

DISSERTATION

Qualität und Quantität des Tageslichtangebots in Innenräumen

Potentialstudie unter spezieller Berücksichtigung des strahlungsinduzierten thermischen Raumverhaltens und der Photophysiologie des Menschen

Ausgeführt zum Zweck der Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der technischen Wissenschaften unter der Leitung von

Ao. Univ. Prof. DI. Dr. Klaus Kreč

E 253

Institut für Architektur und Entwerfen

Eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Architektur und Raumplanung

von

DI. Renate Hammer, MAS

8725689

Palmaygasse 14-1, A-1130 Wien

DI. Peter Holzer

8526222

Schumanngasse 67/1/8, A-1170 Wien

Wien, im August 2009

.....

.....



Moll Carl: Aus meinem Atelier, 1906, Gemäldegalerie der Akademie der bildenden Künste

für

Dr. DI Eugen Hammer 04.10.1933 – 12.12.2007

Dr. DI Gerhard Holzer 12.01.1937 – 27.05.2000

Dank

Klaus Kreč

... für die Ehrlichkeit und Ernsthaftigkeit Deines Interesses,
Deine Authentizität, Geduld und Besonnenheit
und das Vorbild, das Du als Lehrer an einer Universität bist.

Christian Kühn

... für die Spielräume und das Wohlwollen, das uns entgegen gebracht wurde
und für Dein persönliches Interesse.

Robert Hastings

...für Deinen freundschaftlichen und stets ehrlichen Rat
und die Unerschöpflichkeit Deines Humors.

Harald Dobnig

... für Ihre Bereitschaft zum interdisziplinären Dialog,
für Ihre spontane Hilfsbereitschaft und Ihre freundliche Nachsicht.

Anton Leitner

...dafür, dass Du da bist und bleibst, wenn wir Hilfe und Rat brauchen.

Hilarion Petzold und Heike Bischoff-Ferrari

... für Ihre spontane Bereitschaft und Aktivität zur Unterstützung unserer Arbeit.

Silvia Hofbauer

... für die unzähligen Stunden Deiner kostbaren privaten Zeit,
in der Du gelesen, korrigiert und beraten hast.

... für Deine Ausdauer und den Humor, den Du bitter nötig hattest, um uns durch einen
drei Jahre andauernden Ausnahmezustand zu begleiten.

Markus Rottensteiner

... für die Kreativität im Umgang mit „intelli cubes“ und „dead photons“,
und Deine Nachsicht mit der dmu im Verstehen von C++.

Elisabeth und Johannes Pscheidl

... für die Unbeugsamkeit Eures Interesse an der Welt,
für die Bedingungslosigkeit Eures Beistands
und die Grenzenlosigkeit Eurer Liebe.

Magdalena und Konstantin Holzer

...für Eure wunderbare Art, Euch auf Euer Leben einzulassen,
für die Freude, die ich daran habe, Euch wachsen zu erleben
und das Glück, das Ihr mir seid.

Peter Pscheidl

... für die Beharrlichkeit, mit der Du Verantwortung im Beruf lebst und einforderst,
und die ungezählten Nachtsunden der Schreibens, die Du neben mir ausgeharrt hast.

Elisabeth Hammer

... für die wenigen prägenden Einblicke,
die Du mir in Deine stets verborgene Arbeitswelt und Karriere gewährt hast,
in der Du souverän, professionell und dennoch zutiefst menschlich warst.

Gertrude Holzer

...für Deine unausprechlich große Unterstützung und Liebe,
durch wirklich alle Wendungen des Lebens
und auch durch meine Atem- und Schlaflosigkeit der vergangenen Jahre

Rosemarie und Rudolf Pscheidl

... für die Verlässlichkeit mit der Ihr mir zur Seite steht, wenn alle Stricke gerissen sind,
und für die Festigkeit Eurer Überzeugung, dass diese Arbeit ein gutes Ende findet.

Maria Steinrück

... für das Mitempfinden dürfen Deiner Sehnsucht nach universitärer Bildung,
die Dir als zu früh geborenen Frau verweigert wurde.

Dorothea Pfaff

... für Deinen Versuch mir zu Vermitteln wie stolz meine toten Eltern jetzt wohl wären,
und alles was Du tust um an ihrer Stelle für mich da zu sein.

Wilma Hanak

...für Dein Vertrauen, mir ein zu Hause zu schenken,
für Deine Nachsicht, wenn ich nahezu unansprechbar war vor lauter Arbeit,
und für Deine Konsequenz, mich dennoch stets gradlinig anzusprechen.

Charlotte Bodzin

... für long distanc calls voll der Nähe des gemeinsamen Lernens.

Birgit Lichtblau, Claudia Müller, Kerstin Sochor, Sabine Thomas und Elisabeth Wrbka

... für gelebte Solidarität und Freundschaft unter berufstätigen und studierenden Müttern,
für die Konstanz Eurer Unterstützung und Eures Interesses über die Jahre hinweg,
für die Pausen vom Alltag
und für unzählige Gläser Prosecco

Renate Hammer an Peter Holzer

Wenn es stimmt,
dass wir sind, weil wir denken,
bist Du es, der mich sein lässt.

Peter Holzer an Renate Hammer

Wie viel haben wir rund um diese Dissertation gearbeitet, gedacht, gekämpft,
wie viel Neugier haben wir hineingelegt
und wie viel Freude gehabt, wenn Antworten auf Fragen gelungen sind.
Das war so nur gemeinsam möglich, mit Dir möglich.
Ich danke Dir so sehr für diese Jahre. Für Alles.

Zuordnung der persönlichen Beiträge innerhalb der gemeinsamen Dissertation

	A EINLEITUNG
Hammer	1 Verortung und Problemlage
Hammer	2 Hypothese
Hammer / Holzer	3 Methodik und Ziel
	B GRUNDLAGEN
Holzer	4 Tageslicht- und Strahlungsangebot im Außenraum
Holzer	5 Strahlungsdurchgang durch techn. Funktionsgläser
Hammer	6 Photobiologie des Menschen
	C HAUPTTEIL
Hammer / Holzer	7 Potentialstudie „Photophysiology im Innenraum“
Holzer / Hammer	8 Potentialstudie „Licht und thermische Optimierung“
	D SCHLUSS
Holzer / Hammer	9 Ergebnisse
Hammer / Holzer	10 Empfehlungen
	E ANHÄNGE
Holzer	11 Grundlagen der Strahlungsphysik
Holzer	12 – 19 Berechnungsdokumentationen
Holzer / Hammer	20 Datenblätter zur Potentialstudie „Licht und therm. Opt.“

Inhalt

KURZFASSUNG DEUTSCH	11
ABSTRACT ENGLISH	16
0. Leseleitfaden	20
A. EINLEITUNG	24
1. Verortung und Problemlage	24
1.1. Strömungen optimierter Nutzung solarer Strahlung.....	24
1.2. Problemlagen im Umgang mit solarer Strahlung.....	30
2. Hypothese	33
2.1. Hypothese 1.....	33
2.2. Hypothese 2.....	33
3. Methodik und Ziel.....	34
3.1. Methodik Grundlagen	34
3.2. Methodik Hypothese 1	35
3.3. Methodik Hypothese 2	36
3.4. Ziele	38
B. GRUNDLAGEN.....	40
4. Tageslicht- und Strahlungsangebot im Außenraum.....	40
4.1. Sonnenbahn und Himmelsgeometrie	40
4.2. Extraterrestrische Sonnenstrahlung.....	44
4.3. Strahlungsdurchgang durch die Atmosphäre – Grundlagen und Kennzahlen	49
4.4. Strahlungsdurchgang durch die Atmosphäre - Berechnung.....	61
4.5. Terrestrische Sonnenstrahlung.....	70
5. Strahlungsdurchgang durch technische Funktionsgläser	84
5.1. Physikalische Grundlagen.....	84
5.2. Werkstofftechnische Grundlagen	91
5.3. Technische Funktionsglasscheiben.....	94
5.4. Festlegung der Referenzverglasungen für die Parameterstudien	106
5.5. Strahlungsdurchgang durch die Referenzverglasungen	109
6. Photobiologie des Menschen	110
6.1. Photobiologie im ultravioletten Spektralbereich.....	111
6.2. Photobiologie im sichtbaren Spektralbereich.....	142
6.3. Photobiologie im infraroten Spektralbereich.....	206
6.4. Zusammenfassung Photobiologie des Menschen.....	215
C. HAUPTTEIL	223
7. Potentialstudie „Photophysiologie im Innenraum“	223
7.1. Fragestellung	223
7.2. Methodik	223

7.3.	Auswertung Bestrahlungsstärke	228
7.4.	Auswertung photopischer Helligkeitseindruck	240
7.5.	Auswertung Erythembildung.....	253
7.6.	Auswertung Pre-Vitamin D ₃ Photosynthese.....	267
7.7.	Melatonin Suppression.....	280
7.8.	Bezug der Ergebnisse zu realitätsnahen Bedingungen.....	294
7.9.	Zusammenfassung.....	300
8.	Potentialstudie „Licht und thermische Optimierung“	302
8.1.	Fragestellung	302
8.2.	Methodik	302
8.3.	Modelldefinition	309
8.4.	Voruntersuchung und Verkürzung des Basismodells.....	327
8.5.	Detaillierte Untersuchung des Basismodells.....	335
8.6.	Ergebnisse	349
8.7.	Interpretation und Schlussfolgerungen	371
8.8.	Zusammenfassung.....	387
D.	SCHLUSS	389
9.	Ergebnisse.....	389
9.1.	These 1 zur Photophysiologie von Innenräumen.....	389
9.2.	These 2 zu Licht und thermischer Optimierung	409
9.3.	Bezüge zwischen Thesen 1 und These 2.....	431
10.	Empfehlungen.....	435
10.1.	Art der Empfehlungen	435
10.2.	Bauvolumen im natürlichen Lichtraum	436
10.3.	Durchlichtbarkeit von Innenräumen	436
10.4.	Ausrichtung transparenter Fassadenflächen.....	439
10.5.	Sanierungsmaßnahmen und Tageslichtangebot	441
10.6.	Gebäude zugeordnete Außenräume.....	443
10.7.	Produkt- und Materialentwicklung	443
10.8.	Überangebot an Licht	444
E.	ANHÄNGE.....	446
11.	Grundlagen der Strahlungsphysik	446
11.1.	Begriffsdefinition und Eingrenzung	446
11.2.	Größen, Formelzeichen und Einheiten	447
11.3.	Grundgesetze der Strahlungsphysik	449
11.4.	Benennung der Wellenlängenbereiche.....	452
11.5.	Strahlungsphysik im optischen Bereich - Helligkeitsempfinden.....	453
11.6.	Wechselwirkungen zwischen Strahlung und Materie.....	454
12.	Berechnung des Tageslichtquotienten.....	458
12.1.	Inhalt.....	458

12.2.	Berechnungen	458
13.	Berechnung des Durchlichtungsfaktors ©.....	462
13.1.	Allgemeines	462
13.2.	Berechnungsmethode und -randbedingungen	462
13.3.	Auswertungsmethode	464
14.	Berechnung des Heizwärme- und des Kühlbedarfs	466
14.1.	Allgemeines	466
14.2.	Berechnungsmethode	466
14.3.	Randbedingungen	467
14.4.	Auswertung.....	470
15.	Berechnung der terrestrischen Sonnenstrahlung.....	471
15.1.	Luftdruck und Meereshöhe (Card 2)	471
15.2.	Atmosphärentyp (Card 3)	472
15.3.	Wasserdampf (Card 4).....	475
15.4.	Totale Ozonsäulenmenge (Card 5).....	476
15.5.	Gasabsorption und Luftverschmutzung (Card 6)	478
15.6.	Kohlendioxid (Card 7).....	478
15.7.	Extraterrestrial Spectrum (Card 7a)	479
15.8.	Aerosol Model (Card 8)	479
15.9.	Atmosphärische Trübung (Card 9).....	479
15.10.	Neigung und Albedo (Card 10).....	480
15.11.	Solarkonstante und Sonnen-Erde-Abstandskorrektur	481
15.12.	Sonnenposition bzw. relative Luftmasse	481
15.13.	Trübungsfaktor nach Linke, Diffusstrahlungsfaktor nach Reitz	482
15.14.	Ergebnisdarstellung	482
15.15.	Zusammenfassung der Eingabedaten der Referenzpunkte	483
16.	Berechnung des mindest erforderlichen Wärmeschutzes.....	485
16.1.	Inhalt.....	485
16.2.	Methodik	485
16.3.	Ergebnisse	495
17.	Berechnung der Bestrahlungsstärke in der Raumtiefe.....	498
17.1.	Inhalt.....	498
17.2.	Methodik	498
17.3.	Ergebnisse	499
17.4.	Schlussfolgerungen	500
18.	Berechnung der Schwell- und Grenzwerte der Melatonin Suppression	501
18.1.	Hintergrund	501
18.2.	Fragestellung	501
18.3.	Berechnungen und Ergebnisse.....	502
19.	Berechnung langjähriger mittlerer Strahlungssummen	504

19.1. Inhalt	504
19.2. Methodik	504
19.3. Ergebnisse	505
20. Datenblätter zur Potentialstudie „Licht und Thermische Optimierung“	510
20.1. Datenblätter zum Basismodell GGG_B460_T1400	511
20.2. Datenblätter zum Basismodell GGG_B230_T1100	524
20.3. Datenblätter zum Basismodell GWG_B460_T1150.....	537
20.4. Datenblätter zum Basismodell GWG_B230_T900	550
ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	564
DIAGRAMMVERZEICHNIS	569
FORMELVERZEICHNIS	577
TABELLENVERZEICHNIS	580
LITERATURVERZEICHNIS.....	584

KURZFASSUNG DEUTSCH

Problemlage und Relevanz

Zwischen gebauten Strukturen und Licht bestehen vielfältige Wechselbeziehungen. Durch geeignete Gestaltungsmaßnahmen kann die Ausprägung dieser Wechselbeziehungen beeinflusst werden.

Der Nutzung der terrestrischen Solarstrahlung als Ressource der thermischen Gebäudeoptimierung kommt vor dem Hintergrund des gesamtgesellschaftlichen Ziels einer weitgehenden Vermeidung von Treibhausgasemissionen zum Klimaschutz besondere Bedeutung zu. Die thermische Gebäudeoptimierung führt durch die Bevorzugung kompakter Bauformen, die Erhöhung der Bauteilstärken durch hochwärmedämmende Ausführung, die spezifische Positionierung von Fensteröffnungen zum Zweck der optimalen solaren Wärmegewinnung, sowie den Einsatz von hochwirkungsvollen technischen Funktionsgläsern zu einer quantitativen und qualitativen Reduktion des Angebotes an terrestrischer Solarstrahlung in den drei Spektralbereichen ultraviolett, sichtbares Licht und infrarot im Gebäudeinneren. Gleichzeitig ermöglichen die generelle Erhöhung des Innenraumkomforts und die Verfügbarkeit von leistungsfähigen, künstlichen Lichtquellen, dass sich der Mensch in der postindustriellen Gesellschaft etwa 90% seiner Lebenszeit in geschlossenen Räumen und damit in dieser reduzierten terrestrischen Solarstrahlung aufhält.¹ Es ist folglich zu hinterfragen, welche Auswirkungen der Aufenthalt in Innenräumen, speziell von thermisch optimierten Gebäuden, auf die Photobiologie des Menschen hat.

Entsprechend werden folgende Hypothesen aufgestellt und untersucht.

Hypothese 1

Es besteht ein ursächlicher Zusammenhang zwischen der Evidenz des epidemischen Auftretens von Lichtmangelerscheinungen² und dem lang andauernden Aufenthalt hinter Verglasungen im Inneren von Gebäuden allgemein und von Gebäuden mit thermisch optimierten technischen Funktionsglasscheiben im Besonderen.

Hypothese 2

Es liegt ein Zielkonflikt vor zwischen der Optimierung der Tageslichtversorgung und der Optimierung des solarstrahlungsinduzierten thermischen Verhaltens eines Innenraumes in Bezug auf die Ausrichtung der diesem Innenraum zugeordneten transparenten vertikalen Flächen.

¹ Deutsches Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (1996)

² Es ist darauf hinzuweisen, dass in der Medizin unter der Bezeichnungen Licht oftmals auch die Spektralbereiche der nichtionisierenden elektromagnetischen Strahlung des ultravioletten und des infraroten Wellenlängenbereiches zusätzlich zum in der Bauphysikalisch als Licht bezeichneten sichtbaren Wellenlängenbereich subsummiert werden. In diesem Sinn umfassen Lichtmangelerscheinungen beispielsweise auch Erscheinungen auf Grund von Mangel an ultravioletter Strahlung. Eingeführte medizinische Begriffe wie etwa der der Lichtschwiele, hervorgerufen durch ultraviolette Strahlung nicht durch sichtbares Licht, werden dennoch unverändert übernommen.

Grundlagen

Um die Abhandlung der beiden Hypothesen auf eine zuverlässige und klar nachvollziehbare Basis zu stellen, erfolgt zunächst eine Erhebung relevanter Grundlagen. So wird das Tageslichtangebot im Außenraum in seiner spektralen Verteilung für einen konkreten Ort und zu bestimmten Referenzzeitpunkten ermittelt. Der Strahlungsdurchgang durch technische Funktionsgläser wird exemplarisch für vier baupraktisch relevante Verglasungstypen untersucht. Das so ermittelte Strahlungsangebot im Innenraum wird in seiner spektralen Verteilung in Diagrammen dargestellt. Die Grundlagen der Photobiologie des Menschen werden aus facheinschlägigen medizinischen Übersichtswerken zusammengeführt und unter dem selektiven Blickwinkel der Arbeit durch Ergebnisse ausgewählter medizinischer Studien ergänzt. Speziell nachgegangen wird dabei photobiologischen Wirkungs-Kurven, Schwellenwerten und wirksamen Dosen.

Potentialstudie zu Hypothese 1 – Methodik und Durchführung

Um die quantitative und qualitative physiologische Wirksamkeit jener Spektralanteile des Tageslichts, die den Innenraum erreichen, zu untersuchen, wird eine Potentialstudie durchgeführt. Zunächst werden die Referenzbedingungen durch Festlegung aussagekräftiger Auswertungszeitpunkte, einer sinnvollen Orientierung der Messflächen, sowie eines konkreten geografischen Ortes definiert.

Im Folgenden wird die Bestrahlungsstärke der terrestrischen Sonnenstrahlung unter den genannten Referenzbedingungen als Ergebnis des rechnerisch abgebildeten Strahlungsdurchgangs durch die Atmosphäre ermittelt und mit dem Strahlungsdurchgang durch die gewählten technischen Funktionsgläser gefaltet.

Abschließend werden die photobiologischen Wirkpotentiale durch eine weitere Faltung der hinter der Verglasung vorliegenden Strahlung mit ausgewählten Wirkungs-Kurven berechnet. Eingehend untersucht werden die Pre-Vitamin D₃ Photosynthese, die Erythembildung, die Melatonin Suppression und die Helligkeitsempfindlichkeit unter den Bedingungen des photopischen Sehens. Die ermittelten Wirkpotentiale werden zu den jeweiligen in der medizinischen Fachliteratur gesichert vorliegenden Grenz- und Schwellenwerten beziehungsweise wirksamen Dosen in Bezug gesetzt.

Potentialstudie zu Hypothese 1 – Ergebnisse

Die spektrale Durchlässigkeit zu den Referenzzeitpunkten zeigt charakteristische und signifikant unterschiedliche Verläufe in Bezug auf die vier gewählten Verglasungsarten: Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung, Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung, Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung und unbeschichtete Einscheiben-Verglasung.

Es kann klar gezeigt werden, dass alle untersuchten Glasscheiben nahezu intransparent für jene Spektralanteile der UV-Strahlung sind, die dem Ablauf der Photosynthese von Pre-Vitamin D₃ zugrunde liegen. Darüber hinaus sinkt die erreichbare erythemale Dosis drastisch ab. Die Gefahr der Erythembildung aber auch die Chance auf eine Adaption der Haut ist somit verschwindend gering.

Im sichtbaren Spektralbereich hingegen sind die ausgewählten Gläser derart transparent, dass für alle derzeit bekannten nichtvisuellen mittelbaren Wirkungen der Melatonin Suppression die photophysiologisch relevanten Schwellenwerte deutlich überschritten

werden. Jedoch ist die Reduktion der Bestrahlungsstärke visuell oftmals deutlich wahrnehmbar, was zum vermehrten Einsatz von Kunstlicht als Tageslichtergänzung führt. Auch im infraroten Spektralbereich sind photobiologische Wirkungen bekannt. Auf Grund des Fehlens von Wirkungs-Kurven können jedoch keine Wirkpotentiale ermittelt werden. Hypothese 1 kann somit als klar verifiziert gelten.

Potentialstudie zu Hypothese 2 – Methodik und Durchführung

Um den Zielkonflikt zwischen der Optimierung der Tageslichtversorgung und der Optimierung des tageslichtinduzierten thermischen Verhaltens eines Innenraumes in Bezug auf die Ausrichtung der diesem Innenraum zugeordneten transparenten vertikalen Flächen zu untersuchen, wird eine vergleichende Potentialstudie angestellt. Als Vergleichsgrößen herangezogen werden dabei die definierten Kennzahlen des Heizwärmebedarfs für den winterlichen Wärmeschutz und der Kühlbedarf für den Schutz vor sommerlicher Überwärmung. Zur Beurteilung des Potentials der Tageslichtversorgung wird, neben dem Tageslichtquotienten, mit dem Durchlichtungsfaktor eine neuartige Kennzahl eingeführt und in dieser Arbeit erstmals angewandt. Der Durchlichtungsfaktor ist der in % angegebene Anteil des Volumens eines Innenraumes, der von direkter Sonnenstrahlung erreicht werden kann.

Als für die Potentialstudie besonders geeigneter Gebäudetypus wird das zeitgenössische Laubenganghaus mit durchgesteckten Wohnungen identifiziert, das grundsätzlich die Möglichkeit der doppelseitigen Belichtung bietet und dadurch auf unterschiedliche Baukörperausrichtung deutlich und klar zuordenbar reagiert. Es wird ein modellhafter Laubengangtyp entwickelt, der den strengen Anforderungen eines konstruktivistischen Ansatzes an strukturelle Klarheit und Eindeutigkeit genügt. Der Definition des Basismodells des Laubengangtyps liegen die gültigen Mindestanforderungen der Wiener Bauordnung und der ÖNORM B 8110-1 zugrunde.³

Vor der eigentlichen Untersuchung der orientierungsabhängigen Potentiale des Basismodells wird dieses auf seinen Tageslichtquotientenverlauf hin untersucht. Da sich zeigte, dass in der gewählten, Gesetzes konformen Raumtiefe die empfohlene Untergrenze des Tageslichtquotienten für den Wohnbau deutlich unterschritten wird, erfolgt eine Verkürzung des Basismodells für die weiteren Untersuchungen. Es werden Typologien mit unterschiedlichen Raumproportionen und unterschiedlicher Anzahl an verglasten Flächen entwickelt, für die die Kennzahlen Heizwärmebedarf, Kühlbedarf und Durchlichtungsfaktor entsprechend der Ausrichtung in 30° Schritten berechnet werden.

Die Ergebnisse werden in einer Übersichtsgrafik dargestellt, die die Potentialprofile entsprechend der jeweiligen Ausrichtung zur Sonnenbahn zusammenfasst.

³ ÖNORM B 8110-1 (2007)

Potentialstudie zu Hypothese 2 – Ergebnisse

Prägnant zeigt sich der gegenläufige Zusammenhang zwischen thermisch guter Performance im Sinne von Heizwärmebedarf und Kühlbedarf einerseits und gutem Tageslichtpotential im Sinne der Durchlichtung andererseits. Die Optimierungsansätze machen deutlich, wie sensibel die Dimension der Wohnungstiefe alle drei Potentiale beeinflusst.

Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass Nord-Süd belichtete Wohnungen gleichzeitig eine vorteilhaftes thermisches Verhalten aber eine schlechte Durchlichtung aufweisen. Wohnungen mit moderat aus der Nord-Süd-Richtung verschwenkten Längsachsen weisen eine sehr ausgewogene thermische oder optische Performance auf. Wohnungs-Längsachsen in Ost-West-Richtung führen zu Situationen mit exzellenter jedoch stark Tageszeitlich abhängiger Durchlichtung, aber auch zu schlechten Ausgangsbedingungen hinsichtlich der thermischen Performance.

Auch Hypothese 2 kann klar verifiziert werden.

Bezüge zwischen den beiden Potentialstudien

Setzt man die Ergebnisse der Thesen 1 und 2 zueinander in Bezug, stellt sich die Frage nach einer realen Umsetzbarkeit einer adäquaten Tageslichtversorgung innerhalb der Raumtiefe einer Wohneinheit bei gleichzeitiger Gewährleistung thermischen Komforts unter Nutzung solarer Wärmeenergieeinträge. Dazu müssen die, durch die Potentialstudien generierten Extremwerte beziehungsweise Typologien ins Verhältnis zu realen Rahmenbedingungen gebracht werden. Zwei Zusammenhänge sind zu erörtern, die eine angemessene Überführung der Ergebnisse in reale Anwendungssituationen ermöglichen.

Einerseits ist die Verhältnismäßigkeit zwischen der terrestrischen Bestrahlungsstärke zum Referenzzeitpunkt mit definitionsgemäß klarem Himmel, und jener zum selben Zeitpunkt im langjährigen Mittel und somit unter Einbezug des statistischen Bewölkungsanteils zu berücksichtigen. Es zeigt sich, dass die stündlichen Strahlungsmengen während der Mittagsstunden unter wolkenlosen Referenzbedingungen von den stündlichen Strahlungsmengen im langjährigen Mittel um 25% bis 75% unterschritten werden, mit geringster Unterschreitung im Sommer und höchster im Winter.

Andererseits ist die Verhältnismäßigkeit zwischen der Beleuchtungsstärke unmittelbar hinter der Verglasung und jener in der Raumtiefe zu beachten. Innerhalb des direkten Sonnenlichts sinkt die Strahlungsintensität mit der Raumtiefe nur sehr langsam. Wird der Betrachtungspunkt aus dem Lichtstrahl heraus verschoben, verringert sich die Strahlungsintensität hingegen schlagartig und klingt mit zunehmender Raumtiefe erwartungsgemäß weiter ab.

Es kann also festgehalten werden, dass die errechneten Werte der photophysiologischen Wirkpotentiale ihre Gültigkeit behalten, sofern die Messebene beziehungsweise der betroffene Mensch im direkten Sonnenlicht steht. Die Entfernung von der Glasscheibe ist dabei von sekundärer Bedeutung. Außerhalb des direkten Sonnenlichts sind strahlungstechnische und in erster Näherung auch photophysiologische Intensitäten um zirka einen Faktor drei niedriger und klingen mit der Raumtiefe weiter ab. Die vordringliche Bedeutung, die dem Vorhandensein von direkter Sonnenstrahlung für die photophysiologische Qualität von Innenräumen zukommt, wird somit klargestellt.

Empfehlungen

Dem Diskurs über eine ideale Ausrichtung von Gebäuden, der im Lauf der Architekturgeschichte vielfach geführt wurde, soll keine weitere Position hinzugefügt werden. Vielmehr wird darauf abgezielt, wissenschaftlich fundierte und entscheidungsrelevante Grundlagen zum Umgang mit dem Tageslichtangebot an einem konkreten Ort für eine kontextsensitive Gebäudeplanung bereit zu stellen.

Tageslicht erreicht den Innenraum nach dem Durchgang durch technische Funktionsglasscheiben quantitativ reduziert und qualitativ verändert, deshalb wird empfohlen, das Angebot an Tageslicht im Innenraum generell und das an direkter Sonnenstrahlung speziell zu erhöhen. Die Berücksichtigung der Raumgeometrie der Direktstrahlung der Sonne bei der Gestaltung von Gebäudevolumen, Gebäudehülle und Grundrissen erscheint aus diesem Blickwinkel unabdinglich.

Alle Gebäude, deren Funktion einen langfristigen Aufenthalt der Nutzer in Innenräumen bedingt, sind derart mit dem Außenraum zu verbinden, dass ein regelmäßiger und ausreichender Konsum von ungefiltertem Tageslicht sicher gestellt werden kann. Explizit zu berücksichtigen sind die Funktionen Wohnen, Arbeiten, Pflegen, Betreuen, Bilden und Vergleichbare.

Das Lukrieren von Wärmeenergie durch passive Solarnutzung am Gebäude, sowie die möglichst umfangreiche Bereitstellung von Tageslicht, bedingt entsprechend große Fenster als Ernteflächen. Um daraus resultierende überschüssige Wärmeeinträge in der warmen Jahreszeit zu vermeiden, ist eine konsequente und effektive funktionsabhängige und nutzerspezifische Beschattungen der Innenräume bei gleichzeitig möglicher Belüftung zu gewährleisten.

Es wird dringend empfohlen, Zustände natürlicher nächtlicher Dunkelheit im Innenraum, speziell im Schlafbereich zu sichern, oder beim Bestehen von Kunstlichteinträgen aus dem Außenraum, durch geeignete Maßnahmen herzustellen.

ABSTRACT ENGLISH

Problem and Relevance

There are a multitude of complementary relationships that arise in the interplay between man-made structures and light. By taking appropriate measures in the design process, the intensity and nature of these complementary relationships may be influenced.

Utilization of daylight as a resource for thermal building optimization, when regarded in light of larger societal goals, is particularly environmentally significant for its near-avoidance of greenhouse gas emissions. Thermal building optimization leads to a quantitative and qualitative reduction of available interior daylight due to several factors. These include a preference for compact building forms, an increase in building component dimensions through use of highly efficient insulation materials, the specific positioning of windows in relation to site-specific sun path and the use of highly effective functional glazing. Simultaneously, the general rise in room comfort and the availability of high-performance artificial lighting have led to current living conditions, in which post-industrial populations spend approximately 90% of their lives indoors, and in turn, are exposed to a reduced supply of daylight. Thus the issue must be raised of what impacts this indoor living, especially in thermally optimized building, may have on human photobiology.

Consequently, the following hypotheses are proposed and examined.

Hypothesis 1

There is a causal relationship between the evidence of epidemic occurrences of light deficiency disorders and extended periods of time spent indoors behind glazing in general, and that spent in thermally optimized buildings in particular.

Hypothesis 2

There is a conflict of goals involved between optimization of daylight supply and optimization of the daylight-induced thermal characteristics of a room in relation to the positioning of the room's transparent vertical surfaces.

Basic Principles

To establish a solid, intelligible foundation for the treatment of these hypotheses, one should begin with a survey of the relevant principles. Thus we calculated the spectral distribution of outdoor daylight supply for a specific location at certain reference times. Radiation transmission through high-tech functional glazings was investigated in four glazing types selected for their frequent usage in the construction industry. The calculated room radiation supply was then broken down into its spectral distribution and represented in a diagram. The fundamentals of human photobiology were compiled from respected medical reference works and, in the selective perspective of the paper, complemented by results from selected medical studies. In particular, photobiological response curves, threshold values and effective doses were investigated.

Potential Study of Hypothesis 1 – Methodology and Execution

In order to investigate the quantitative and qualitative physiological response of the daylight spectrum that reaches the room, a potential study was conducted. First the reference conditions were described by determining key evaluation times, then the measured surfaces were ideally positioned and a concrete geographic location was defined.

Subsequently the radiation intensity of terrestrial solar radiation under the defined reference conditions was calculated as a result of the computer-generated radiation path through the atmosphere and its subsequent trajectory through the selected functional glazings.

Finally, the photobiological response potentials resulting from further refraction of the radiation behind the glazing were calculated using selected response curves. Special attention was given to pre-vitamin D₃ photosynthesis, erythema formation, melatonin suppression, and light sensitivity in photopic vision conditions. The resulting response potentials were compared with the borderline and threshold values, and effective doses compared with values from existing studies in medical literature.

Potential Study of Hypothesis 1 – Results

Spectral transmission at the reference times displays characteristic, significantly heterogeneous courses with respect to the four selected glazing types: double-glazed insulated glass, triple-glazed insulated glass, double-glazed solar protection glass, and uncoated single-glazed glass.

It is clearly shown that every investigated pane is virtually impermeable for the UV radiation spectrum that is necessary for the process of photosynthesis of pre-vitamin D₃. Moreover the attained erythema dose falls drastically. Both the threat of erythema formation as well as the chances of skin adaptation are remote.

In the visible light spectrum, however, the selected glazings are so transparent that the photophysiological-relevant threshold values are significantly exceeded for all presently known non-visual indirect effects of melatonin suppression. Nonetheless the reduced radiation intensity is often readily perceptible, leading to increased use of artificial lighting as daylight compensation.

Photobiological effects are also identified in the infrared spectrum. Due to the lack of response curves, however, response potentials cannot be determined.

Hypothesis 1 may thus be considered as clearly confirmed.

Potential Study of Hypothesis 2 – Methodology and Execution

In order to investigate the trade-off involved between optimization of daylight supply and optimization of daylight-induced thermal characteristics of a room as regards positioning of the room's transparent vertical surfaces, a comparative potential study was conducted. Reference values employed include quality of heating demand, cooling demand, and daylight supply in the room.

A contemporary gallery (Golden Lane) apartment house with apartments spanning the width of the building was identified as particularly well-suited for this potential study. It is such an ideal building type since it offers the opportunity of bilateral lighting, hence producing a distinct, clearly attributable reaction to various building positionings. A model of the gallery type was developed that meets the strict requirements of a constructive approach to structural clarity and directness. The definition of the basic gallery model is based on Vienna building code and Austrian building norm ÖNORM B 8110-1.

Prior to the actual evaluation of the orientation-dependant potentials of the basic model, its daylight quotient progression was determined. Since it was shown that the recommended minimum daylight quotient for residential buildings fell significantly short in the selected, building code-stipulated room depth, for the remainder of the investigations the basic model depth was reduced.

With regards to summer and winter thermal insulation, we drew on the defined key figures for warmth and cold requirements. In order to evaluate the daylight supply potentials, in addition to the lighting factor, we introduced a novel ratio which was first applied in this paper. The lighting factor is defined as the percentage of room volume that has access to direct solar radiation.

Extrapolating on the discoveries made by use of the basic model, variations were created to reflect the room proportions and number of glazed surfaces. The results are illustrated by a graphic summarizing the orientation to the solar ecliptic relative to the potential profile.

Potential Study of Hypothesis 2 – Results

The conflicting relationship between high thermal performance as concerns heating demand and cooling demand, on the one hand, and high daylight potential as concerns lighting, on the other hand, is presented concisely. The optimization approaches clearly show just how sensitively the dimension of room depth impacts all three potentials.

Generally, one may conclude that north-south-lit apartments simultaneously display beneficial thermal characteristics and poor lighting. Apartments whose longer axis is moderately angled away from north-south display a very balanced thermal, or optical, performance. In contrast, apartments whose longer axis is angled east-west create situations with excellent lighting, yet with poor basic conditions for favorable thermal performance. Approaches which either aim to reduce glazed surfaces or extend apartment depth are well-suited to achieving more balanced potential profiles.

Hence, hypothesis 2 is also clearly confirmed.

Relationships Between the Potential Studies

If one examines the relationships between the results of hypotheses 1 and 2, the question arises of whether one can practically achieve adequate daylight supply within the room depth of an apartment unit while maintaining thermal comfort by use of solar heat energy input. To answer this, the extreme values and typologies generated by the potential studies should be related to realworld conditions. The following two relationships must be identified in order to allow reasonable transferability of the results to practical applications.

Thus one must consider both the relation between terrestrial radiation intensity at the reference time in defined clear-sky conditions on the one hand, and that of radiation intensity at the same reference time in long-term averages, thus incorporating statistical cloudy conditions. It becomes obvious that hourly radiation levels at mid-day in clear-sky reference conditions are under-represented by 25 to 75% when compared with hourly radiation levels in the long-term, the smallest difference being in summer and the largest in winter.

On the other hand, a balance may be identified between the illumination intensity immediately behind the glazing and that in the room interior. In areas of direct sunlight, radiation intensity only diminishes incrementally with increased room depth. In contrast, when the observation point is relocated outside the area of direct sunlight, radiation intensity plunges and, as expected, continues to diminish with increased room depth.

Thus it may be stated that the calculated values from photo-physiological response potentials retain their validity provided that the measured surface or affected person is located in direct sunlight. At the same time, distance from the glass pane is of secondary importance. Outside the area of direct sunlight radiation and, at first approximation, photo-physiological intensities are approximately three times smaller and diminish with increased room depth. The critical importance of the presence of direct sunlight for the photo-physiological quality of interior spaces is thus clearly evident.

Recommendations

It is not our desire to take a position in the ongoing historical architectural regarding ideal building orientation. Rather we intend to provide scientifically based, decision-facilitating principles for the utilization of daylight supply at a specific site for context-oriented building planning.

Daylight falls in the building interior only after having been quantitatively and qualitatively compromised by high-tech functional glazings. Thus it is our recommendation to increase daylight supply in general, and that of direct sunlight in particular. From this perspective, consideration of the spatial geometry of direct solar radiation when designing building volumes, shells and floor plans becomes absolutely essential.

Every building that is intended for extended use of indoor spaces by its inhabitants should be connected with the outdoor space in such a manner that regular, sufficient consumption of unfiltered daylight is assured. One should explicitly consider the functions of living, working, care-giving, supervising, instructing and similar activities.

Exploitation of thermal energy by passive solar utilization in buildings, as well as the most extensive availability of daylight possible requires proportionately large windows as collecting surfaces. In order to avoid resulting superfluous thermal gains in the warm season, one must provide for uncompromising, effective, functionally independent, user-specific shading systems for the interior rooms coupled with ventilation options.

We strongly recommend ensuring natural night-time darkness in the interior, especially in sleeping areas, or in cases of artificial exterior light, taking appropriate planning measures to create such conditions.

0. Leseleitfaden

Die vorliegende Doppeldissertation untersucht Fragestellungen an den Schnittstellen unterschiedlicher Disziplinen wie Architektur und Bauphysik, Meteorologie und Physiologie. Entsprechend den Anforderungen an Vollständigkeit und Nachvollziehbarkeit erreicht die Doppeldissertation einen großen Textumfang. Inhaltliche Verkürzungen erscheinen vor allem vor dem Hintergrund der Interdisziplinarität als unzulässig, weil die Grundlagen entsprechend eingehend erläutert werden müssen, um gegenseitiges Verständnis erreichen zu können.

Dennoch ist es nicht notwendig, die Arbeit gesamtumfänglich zu lesen, wenn der Interessenschwerpunkt des Lesers auf einem Teilaspekt der Arbeit liegt. Daher bietet die Arbeit eine Struktur an, die dem selektiven Lesen unter einem individuellen Fokus entgegen kommt. Mit dem gegenständlichen Leseleitfaden wird die inhaltliche Struktur der Arbeit erläutert, um so die Orientierung in der Arbeit und das Auffinden spezifischer Inhalte zu erleichtern.

Übergeordnete Struktur der Arbeit

Die einzelnen Kapitel der gegenständlichen Arbeit sind in eine übergeordnete Struktur eingebettet, die fünf eingeführte Textbereiche wissenschaftlicher Literatur umfasst. Den Textbereichen sind Großbuchstaben in alphabetischer Reihenfolge zugeordnet, sodass sich die übergeordnete Struktur folgendermaßen abbilden lässt:

- A – Einleitung
- B – Grundlagen
- C – Hauptteil
- D – Schluss
- E – Anhänge

Diesen Textbereichen sind jeweils Kapitel zugeordnet, die entweder schwerpunktmäßig einer Disziplin zuzurechnen sind, oder in hohem Maß Disziplinen übergreifenden Inhalt anbieten. Speziell die disziplinspezifischen Kapitel stehen gleichwertig nebeneinander und können selektiv als Unterstützung zum Verständnis der interdisziplinären Kapitel gelesen werden. Dennoch wurden alle Kapitel der Arbeit in ansteigender Reihenfolge nummeriert, wodurch die Kontinuität des Textes gewahrt und die Orientierung während des Lesens erleichtert wird.

Die Verortung der Arbeit, die Formulierung der Hypothesen und die Festlegung der Methodik zu deren Bearbeitung sind zusammengefasst im Textbereich A, der Einleitung mit seinen Kapiteln 1 bis 3.

Zentrale Bedeutung kommt dem Textbereich C, dem Hauptteil zu. Der Hauptteil umfasst mit den interdisziplinären Kapiteln 7 und 8 die eigentliche Bearbeitung der beiden, als

Gegenstand der vorliegenden Arbeit formulierten Hypothesen zur Solarstrahlungsversorgung von Innenräumen. So wird in Kapitel 7 die physiologische Wirksamkeit jener terrestrischen Strahlungsanteile untersucht, die den Innenraum nach dem Durchgang durch unterschiedliche Glasscheiben erreichen. In Kapitel 8 werden die, durch die terrestrische Strahlung induzierten visuellen und thermischen Potentiale eines Innenraumes in Abhängigkeit von der Orientierung seiner transparenten Begrenzungsflächen zum Sonnengang untersucht.

Die Kapitel 7 und 8 stützen sich auf eine eingehende Aufarbeitung grundlegender Zusammenhänge aus den Disziplinen der Meteorologie, der Bauphysik und der Photobiologie. Die drei diesbezüglichen Kapitel 4, 5 und 6 werden zusammengefasst zum Textbereich B, den Grundlagen.

Ergebnisse und daraus abgeleitete Empfehlungen, enthalten in den gleichnamigen Kapiteln 9 und 10, werden schließlich Im Textbereich D, dem Schluss dargestellt.

In den Textbereich E - Anhänge sind schließlich alle jene Inhalte ausgelagert, deren Dokumentation zwar für die Nachvollziehbarkeit der vorgelegten Untersuchungen essentiell ist, deren detaillierte Aufnahme in den Hauptteil jedoch die Lesbarkeit beeinträchtigen würde. Insbesondere sind das Dokumentationen der Randbedingungen von Berechnungen. Der Bereich E – Anhänge umfasst die Kapitel 11 bis 20.

Kapitelstruktur der Arbeit

A - Einleitung

1. Verortung und Problemlage

Das Thema der vorliegenden Arbeit, die Versorgung von Innenräumen mit Solarstrahlung unter besonderer Berücksichtigung des sichtbaren Lichts, wird in seinen beiden spezifischen Schwerpunktsetzungen anhand exemplarischer Baubeispiele und unter Bezugnahme auf funktional fundierte architektonische Strömungen verortet und die aktuellen diesbezüglichen Problemlagen erörtert.

2. Hypothese

Die beiden Hypothesen der Arbeit werden präzisiert ausformuliert.

3. Methodik und Ziel

Die Methodik zur Bearbeitung der aufgeworfenen Fragen wird festgelegt und in ihren Grundzügen erläutert.

B - Grundlagen

4. Tageslicht- und Strahlungsangebot im Außenraum

In diesem ersten der drei Grundlagenkapitel wird aufbauend auf einer Erörterung der Strahlungsphysik der Atmosphäre die Berechnung der spektralen Sonneneinstrahlung unter zuvor festgelegten Referenzbedingungen vorgenommen und dokumentiert.

5. Strahlungsdurchgang durch technische Funktionsgläser

Dargelegt wird der Strahlungsdurchgang durch technische Funktionsglasscheiben, als Grundlage für insbesondere die Bearbeitung der ersten Hypothese, also der Fragestellung nach der photophysiologischen Qualität des solaren Strahlungsangebotes in Innenräumen.

6. Photobiologie des Menschen

In diesem Kapitel werden die Wirkungen der terrestrischen Solarstrahlung auf den menschlichen Organismus basierend auf der Recherche aktueller medizinischer Fachliteratur dargestellt. Wo vorhanden werden spektrale Wirkungs-Kurven sowie Schwellwerte, Grenzwerte oder wirksame Dosen dokumentiert. Die Beschreibung erfolgt nach ansteigender Wellenlänge, demnach ausgehend von der ultravioletten über die sichtbare hin zur infraroten Strahlung.

C - Hauptteil

7. Potentialstudie Physiologie im Innenraum

Zur Bearbeitung der ersten Hypothese wird im gegenständlichen Kapitel die physiologische Wirksamkeit der Sonnenstrahlung hinter technischen Funktionsglasscheiben ermittelt. Die Untersuchung wird anhand einer Potentialstudie wie folgt durchgeführt. Für zuvor definierte Referenzbedingungen werden durch spektrale Faltung der Außenbestrahlungsstärken mit den Transmissionsgraden der Referenzverglasungen und schließlich mit den Wirkungs-Kurven der jeweiligen photobiologischen Phänomene die jeweiligen Wirkpotentiale der Solarstrahlung hinter den technischen Funktionsglasscheiben berechnet. Diese Wirkpotentiale werden in Bezug gesetzt zu in der medizinischen Fachliteratur gesichert vorliegenden Grenzwerten und Schwellwerten beziehungsweise wirksamen Dosen.

8. Potentialstudie Licht und Thermische Optimierung

Untersucht wird die Hypothese, wonach ein Zielkonflikt vorliegt zwischen der Optimierung der Tageslichtversorgung und der Optimierung des strahlungsinduzierten thermischen Verhaltens eines Innenraumes in Bezug auf die Ausrichtung der, diesem Innenraum zugeordneten transparenten vertikalen Flächen. Wiederum wird die Untersuchung der

Fragestellung mittels einer Potentialstudie vorgenommen. An einem konstruktivistisch definierten Gebäudemodell werden für unterschiedliche Ausrichtungen der Verglasungsflächen anhand dreier Kennwerte die Potentiale der Tageslichtqualität, der Sommertauglichkeit und der passiv solaren Wärmegevinne ermittelt und zueinander in Bezug gebracht und vergleichend ausgewertet.

D - Schluss

9. Ergebnisse

Die Ergebnisse der Potentialstudie „Photophysiologie im Innenraum“ sowie der vergleichenden Potentialstudie „Licht und thermische Optimierung“ werden zusammenfassend dargelegt. Querbezüge zwischen den Einzelergebnissen werden hergestellt.

10. Empfehlungen

Aus den vorliegenden Ergebnissen werden grundlegende Empfehlungen für die architektonische Gestaltung und für technische Maßnahmen formuliert. Weiterer Forschungsbedarf wird eingegrenzt.

E - Anhang

Die Kapitel 11 bis 20 bilden den Anhang. Wiederholt in der Arbeit verwendete, Zusammenhänge der Strahlungsphysik werden hier dargestellt. Darüber hinaus sind die Randbedingungen für die zahlreichen, zur Ausführung der Potentialstudien angestellten Berechnungen im Detail dokumentiert.

A. EINLEITUNG

1. Verortung und Problemlage

Zwischen gebauten Strukturen und der terrestrischen Solarstrahlung in den Spektralbereichen ultraviolett, sichtbares Licht und infrarot bestehen vielfältige Wechselbeziehungen. Durch geeignete Gestaltungsmaßnahmen kann die Ausprägung dieser Wechselbeziehungen beeinflusst werden. So entstehen Gebäude mit ganz bestimmten Qualitäten, die auf einem spezifischen Umgang mit dem solaren Strahlungsangebot und speziell mit dem Tageslicht als sichtbarem Teil dieser Strahlung beruhen.

1.1. Strömungen optimierter Nutzung solarer Strahlung

Im Folgenden werden mit den Ansätzen der thermisch, der visuell ergonomisch und der therapeutisch optimierten Nutzung solarer Strahlung in Gebäuden jene drei Strömungen eines spezifischen Umgangs skizziert, die für die vorliegende Arbeit von Bedeutung sind. Um diese drei Ansätze zu charakterisieren, wird jeweils ein besonders prägnantes Baubeispiel von internationaler Bedeutung als prototypisch angeführt. Diesen prototypischen Beispielen werden jeweils zwei weitere exemplarische Gebäude am Standort Wien zugeordnet. Dabei wird deutlich, dass sich die unterschiedlichen Strömungen der optimierten Nutzung solarer Strahlung im Kontext mit generellen gesellschaftlichen Entwicklungen herausbilden. Entsprechend konzipierte Gebäude entstehen daher bevorzugt innerhalb jener begrenzten Zeiträume, innerhalb derer sie von gesellschaftlicher Relevanz sind.

1.1.1. Thermische Gebäudeoptimierung durch Nutzung solarer Strahlung

Auf der unterschiedlichen Durchlässigkeit von Glasscheiben für die jeweiligen Wellenlängen der terrestrischen Solarstrahlung beziehungsweise langwelligerer Wärmestrahlung beruht die Möglichkeit, solare Wärmegevinne für Innenräume zu lukrieren. Dadurch kann die thermische Effizienz von Gebäuden gesteigert werden, und ein Beitrag zur Schonung von Energieressourcen und zum Klimaschutz geleistet werden. Von zentraler Bedeutung ist dabei die Ausrichtung und Größe der, in der Gebäudehülle positionierten Glasflächen in Bezug zur Sonne, sowie die Qualität dieser Glasflächen in Hinsicht auf ihre Durchlässigkeit für die terrestrische Solarstrahlung und die langwelligere Wärmestrahlung, sowie schließlich die Anordnung geeigneter Abschattungen. Als prototypisch für die Nutzung von Solarstrahlung zur thermischen Optimierung von Gebäuden wird das im Jahr 1991 als erstes im Passivhausstandard errichtete Wohnhaus in Darmstadt Kranichstein (Abbildung 1) angeführt und nachfolgend abgebildet.⁴ Darüber hinaus werden mit den Wohnanlagen in der Esslinger Hauptstraße (

Abbildung 2) aus dem Jahr 2006 und in der Utendorfgasse (

⁴ Um die vergleichende Interpretation der abgebildeten Gebäude hinsichtlich ihres Bezugs zum Tageslicht zu erleichtern, wurden die verwendeten Scans, Downloads und Fotos in Graustufenbilder übergeführt.

Abbildung 3) ebenfalls aus dem Jahr 2006, zwei weitere im Passivhausstandard errichtete Gebäude am Standort Wien angeführt.^{5,6,7}



Abbildung 1: Passivwohnhaus, Darmstadt Kranichstein, H. Bott, K. Ridder, H. Westermeyer

Abbildung 2: Passivwohnanlage, Esslinger Hauptstraße 17, Wien 22, W. Hackermüller

Abbildung 3: Passivwohnanlage, Utendorfgasse 7, Wien 14, H. Schöberl, M. Pöll

Alle drei Gebäude zeigen langgestreckte südorientierte Fassaden mit mittlerem Fensterflächenanteil sowie ausgeprägten horizontalen Elementen, die der Abhaltung der Solarstrahlung der hochstehenden Mittagssonne während des Sommerhalbjahres dienen. In den nach Osten, Westen und Norden ausgerichteten Fassaden ist der Fensterflächenanteil vergleichsweise deutlich geringer. Teilweise sind diese Fassaden auch fensterlos.

1.1.2. Tageslichtnutzung zur Steigerung der visuellen Ergonomie⁸ von Gebäuden

Während Gebäude, die terrestrische Solarstrahlung zur thermischen Optimierung nutzen, primär in Bezug zu den am Ort vorliegenden Sonnenbahnen, also Umraum determiniert, konzipiert werden, geht die Gestaltung von Gebäuden, die den Aspekt der Steigerung der visuellen Ergonomie durch den gezielten Einsatz von Tageslicht fokussiert, vordringlich von der Funktionalität des Innenraumes aus. Verglichen mit der Anzahl an Gebäuden, denen eine solarstrahlungsbezogene thermische Optimierung als expliziertes Kriterium der Planung zugrunde liegt, ist jene mit einem konzeptiven Ansatz hinsichtlich einer visuell ergonomischen Tageslichtnutzung im aktuellen lokalen Baugeschehen gering. Ein Impuls für die Entwicklung von Wohngebäuden mit zumindest minimalen Ansprüchen an eine Tageslicht basierte Ergonomie, geht von den gesellschaftlichen Veränderungen in den ersten Dekaden des 20. Jahrhunderts aus. So wird im Zuge der Emanzipation der Masse an Industriearbeitern die Forderung nach der Versorgung von Arbeiterwohnungen mit direktem Sonnenlicht aufgestellt und zum vielfach eingeforderten architektonischen Programm.^{9,10,11} Am Ende dieser Entwicklung stehen freistehende Wohngebäude mit opakem Kern und umlaufenden völlig transparenten Fassaden.^{12,13,14,15}

⁵ http://www.passivhaustagung.de/Kran/Passivhaus_Kranichstein.htm (04.05.2009)

⁶ http://www.ibo.at/documents/TB08_hackermüller.pdf (05.05.2009)

⁷ http://www.baunetzwissen.de/objektartikel/Daemmstoffe_Passivhaus-in-Wien_70130.html?img=0&layout=galerie (05.05.2009)

⁸ Der Begriff „visuelle Ergonomie“ wird in Kapitel 6.2.2 näher erläutert.

⁹ Giedion (1929)

Als prototypisches Beispiel wurde mit dem 1961 fertig gestellten Esherick Haus (Abbildung 4), ein Spätwerk von Louis Kahn gewählt, das sich differenziert mit den Ansprüchen an visuelle Ergonomie auseinandersetzt und gezielt opake und transparente Flächen in der Gebäudehülle platziert (Abbildung 5). Die Positionierung von Fensteröffnungen erfolgt in Hinsicht auf eine entsprechende Helligkeit und Leuchtdichtevertelung im Blickfeld des Nutzers (Abbildung 6). Häufig wird durch die Anordnung der Fenster auch auf die Blickführung Einfluss genommen, sodass spezielle Blickbeziehungen bevorzugt werden und Ausblicke ausgewählte Ausschnitte des Umraumes anbieten.^{16,17,18}



Abbildung 4: Haus Margaret Esherick, Chestnut Hill, Fassade Nordost, L. Kahn

Abbildung 5: Haus Margaret Esherick, Chestnut Hill, Fassade Südwest, L. Kahn

Abbildung 6: Haus Margaret Esherick, Chestnut Hill, Innenansicht des Wohnraumes mit der von L. Kahn als Keyhole Window¹⁹ bezeichneten Fensteranordnung

Weiters werden zwei Beispiele aus dem zeitgenössischen Wiener Wohnungsbau angeführt, bei denen Kriterien der visuellen Ergonomie nachweislich Einfluss auf die Gestaltung des Gebäudes hatten. So wird bei dem 2004 fertiggestellten Haus in der Leebergasse 46 (

Abbildung 8) durch eine überhöhte Anordnung der Balkonplatten um 45 cm in Bezug auf das Fußbodenniveau der Innenräume (Abbildung 7, Abbildung 10) ein tieferer Lichteinfall erreicht (Abbildung 9).^{20,21,22,23,24}

¹⁰ Jeanneret C., veröffentlicht als Le Corbusier (1931)

¹¹ Gropius (1933)

¹² Haus Lovell auch „Health House“, Los Angeles, Neutra R., 1927 - 1929

¹³ Haus Tugendhat, Brünn, van der Rohe L., 1928 - 1930

¹⁴ Haus Farnsworth, Plano, 1946 - 1951

¹⁵ Glass House, New Canaan, Johnson P., 1949

¹⁶ <http://www.apartmenttherapy.com/ny/news/for-salestill-louis-kahns-margaret-esherick-house-052836> (05.05.2009)

¹⁷ <http://blog.antiquetrader.com/blog/content/binary/Louis%20Kahn%20Esherick%20House.jpg> (06.05.2009)

¹⁸ <http://users.tce.rmit.edu.au/E03159/ModMelb/mm2/lect/60%27s%20&%2070%27s/images/lkimages/esh1.jpg> (06.05.2009)

¹⁹ Corrodi (2008)

²⁰ <http://www.querkraft.at/> (06.05.2009)

²¹ <http://www.querkraft.at/> (06.05.2009)



Abbildung 7: Haus LEE, Wien 22, Fassade West, querkraft architekten wien



Abbildung 8: Haus LEE, Wien 22, Fassade Ost, querkraft architekten wien



Abbildung 9: Haus LEE, Wien 22, Innenansicht mit Blick auf den überhöht angeordneten Balkon, querkraft architekten wien

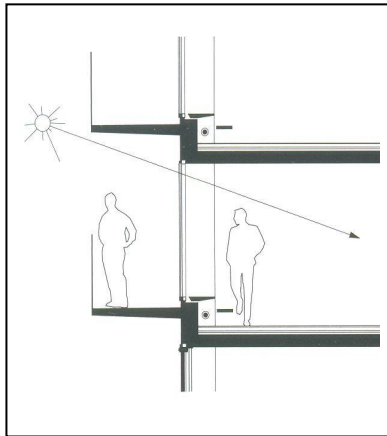


Abbildung 10: Haus LEE, Wien 22, Schnitt durch den überhöht angeordneter Balkon, querkraft architekten wien

Das 1993 fertiggestellte Wohnhaus in der Frauenfelderstraße 20 verfügt über Schiebeläden mit flexiblen Lamellen (Abbildung 11), die eine den individuellen Bedürfnissen entsprechende Nutzung des zur Verfügung stehenden Tageslichts im Innenraum ermöglichen (

Abbildung 13). Darüber hinaus wurde durch das Absetzen des Erschließungsgangs von der Fassade die Bildung dunkler Schlagschattenzonen gemildert (

Abbildung 12).^{25,26,27}

²² Als Fotografen werden von querkraft architekten wien Margherita Spiluttini, Hertha Hurnaus, Rupert Steiner und Manfred Seidl angegeben, jedoch ohne nachvollziehbare Zuordnung zu den jeweiligen Fotos.

²³ Corrodi (2008)

²⁴ Corrodi (2008)

²⁵ <http://www.henkeschreieck.at/> (07.05.2009)

²⁶ <http://www.henkeschreieck.at/> (07.05.2009)

²⁷ <http://www.henkeschreieck.at/> (07.05.2009)



Abbildung 11: Haus ÖBV, Wien 17, Fassadenausschnitt mit Schiebeläden, D. Henke, M. Schreieck

Abbildung 12: Haus ÖBV, Wien 17, Erschließungsgänge, D. Henke, M. Schreieck

Abbildung 13: Haus ÖBV, Wien 17, Innenansicht mit Blick auf die Loggia, D. Henke, M. Schreieck

1.1.3. Therapeutische Nutzung von solarer Strahlung in Sondergebäuden

Die Wirkungen der terrestrischen Solarstrahlung auf die physische wie psychische Befindlichkeit des Menschen wurden angesichts des epidemischen Auftretens von Lichtmangelerscheinungen²⁸ wie Rachitis in den Arbeiterquartieren der Industriestädte bereits Mitte des 19. Jahrhunderts empirisch beschrieben.²⁹ Diese photobiologischen Erkenntnisse bildeten einerseits die Grundlage für Reformen der Bauordnungen im ersten Viertel des 20. Jahrhunderts³⁰ mit dem Ziel einer ausreichenden Versorgung der Bevölkerung mit Tageslicht, andererseits wurden sie zu Parametern für die Konzeption von medizinischen Sondergebäuden wie Sanatorien und Kliniken.

Exemplarisch angeführt wird hier das 1933 fertig gestellte Sanatorium in Paimio von Alvar Aalto (Abbildung 14). Das Gebäude wurde für die lichttherapeutische Behandlung von Lungentuberkulose und anderen Atmungsorganerkrankungen konzipiert.³¹ In den oberen Geschossen des südorientierten Trakts des Sanatoriums sind offene Liegehallen angeordnet (

Abbildung 15). Die Patientenzimmer sind mit großen, öffenbaren Fenstern (

Abbildung 16), einige auch mit Balkon ausgestattet. Die Nutzungsanforderung, sich im Gebäude unmittelbarer Sonneneinstrahlung aussetzen zu können, bestimmt zentral die Architektur und führt, wie die Abbildungen zeigen, zu einer starken Durchdringung von Innen- und Außenraum.^{32,33,34}

²⁸ Es ist darauf hinzuweisen, dass in der Medizin unter der Bezeichnungen Licht oftmals auch die Spektralbereiche der nichtionisierenden elektromagnetischen Strahlung des ultravioletten und des infraroten Wellenlängenbereiches zusätzlich zum in der Bauphysikalisch als Licht bezeichneten sichtbaren Wellenlängenbereich subsummiert werden. In diesem Sinn umfassen Lichtmangelerscheinungen beispielsweise auch Erscheinungen auf Grund von Mangel an ultravioletter Strahlung.

²⁹ Hobday (2006)

³⁰ Corrodi (2008)

³¹ Hobday (2006)

³² http://dcl.umn.edu/dcl/show_details?page=7&search=per_page%3D12%26q%3Dv_modernism%2Bo_full%2Bf_search_cache_keywords%26s%3Df_search_cache_title%2Br_DES_C%26page%3D6 (04.05.2009)

³³ <http://www.scuolamediavirgilio.it/cittanellastoria/post-ind-moderna/pagina3.html> (04.05.2009)



Abbildung 14: Sanatorium Paimio, Finnland, Ansicht des Süd- und des Zentraltraktes, A. Aalto

Abbildung 15: Sanatorium Paimio, Finnland, Oberste Liegehalle, A. Aalto

Abbildung 16: Sanatorium Paimio, Finnland, Krankenzimmer, A. Aalto

Auch am Standort Wien wurden zu Beginn des 20. Jahrhunderts Sondergebäude errichtet, deren Konzeption auf der optimalen Nutzung der Solarstrahlung für therapeutische Zwecke beruht. So wurde unter der Bauherrschaft der Stadt Wien im Jahr 1929 der Pavillon 8 (Abbildung 17) auf dem Gelände des Lainzer Krankenhauses nach Plänen der Architekten Fritz Judtman und Egon Riss fertiggestellt. Das Gebäude diente der Therapie von an Lungentuberkulose erkrankten Personen.³⁵ Der nach Süden orientierte Pavillon zeigt wieder das Element der offenen Liegehalle. Die Krankenzimmer sind mit raumhohen, großflächig öffnenbaren Fenstern ausgestattet.

Bereits 1907 wurden, ausgehend von einem Lageplan von Otto Wagner, auf der Baumgartner Höhe die Pavillons des, als Pensionat bezeichneten, Sanatoriums für Privatpatienten als Teil der Niederösterreichischen Landes-Heil- und Pflegeanstalt für Nerven- und Geisteskranke „Am Steinhof“ erbaut. Die von Carlo von Boog und Franz Berger geplanten Gebäude weisen typische Elemente einer für die Tageslichttherapie konzipierten Architektur, wie Loggien oder schmale wintergartenähnliche Anbauten (

Abbildung 18) und hohe öffnenbare Fenster auf. Wobei die für die Tageslichtnutzung relevanten Architekturelemente den Bedürfnissen von psychisch Kranken angepasst wurden und sich folglich von jenen für physisch Kranke differenzieren³⁶ (

Abbildung 19), wie die folgenden Abbildungen verdeutlichen.^{37,38,39}

³⁴ http://dcl.umn.edu/dcl/show_details?page=6&search=per_page%3D12%26q%3Dv_modernism%2Bo_full%2Bf_search_cache_keywords%26s%3Df_search_cache_title%2Br_DESC%26page%3D6 (04.05.2009)

³⁵ Weihsmann (2005)

³⁶ Vergitterungen, Brüstungshöhen, Geländerhöhen und Ähnliches

³⁷ http://www.dasrotewien.at/bilder/d42/TBC_Pacillon_Lainzer_Krankenhaus.jpg (05.05.2009)

³⁸ <http://www.runser.at/Runser/index.php?format=show&mid=4258> (05.05.2009)

³⁹ Vetter (1993)



Abbildung 17: Pavillon 8 Krankenhaus Lainz, Wien 13, Fassade Süd, F. Judtmann, E. Riss

Abbildung 18: Pavillon 9 Pulmologisches Zentrum, Wien 14, Fassade Süd, C. Boog, F. Berger

Abbildung 19: Pulmologisches Zentrum, Wien 14, Detail teilverglaste Loggia, C. Boog, F. Berger

Der erfolgreiche Einsatz von neu entwickelten Medikamenten, beispielsweise zur Bekämpfung von Infektionen der Lunge oder von Depressionen, führte zur Einstellung der lichttherapeutischen Anwendungen, und die Errichtung weiterer entsprechender Sondergebäude unterblieb.

Abschließend ist anzumerken, dass eine explizite Nutzung der terrestrischen Solarstrahlung oder auch ein bewusster gestalterischer Umgang mit Tageslicht bei der Gebäudeplanung keine Selbstverständlichkeit darstellen. Viele Gebäude stellen so Mischformen zwischen unterschiedlichen Optimierungsansätzen dar⁴⁰ oder verbleiben in Bezug auf diese Qualitäten ohne Intention.

1.2. Problemlagen im Umgang mit solarer Strahlung

Im Folgenden sollen jene gesellschaftlich relevanten Probleme skizziert werden, die in unmittelbarem Zusammenhang mit der spezifischen Nutzung von solarer Strahlung, beziehungsweise dem aktuellen Umgang mit solarer Strahlung im Gebäude in Zusammenhang stehen.

1.2.1. Thermische Gebäudeoptimierung zur Reduktion von Treibhausgasemissionen

Eine weitgehende Vermeidung der Emission von Treibhausgasen ist ein vordringliches gesamtgesellschaftliches Ziel. Um die Treibhausgaskonzentration^{41,42} in der Atmosphäre langfristig auf etwa 550 ppm zu stabilisieren, müssen die Emissionen in den nächsten Dekaden auf 20% des gegenwärtigen Niveaus gesenkt werden. Misslingt das, entsteht eine nicht einschätzbare und nicht mehr steuerbare Eigendynamik innerhalb des

⁴⁰ Beispielsweise das unter ¹⁵ angeführte zwischen 1927 und 1929 in Los Angeles errichtete Haus Lovell oder „Health House“ von Richard Neutra. Hier geht es nicht nur darum ausreichende Helligkeit zu erzielen, sondern auch um das Erhalten der Gesundheit, nicht jedoch um Lichttherapie.

⁴¹ Die derzeitige Konzentration liegt bei etwa 380 ppm.

⁴² Kromp-Kolb (2005)

natürlichen Klimasystems.⁴³ Dabei liegt der Anteil an Treibhausgasemissionen, der vom Gebäudesektor ausgeht, in Österreich aktuell bei 15,6%, wie das folgende Diagramm (Diagramm 1) zeigt.^{44,45}

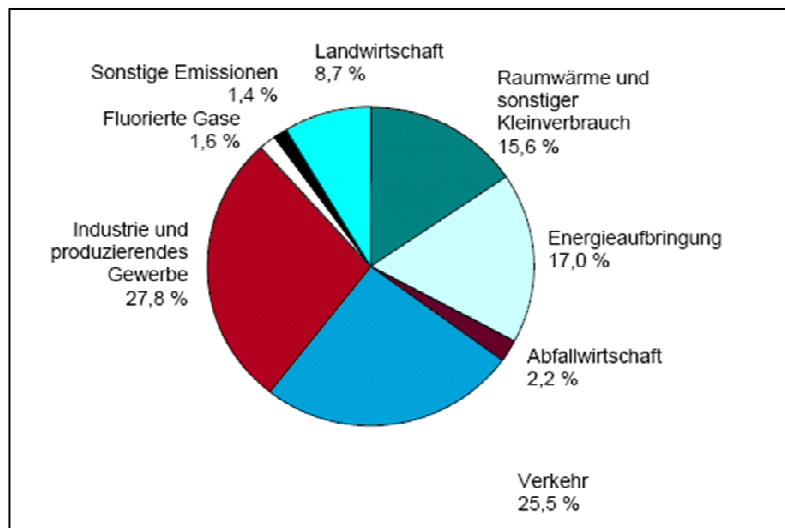


Diagramm 1: Anteilige Treibhausgasemissionen in Österreich 2006 nach Nutzungssektoren

Vor dem Hintergrund dieser Angaben ist die thermische Optimierung von Gebäuden und eine diesbezügliche energetische Nutzung der Ressource Solarstrahlung, die zu einer Reduktion der Emission von Treibhausgasen beiträgt, von höchster Wichtigkeit.

Die thermische Gebäudeoptimierung führt durch die Bevorzugung kompakter Bauformen, die Erhöhung der Bauteildicken durch hochwärmedämmende Ausführung, den bereits unter 1.1. beschriebenen Umgang mit Fensteröffnungen in Bezug zu den Sonnenbahnen am jeweiligen Standort sowie den Einsatz von hoch wirkungsvollen Funktionsgläsern zu einer quantitativen Reduktion und qualitativen Veränderung des Solarstrahlungsangebots im Gebäudeinneren.

Es ist daher zu diskutieren, ob die oben angeführten Maßnahmen der thermischen Gebäudeoptimierung zu einer unzulässigen Beeinträchtigung der visuellen Tageslichtergonomie sowie von photobiologischen Abläufen im Innenraum führen. Darüber hinaus ist zu hinterfragen, ob die thermische und die visuell ergonomische Maximierung der Solarstrahlungsnutzung zueinander in Widerspruch stehen beziehungsweise ob Synergien zu einer zufriedenstellenden Umsetzung beider Aspekte führen können.

⁴³ Kromp-Kolb (2005)

⁴⁴ Umweltbundesamt (2008)

⁴⁵ Der Begriff Nutzungssektoren wird aus der Quelle übernommen, auch wenn „sonstige Emissionen“ und „fluorierte Gase“ keine Nutzung im Wortsinn darstellen.

1.2.2. Lichtmangelercheinungen durch unzureichende Versorgung mit Solarstrahlung

Die generelle Erhöhung des Innenraumkomforts und die Verfügbarkeit von leistungsfähigen, künstlichen Lichtquellen haben dazu geführt, dass sich der Mensch in der postindustriellen Gesellschaft etwa 90% seiner Lebenszeit in geschlossenen Räumen aufhält.^{46,47} In diesem Zusammenhang ist eine Vielzahl von medizinischen Studien⁴⁸ zu beachten, die das epidemische Auftreten von Lichtmangelercheinungen wie Autoimmunkrankheiten, einigen Krebserkrankungen und weiteren, innerhalb eben dieser in Innenräumen lebenden Gesellschaft beschreiben.

Neben der Betrachtung der Vereinbarkeit von visuell ergonomischen und thermischen Optimierungsansätzen ist daher auch zu hinterfragen, welche Auswirkungen der Aufenthalt in Gebäuden auf die Photobiologie des Menschen hat. In diesem Zusammenhang sind die Auswirkungen des Einsatzes von thermisch optimierten Funktionsglasscheiben und ihre jeweilige spektrale Durchlässigkeit besonders zu beachten. Die Frage nach der Qualität des Solarstrahlungsangebots in Innenräumen ist angesichts der zur Treibhausgasemissionsreduktion unumgänglich notwendigen thermischen Optimierung von Gebäuden und der hohen Aufenthaltsdauer im Inneren dieser Gebäude von höchster Relevanz.

⁴⁶ Deutsches Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (1996)

⁴⁷ Zum Aufenthalt in geschlossenen Räumen wird auch jener in Fahrzeugen gezählt.

⁴⁸ siehe Kapitel 6

2. Hypothese

Ausgehend von den skizzierten Problemlagen werden die folgenden zwei Hypothesen aufgestellt und im Rahmen der vorliegenden Arbeit untersucht.

2.1. Hypothese 1

Es besteht ein ursächlicher Zusammenhang zwischen der Evidenz des epidemischen Auftretens von Lichtmangelerscheinungen und dem langandauernden Aufenthalt hinter Verglasungen im Inneren von Gebäuden im Allgemeinen und von Gebäuden mit thermisch optimierten Funktionsglasscheiben im Besonderen.

2.2. Hypothese 2

Es liegt ein Zielkonflikt zwischen der Optimierung der Tageslichtversorgung und der Optimierung des solarstrahlungsinduzierten thermischen Verhaltens eines Innenraumes in Bezug auf die Ausrichtung der diesem Innenraum zugeordneten transparenten vertikalen Flächen vor.

3. Methodik und Ziel

Im Folgenden werden die grundlegenden Herangehensweisen und die gewählten Methoden zur Bearbeitung der beiden aufgestellten Hypothesen skizziert. Ausführliche Beschreibungen sind den jeweiligen Kapiteln zugeordnet. Speziell detaillierte methodische Aspekte werden im Anhang erläutert.

3.1. Methodik Grundlagen

Um die Untersuchung der beiden Hypothesen auf eine zuverlässige und klar nachvollziehbare Basis zu stellen, erfolgt zunächst eine eingehende Grundlagenrecherche, deren Ergebnisse entsprechend den Anforderungen der Arbeit zusammengeführt dargestellt werden.

3.1.1. Tageslichtangebot im Außenraum

Das Strahlungsangebot im Außenraum wird in seiner spektralen Verteilung für einen konkreten Ort und für konkrete Referenzzeitpunkte ermittelt.

Zunächst werden die Phänomene und Gesetzmäßigkeiten der Strahlungsextinktion in der Atmosphäre zusammenfassend dargestellt. Eine Analyse verfügbarer Berechnungsmodelle zur mathematischen Abbildung dieser Strahlungsextinktion wird vorgenommen. Ausgehend von dieser Analyse kommt das parametrisierte Modell SMARTS⁴⁹ zur Anwendung, welches auch im internationalen Normenwerk verwendet wird. Schließlich werden die derart ermittelten Bestrahlungsstärken im Außenraum in Bezug gesetzt zu den im langjährigen Mittel beobachteten stündlichen und täglichen entsprechenden Bestrahlungssummen, um die für den wolkenlosen Himmel errechneten Potentiale in Bezug setzen zu können zu den tatsächlichen, bei statistisch auftretender Bewölkung gegebenen Qualität der terrestrischen Solarstrahlung.

3.1.2. Strahlungsdurchgang durch technische Funktionsgläser

Der Strahlungsdurchgang durch technische Funktionsgläser wird exemplarisch für vier baupraktisch bedeutsame Verglasungstypen untersucht.⁵⁰ Aufbauend auf einen kurzen Abriss der aktuellen Werkstofftechnik und Produktionsverfahren werden die spektralen Transmissionsgrade der vier Referenzverglasungen erhoben und in Diagrammen dargestellt, wobei die Winkelabhängigkeit der Transmissionsgrade berücksichtigt wird. Als Quelle wird die Glasdatenbank IGDB des Lawrence Berkeley National Laboratory

⁴⁹ SMARTS - Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine, Gueymard C., 1994 - 2005, NREL - National Renewable Energy Laboratory, U.S.A, Golden, Colorado
Bezugsquelle im Internet <http://www.nrel.gov/rredc/smarts/> (02.01.2009)

⁵⁰ Unter dem Begriff der technischen Funktionsglasscheibe wird jene Palette an, für die bautechnische Anwendung verfügbaren, Produkten verstanden, die zusätzlich zur immanenten Glasqualität der Transparenz für Licht gezielt herbeigeführte ergänzende Qualitäten der Wärmedämmung oder des Sonnenschutzes aufweisen.

herangezogen und mit Daten des Software Pakets WINDOW desselben Institutes verknüpft.^{51,52} Spezialgläser mit einem verbesserten Transmissionsgrad im ultravioletten Spektralbereich werden erwähnt und in ihren Transmissionseigenschaften dargestellt.

3.1.3. Photobiologie

Die Grundlagen der Photobiologie des Menschen werden einerseits aus aktuellen fach einschlägigen medizinischen Übersichtswerken und Lehrbüchern zusammengeführt. Andererseits ist es unter dem selektiven Blickwinkel der vorliegenden Arbeit notwendig, dieses gut gesicherte und oft lang tradierte Grundlagenwissen durch die Ergebnisse ausgewählter medizinischer Studien zu erweitern, die neueste wissenschaftliche Erkenntnisse dokumentieren. Dazu wird eine systematische Literatursuche in der medizinischen bibliographischen Datenbank Medline und punktuell in anderen Datenbanken durchgeführt.

Speziell nachgegangen wird Studien zu epidemisch auftretenden Lichtmangelerscheinungen, zu photobiologischen Wirkungs-Kurven sowie Schwell- und Grenzwerten und wirksamen Dosen. Die so ausgehobenen Studien werden auf ihre themenbezogene Relevanz und qualitative Eignung hin überprüft und die jeweils angeschlossenen Quellenverzeichnisse nach weiterführenden Beiträgen durchsucht. Abschließend werden alle derart selektierten Studien zueinander in Bezug gebracht, um so einen Überblick über den aktuellen Wissensstand zu skizzieren.

3.2. Methodik Hypothese 1

Um die physiologische Wirksamkeit jener Spektralanteile der Solarstrahlung, die den Innenraum erreichen, zu untersuchen, wird eine Potentialstudie in folgenden Schritten durchgeführt.

Zunächst werden die Referenzbedingungen in Hinsicht auf aussagekräftige Auswertungszeitpunkte, auf die Orientierung relevanter Messflächen, sowie die Definition eines konkreten geografischen Ortes festgelegt.

Anschließend wird, unter Anwendung der Gesetzmäßigkeiten des Strahlungsdurchgangs durch die Atmosphäre, die Stärke der terrestrischen Sonnenstrahlung unter den genannten Referenzbedingungen ermittelt.

In Folge werden unter Heranziehung des spezifischen Strahlungsdurchgangs durch die ausgewählten technischen Funktionsgläser die spektralen Intensitäten der Sonnenstrahlung unmittelbar hinter den Verglasungen errechnet.

Abschließend werden, durch eine Faltung dieser errechneten spektralen Strahlungsintensitäten mit ausgewählten biologischen Wirkungs-Kurven die photobiologischen Wirkpotentiale der Solarstrahlung berechnet.

⁵¹ International Glazing Database, Optical data for over 2900 glazing products, aus dem Internet <http://windows.lbl.gov/materials/IGDB/default.htm> (03.02.2009)

⁵² WINDOW 5.2.17a, Softwarepaket zur Berechnung strahlungsphysikalischer und thermischer Kennzahlen von Fenstern, aus dem Internet <http://windows.lbl.gov/software/window/window.html> (03.02.2009)

Diese Wirkpotentiale werden in Bezug gesetzt zu den in der medizinischen Fachliteratur gesicherten vorliegenden Grenz- und Schwellwerten beziehungsweise wirksamen Dosen. Es werden grundsätzliche Aussagen darüber getroffen, ob die unter den angenommenen Randbedingungen vorliegende Strahlungsversorgung geeignet ist, die menschliche Gesundheit zu erhalten, gegebenenfalls zu fördern oder ob sie Mängel oder Schädigungen verursacht.

3.3. Methodik Hypothese 2

Um den Zielkonflikt zwischen der Optimierung der Tageslichtversorgung und der Optimierung des solarstrahlungsinduzierten thermischen Verhaltens eines Innenraumes in Bezug auf die Ausrichtung der diesem Innenraum zugeordneten transparenten vertikalen Flächen zu untersuchen wird eine vergleichende Potentialstudie angestellt. Für den Vergleich werden dabei die definierten Kennzahlen des Heizwärmebedarfs für den winterlichen Wärmeschutz und der Kühlbedarf für den Schutz vor sommerlicher Überwärmung herangezogen. Zur Beurteilung des Potentials der Tageslichtversorgung wird, neben dem Tageslichtquotienten, mit dem Durchlichtungsfaktor eine neuartige Kennzahl eingeführt und in dieser Arbeit erstmals angewandt. Der Durchlichtungsfaktor ist der in % angegebene Anteil des Volumens eines Innenraumes, der von direkter Sonnenstrahlung erreicht werden kann.

Als für die Potentialstudie besonders geeigneter Typus wird das zeitgenössische Laubenganghaus mit durchgesteckten Wohnungen identifiziert, das grundsätzlich die Möglichkeit der doppelseitigen Belichtung bietet und dadurch auf unterschiedliche Baukörperausrichtung deutlich und klar zuordenbar reagiert. Wie die im Folgenden abgebildeten Baubeispiele (Abbildung 20, Abbildung 21, Abbildung 22) zeigen, bestehen zwischen den Gebäuden strukturelle Übereinstimmungen ebenso, wie deutliche Abweichungen in den jeweiligen konkreten Ausführungen.^{53,54,55}

⁵³ http://nextroom.org/building_preview.php?building_id=2346&article_id=2948&media_id=8668 (19.12.2007)

⁵⁴ Foto von Johannes Stitz, 2007

⁵⁵ Foto von Johannes Stitz, 2007



Abbildung 20: Laubengangwohnhaus, Brünnerstraße 26 – 32, Wien 23, H. Richter, 1991

Abbildung 21: Laubengangwohnhaus, Rosensteingasse 104 – 106, Wien 17, L. Dungl, 2004

Abbildung 22: Laubengangwohnhaus, Breitenfurter Straße 114, Wien 12, H. Wimmer 2002

Ein analytischer Ansatz zur Bearbeitung der aufgestellten Hypothese würde auf Grund der individuellen Ausprägungen der unterschiedlichen Laubengangwohnhäuser die Gefahr von Fehlinterpretationen bergen, weil komplexe Zusammenhänge nach vordefinierten und vereinfachenden Mustern beurteilt werden müssten.⁵⁶ Es wird daher ein modellhafter Laubengangtyp entwickelt, der den strengen Anforderungen an strukturelle Klarheit und Eindeutigkeit genügt. Damit wird der konstruktivistische Ansatz des Erkenntnisgewinns durch Annäherung eines Modells an die Realität verfolgt. Entsprechend bedarf es einer grundlegenden Definition der das Modell bildenden Einzelelemente.⁵⁷

So ist in einem ersten Arbeitsschritt das Basismodell des Typs Laubenganghaus zu definieren. Diese Definition wird entsprechend den gültigen Mindestanforderungen der Wiener Bauordnung und der ÖNORM B 8110-1⁵⁸ vorgenommen. Vor der eigentlichen Untersuchung der orientierungsabhängigen Potentiale des Basismodells wird dieses auf seinen Tageslichtquotientenverlauf hin untersucht. Da sich zeigte, dass in der gewählten, Gesetzes konformen Raumtiefe, die empfohlene Untergrenze des Tageslichtquotienten für den Wohnbau deutlich unterschritten wird, erfolgt eine entsprechende Verkürzung des Basismodells für die weiteren detaillierten Untersuchungen.

Die thermischen Qualitäten und die Tageslichtversorgung des Laubengangtyps werden anhand dieses verkürzten Basismodells untersucht. Es werden drei Qualitäten im Sinne der Potentialstudie als eindeutige und somit vergleichbare Kennzahlen festgelegt. Hinsichtlich des sommerlichen und winterlichen Wärmeschutzes wird dazu auf definierte Kennzahlen zurückgegriffen. Für die Beurteilung des Potentials der Tageslichtqualität wird neben dem Tageslichtquotienten mit dem Durchlichtungsfaktor eine neuartige Kennzahl entwickelt und erstmals in dieser Arbeit angewandt.

⁵⁶ Poser (2004)

⁵⁷ Mittelstraß (2004)

⁵⁸ ÖNORM 8110-1 (2007)

Ausgehend von den am Basismodell gewonnenen Erkenntnissen werden Typologien mit unterschiedlichen Raumproportionen und unterschiedlicher Anzahl an verglasten Flächen entwickelt. Für diese werden die Kennzahlen Heizwärmebedarf, Kühlbedarf und Durchlichtungsfaktor entsprechend der Ausrichtung in 30° Schritten berechnet. Die Ergebnisse werden in einer Übersichtsgrafik dargestellt, die die Potentialprofile entsprechend der jeweiligen Ausrichtung zur Sonne zusammenfasst.

3.4. Ziele

Es wird darauf abgezielt, wissenschaftlich fundierte und entscheidungsrelevante Grundlagen zum Umgang mit dem Angebot an terrestrischer Solarstrahlung unter spezieller Berücksichtigung des Tageslichts an einem konkreten Ort für eine kontextsensitive Gebäudeplanung bereit zu stellen. Dem Diskurs über eine ideale Ausrichtung von Gebäuden, der im Lauf der Architekturgeschichte vielfach geführt wurde,^{59,60,61,62,63,64,65} soll an dieser Stelle keine weitere Position hinzugefügt werden.

Erarbeitet und leicht verständlich dargestellt werden daher die Potentialprofile des strahlungsinduzierten thermischen Verhaltens und der Tageslichtversorgung eines modellhaften Gebäudes. Die Kenngrößen Heizwärmebedarf, Kühlbedarf und Durchlichtung charakterisieren dabei die ausrichtungsabhängigen Eigenschaften des Modellgebäudes. Die Potentialprofile dienen so als Ausgangsbasis für die konzeptionelle Baumassenverteilung und Gebäudeorientierung im Rahmen der frühen Entwurfsplanung.

Mit dem Durchlichtungsfaktor wird ein einfaches raumbezogenes Maß für das maximal verfügbare Angebot an direkter Sonnenstrahlung vorgelegt, das den diffuslichtbezogenen und damit himmelsrichtungsunabhängigen Tageslichtquotienten ergänzt. Die graphische Darstellung des Durchlichtungsfaktors zeigt, ob, wann und wo direkte Sonnenlichtstrahlung in einen Innenraum fällt. So liefert der Durchlichtungsfaktor Informationen, die eine gezielte Modellierung der Lichtdurchlässigkeit eines zu gestaltenden Raumvolumens erleichtern. Lichtdurchlässigkeit bezieht sich dabei nicht nur auf Transparenz und Transluzenz der Gebäudehülle sondern auch und speziell auf eine

⁵⁹ So wurde die Stadt Achet-Aton, nahe dem heutigen Amarna gelegen, etwa um 1350 vor Christus basierend auf Sonnenlicht orientierten Ritualen auf einem Südost Nordwest geführten Gitter entwickelt.

⁶⁰ Hornung (2001)

⁶¹ Hobday (2006)

⁶² Im Jahr 1602 veröffentlicht der italienische Mönch Tommaso Campanella seine Schrift „Der Sonnenstaat“ in der er eine utopische ebenfalls rituell basierte auf sieben konzentrischen Kreisen konzipierte Stadt vorstellt.

⁶³ Schröder (2001)

⁶⁴ 1930 veröffentlicht Walter Schwagenscheidt sein Diagramm „Anordnung der Räume nach der Sonnenbahn“, das eine Ost-Westorientierung von Wohnungsgrundrissen nahelegt, während Ernst May im gleichen Jahr ein strikt Nord Süd ausgerichtetes Zeilenschema für Wohnbebauungen vorschlägt.

⁶⁵ Kessler (2006)

Anordnung opaker Bauteile im Innenraum, die den jeweils vorliegenden Strahlengang berücksichtigt.

Schließlich zielt die Diskussion photobiologischer Wirkungen vordringlicher Relevanz darauf ab, eine sinnvoll begründete Funktionszuordnung und entsprechende Nutzung von Gebäuden in Bezug zur angebotenen Solarstrahlung zu ermöglichen. Eingehend abgehandelt werden dabei sowohl photopathologisch wie photophysiologisch grundlegende Wirkungen in den derzeit erforschten Wellenlängenbereichen der ultravioletten Strahlung und des sichtbaren Lichts. Konkrete Aussagen über die Wirksamkeit des potenziell zu Verfügung stehenden Strahlungsangebotes im Innenraum werden in Zusammenhang mit Monat und Uhrzeit, Ausrichtung, Raumtiefe und Verglasungsqualität getroffen.

Die vorliegende Arbeit verfolgt somit das konkrete Ziel, wissenschaftlich haltbare Grundlagen für eine bewusste und sinnvolle Nutzung des Tageslichtangebotes an einem definierten Ort in Bezug auf die Gebäudeorientierung, die Modellierung des Innenraumvolumens und die Funktionszuordnung im Gebäude zu erarbeiten und in geeigneter anschaulicher Form zur Verfügung zu stellen.

B. GRUNDLAGEN

4. Tageslicht- und Strahlungsangebot im Außenraum

Ausgehend von der Strahlungsemission der Sonne wird im Folgenden das terrestrische Strahlungsangebot spektral aufgelöst für ausgewählte Zeitpunkte und an einem festgelegten Ort unter Berücksichtigung atmosphärenphysikalischer Zusammenhänge berechnet. Das solcherart ermittelte terrestrische Strahlungsangebot wird einer anschließenden Faltung mit der spektralen Durchlässigkeit von technischen Funktionsglasscheiben unterzogen und so der Untersuchung von photophysiologicalen Wirkpotentialen zugrunde gelegt.

Die hohe Sensitivität der Ergebnisse hinsichtlich der spektralen Zusammensetzung und Intensität der terrestrischen Sonnenstrahlung macht eine detaillierte Grundlagenermittlung zur Berechnung notwendig und schließt die Anwendung standardisierter Normlichtarten jedenfalls aus. Die vielfältigen Phänomene der atmosphärischen Strahlungsextinktion können so mit hoher Genauigkeit berücksichtigt und abgebildet werden. Im Sinne der gewählten Methodik der Potentialstudie wird der Strahlungsdurchgang durch die Atmosphäre jedoch immer für den idealisiert wolkenlosen Himmel berechnet.

4.1. Sonnenbahn und Himmelsgeometrie

Als Sonnenbahn wird der Tagesverlauf der Sonnenposition relativ zu einem Betrachtungspunkt auf der Erdoberfläche bezeichnet. Sie ist abhängig von der geografischen Breite des Betrachtungspunktes und vom kalendarischen Zeitpunkt der Beobachtung.

Die Position der Sonne relativ zu einem terrestrischen Beobachtungspunkt ergibt sich aus der Himmelsgeometrie, konkret aus dem Umlauf der Erde um die Sonne und der Rotation der Erde um ihre, zur Ekliptik um $23,44^\circ$ geneigte Achse. Sie wird beschrieben durch die Sonnenhöhe⁶⁶ γ_S und das Sonnenazimut⁶⁷ α_S .

Die Sonnenhöhe ist definiert als der Winkel zwischen dem Sonnenmittelpunkt und dem Horizont vom Beobachter aus betrachtet. Das Sonnenazimut ist definiert als der Winkel zwischen der geografischen Nordrichtung und dem Vertikalkreis durch den Sonnenmittelpunkt.^{68,69}

⁶⁶ Englische Bezeichnungen: elevation oder altitude angle

⁶⁷ Englische Bezeichnungen: direction angle oder azimuth angle

⁶⁸ DIN 5034-2 (1985)

⁶⁹ Hinzuweisen ist darauf, dass in der Fachliteratur der sonnenteknischen Anlagen und der Atmosphärenphysik auch alternative Definitionen des Höhenwinkels und des Azimuts gebräuchlich sind: Das Sonnenazimut wird abweichend von der angeführten Definition bisweilen auch von der Südrichtung ausgehend gemessen, siehe etwa ÖNORM M 7701 (2004). Und anstelle des Höhenwinkels wird bisweilen der Zenitwinkel verwendet, der von der Vertikalen ausgehend gemessen wird, siehe etwa Gueymard (2004).

Eine anschauliche Darstellung der beiden beschreibenden Größen der Sonnenposition, der Sonnenhöhe und dem Sonnenazimut bietet die folgende Abbildung (Abbildung 23).⁷⁰

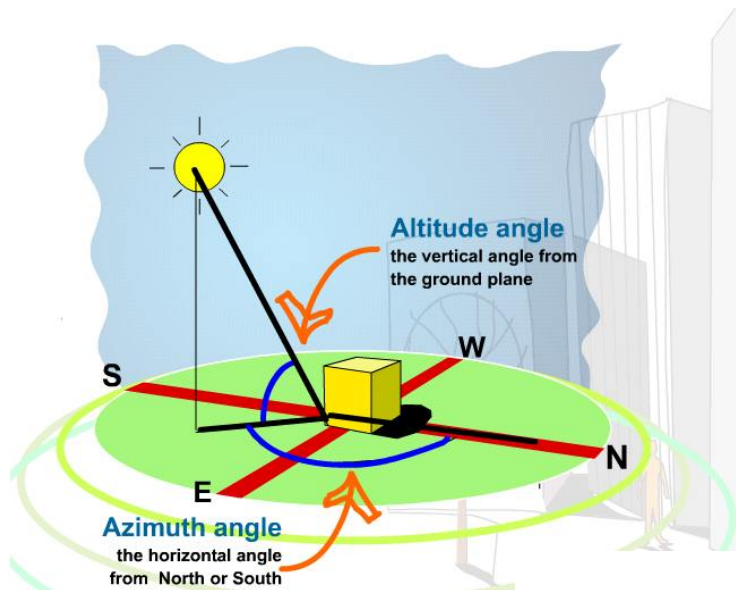


Abbildung 23: Beschreibung der Sonnenposition durch Sonnenhöhe und Sonnenazimut

⁷⁰ Aus dem Schulungstool der Software Shading Analyzer, erstellt an der University of Southern California, School of Architecture, aus dem Internet
<http://www.usc.edu/dept/architecture/mbs/tools/ecsdnld.html> (21.07.2008)

4.1.1. Sonnenbahndiagramm

Grafisch dargestellt werden Sonnenbahnen für einen konkreten Breitengrad in Sonnenbahndiagrammen, in entweder zylindrischen oder polaren Koordinatensystemen. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen je ein Sonnenbahndiagramm in Polarkoordinaten (Diagramm 2) und in Zylinderkoordinaten (Diagramm 3) für den 48. nördlichen Breitengrad.^{71,72}

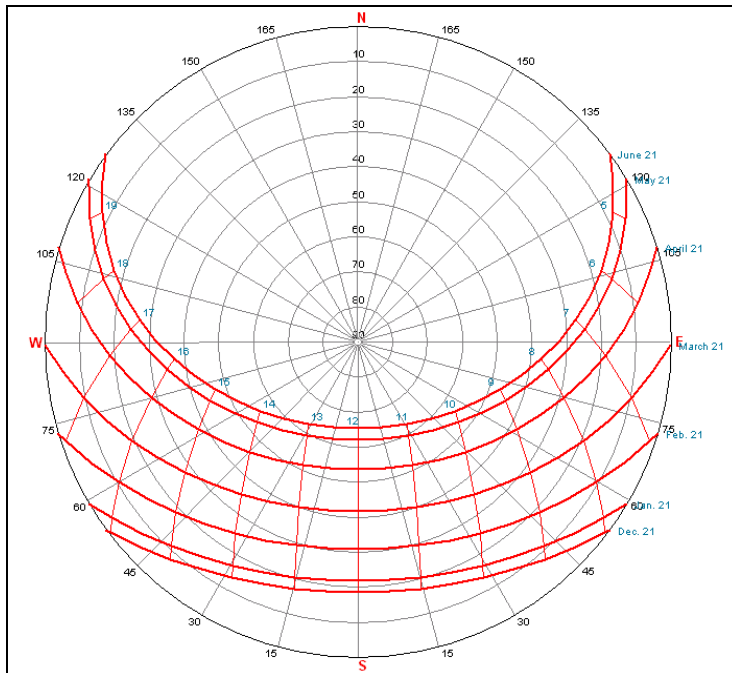


Diagramm 2: Polares Sonnenbahndiagramm für den 48. nördlichen Breitengrad

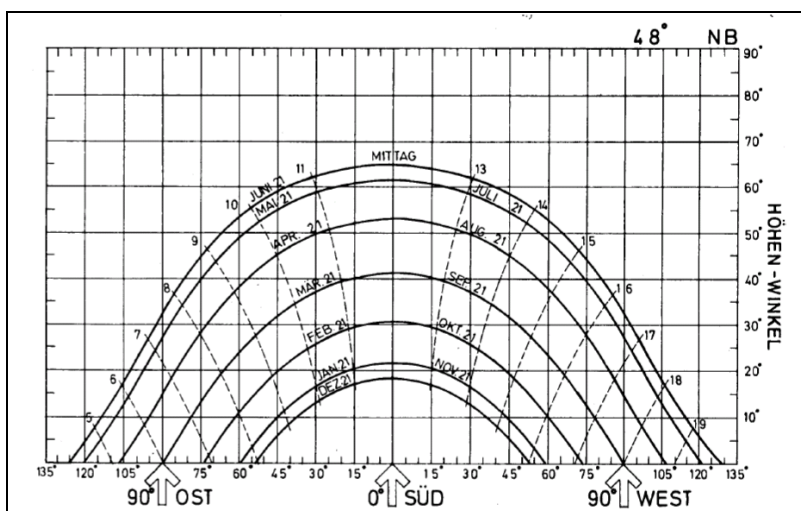


Diagramm 3: Zylindrisches Sonnenbahndiagramm für den 48. nördlichen Breitengrad

⁷¹ Ausdruck aus dem Softwarepaket Shading Analyser der University of Southern California, School of Architecture, Los Angeles, aus dem Internet <http://www.usc.edu/dept/architecture/mbs/tools/ecsdnld.html> (01.01.2009)

⁷² ÖNORM M 7701, Bbl 2 (2004)

4.1.2. Sonnenhöhen-Charakteristik

Der Begriff der Sonnenhöhen-Charakteristik wurde im Zuge der Vorarbeiten zur gegenständlichen Forschungsarbeit von den Autoren definiert als die standortspezifische Häufigkeitsverteilung der Sonnenhöhe in Stunden pro Jahr innerhalb von 5° Intervallen.⁷³

Eine Veranschaulichung dieser Sonnenhöhen-Charakteristik an drei exemplarischen, europäischen Standorten gibt die folgende Abbildung (Diagramm 4) wieder. Dargestellt sind die Sonnenhöhen-Charakteristika für Narvik mit 68° nördlicher Breite, Wien mit 48° nördlicher Breite und Malaga mit 37° nördlicher Breite.⁷⁴

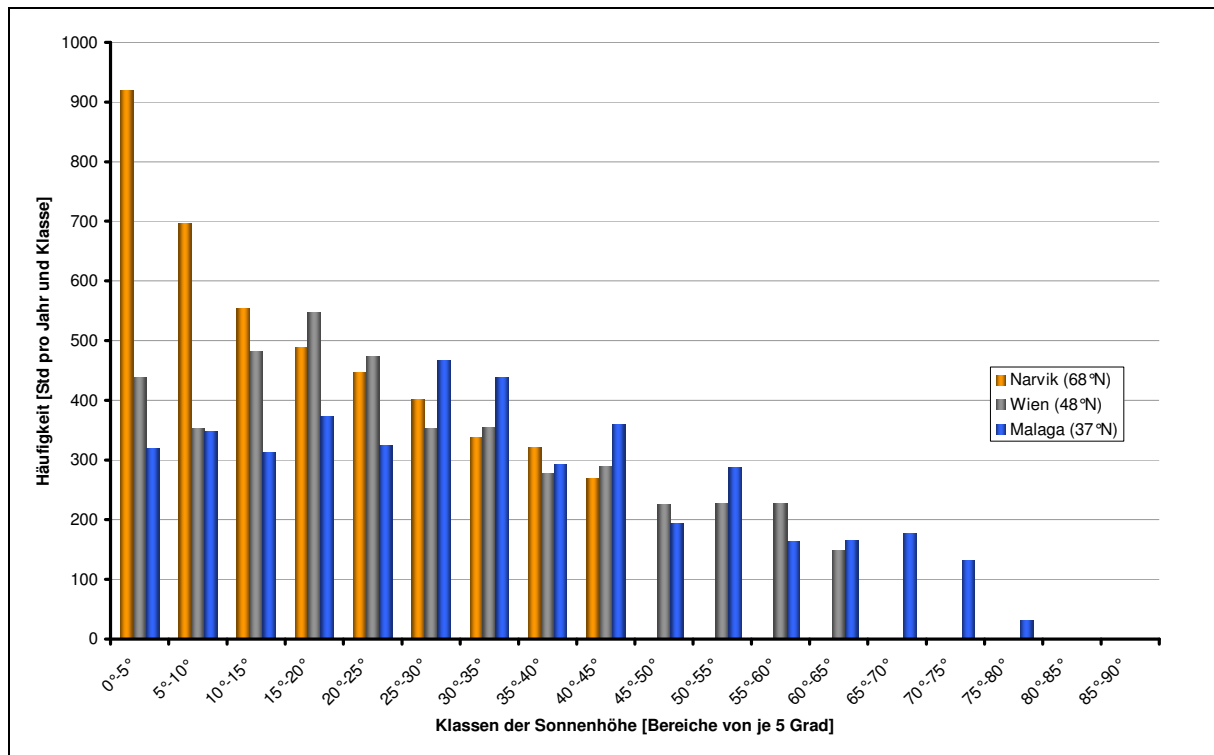


Diagramm 4: Häufigkeitsverteilung der Sonnenhöhe für drei europäische Standorte

Die dargestellten Häufigkeitsverteilungen weisen Breitengradabhängig charakteristische Verläufe auf: Erwartungsgemäß verschieben sich mit steigenden Breitengraden die Häufigkeiten zu niedrigeren Werten der Sonnenhöhe. Es besteht die Vermutung, dass sich aus der Tatsache dieser charakteristischen Häufigkeitsverteilung, in Verbindung mit anderen atmosphärischen Einflüssen, wie etwa der Luftfeuchte und der Staubbelastung, die wahrnehmbaren, charakteristischen Lichtstimmungen an Standorten erklären lassen.

Nachdem diese Effekte der sonnenrichtungsabhängigen Farbverschiebungen aber über die Fragestellung der gegenständlichen Arbeit hinausgehen, werden sie nicht weiter verfolgt.

⁷³ Holzer (2007)

⁷⁴ Diagramm 4: Peter Holzer, 2008

4.2. Extraterrestrische Sonnenstrahlung

Als extraterrestrische Sonnenstrahlung wird die an der Außenseite der Erdatmosphäre auftreffende Sonnenstrahlung bezeichnet. Sie wird in spektraler Zusammensetzung und Strahlungsdichte determiniert durch die Sonnenaktivität und durch die Entfernung zwischen Sonne und Erde. Ausgehend von einer mittleren Strahlungsdichte an der Photosphäre der Sonne von 63.000 kWh/m² und einer mittleren Entfernung zwischen Sonne und Erde von ca. 25.000 Erdradien ergibt sich die extraterrestrische solare Bestrahlungsdichte⁷⁵ als weitgehend konstante Größe.

Die spektrale Zusammensetzung der Solarstrahlung ähnelt jener eines schwarzen Temperaturstrahlers mit einer Temperatur von 5.780 K mit einigen Abweichungen, die aus der selektiven Charakteristik von Gasstrahlung und -absorption in der Sonnenatmosphäre herrühren.

4.2.1. Totale Solare Bestrahlungsdichte und Solarkonstante

Die Bestrahlungsdichte auf ein normal zur Einstrahlungsrichtung ausgerichtetes Flächenelement an der Außengrenze der Erdatmosphäre wird als die Totale Solare Bestrahlungsdichte⁷⁶ bezeichnet und im Folgenden mit TSI abgekürzt. Sie unterliegt Schwankungen im Rhythmus der Sonnenrotation von im Mittel ca. 27 Tagen⁷⁷ und jährlichen Schwankungen aufgrund des variierenden Abstands zwischen Sonne und Erde. Die Schwankungen aufgrund der Sonnenrotation betragen bis zu $\pm 0,2\%$, jene aufgrund der jahreszeitlichen Änderung des Abstands zwischen Sonne und Erde betragen $\pm 3,5\%$.⁷⁸

Der 27-tägliche Mittelwert von TSI bei mittlerem Abstand der Sonne von der Erde wird als Solarkonstante⁷⁹ bezeichnet. Sie beträgt ca. 1.366 W/m².^{80,81,82,83}

⁷⁵ In der Fachliteratur der Atmosphärenphysik wird die Bezeichnung der Bestrahlungsdichte häufig anstelle jener der Bestrahlungsstärke gebraucht, was auch in der gegenständlichen Arbeit weitgehend übernommen wird. Englische Bezeichnung: irradiance

⁷⁶ Englische Bezeichnung: TSI – total solar irradiance

⁷⁷ Tatsächlich rotiert die Sonne in ihrer gasförmigen Struktur nicht gleich schnell, sondern an den Polen langsamer als am Äquator.

⁷⁸ Gueymard (2004)

⁷⁹ Englische Bezeichnung: Solar Constant

⁸⁰ Solar Constant: Construction of a Composite Total Solar Irradiance (TSI) Time Series from 1978 to present, Webartikel des PMOD - Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos, World Radiation Centert
<http://www.pmodwrc.ch/pmod.php?topic=tsi/composite/SolarConstant> (21.12.2008)

⁸¹ ASTM E490-00a (2006)

⁸² Gueymard Christian: User's manual of SMARTS 2.9.5, 2006, S.34-35, aus dem Internet <http://www.nrel.gov/rredc/smarts/> (01.01.2009)

⁸³ ASTM E490-00a (2006)

Über die genannten 27-täglichen und jährlichen Schwankungen hinaus sind längerfristige zyklische Schwankungen der Sonnenaktivität dokumentiert. Es handelt sich dabei um Schwankungen im 11-Jahresrhythmus der Sonnenfleckenzyklen, um Schwankungen im 50- bis 140-jährlichen Gleisenbergzyklus und um Schwankungen im 160- bis 260-jährlichen Suesszyklus.⁸⁴

Seit 1978 werden mittels satellitengestützter Radiometer kontinuierliche Messungen der Totalen Solaren Bestrahlungsdichte vorgenommen und dokumentiert. Die folgende Abbildung (Diagramm 5) zeigt den Verlauf der Totalen Solaren Bestrahlungsdichte aus einer Zusammenschau verschiedener Messreihen, publiziert vom Physikalisch-Meteorologischen Observatorium Davos, World Radiation Center (PMOD/WRC). Deutlich erkennbar ist die Charakteristik der 11-Jahreszyklen mit der Schwankungsbreite von weniger als 0,2%. Erkennbar ist auch die Tatsache, dass sich die Sonne gegenwärtig⁸⁵ in einer Phase minimaler Sonnenaktivität befindet.^{86,87}

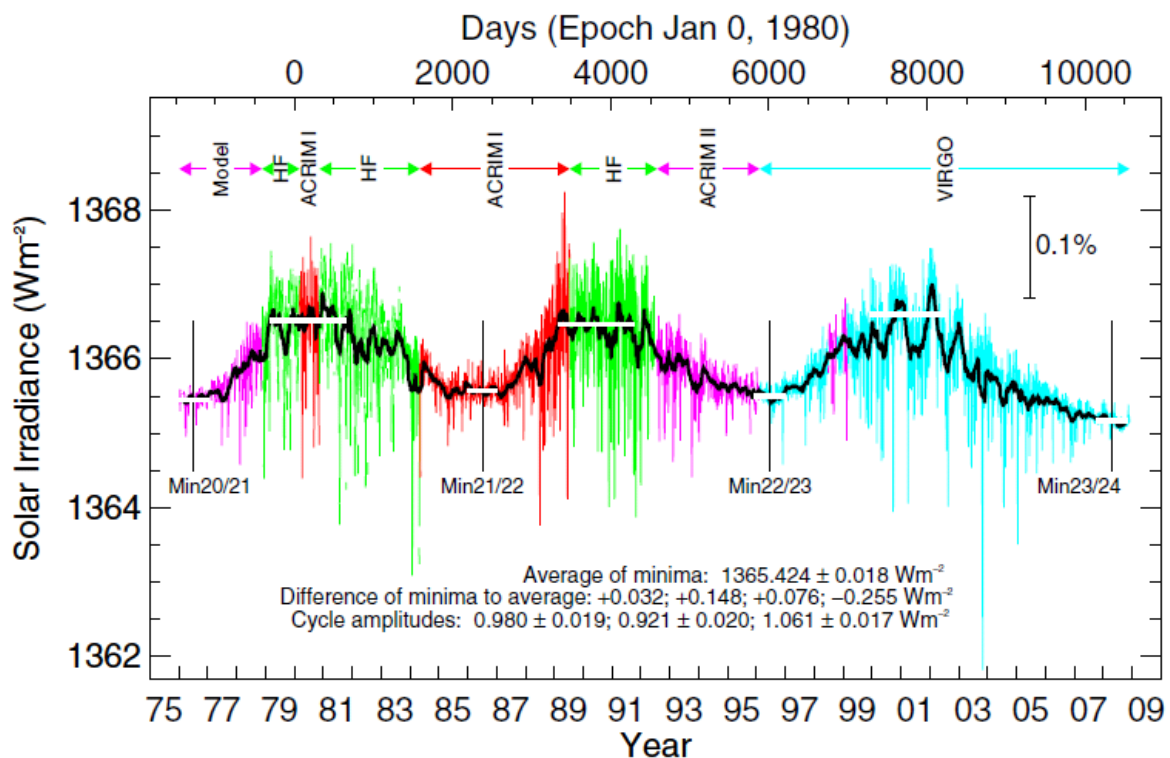


Diagramm 5: Gemessener Verlauf der Totalen Solaren Bestrahlungsdichte 1978-2008

⁸⁴ Ogurtsov et al. (2002)

⁸⁵ 2009

⁸⁶ Solar Constant / Construction of a Composite Total Solar Irradiance (TSI) Time Series from 1978 to present, Webartikel des PMOD - Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos, World Radiation Center, aus dem Internet <http://www.pmodwrc.ch/pmod.php?topic=tsi/composite/SolarConstant> (21.12.2008)

⁸⁷ Fröhlich (2005)

4.2.2. Historische Schwankungen der extraterrestrischen Bestrahlungsdichte

Weitergreifende Rückblicke auf die Schwankungen der Sonnenaktivität müssen Rekonstruktionsrechnungen anwenden. Informationsquellen sind:

- 1) Sonnenfleckenbeobachtungen mit Teleskopen seit etwa 1850
- 2) Sonnenfleckenbeobachtungen mit freiem Auge wie sie insbesondere in China bereits seit mehreren hundert Jahren nach Christus durchgeführt und aufgezeichnet werden
- 3) Messungen der kosmisch generierten Isotopen ^{10}Be im Polareis und ^{14}C in Pflanzen
- 4) Historische Polarlichtbeobachtungen

Eine repräsentative Studie des Instituts für Astronomie der ETH Zürich, Schweiz und des Max Planck Instituts für Aeronomie in Kaltenburg-Lindau, Deutschland rekonstruiert den Verlauf der extraterrestrischen Bestrahlungsdichte der letzten dreihundert Jahre.⁸⁸

Die Schwankungsbreite der extraterrestrischen Bestrahlungsdichte innerhalb des untersuchten Zeitraums wird in dieser Studie mit $\pm 0,4\%$ angegeben. Gleichzeitig wird eine Korrelation zum, ebenfalls rekonstruierten, Verlauf der Jahresmitteltemperaturen der nördlichen Hemisphäre nach Groveman und Landsberg festgestellt, welcher innerhalb desselben Zeitraums von 300 Jahren eine Schwankungsbreite von $\pm 0,5$ K aufweist.⁸⁹

Dieser Studie ist auch die folgende Abbildung (Diagramm 7) entnommen, in der zwei unabhängige Rekonstruktionen der 11-Jahres-Mittelwerte der extraterrestrischen Bestrahlungsdichte bezogen auf die linke Skala und dargestellt mit dünnen Linien überlagert wird mit der Rekonstruktion der Jahresmitteltemperaturen der nördlichen Hemisphäre bezogen auf die rechte Skala und dargestellt in einer dicken durchgezogenen Linie. Erkennbar ist die Korrelation zwischen der Sonnenaktivität und der Jahresmitteltemperatur. Die Abweichung der beiden Rekonstruktionen der Bestrahlungstärke gibt nach Einschätzung der Autoren einen Hinweis auf das Maß der Unsicherheit der Ergebnisse.⁹⁰

⁸⁸ Solanki und Fligge (2001)

⁸⁹ Groveman und Landsberg (1979)

⁹⁰ Solanki und Fligge (2001)

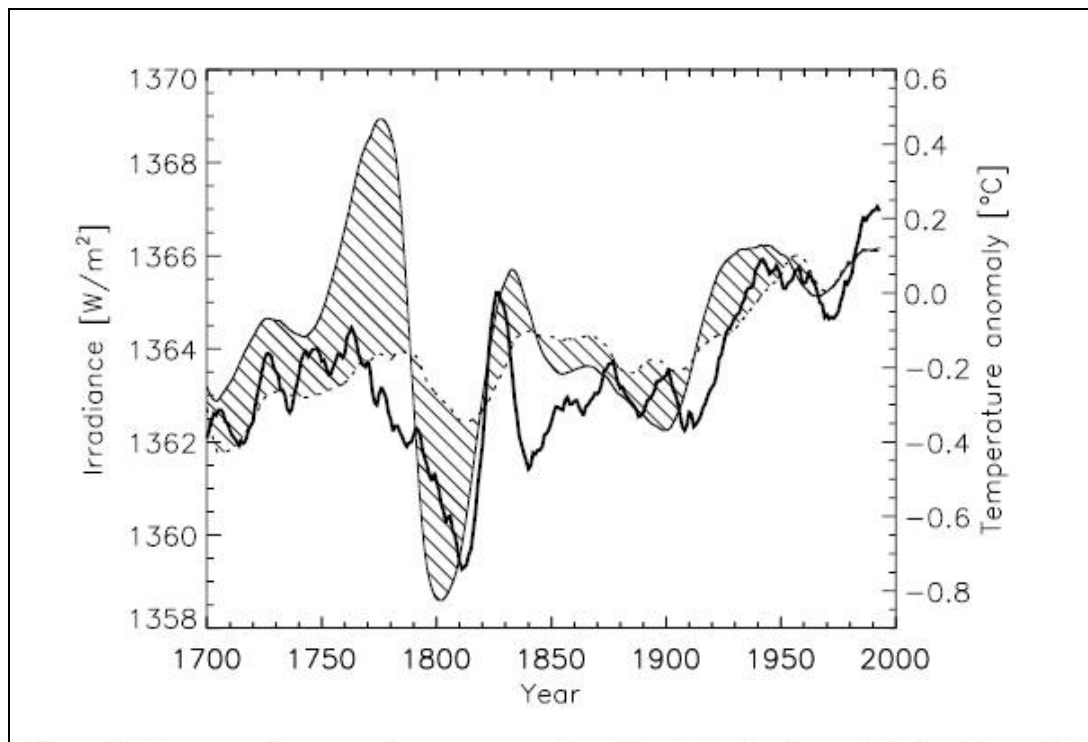


Diagramm 6: Rekonstruktion der Solaren Bestrahlungsichte

Die Rekonstruktion der vergangenen 1.000 Jahre wird in einer Studie, durchgeführt an zwei russischen Instituten in Kooperation mit der Universität Helsinki, versucht.⁹¹ Es gelang im Rahmen dieser Untersuchung die Existenz der langfristigen Zyklen der Sonnentätigkeit nach Gleisenberg und Suess nachzuweisen. Die Schwankungsbreite der extraterrestrischen Bestrahlungsichte wird in dieser Studie nicht quantitativ, sondern nur implizit aus der ermittelten Isotopenkonzentration im Polareis angegeben. Schwankungen der rekonstruierten Jahresmitteltemperaturen der nördlichen Hemisphäre werden aus einer Studie von Mann et al. zitiert und innerhalb des untersuchten Zeitraums von 1.000 Jahren mit einer Schwankungsbreite von weniger als $\pm 0,4$ K angegeben.⁹² Studienergebnisse, die auf einer oder mehreren dieser rekonstruktiven Methoden aufbauen, sind naturgemäß mit erheblicher Unsicherheit behaftet.^{93,94,95,96}

⁹¹ Ogurtsov et al. (2002)

⁹² Mann et al. (1999)

⁹³ Nichts desto Trotz sind gerade diese Studien, in Verbindung mit der Rekonstruktion des langfristigen historischen Temperaturverlaufs, immer wieder die Basis für einen Expertenstreit um die Ursachen des Klimawandels. So werden aus der Korrelation zwischen Sonnenaktivität und terrestrischen Temperaturen nach wie vor Theorien abgeleitet, welche die antropogene Komponente des Klimawandels in Abrede stellen. Was von der weitaus überwiegenden Zahl der einschlägig tätigen Wissenschaftler mit entschiedenen Entgegnungen beantwortet wird.

⁹⁴ Landscheidt T., Sonnenaktivität als dominanter Faktor der Klimadynamik, Eigenpublikation des Schroeter-Institut zur Erforschung der Zyklen der Sonnenaktivität, Nova Scotia, Kanada, <http://www.geocities.com/capecanaveral/4310/klima/landscheidt/sonne1.htm> (30.12.2008)

⁹⁵ Kromp-Kolb (2005)

⁹⁶ Laut (2003)

4.2.3. Spektrum der extraterrestrischen Sonnenstrahlung

Die spektrale Zusammensetzung der extraterrestrischen Sonnenstrahlung gleicht in erster Näherung jener eines schwarzen Temperaturstrahlers mit einer Temperatur von 5.780 K, was gut mit der Temperatur an der Oberfläche der Photosphäre der Sonne korreliert. Darüber hinaus weist das extraterrestrische Spektrum aber markante Abweichungen vom idealen Temperaturstrahlungsprofil auf, die durch die selektive Emission und Absorption von Gasen im Bereich der Sonne hervorgerufen werden.

Eine international anerkannte Festlegung der spektral aufgelösten extraterrestrischen Sonnenstrahlung erfolgte durch die American Society for Testing and Materials (ASTM)⁹⁷ in dem Dokument ASTM E490-00. Dieses Dokument wurde von Christian A. Gueymard auf Basis langjähriger Vorarbeit erstellt und erstmals im Jahr 2000 publiziert. Gegenwärtig liegt eine gültige Ausgabe aus dem Jahr 2006 vor.^{98, 99}

Das Spektrum des Dokuments ASTM E490-00 der extraterrestrischen Sonnenstrahlung deckt den Wellenlängenbereich von 0,5 nm bis 1.000 µm ab und integriert zu einer Solarkonstante von 1.366,1 W/m². Dasselbe Spektrum ist auch den Berechnungen des Softwarepakets Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine mit der im Folgenden verwendeten Kurzbezeichnung SMARTS zugrunde gelegt. SMARTS wird in der gegenständlichen Arbeit zur Ermittlung der terrestrischen Sonnenstrahlung zu den definierten Referenzzeitpunkten verwendet.¹⁰⁰

Die folgende Abbildung (Diagramm 7) zeigt die spektrale Verteilung der Intensität der extraterrestrischen Sonnenstrahlung nach ASTM E490-00 bzw. nach Gueymard (2004) sowie, ihr überlagert, die spektrale Verteilung der Strahlung eines schwarzen Temperaturstrahlers bei 5.780 K und bei identischer Strahlungsleistung.¹⁰¹

⁹⁷ <http://www.astm.org/> (16.05.2009)

⁹⁸ Gueymard Christian: User's manual of SMARTS 2.9.5, 2006, S.34-35, aus dem Internet <http://www.nrel.gov/rredc/smarts/> (01.01.2009)

⁹⁹ ASTM E490 - 00a (2006)

¹⁰⁰ Gueymard Christian: SMARTS 2.9.5, Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine, 1994 - 2005, NREL - National Renewable Energy Laboratory, U.S.A, Golden, Colorado, aus dem Internet <http://www.nrel.gov/rredc/smarts/> (01.01.2009)

¹⁰¹ Diagramm 7 Peter Holzer, 2008

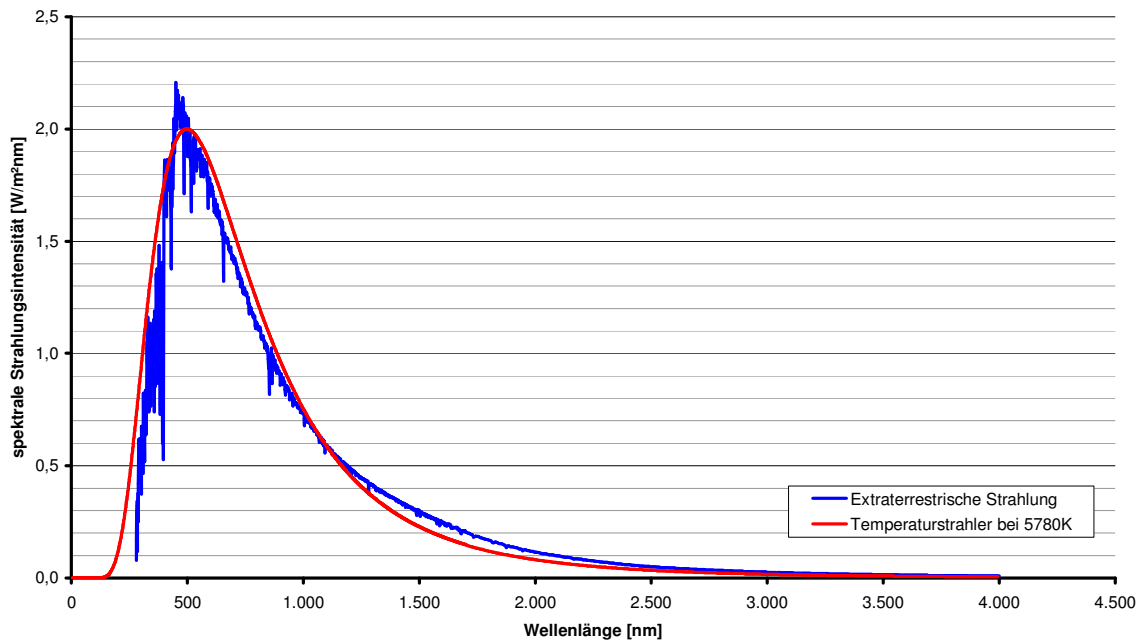


Diagramm 7: Spektraler Verlauf der extraterrestrischen Strahlung überlagert mit der Strahlungsemission eines Temperaturstrahlers mit einer Temperatur von 5.780 K

4.3. Strahlungsdurchgang durch die Atmosphäre – Grundlagen und Kennzahlen

Während des Durchgangs durch die Atmosphäre wird die Sonnenstrahlung in ihrer Intensität, ihrem Verhältnis zwischen direktem und diffusem Anteil sowie in ihrer spektralen Zusammensetzung verändert. Mit diesen Veränderungen, ausgehend von der Zusammensetzung der Atmosphäre, über die Beschreibung der Phänomene der Extinktion der Sonnenstrahlung bis hin zu ausgewählten Kennzahlen zur quantitativen Beschreibung dieser Phänomene, setzen sich die folgenden Kapitel auseinander.

4.3.1. Zusammensetzung der Atmosphäre

Als Atmosphäre¹⁰² wird jene, etwa 120 km dicke Schicht um die Erdoberfläche bezeichnet, in der sich unter dem Einfluss der Erdanziehung dauerhaft Partikel befinden.

Die Atmosphäre setzt sich zusammen aus:

- > molekularem Stickstoff (N₂)
- > molekularem Sauerstoff (O₂)
- > sonstigen Gasen
- > Wasserdampf
- > Wassertropfen und Eiskristallen
- > Aerosolen

Molekularer Stickstoff und molekularer Sauerstoff bilden zusammen bereits 99% aller Atmosphärenbestandteile. In der Fachliteratur werden Sauerstoff und Stickstoff daher auch bisweilen als die „Luftmoleküle“ bezeichnet. Wasser kommt in der Atmosphäre in den drei Aggregatzuständen dampfförmig, flüssig und fest vor. Unter dem Sammelbegriff der Aerosole schließlich werden sämtliche Schwebstoffe zusammengefasst, wie Sand, Staub, Ruß, vulkanische Asche oder auch antropogene Luftverunreinigungen.

In der Höhenentwicklung weist die Atmosphäre charakteristische Bereiche auf, die jeweils von weitgehend partikelfreien Schichten, den sogenannten „Pausen“ voneinander getrennt werden:

- > Troposphäre bis ca. 12 km, nach oben begrenzt durch die Tropopause
- > Stratosphäre bis ca. 50 km, nach oben begrenzt durch die Stratopause
- > Mesosphäre bis ca. 86 km, nach oben begrenzt durch die Mesopause
- > Thermosphäre bis ca. 120 km

4.3.2. Phänomene der Strahlungsextinktion

Die – stets direkte – extraterrestrische Sonnenstrahlung wird bei ihrem Durchtritt durch die Atmosphäre abgeschwächt. Für diese Schwächung wird in der Meteorologie meist der Begriff der Extinktion verwendet. Hervorgerufen wird die Extinktion durch die physikalischen Phänomene der Streuung und der Absorption. Streuung tritt auf an den Hauptbestandteilen trockener Luft, also molekularem Stickstoff und molekularem Sauerstoff, sowie an Aerosolen, Wassertropfen und Eiskristallen. Absorption tritt auf an den bereits genannten Aerosolen, Wassertropfen und Eiskristallen sowie an den gasförmigen Bestandteilen der Luft.

¹⁰² aus dem Griechischen atmós: Luft und sphära: Kugel

4.3.2.1. Streuung

Die Streuung ist eine Sonderform der Reflexion, nämlich jene an kleinen Partikeln. Nach dem jeweiligen Physiker, der sich um die quantitative Beschreibung des Phänomens der Streuung verdient gemacht hat, wird die Streuung an Molekülen kleiner der Wellenlänge, insbesondere an Luftmolekülen, als Rayleigh-Streuung und jene an Molekülen größer der Wellenlänge, insbesondere an Aerosolen, als Mie-Streuung bezeichnet.

Streuung führt zur Ablenkung der auftreffenden Direktstrahlung. Der zur Erdoberfläche gerichtete Anteil der gestreuten Strahlung trifft dort als diffuse Himmelsstrahlung auf.

Über das Spektrum der Sonnenstrahlung verteilt, tritt die Streuung mit steigender Wellenlänge der Strahlung signifikant fallend auf, somit am stärksten im UV-Bereich und im Blaubereich der Sonnenstrahlung, wodurch beispielsweise die blaue Färbung des Taghimmels oder auch die rote Färbung von Objekten am Morgen- oder Abendhimmel begründet ist.

Die Streuung an Aerosolen korreliert direkt proportional mit der Trübung¹⁰³ der Atmosphäre und somit indirekt proportional mit der Sichtweite¹⁰⁴. Zahlreiche Kennzahlen wurden eingeführt zur Quantifizierung der Streuung durch Aerosole, wie in den folgenden Kapiteln beschrieben wird.

4.3.2.2. Absorption

Absorption führt zur Abschwächung der direkten Sonnenstrahlung durch den Energieeintrag aus der Strahlung in eine Schwingungsanregung und in Folge einer Erwärmung der absorbierenden Partikel oder Moleküle. Die absorbierte Wärme wird durch Konvektion oder durch Eigenstrahlung in weitaus größeren Wellenlängen wieder abgegeben. Absorption tritt an praktisch allen Atmosphärenbestandteilen auf, mit Ausnahme des Luftmoleküls Stickstoff.

Im Gegensatz zur Streuung, die eine exponentiell fallende Intensität bei steigender Wellenlänge aufweist, sind die Absorptionseigenschaften etwa von Gasen hochgradig selektiv. Diese Charakteristik der Gasabsorption wird im Spektrum der terrestrischen Solarstrahlung in Form markanter Intensitätseinschnitte innerhalb schmaler Frequenzbänder ablesbar.

¹⁰³ Englische Bezeichnung: haziness

¹⁰⁴ Englisch Bezeichnung: visibility

4.3.3. Basisformeln der atmosphärischen Strahlungsextinktion

Quantitativ beschrieben wird die Strahlungsextinktion durch das Lambert-Beer'sche Gesetz (Formel 1) über die Schwächung der Strahlungsintensität beim Durchgang durch eine absorbierende und streuende Substanz. Es gilt:

$$E = -\lg \frac{I_1}{I_0} \quad \text{oder} \quad I_1 = I_0 \cdot e^{(-E)}$$

mit E ... Extinktionskoeffizient

mit I_1 ... Intensität der transmittierten Strahlung

mit I_0 ... Intensität der einfallenden Strahlung

Formel 1: Lambert-Beer'sches Gesetz der Strahlungsextinktion, 1. Schreibweise

Zur Anwendung in der Atmosphärenphysik ist es von Vorteil, den Extinktionskoeffizient durch das Produkt aus optischer Dicke und atmosphärischer Masse auszudrücken. Das Lambert-Beer'sche Gesetz (Formel 2) wird dann wie folgt angeschrieben:

$$I_1 = I_0 \cdot e^{(-m \cdot \tau)}$$

mit I_1 ... Intensität der transmittierten Strahlung

mit I_0 ... Intensität der einfallenden Strahlung

mit m ... atmosphärische Masse¹⁰⁵

mit τ ... optische Dicke der Atmosphäre bei vertikalem Strahlungseinfall

Formel 2: Lambert-Beer'sches Gesetz der Strahlungsextinktion, 2. Schreibweise

Die atmosphärische Masse ist das Verhältnis aus der tatsächlich durchstrahlten Luftmasse zur Luftmasse bei vertikalem Strahlungseinfall. In erster Näherung ergibt sich die atmosphärische Masse aus dem Kehrwert des Kosinus des Zenitwinkels der Sonne. Für genauere Rechnungen muss aber sowohl die Erdkrümmung als auch die zum Teil nichthomogene Schichtung der relevanten Partikel berücksichtigt werden.

Die optische Dicke ist der Extinktionskoeffizient im Lambert-Beer'schen Gesetz (Formel 3) bei vertikaler Einstrahlrichtung der Sonnenstrahlung.

¹⁰⁵ Englische Bezeichnung: optical mass

Der Term $e^{(-m\cdot\tau)}$ wird als atmosphärischer Transmissionskoeffizient T bezeichnet.¹⁰⁶
Es gilt also:

$$T = e^{(-m\cdot\tau)}$$

Formel 3: Atmosphärischer Transmissionskoeffizient

Für einige Anwendungen ist auch die folgende Schreibweise (Formel 4) von Vorteil:

$$I_1 = I_0 \cdot e^{(-L\cdot k)}$$

mit I_1 ... Intensität der transmittierten Strahlung
mit I_0 ... Intensität der einfallenden Strahlung
mit k ... gesamte Wegstrecke der Strahlung
mit L ... wegstreckenbezogener Extinktionskoeffizient

Formel 4: Lambert-Beer'sches Gesetz der Strahlungsextinktion, 3. Schreibweise

Insbesondere für die Absorption von Gasen wird auch die folgende Form des Lambert-Beer'schen Gesetzes (Formel 5) verwendet:

$$I_1 = I_0 \cdot e^{(-L\cdot C\cdot m)}$$

mit I_1 ... Intensität der transmittierten Strahlung
mit I_0 ... Intensität der einfallenden Strahlung
mit L ... wegstreckenbezogener Extinktionskoeffizient
mit C ... totale Säulenhöhe¹⁰⁷ des jeweiligen Atmosphärenbestandteils
mit m ... atmosphärische Masse

Formel 5: Lambert-Beer'sches Gesetz der Strahlungsextinktion, 4. Schreibweise

¹⁰⁶ Englische Bezeichnung: atmospheric transmittance

¹⁰⁷ Englische Bezeichnung: total abundance. „Totale Säulenhöhe“ wird im Deutschen auch als Säulenmenge bezeichnet und dargestellt als die Dicke des Gasfilms in einer Säule gleichbleibenden Durchmessers unter der Referenzbedingung von 0°C und 1 atm.

Die Beiträge der einzelnen Atmosphärenbestandteile zur gesamten Extinktion können als Summen der Einzelbeiträge dargestellt werden (Formel 6). Der Extinktionskoeffizient, in diesem Fall die optische Dicke, wird daher in einzelne Summanden aufgelöst. Es gilt etwa:

$$\tau = \tau_R + \tau_{Gas} + \tau_A$$

mit τ_R ... optische Dicke durch Rayleigh-Streuung, im Besonderen an Luftmolekülen

mit τ_{Gas} ... optische Dicke durch Absorption, im Besonderen an Gasmolekülen und Wasserdampf

mit τ_A ... optische Dicke durch Mie-Streuung, im Besonderen an Aerosolen

Formel 6: Summenformel für die optische Dicke, 1. Schreibweise

Bisweilen wird τ_{Gas} noch in weitere Summanden zerlegt, die die Wirkung der einzelnen Gase abbilden (Formel 7). Es gilt dann beispielsweise:

$$\tau_{Gas} = \tau_g + \tau_{NO_2} + \tau_w + \tau_{O_3}$$

mit τ_g ... optische Dicke durch homogene Gase wie CO_2 und O_2

mit τ_{NO_2} ... optische Dicke durch Stickoxid

mit τ_w ... optische Dicke durch Wasserdampf

mit τ_{O_3} ... optische Dicke durch Ozon

Formel 7: Summenformel für die optische Dicke, 2. Schreibweise

Es ist zu beachten, dass auch die atmosphärische Masse mit den jeweils beschriebenen Extinktionsphänomenen variiert, was auf die unterschiedliche Schichtung der einzelnen Substanzen innerhalb der Atmosphäre zurückzuführen ist.

Sämtliche genannten Zusammenhänge gelten in der bisher verwendeten Schreibweise für die Strahlungsintensität über das gesamte Spektrum, also über das Integral über die jeweiligen spektralen Intensitäten.

Sowohl Absorption als auch Streuung weisen eine immanent Wellenlängen abhängige Charakteristik auf. Für die mathematische Abbildung der einzelnen Extinktionsvorgänge ist daher eine Wellenlängen bezogene Betrachtung erforderlich.

Das Lambert-Beer'sche Gesetz kann in allen seinen Schreibweisen auch als Funktion der Wellenlänge formuliert werden (Formel 8). Es gilt beispielsweise:

$$I_1(\lambda) = I_0(\lambda) \cdot e^{[-m_R \tau_R(\lambda) - m_{Gas} \tau_{Gas}(\lambda) - m_A \tau_A(\lambda)]}$$

$$I_1(\lambda) = I_0(\lambda) \cdot T_R \cdot T_{Gas} \cdot T_A$$

mit $I_1 = \int_{\lambda} I_1(\lambda) \cdot d\lambda$

mit λ ... Wellenlänge der Strahlung

mit I_1 ... Intensität der transmittierten Strahlung

mit I_0 ... Intensität der einfallenden Strahlung

mit m_i ... Atmosphärische Masse, unterteilt nach den Phänomenen

mit τ_i ... optische Dicken der Atmosphäre bei vertikalem Strahlungseinfall, unterteilt nach den Phänomenen der Rayleigh-Streuung an Luftmolekülen, der Extinktion durch Gase und Wasserdampf sowie der Mie-Streuung an Aerosolen

mit T_i ... atmosphärischer Transmissionskoeffizient, unterteilt nach den Phänomenen

Formel 8: Lambert-Beer'sches Gesetz der Strahlungsextinktion als Funktion der Wellenlänge

4.3.4. Planetarische Albedo und Energiebilanz der Erde

Eine universell einsetzbare Kennzahl zur quantitativen Beschreibung der Extinktion beim Durchgang der Sonnenstrahlung durch die Atmosphäre ist die Planetarische Albedo. Sie bezeichnet jenen Anteil der extraterrestrischen Sonnenstrahlung, der von der Atmosphäre oder der Erdoberfläche reflektiert wird, bilanziert an der Außenseite der Atmosphäre.¹⁰⁸

Die Kenntnis der Planetarischen Albedo ist ein wichtiger Baustein zur Erstellung einer Energiebilanz der Erde. Definitionsgemäß lässt die Planetarische Albedo keine Aussagen hinsichtlich der Verteilung von direkter und diffuser terrestrischer Strahlung und hinsichtlich der spektralen Zusammensetzung der Strahlung zu.

Erste Versuche, unter globaler und zeitlicher Mittelung die Energiebilanz der Erde zu berechnen wurden bereits 1917 von Dines angestellt.¹⁰⁹ Eine weitere Arbeit zur global und zeitlich gemittelten Energiebilanz der Erde mit Referenzcharakter haben Kiehl und Trenberth 1997 publiziert.¹¹⁰ Unter Auswertung der seit 1978 vorliegenden satellitengestützten Strahlungsmessungen, insbesondere aus dem Earth Radiation Budget Experiment (ERBE)¹¹¹ und aus dem International Satellite Cloud Cover Climatology

¹⁰⁸ Englische Bezeichnung: TOA - Top of Atmosphere

¹⁰⁹ Dines (1917)

¹¹⁰ Kiehl und Trenberth (1997)

¹¹¹ ERBE - Earth Radiation Budget Experiment, aus dem Internet <http://asd-www.larc.nasa.gov/erbe/ASDerbe.html> (01.01.2009)

Project, kurz als ISCCP¹¹² bezeichnet, bestätigen sie in ihren Studien einen mittleren Wert der Planetarischen Albedo von 31% und belegen gleichzeitig die signifikante örtliche und zeitliche Varianz der Planetarischen Albedo, primär dominiert durch die veränderliche Reflexion an den Wolkenoberflächen und erst sekundär durch Veränderung der terrestrischen Reflexion durch etwa Schnee und Eis. Die folgende schematische Darstellung (Abbildung 24) der Energiebilanz der Erde ist der genannten Arbeit von Kiehl und Trenberth entnommen.¹¹³

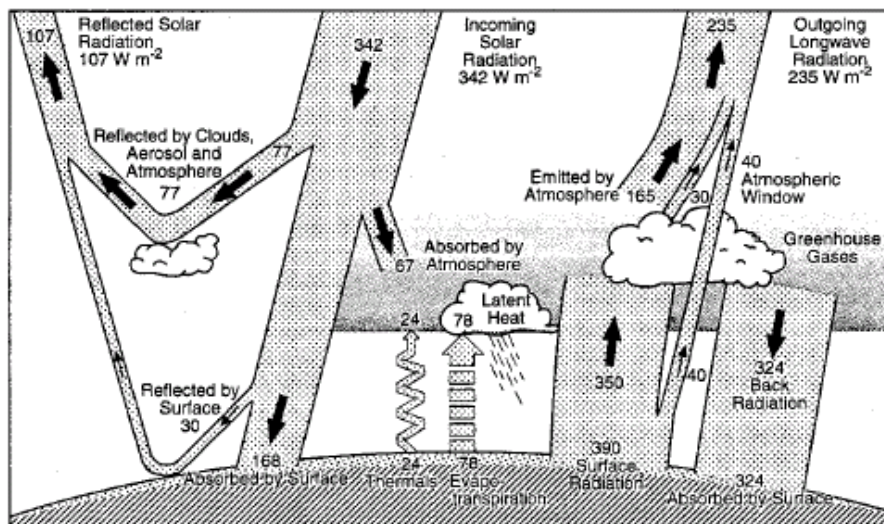


Abbildung 24: Energiebilanz der Erde nach Kiehl und Trenberth, 1997

Eine exemplarische Darstellung der weltweiten Verteilung der Mittelwerte der Planetarischen Albedo über das Quartal Dezember bis Februar bietet die folgende Abbildung. (Abbildung 25)¹¹⁴

¹¹² ISCCP – International Satellite Cloud Cover Project, aus dem Internet <http://isccp.giss.nasa.gov/index.html> (01.01.2009)

¹¹³ Kiehl und Trenberth (1997)

¹¹⁴ Hantel (2005)

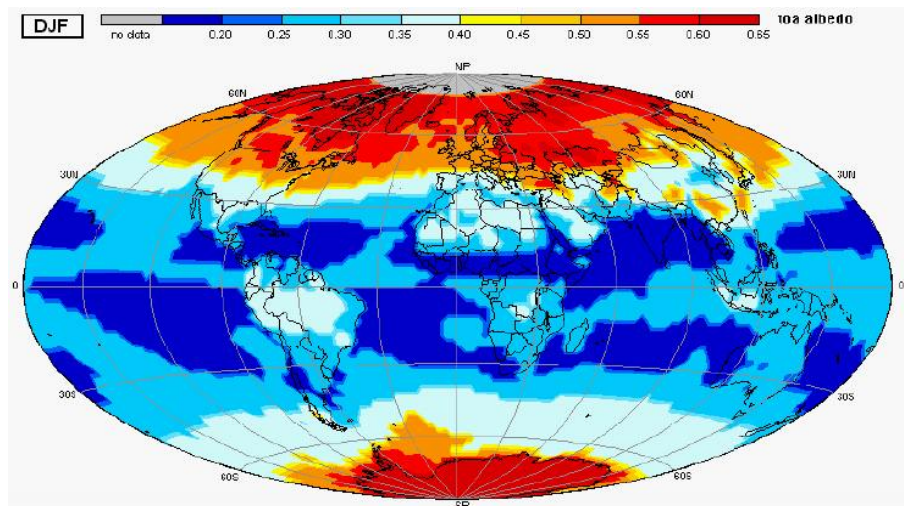


Abbildung 25: Weltweite Planetarische Albedo für die Periode von Dezember bis Februar

4.3.5. Trübungsfaktor nach Linke

Der Linke'sche Trübungsfaktor, Formelzeichen T_L oder Γ , gibt als dimensionslose Verhältniszahl die Proportion an zwischen τ , der tatsächlichen optischen Dicke und τ_C , der optischen Dicke der ideal trockenen und sauberen Referenzatmosphäre, in der Strahlungsextinktion ausschließlich durch Ozon-Absorption und durch Rayleigh-Streuung an Molekülen der Luft erfolgt. Der Linke-Faktor wurde von seinem Namensgeber erstmals 1922 publiziert.¹¹⁵

Unter Heranziehung des Linke-Faktors lässt sich das Lambert-Beer'sche Gesetz (Formel 9) demnach wie folgt anschreiben:

$$I_1 = I_0 \cdot \exp(-T_L \cdot \tau_C \cdot m)$$

mit I_1 ... Intensität der transmittierten Strahlung

mit I_0 ... Intensität der einfallenden Strahlung

mit m ... Atmosphärische Masse

mit τ_C ... optische Dicke der Referenzatmosphäre bei vert. Strahlungseinfall

mit T_L ... Trübungsfaktor nach Linke

τ_C ist abhängig von der durchstrahlten Luftmasse m und lässt sich nach der Formel von W. Heindl, 1976, parametrisiert berechnen zu:¹¹⁶ $\tau_C = (9,38076 + 0,912018 \cdot m)^{-1}$

Formel 9: Lambert-Beer'sches Gesetz, Schreibweise mit Linke-Faktor

Bildlich kann der Linke-Faktor auch als die äquivalente Anzahl von seriellen, ideal trockenen und sauberen Referenzatmosphären betrachtet werden, welche dieselbe

¹¹⁵ Linke und Boda (1922)

¹¹⁶ Heindl und Koch (1976)

Abschwächung auf die Sonnenstrahlen ausüben, wie die reale Atmosphäre. Der minimal auftretende Linke-Faktor ist demnach gleich eins. Unter trüben Bedingungen können Linke-Faktoren bis zehn und darüber auftreten.

Für den klaren Julitag wird in der ÖNORM B 8110-3 zur Berechnung der Sommertauglichkeit von Räumen ein Linke-Faktor von 4,5 festgelegt.¹¹⁷

Die Verwendung des Linke-Faktors ist in Ingenieursanwendungen der technischen Sonnenenergienutzung weit verbreitet. Für weiterführende Anwendungen in der Atmosphärenphysik ist er nur bedingt geeignet, erstens weil er ein Breitbandfaktor über alle Wellenlängen ist und zweitens weil er nicht nur die eigentliche Trübung durch Aerosole, sondern auch die Extinktion durch Wasserdampf abbildet.

4.3.6. Trübungsfaktor nach Ångström

Physikalisch beschreibt der Trübungsfaktor nach Ångström, auch Ångström-Koeffizient β , die optische Dicke der tatsächlichen Atmosphäre bei einer Referenz-Wellenlänge von 1 μm . Er wird in der von Ångström 1929 erstmals publizierten Formel zur Abbildung der Wellenlängen abhängigen Extinktion durch Mie-Streuung an Aerosolen eingesetzt.¹¹⁸ Hinzuweisen ist darauf, dass der Wellenlängen-Exponent α in Wahrheit nicht konstant über die Wellenlänge ist. In Rechenmodellen zur Strahlungsextinktion in der Atmosphäre wird die unten stehende Ångström-Formel (Formel 10) daher häufig auf zumindest zwei Wellenlängenbereiche getrennt angewandt.

Es gilt:

$$\tau_A(\lambda) = \beta \cdot (\lambda / \lambda_0)^{-\alpha}$$

mit $\tau_A(\lambda)$... optische Dicke aufgrund von Mie-Streuung an Aerosolen

mit β ... Ångström-Koeffizient, gleichzeitig optische Aerosol-Dicke bei der Referenz-Wellenlänge von 1 μm

mit λ ... Wellenlänge der Strahlung

mit λ_0 ... Referenz-Wellenlänge von 1 μm

mit α ... Wellenlängen-Exponent

Formel 10: Ångström-Formel: spektrale optische Dicke aufgrund von Mie-Streuung

4.3.7. Diffusstrahlungsfaktor nach Reitz

Der Diffusstrahlungsfaktor nach Reitz¹¹⁹, mit dem Formelzeichen Π , gibt jenen Anteil der beim Durchgang durch die Atmosphäre gestreuten oder absorbierten Sonnenstrahlung an, der aufgrund von Streueffekten in der Atmosphäre als diffuse Himmelsstrahlung die Erdoberfläche erreicht.

¹¹⁷ ÖNORM B 8110-3 (1999) und ÖNORM B 8110-3/AC1 (2001)

¹¹⁸ Ångström (1929)

¹¹⁹ Englische Bezeichnung: scatter factor

Sein Zahlenwert liegt stets zwischen Null und Eins; mit Werten nahe Null bei vollständiger, dunkler Bewölkung; mit Werten nahe Eins bei hochnebelartiger Bewölkung. An klaren Strahlungstagen liegt der Reitz'sche Diffusstrahlungsfaktor in der Größenordnung von $\frac{1}{3}$.¹²⁰

¹²⁰ Kreč K.: GEBA Version 7.0 / Simulation des thermischen Verhaltens von Räumen, Raumgruppen oder Gebäuden / Handbuch des gleichnamigen Softwarepakets, 1995-2008 aus dem Internet http://www.krec.at/software/geba/downloads/GEBA_Handbuch.pdf (02.01.2008)

4.3.8. Grafische Darstellung der atmosphärischen Strahlungsextinktion

Das folgende Diagramm (Diagramm 8) zeigt die Abminderung der Sonnenstrahlung bei Atmosphärendurchtritt, exemplarisch für die Direktstrahlung zum Referenzzeitpunkt 15. Juni, auf eine Ebene normal zur Einstrahlungsrichtung.¹²¹ Deutlich erkennbar ist die signifikant Wellenlängen abhängige Extinktion der Strahlung beim Durchgang durch die Atmosphäre: Mit der Extinktion im ultravioletten Spektrum, hervorgerufen insbesondere durch Absorption an Ozon. Mit der markanten Extinktion im kurzwelligen Bereich des sichtbaren Spektrums, hervorgerufen durch Rayleigh-Streuung an Luftmolekülen und durch Mie-Streuung an Aerosolen. Schließlich mit den markanten Absorptionsbänder im langwelligen Bereich des sichtbaren Lichts und im Bereich des nahen Infrarots, hervorgerufen durch Gasabsorption, insbesondere durch Wasserdampf, und ebenfalls noch signifikant durch Sauerstoff und Kohlendioxid.

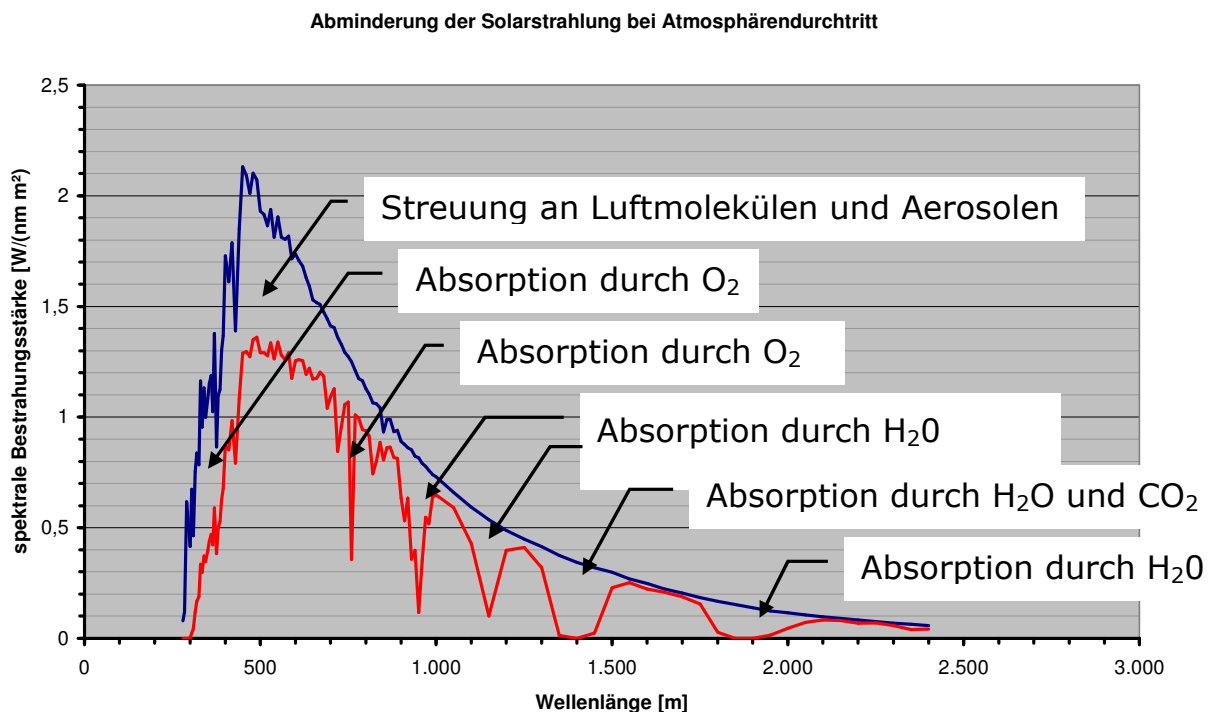


Diagramm 8: Extinktion der Direktstrahlung in der Atmosphäre am Referenzzeitpunkt 15. Juni, 12:00

¹²¹ Berechnet mit SMARTS 2.9.5 - Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine, Gueymard C., 1994 - 2005, NREL - National Renewable Energy Laboratory, U.S.A, Golden, Colorado

4.4. Strahlungsdurchgang durch die Atmosphäre - Berechnung

Für die gegenständliche Arbeit gilt es, die Strahlungsverhältnisse am Standort Wien zu festzulegenden Referenzzeitpunkten spektral aufgelöst zu berechnen. Wie bereits erwähnt, sind die so erhaltenen terrestrischen Spektren zunächst mit den Transmissionsfunktionen der Verglasungstypen und anschließend mit ausgewählten Wirkungs-Kurven der Photophysiologie spektral zu falten, um aus den solcherart gewonnen Ergebnissen Schlussfolgerungen betreffend der unter 2.1 formulierten Hypothese betreffend das epidemische Auftreten von Lichtmangelerscheinungen, ziehen zu können. Im Anschluss wird die Berechnung dieser terrestrischen Spektren wie folgt dokumentiert:

- > Erörterung standardisierter Referenzspektren
- > Diskussion unterschiedlicher Rechenmodelle
- > Auswahl eines Berechnungsprogramms
- > Dokumentation des in diesem Berechnungsprogramm verwendeten Formelapparats

4.4.1. Standardisierte Referenzspektren

Abgeleitet aus dem normierten Spektrum der extraterrestrischen Sonnenstrahlung liegen normierte Spektren der terrestrischen Sonnenstrahlung für eine definierte Einstrahlrichtung der Sonne und eine definierte Zusammensetzungen der Atmosphäre vor.

Es sind das die normierten Spektren der terrestrischen Sonnenstrahlung nach ASTM G173-03e1 der American Society for Testing and Materials und die der ISO 9845-1 aus dem Jahr 1992.^{122,123} Beide Dokumente definieren ein und dasselbe terrestrische Referenzspektrum der Sonnenstrahlung für eine atmosphärische Masse von 1,5 und für festgelegte, mittlere Atmosphärenzustände. Das solcherart festgelegte Spektrum wird für gemäßigte Klimazonen für Berechnungen an sonnentechischen Anlagen, wie photovoltaischen oder solarthermischen Systemen empfohlen.¹²⁴

Das genannte Referenzspektrum nach ASTM G173-03e1 beziehungsweise nach ISO 9845-1 beschreibt demnach die direkte und die globale spektrale Bestrahlungsintensität auf eine normal auf die Sonne ausgerichtete Fläche bei einem Höhenwinkel der Sonne von $41,81^\circ$.

Angesichts der Fragestellung der gegenständlichen Arbeit schließt sich eine Verwendung dieser normierten, per Definition nicht zeit- und ortssensitiven Spektren aus. Es müssen jedenfalls terrestrische Spektren für die spezifischen Referenzzeitpunkte, Atmosphärenzustände und den geografischen Standort generiert werden.

¹²² ASTM G173-03e1 (2003)

¹²³ ISO 9845-1 (1999)

¹²⁴ Angemerkt werden darf, dass das genannte Referenzspektrum mit eben jenem Softwarepaket SMARTS 2 berechnet wurde, das auch in der gegenständlichen Arbeit zur Berechnung der zeit- und ortsspezifischen Bestrahlungsstärken herangezogen wird.

4.4.2. Diskussion unterschiedlicher Rechenmodelle

Neben den genannten normativ festgelegten Referenzspektren der terrestrischen Sonnenstrahlung existieren mehrere, durchwegs softwaregestützte Rechenmodelle zur spektral aufgelösten Berechnung des Strahlungsdurchgangs durch die Atmosphäre.

Allen Rechenmodellen gemeinsam ist die parametrisierte Abbildung der beschriebenen Vorgänge von Absorption und Streuung in Wellenlängen abhängigen Formelapparaten. Hinsichtlich der Aufwändigkeit der Eingabe und auch der Rechengenauigkeit existieren zwei typische Unterscheidungsmerkmale:

Erstes Unterscheidungsmerkmal ist die Berücksichtigung der Schichtenstruktur der Atmosphäre. Während die komplexen Referenzprogramme die Schichtenstruktur der Atmosphäre mit den jeweils charakteristischen stofflichen Zusammensetzungen und den Temperatur- und Druckverhältnissen dieser Schichten differenziert abbilden, wird in den vereinfachten Modellen ein Formelapparat aufgestellt, der über die gesamte Atmosphärenausdehnung angenäherte, temperatur-, druck- und feuchtigkeitsabhängige Extinktionskoeffizienten für die relevanten Phänomene der Streuung und der Absorption berücksichtigt.

Die maßgeblichen Vertreter des erstgenannten, detaillierten Zugangs sind LOWTRAN¹²⁵ und, mit deutlich verbesserter spektraler Auflösung, MODTRAN.^{126,127,128}

Vertreter des zweiten, vereinfachten Zugangs sind SPCTRAL 2^{129,130}, SMARTS 1¹³¹, beide basierend auf dem Formelapparat von Leckner, 1978¹³². Ebenfalls dieser zweiten Gruppe gehört SMARTS 2 an, eine umfassende Weiterentwicklung von SMARTS 1, etwa mit signifikant gesteigerter spektraler Auflösung, mit vollständiger Überarbeitung der Transmissionsformeln unter Berücksichtigung von Einflüssen der Temperatur und der Feuchte und mit Aufnahme von NO₂ in die Liste der absorbierenden Gase mit temperaturabhängigem Absorptionskoeffizienten.^{133,134}

Zweites grundsätzliches Unterscheidungsmerkmal der Rechenmodelle ist deren Eignung zur Berücksichtigung von Bewölkung. Die Schwierigkeit bei der Abbildung der Bewölkung liegt dabei weniger in der Atmosphärenphysik sondern vielmehr in den in weiten Grenzen variierenden optischen Eigenschaften der Bewölkung sowie in ihrer signifikanten örtlichen und zeitlichen Varianz bei gleichzeitig, im Rahmen der Strahlungssimulationsrechnung praktisch unmöglicher Vorhersagbarkeit. Ein Vertreter jener Programme, die auch die

¹²⁵ <http://www1.ncdc.noaa.gov/pub/software/lowtran/> (02.01.2009)

¹²⁶ <http://www.ontar.com> vom (02.01.2009)

¹²⁷ Berk (1989)

¹²⁸ Anderson (1993)

¹²⁹ Bird (1984)

¹³⁰ Bird and Riordan (1986)

¹³¹ Gueymard (1993)

¹³² Leckner (1978)

¹³³ Gueymard (2001)

¹³⁴ SMARTS - Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine, Gueymard C., 1994 - 2005, NREL - National Renewable Energy Laboratory, U.S.A, Golden, Colorado
<http://www.nrel.gov/rredc/smarts/> (02.01.2009)

Bewölkung zumindest näherungsweise berücksichtigen ist SEDES 2. Es wurde auf der Basis von SPCTRAL 2 am Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung in Stuttgart erarbeitet und publiziert. Im Gegenzug zur Erweiterung um die Berücksichtigung der Bewölkung wurden aber die Freiheitsgrade zur Abbildung spezifischer Atmosphärenparameter stark eingeschränkt.

Für die gegenständliche Fragestellung nach dem Potential, Inhabitanten hinter technischen Funktionsgläsern innerhalb vertretbarer Zeitspannen mit physiologisch ausreichenden Strahlungsdosen zu versorgen, ist die Berücksichtigung von Bewölkung nicht erforderlich. Eine Einrechnung von Bewölkungsphänomenen würde im Gegenteil die Auswertung der Ergebnisse deutlich erschweren und deren Aussagekraft mindern.

4.4.3. Auswahl eines Berechnungsprogramms

Vor dem geschilderten Hintergrund wurde daher für die Generierung von Referenzzuständen der terrestrischen Sonnenstrahlung in der gegenständlichen Arbeit das Softwarepaket SMARTS - Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine in seiner aktuellen Version 2.9.5 herangezogen.

Der zugrunde liegende Formelapparat wurde von Christian A. Gueymard 1993 erstmals publiziert und seither laufend weiterentwickelt.^{135,136,137} Der Formelapparat von SMARTS 2.9.5 ist detailliert dokumentiert durch Gueymard.^{138,139}

SMARTS berechnet die relevanten Extinktionsprozesse der Sonnenstrahlung in der wolkenlosen Atmosphäre: die Rayleigh-Streuung an Luftmolekülen, die Mie-Streuung an Aerosolen und die Absorption durch Ozon, sonstige Gase, Wasserdampf und Stickoxid. Sämtliche Extinktionskoeffizienten werden wellenlängenabhängig und darüber hinaus temperatur-, druck- und feuchtesensitiv definiert. Die variable Schichtung der Atmosphäre wird mit einem Set aus sieben Referenzatmosphären berücksichtigt.

Nachfolgend werden die wesentlichen Strukturen des verwendeten Formelapparats dargestellt. Eine detaillierte Dokumentation der Eingangsgrößen und ihrer Quellen findet sich im Anhang in Kapitel 15 der gegenständlichen Arbeit.

4.4.4. Dokumentation des verwendeten Formelapparats

Der nachfolgend in seinen Grundzügen dokumentierte Formelapparat wird vom gewählten Softwarepaket SMARTS 2.9.5 zur Berechnung der terrestrischen Sonnenstrahlung zu vier festgelegten Referenzzeitpunkten verwendet.

¹³⁵ Gueymard (1993)

¹³⁶ Gueymard (2001)

¹³⁷ Gueymard (2004)

¹³⁸ Gueymard (2001)

¹³⁹ Dieser Dokumentation ist auch das folgende Zitat entnommen, das humorvoll auf die hervorragende Eignung des Programms für Ingenieursanwendungen Bezug nimmt: „The present resolution may be considered low by spectroscopists, just right by atmospheric physicists, or rather high by engineers.“

4.4.4.1. Rayleigh-Streuung

Die Rayleigh-Streuung an Luftmolekülen, mathematisch beschrieben durch die optische Dicke $\tau_R(\lambda)$, ist mit annähernd der vierten Potenz umgekehrt proportional zur Wellenlänge, mit einer zusätzlichen Abhängigkeit vom Luftdruck. Eine Näherungsformel (Formel 11) wurde von Leckner 1978 publiziert:¹⁴⁰

$$\tau_R(\lambda) = 0,008735 \cdot (p / p_0) \cdot \lambda^{-4,08}$$

mit $\tau_R(\lambda)$: optische Dicke aufgrund von Rayleigh-Streuung

mit λ : Wellenlänge der Strahlung

mit p : atmosphärischer Luftdruck am Standort

mit I_0 : atmosphärischer Luftdruck unter Referenzbedingungen (1.013,25 Pa)

Formel 11: Näherungsformel von Leckner für die optische Dicke aufgrund von Rayleigh-Streuung

In SMARTS wird eine deutlich genauere Formel (Formel 12) eingeführt. Es gilt:

$$\tau_R(\lambda) = (p / p_0) \cdot [a_0 \cdot (\lambda / \lambda_0)^4 + a_1 \cdot (\lambda / \lambda_0)^2 + a_2 + a_3 \cdot (\lambda / \lambda_0)^{-2}]$$

mit $\tau_R(\lambda)$: optische Dicke aufgrund von Rayleigh-Streuung

mit λ : Wellenlänge der Strahlung

mit λ_0 : Referenz-Wellenlänge ist mit 0,1 μm festgelegt

a_0 bis a_3 : Konstanten, die aus Messreihen bestimmt wurden.¹⁴¹

Formel 12: Näherungsformel von Gueymard für die optische Dicke aufgrund von Rayleigh-Streuung

Auch die atmosphärische Masse wird mit einer aufwändigen Formel (Formel 13) angenähert. Es gilt:

$$m_R = 1 / [\cos Z + b_0 \cdot Z^{b_1} \cdot (b_2 - Z)^{b_3}]$$

mit m_i : Atmosphärische Masse für Rayleigh-Streuung

mit Z : Zenitwinkel in Grad

b_0 bis b_3 : Konstanten, die aus Messreihen bestimmt wurden.¹⁴²

Formel 13: Näherungsformel von Gueymard für die atmosphärische Masse für Rayleigh-Streuung

¹⁴⁰ Leckner (1978)

¹⁴¹ Zahlenwerte siehe Gueymard (2004)

¹⁴² Zahlenwerte siehe Gueymard (2004)

4.4.4.2. Aerosol-Streuung

Die optische Dicke durch Streuung an Aerosolen, $\tau_A(\lambda)$, oder auch AOD,¹⁴³ lässt sich als Wellenlängen abhängiger Zusammenhang anschreiben (Formel 14), der von Ångström entdeckt und 1929 erstmals publiziert wurde:¹⁴⁴

Ångström erkannte, dass die Wellenlängenabhängigkeit der Mie-Streuung an Aerosolen eine ähnliche Charakteristik aufweist, wie jene der Rayleigh-Streuung an Luftmolekülen, dass aber der Wellenlängen-Exponent nicht konstant, sondern insbesondere von der Größe der Aerosolpartikel abhängig ist. Es gilt:

$$\tau_A(\lambda) = \beta \cdot (\lambda / \lambda_0)^{-\alpha}$$

mit $\tau_A(\lambda)$: optische Dicke aufgrund von Mie-Streuung an Aerosolen

mit β : Ångström-Koeffizient, gleichzeitig optische Aerosol-Dicke bei der Referenz-Wellenlänge von 1 μm

mit λ : Wellenlänge der Strahlung

mit λ_0 : Referenz-Wellenlänge von 1 μm

mit α : Wellenlängen-Exponent

Formel 14: Formel von Ångström für optische Dicke aufgrund von Mie-Streuung an Aerosolen

Der Ångström-Koeffizient ist abhängig vom Aerosolgehalt der Atmosphäre, und somit der eigentlichen Trübung. Er liegt typischerweise in der Bandbreite von 0 bis 0,5 in Gebieten starker Luftverschmutzung auch deutlich darüber.

Der Wellenlängen-Koeffizient ist abhängig von der Partikelgröße und weist häufig Werte um 1,3 auf. Die Bandbreite möglicher Werte des Wellenlängen-Koeffizienten reicht jedoch von -0,6 bis 2,6.

Jedenfalls ist der Wellenlängen-Exponent α nicht konstant über die Wellenlänge. In guter Näherung kann die Gleichung daher geteilt werden, wobei sich ein Teilungspunkt an einer Wellenlänge von 0,5 μm bewährt hat und in den gegenständlichen Rechnungen angewandt wird. Demgemäß ist es von Vorteil, die Ångström-Formel (Formel 15) für eine Referenz-Wellenlänge von 0,5 μm anzuschreiben. Es gilt:

$$\tau_A(\lambda) = \tau_{0,5} \cdot (2\lambda / \lambda_0)^{-\alpha}$$

mit $\tau_A(\lambda)$: optische Dicke aufgrund von Mie-Streuung an Aerosolen

mit $\tau_{0,5}$: optische Aerosol-Dicke bei der Referenz-Wellenlänge von 0,5 μm

mit λ : Wellenlänge der Strahlung

mit λ_0 : Referenz-Wellenlänge von 0,5 μm

mit α : Wellenlängen-Exponent

Formel 15: Formel von Ångström, Schreibweise für eine Referenz-Wellenlänge von 0,5 μm

¹⁴³ Englische Bezeichnung: AOD - Aerosol Optical Depth

¹⁴⁴ Ångström (1929)

Die Bestimmung geeigneter Werte für $\tau_{0,5} = \text{AOD}_{0,5}$ und für den Wellenlängen-Exponenten α erfolgt aus Messungen oder Referenzmodellen, die ihrerseits wieder auf Messungen beruhen. Im gegenständlichen Rechenprogramm stehen zehn unterschiedliche Referenzmodelle zur Verfügung. Als Quelle für eine Vielzahl von Messwerten, sowohl im Zeitverlauf als auch gemittelt, steht die Website des NASA¹⁴⁵ Projekts AERONET zur Verfügung.¹⁴⁶

4.4.4.3. Absorption an Gasen

Gase absorbieren in spezifischen, meist sehr engen Frequenzbändern der Strahlung. Gasabsorption ist daher ein hochgradig Wellenlängen abhängiges Phänomen und die Absorption jedes relevanten Gases ist somit gesondert abzubilden. Die einzelnen Wirkungen können dabei, wie bereits erläutert, summiert werden.

Das weitaus am stärksten absorbierende Gas in der Atmosphäre der Erde ist Wasserdampf mit mehreren signifikanten Absorptionsbändern im Bereich des Nahen Infrarot, im Folgenden mit NIR¹⁴⁷ abgekürzt, konkret von zirka 800 nm bis zirka 2.000 nm Wellenlänge.

Das zweite, hinsichtlich seiner Absorption relevante Gas, ist Ozon mit seiner entscheidenden Wirksamkeit im Bereich der UV-B-Strahlung und einem weiteren Absorptionsband, ebenfalls im Bereich der NIR, zirka von 500 nm bis 700 nm. Im UV-Bereich absorbiert die vorhandene Ozonsäulenhöhe praktisch die gesamte UV-B-Komponente der Sonnenstrahlung und darüber hinaus auch stark im UV-A-Bereich bei mit zunehmender Wellenlänge rasch fallender Wirkung.

Weiters ist relevant für die Absorption die Gruppe der innerhalb der Atmosphäre weitgehend gleichverteilten Gase wie CH_4 , CO , N_2 , O_2 , CO und N_2O . Aufgrund der Gleichverteilung dieser Gase in der Atmosphäre kann die Formel zur Berechnung der atmosphärischen Masse wie bei der Rayleigh-Streuung verwendet werden. Die Säulenhöhe der jeweiligen Gase ist insbesondere eine Funktion des Luftdrucks.

¹⁴⁵ National Aeronautics and Space Administration

¹⁴⁶ Website des Projekts AERONET - Aerosol Robotic Network, NASA, Goddard Space Flight Center, aus dem Internet <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/> vom 03.01.2009

¹⁴⁷ Englische Bezeichnung: Near Infrared Radiation

Letztlich ist noch, mit deutlich schwächster Wirksamkeit, die Gruppe der Spurengase wie BrO, CH₂O, ClNO₃, HNO₂, HNO₃, NH₃, NO, NO₂, NO₃ und SO₂ absorbierend wirksam.

Für die Absorption an Gasen wird wieder auf das Lambert-Beer'sche Gesetz der Strahlungsextinktion (Formel 16) zurückgegriffen, in einer seiner bereits eingangs vorgestellten Schreibweisen. Es gilt:

$$T_G(\lambda) = e^{-A_G(\lambda) \cdot C_G \cdot m_G}$$

mit $T_G(\lambda)$: atmosphärischer Transmissionskoeffizient des jeweiligen Gases

mit A_G : wegstreckenbezogener Absorptionskoeffizient des jeweiligen Gases

mit C_G : totale Säulenhöhe des jeweiligen Gases

mit m_G : atmosphärische Masse, spezifisch für das jeweilige Gas

Formel 16: Atmosphärischer Transmissionskoeffizient von gasförmigen Atmosphärenbestandteilen

Auch hier wird zur Berücksichtigung der unterschiedlichen vertikalen Verteilung der jeweiligen Gase die atmosphärische Masse für jedes Gas getrennt berechnet. Die Bestimmung geeigneter Werte für die totale Säulenhöhe der einzelnen Gase erfolgt wiederum aus Messungen.

Quellen für die totale Säulenhöhe von Wasserdampf sind:

- > NASA Projekt AERONET - Aerosol Robotic Network¹⁴⁸
- > NASA Projekt NVAP - NASA Water Vapor Project¹⁴⁹

Quellen für die totale Säulenhöhe von Ozon sind:

- > WOUDC - World Ozone and Ultraviolet Data Center network¹⁵⁰
- > NASA Projekt TOMS – Total Ozone Mapping Spectrometer¹⁵¹
- > MACUV – Measurements of Atmospheric Composition in the Ultraviolet and Visible¹⁵²
- > GOME – Global Ozone Monitoring Experiment¹⁵³

¹⁴⁸ Website des Projekts AERONET - Aerosol Robotic Network, NASA, Goddard Space Flight Center, <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/> (03.01.2009)

¹⁴⁹ Website des Projekts NVAP - NASA Water Vapor Project, http://eosweb.larc.nasa.gov/PRODOCS/nvap/table_nvap.html (04.01.2009)

¹⁵⁰ Website des Projekts WOUDC - World Ozone and Ultraviolet Data Center network, <http://www.woudc.org> vom (04.01.2009)

¹⁵¹ Website des Projekts TOMS – Total Ozone Mapping Spectrometer, <http://toms.gsfc.nasa.gov/> (04.01.2009)

¹⁵² Website des Projekts MACUV – Measurements of Atmospheric Composition in the Ultraviolet and Visible, <http://macuv.gsfc.nasa.gov> (06.12.2008)

¹⁵³ Website des Projekts GOME – Global Ozone Monitoring Experiment, http://www.knmi.nl/gome_fd/doc/gomeintro.html (dzt. Verbindungsfehler) (04.01.2009)

4.4.4.4. Diffusstrahlung

Schließlich muss aus der Berechnung der Streuung noch jener Anteil der Strahlung berechnet werden, der als Diffusstrahlung die Erdoberfläche erreicht.

Diffusstrahlung entsteht durch die beiden Streuungsphänomene in der Atmosphäre, die Mie-Streuung an Aerosolen und die Rayleigh-Streuung an Luftmolekülen. Erstere ist die größere Quelle für Diffusstrahlung, weil erstens die optische Dicke der Aerosole meistens größer als die der Luftmoleküle ist und weil zweitens bei der Mie-Streuung an Aerosolen die Abstrahlung in hohem Maß nach vorne, also etwa in Richtung der ursprünglichen Direktstrahlung, erfolgt.

Im verwendeten Rechenmodell werden die beiden genannten Diffusstrahlungsanteile gesondert über die folgenden beiden Näherungsformeln (Formel 17, Formel 18) berechnet.

$$I_{DR}(\lambda) = I_0(\lambda) \cdot T_g(\lambda) \cdot T_w(\lambda) \cdot T_t(\lambda) \cdot T_{aa}(\lambda) \cdot (1 - T_R^{0,9}) \cdot F_R(\lambda) \cdot \Gamma_o(\lambda) \cdot \cos Z$$

mit $I_{DR}(\lambda)$: Intensität der Diffusstrahlung aus Rayleigh-Streuung

mit $I_0(\lambda)$: Intensität der einfallenden Strahlung

mit $T_g(\lambda)$: Transmissionskoeffizient¹⁵⁴ durch Absorption an gleichförmig verteilten Gasen

mit $T_w(\lambda)$: Transmissionskoeffizient durch Absorption an Wasserdampf

mit $T_t(\lambda)$: Transmissionskoeffizient durch Absorption an Spurengasen

mit $T_{aa}(\lambda)$: Transmissionskoeffizient durch Absorption an Aerosolen

mit $T_R(\lambda)$: Transmissionskoeffizient durch Rayleigh-Streuung an Luftmolekülen

mit $F_R(\lambda)$: Anteil der vorwärts gestreuten Strahlungsintensität zur gesamten gestreuten Strahlungsintensität

mit $\Gamma_o(\lambda)$: Effektiver Transmissionskoeffizient durch Ozon

Formel 17: Näherungsformel zur Berechnung der Diffusstrahlung aus Rayleigh-Streuung

¹⁵⁴ Englische Bezeichnung: transmittance

$$I_{DA}(\lambda) = I_0(\lambda) \cdot T_g(\lambda) \cdot T_w(\lambda) \cdot T_t(\lambda) \cdot T_{aa}(\lambda) \cdot T_R \cdot (1 - T_{as}(\lambda)^{0,9}) \cdot F_A(\lambda) \cdot \Gamma_o(\lambda) \cdot \cos Z$$

mit $I_{DR}(\lambda)$: Intensität der Diffusstrahlung aus Mie-Streuung an Aerosolen

mit $I_0(\lambda)$: Intensität der einfallenden Strahlung

mit $T_g(\lambda)$: Transmissionskoeffizient durch Absorption an gleichförmig verteilten Gasen

mit $T_w(\lambda)$: Transmissionskoeffizient durch Absorption an Wasserdampf

mit $T_t(\lambda)$: Transmissionskoeffizient durch Absorption an Spurengasen

mit $T_{aa}(\lambda)$: Transmissionskoeffizient durch Absorption an Aerosolen

mit $T_R(\lambda)$: Transmissionskoeffizient durch Rayleigh-Streuung an Luftmolekülen

mit $T_{as}(\lambda)$: Transmissionskoeffizient durch Streuung an Aerosolen

mit $F_A(\lambda)$: Anteil der vorwärts gestreuten Strahlungsintensität zur gesamten gestreuten Strahlungsintensität

mit $\Gamma_o(\lambda)$: Effektiver Transmissionskoeffizient durch Ozon

Formel 18: Näherungsformel zur Berechnung der Diffusstrahlung aus Mie-Streuung

4.5. Terrestrische Sonnenstrahlung

4.5.1. Randbedingungen der Berechnung

Wie bereits erwähnt, sind für die gegenständliche Arbeit die Strahlungsverhältnisse am Standort Wien zu festzulegenden Referenzzeitpunkten spektral aufgelöst zu berechnen.

Betreffend die Referenzzeitpunkte wurde jeweils der 15. Tag der Monate März, Juni, September und Dezember festgelegt. Die Uhrzeit wird gleich bleibend mit 12:00 wahrer Sonnenzeit, gegebenenfalls ergänzt durch die Zeitpunkte 07:00 und 17:00 festgelegt. Beide Festlegungen, jene der vier Referenztage und jene der Uhrzeit, werden vor dem Hintergrund der Fragestellung der gegenständlichen Forschungsarbeit gewählt. Untersucht wird, ob grundsätzlich das Potential besteht, Inhabitanten hinter technischen Funktionsgläsern innerhalb vertretbarer Zeitspannen mit physiologisch ausreichenden Strahlungsdosen zu versorgen. Es erscheint sinnvoll, diese Frage für charakteristische Referenzzustände in allen vier Jahreszeiten und zu Tageszeiten hoher photophysiologicaler Sensitivität zu untersuchen.¹⁵⁵

Die Orientierung der Ernte- oder Messfläche schließlich wird als vertikal und dem Azimut der Sonne nachgeführt festgelegt. Diese Wahl wird in Übereinstimmung mit der medizinischen Fachliteratur getroffen und berücksichtigt somit die tagsüber überwiegend aufrechte Haltung des Menschen. Auch die Verglasungen werden als vertikal und dem Azimut der Sonne nachgeführt festgelegt, womit sich in konsequenter Fortsetzung des konstruktivistischen Forschungsansatzes das Potential der transmittierten Sonnenstrahlung durch eine vertikale, zur Sonne orientierten Fassade abbildet.

Alle Berechnungen werden schließlich wieder im Sinne der Ermittlung von Potentialen unter der Annahme eines klaren Himmels vorgenommen.

Zur Beurteilung der strahlungsbedingten Melatonin Suppression haben sich über die genannten vier Referenzzeitpunkte 12:00 hinaus auch Analysen zu anderen Tageszeiten als erforderlich erwiesen. In Übereinstimmung mit der physiologischen Bedeutung der Melatonin Suppression am Morgen und am späten Nachmittag werden daher, wiederum für den jeweils 15. März, Juni, September und Dezember, weitere Untersuchungszeitpunkte um 07:00 und 17:00 um festgelegt. Die Orientierung der Messflächen und der Verglasungen wird weiterhin als vertikal und gegen den Azimut der Sonne ausgerichtet beibehalten.

Berechnet werden demnach die spektral aufgelösten solaren Strahlungsintensitäten auf eine vertikale, nach dem Sonnenazimut ausgerichtete Ebene, unmittelbar hinter einer ebenso orientierten Verglasung bei klarem Himmel zu drei unterschiedlichen Tageszeiten, an vier unterschiedlichen Tagen des Jahres.

Die derart errechneten Ergebnisse der terrestrischen Sonnenstrahlung werden in Folgekapiteln mit dem Strahlungsdurchgang durch ausgewählte technische

¹⁵⁵ Der kalendarischen Monatsmitte wurde gegenüber dem jeweils 21. des Monats der Vorzug gegeben, weil das deutliche Vorteile bei der Beschaffung von belastbaren Parametern des Klimas und der Atmosphärenzusammensetzung bringt, wie sie als Eingangsgrößen für die Berechnung des Strahlungsdurchgangs durch die Atmosphäre erforderlich sind.

Funktionsgläser und mit relevanten physiologischen Wirkungs-Kurven gefaltet, was schließlich zu spektral aufgelösten, physiologisch gewichteten Strahlungsintensitäten zu den hier festgelegten Referenzpunkten führt.

Im Sinn der Potentialstudie kann aus diesen Momentanwerten der Strahlungsintensität beantwortet werden, ob unter den angenommenen Bedingungen entweder Schwellwerte der physiologisch erforderlichen Strahlungsintensität oder ob bei hypothetisch gleich bleibenden Strahlungsbedingungen innerhalb realistischer Zeitspannen physiologisch erforderliche Strahlungs Dosen erreicht werden können.

Die folgende Tabelle (Tabelle 1) fasst die beschriebene Festlegung der Referenzzeitpunkte zusammen. Eine detaillierte Dokumentation aller Eingangsgrößen in die Berechnung der terrestrischen Sonnenstrahlung findet sich darüber hinaus im Anhang in Kapitel 15.

Geografischer Standort¹⁵⁶

Geografische Breite	48° nördlich
Geografische Länge	15° östlich
Seehöhe [m]	202 m

Referenzzeitpunkte

15. März	07:00 und 12:00 und 17:00
15. Juni	07:00 und 12:00 und 17:00
15. September	07:00 und 12:00 und 17:00
15. Dezember	12:00

¹⁵⁶ Die geografische Lage des Referenzstandorts Wien wurde angenähert mit 48° nördlicher Breite und 15° östlicher Länge, um Rechenfehler aufgrund beschränkter Eingabemöglichkeiten von Softwareprodukten verlässlich zu vermeiden.

Sonnengeometrie	März	Juni	Sept.	Dez.
Sonnenhöhe um 07:00	8°	27°	13°	--
Azimut um 07:00	103°	84°	99°	--
Sonnenhöhe um 12:00	40°	65°	45°	19°
Azimut um 12:00	180°	180°	180°	180°
Sonnenhöhe um 17:00	8°	27°	13°	--
Azimut um 17:00	257°	276°	261°	--
Neigung der Messebene	90° vertikal	90° vertikal	90° vertikal	90° vertikal

Tabelle 1: Eingabedaten zur Berechnung der terrestrischen Sonnenstrahlung zu den Referenzzeitpunkten

4.5.2. Ergebnisse

Die terrestrische Sonnenstrahlung charakterisiert durch ihre Intensität, ihre spektrale Verteilung, ihre anteilige Zusammensetzung aus gerichteter Direktstrahlung und an ungerichteter Diffusstrahlung, ist ein Resultat der extraterrestrischen Sonnenstrahlung und des Strahlungsdurchgangs durch die Atmosphäre.

4.5.2.1. Tabellarische Ergebniszusammenstellung

Im Folgenden werden die Berechnungsergebnisse der terrestrischen Sonnenstrahlung zu den definierten Referenzzeitpunkten und am Referenzstandort dokumentiert. Die nachfolgenden Tabellen (Tabelle 2, Tabelle 3) fassen die wesentlichen Ergebnisparameter des Strahlungsdurchgangs durch die Atmosphäre unter den getroffenen Festlegungen zusammen.¹⁵⁷

Die Trübungsfaktoren nach Linke und der Diffusstrahlungsfaktor nach Reitz werden aus den Ergebnissen des spektralen Strahlungsdurchgangs laut SMARTS 2 nachträglich errechnet.

¹⁵⁷ Ergänzend bemerkt werden soll noch, dass sich sämtliche Kennzahlen der solaren Strahlungsintensität auf den ausgewerteten Wellenlängenbereich von 280 bis 2.500 nm beziehen. Es ergeben sich daher geringfügige Abweichungen gegenüber denselben Kennzahlen über das gesamte solare Spektrum, beispielsweise für die Solarkonstante von 1.366 W/m² und die berechnete extraterrestrische Strahlungsdichte von nur 1.348 W/m².

Strahlungsphysikalische Ergebniskennzahlen, 12:00	März	Juni	Sept.	Dez.
Atmosphärische Masse ¹⁵⁸	1,569	1,101	1,409	3,099
Niederschlagsverfügbare Wasserdampfmenge	1,121 cm	2,165 cm	2,065 cm	0,919 cm
Optische Dicke bei 500 nm	0,2100	0,2100	0,1500	0,1200
Aerosol Angström-Koeffizient β	0,090	0,090	0,064	0,050
Aerosol Wellenlängen-Exponent α	1,041	1,037	1,048	1,062
Atmosphärischer Transmissionskoeffizient	0,584	0,641	0,624	0,493
Trübungsfaktor nach Linke	3,7	4,2	3,6	2,8
Diffusstrahlungsfaktor nach Reitz	0,30	0,29	0,28	0,30
Extraterrestrische Strahlungsdichte	1.348 W/m ²	1.348 W/m ²	1.348 W/m ²	1.348 W/m ²
Direktstrahlungsdichte normal zum Strahl	787 W/m ²	864 W/m ²	841 W/m ²	665 W/m ²
Direktstrahlungsdichte auf die Messfläche	607 W/m ²	361 W/m ²	593 W/m ²	630 W/m ²
Himmelsstrahlungsdichte auf die Messfläche	147 W/m ²	163 W/m ²	136 W/m ²	89 W/m ²
Reflexstrahlungsdichte auf die Messfläche	61 W/m ²	91 W/m ²	70 W/m ²	28 W/m ²
Globalstrahlung auf die Messfläche	815 W/m ²	615 W/m ²	799 W/m ²	747 W/m ²

Tabelle 2: Kennzahlen der terrestrischen Sonnenstrahlung zu den Referenzzeitpunkten um 12:00

¹⁵⁸ Hier angegeben wird exemplarisch die atmosphärische Masse für die Berechnung der Strahlungsextinktion durch Wasserdampf. Wie bereits erläutert, weichen die atmosphärischen Massen zur Berechnung anderer Extinktionsphänomene davon geringfügig ab.

Strahlungsphysikalische Ergebniskennzahlen, 07:00 und 17:00	März	Juni	Sept.	Dez.
Optische Masse ¹⁵⁹	6,857	2,202	4,603	--
Niederschlagsverfügbare Wasserdampfmenge	1,1206 cm	2,1648 cm	2,0648 cm	--
Optische Dicke bei 500 nm	0,2100	0,2100	0,1500	--
Aerosol Angström-Koeffizient β	0,0902	0,0904	0,0639	--
Aerosol Wellenlängen-Exponent α	1,0406	1,0368	1,0478	--
Atmosphärischer Transmissionskoeffizient	0,2094	0,4790	0,3386	--
Trübungsfaktor nach Linke	3,6	3,8	3,2	--
Diffusstrahlungsfaktor nach Reitz	0,30	0,28	0,26	--
Extraterrestrische Strahlungsdichte	1.348 W/m ²	1.348 W/m ²	1.348 W/m ²	--
Direktstrahlungsdichte normal zum Strahl	282 W/m ²	646 W/m ²	456 W/m ²	--
Direktstrahlungsdichte auf die Messfläche	279 W/m ²	575 W/m ²	446 W/m ²	--
Himmelsstrahlungsdichte auf die Messfläche	79 W/m ²	124 W/m ²	75 W/m ²	--
Reflexstrahlungsdichte auf die Messfläche	8 W/m ²	38 W/m ²	15 W/m ²	--
Globalstrahlung auf die Messfläche	366 W/m ²	737 W/m ²	536 W/m ²	--

Tabelle 3: Kennzahlen der terrestrischen Sonnenstrahlung zu den Referenzzeitpunkten um 07:00 und 17:00

4.5.2.2. Grafische Darstellung

In den folgenden Abbildungen wird die spektrale Strahlungsintensität unter den Referenzbedingungen auf die vertikale, nachgeführte Ebene dargestellt. Prinzipiell wurden zwölf Referenzzeitpunkte ausgewertet, nämlich alle Kombinationen aus den drei Uhrzeiten 07:00, 12:00 und 17:00 und den vier Zeitpunkten im Jahresverlauf, 15. März, 15. Juni, 15. September und 15. Dezember. Nachdem im Dezember die Uhrzeiten 07:00 und 17:00 vor Sonnenaufgang beziehungsweise nach Sonnenuntergang liegen, reduziert sich die Zahl der Varianten auf zehn.

¹⁵⁹ Hier angegeben wird exemplarisch die atmosphärische Masse für die Berechnung der Strahlungsextinktion durch Wasserdampf. Wie bereits erläutert, weichen die atmosphärische Massen zur Berechnung anderer Extinktionsphänomene davon geringfügig ab.

Die spektralen Strahlungsintensitäten der Uhrzeiten 07:00 und 17:00 unterscheiden sich an ein und demselben Tag nicht voneinander, was in den Randbedingungen gleicher Sonnengeometrie und näherungsweise gleichen Atmosphärenzustandes begründet ist. Sie erscheinen in den Diagrammen daher als eine Kurve und sind auch als solche in der Legende beschriftet. Die Zahl der tatsächlich unterschiedlichen Situationen reduziert sich demnach auf sechs.

Nachfolgend sind die Ergebnisse der terrestrischen Sonnenstrahlung in Diagrammen zur leichteren Lesbarkeit und Interpretation einmal nach gleichen Tageszeiten und einmal nach gleichem Datum der Referenzzeitpunkte zusammengefasst.

4.5.2.2.1. Übersicht nach Tageszeiten

Pro Tageszeit, also 07:00 (Diagramm 9), 12:00 (Diagramm 10) und 17:00 (Diagramm 11), ist ein Diagramm dargestellt. Darin zusammengefasst werden die Intensitäten der Globalstrahlung zu den vier Referenzzeitpunkten 15. März, 15. Juni, 15. September und 15. Dezember. Wieder fehlt zu den Uhrzeiten von 07:00 und 17:00 die Linie des Dezembers, da diese Zeitpunkte im Dezember vor den Sonnenaufgang beziehungsweise nach den Sonnenuntergang fallen.

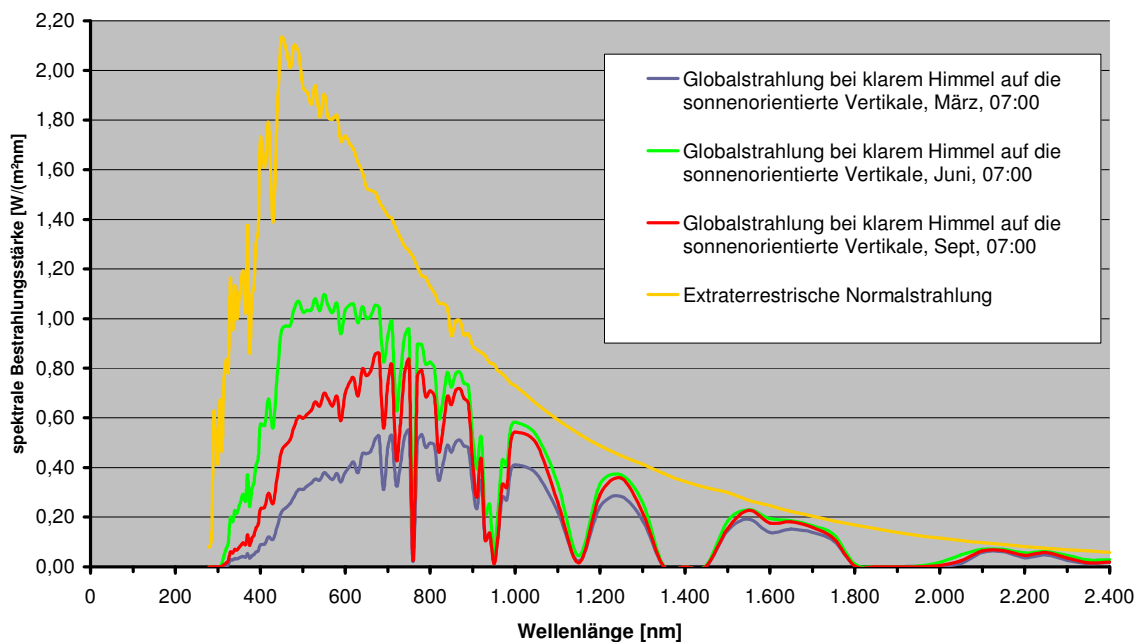


Diagramm 9: Spektrale terrestrische Globalstrahlungsstärken um jeweils 07:00

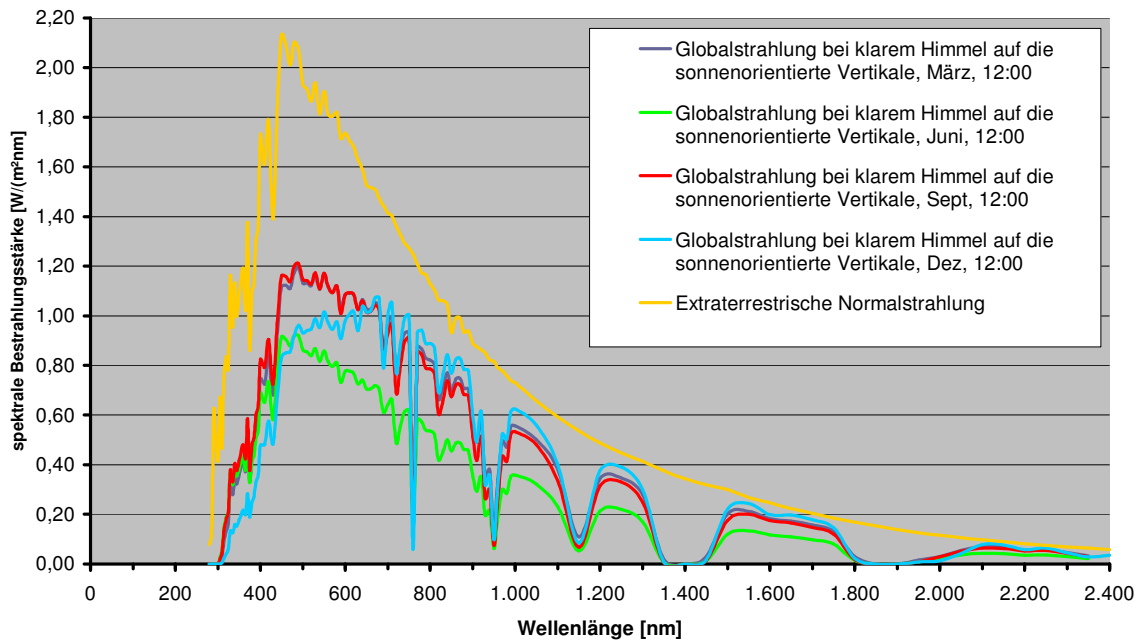


Diagramm 10: Spektrale terrestrische Globalstrahlungsstärken um jeweils 12:00

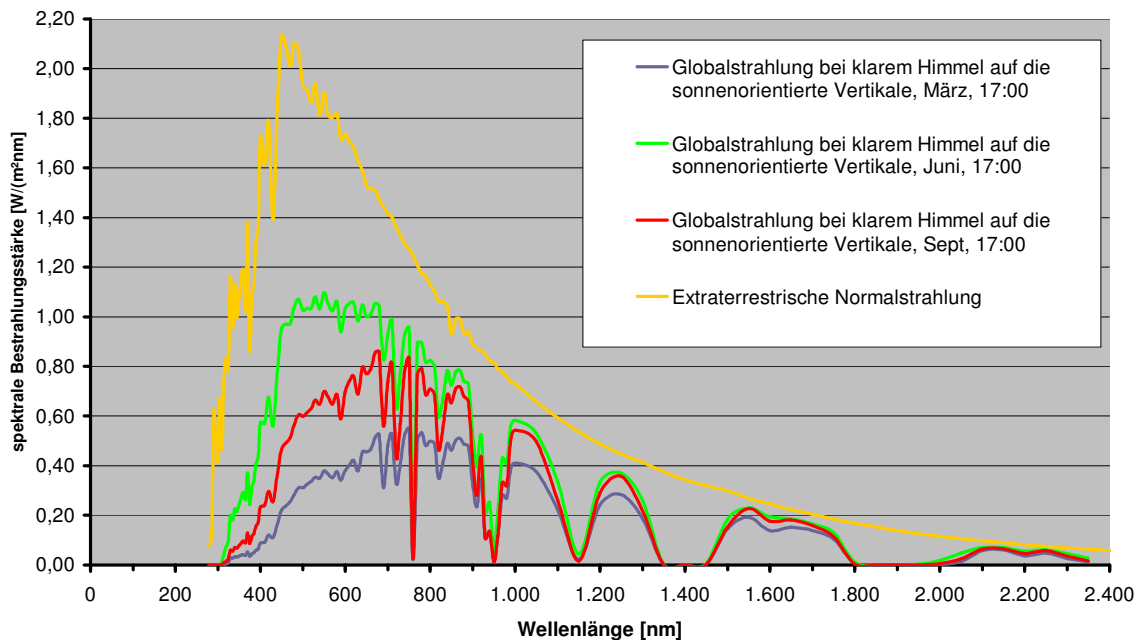


Diagramm 11: Spektrale terrestrische Globalstrahlungsstärken um jeweils 17:00

Aus den Diagrammen geht deutlich hervor, dass bei flach stehender Sonne, also bei längerem Weg der Sonnenstrahlen durch die Atmosphäre, die kurzwelligen Strahlungsanteile überproportional stark vermindert werden. Durch die Projektion der

einfallenden Strahlung auf die vertikale Messebene wird die höhere Normalstrahlungsdichte der hochstehenden Sonne zum Teil egalisiert. Festzustellen ist dieser Effekt etwa um 12:00, wo die Bestrahlungsdichte auf die Messfläche am 15. Juni geringer ist als zu jedem der drei anderen untersuchten Zeitpunkten im Jahr.

4.5.2.2.2. Übersicht nach Jahreszeiten

Pro Datum, also 15. März (Diagramm 12), 15. Juni (Diagramm 13), 15. September (Diagramm 14) und 15. Dezember (Diagramm 15) ist ein Diagramm dargestellt. Darin zusammengefasst werden die Intensitäten der Globalstrahlung zu den drei Tageszeiten, mit Ausnahme des Dezembers, an dem 07:00 und 17:00 außerhalb der Sonnenscheindauer liegen.

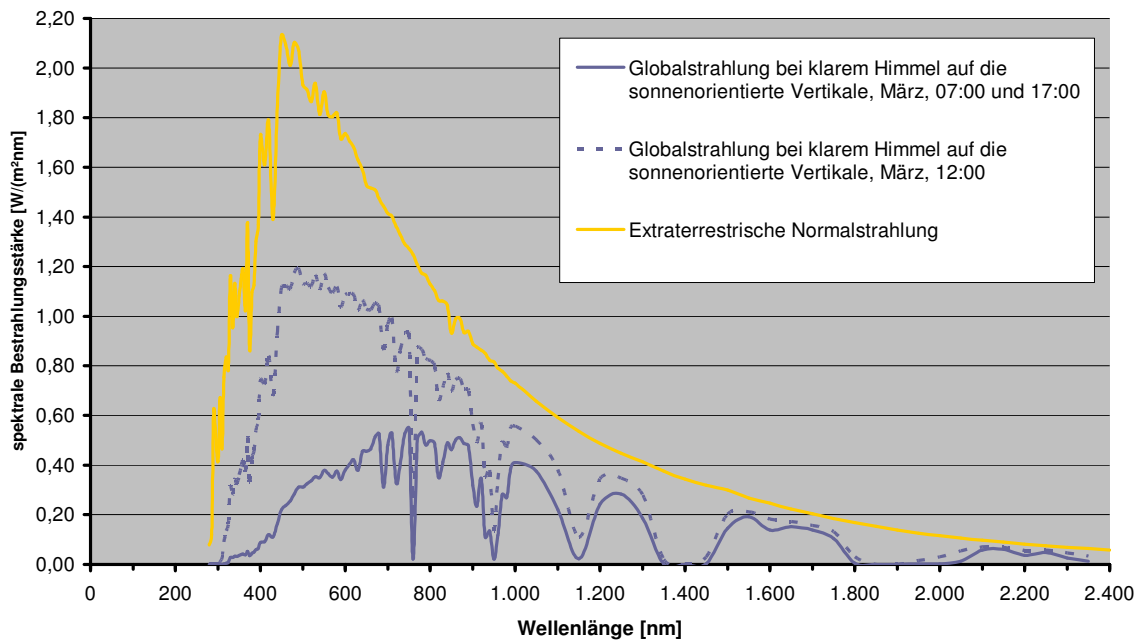


Diagramm 12: Spektrale terrestrische Globalstrahlungsstärken am 15. März

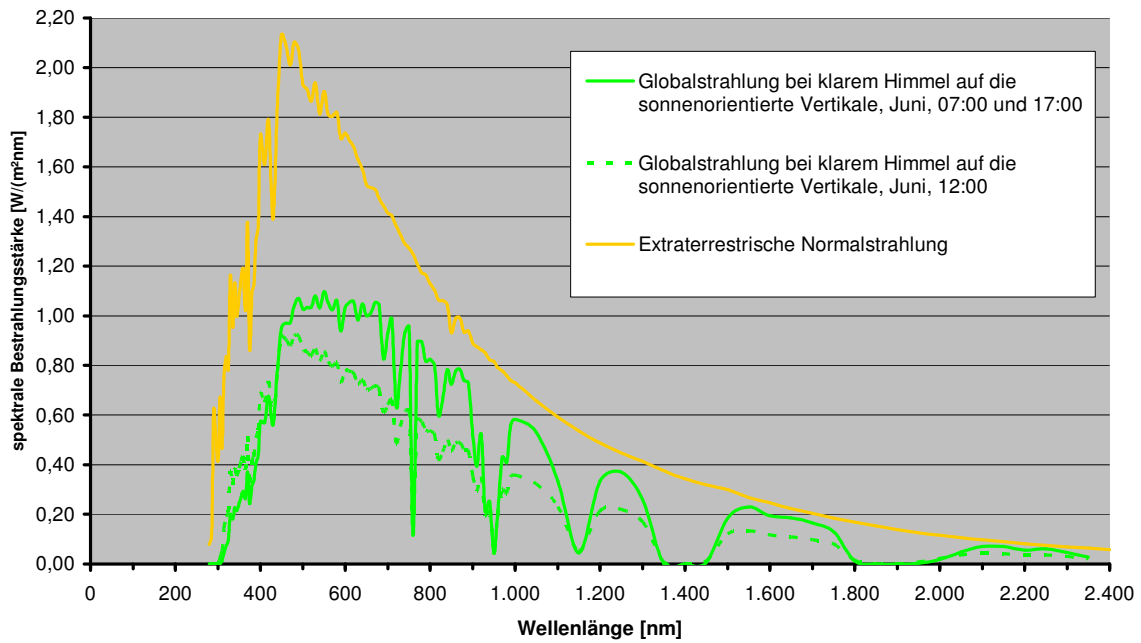


Diagramm 13: Spektrale terrestrische Globalstrahlungsstärken am 15. Juni

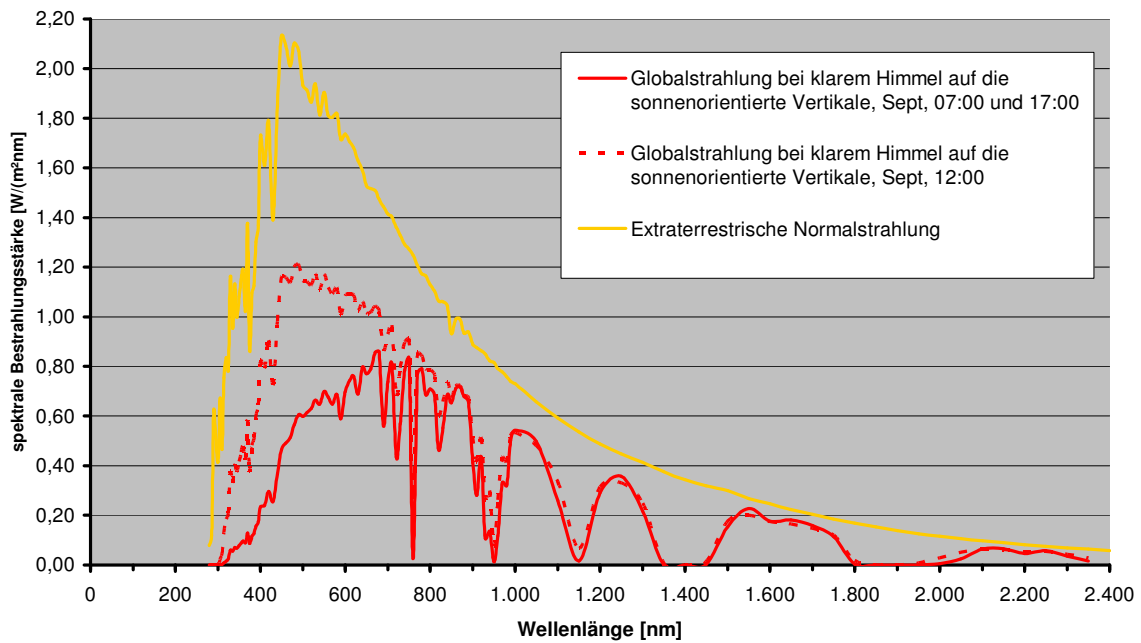


Diagramm 14: Spektrale terrestrische Globalstrahlungsstärken am 15. September

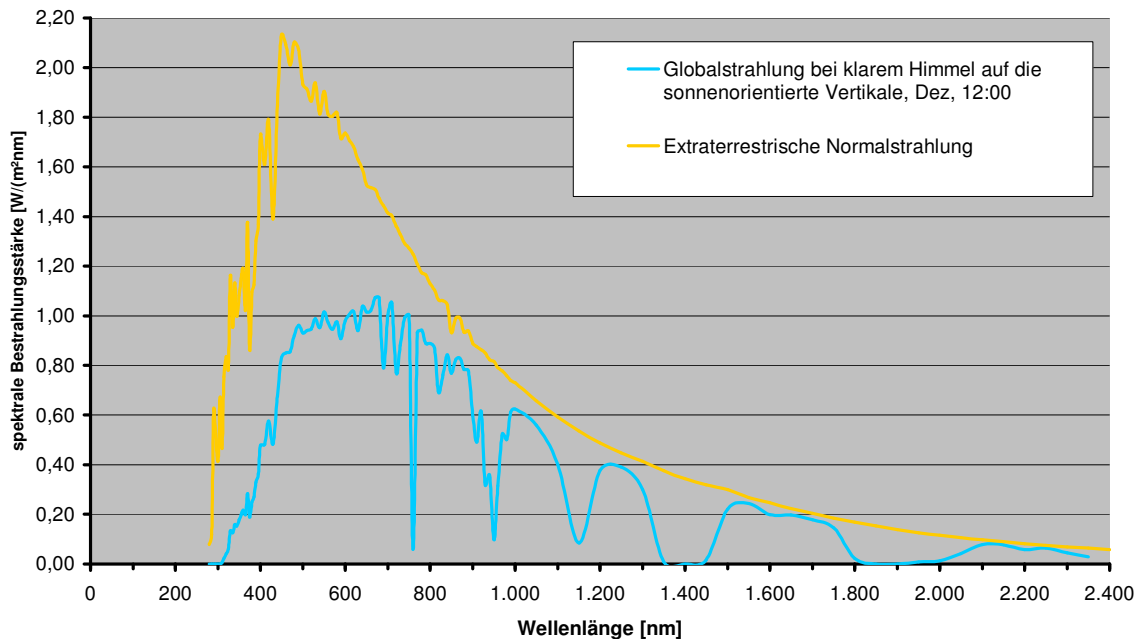


Diagramm 15: Spektrale terrestrische Globalstrahlungsstärken am 15. Dezember

Wiederum wird aus den Diagrammen deutlich, dass bei flach stehender Sonne, also bei längerem Weg der Sonnenstrahlen durch die Atmosphäre, die kurzwelligeren Strahlungsanteile überproportional stark vermindert werden und dass das schleifende Auftreffen der einfallenden Strahlung auf die vertikale Messebene die höhere Normalstrahlungsdichte der hochstehenden Sonne zum Teil egalisiert.

4.5.2.2.3. Ergebnisvergleich mit Berechnungen unter statistischer Bewölkung

Der Atmosphärenzustand zu den Referenzzeitpunkten wurden bewusst und im Einklang mit der Methodik der Potentialstudie als wolkenlos definiert, damit sich auch tatsächlich das Potential solarer Bestrahlungsstärke auf die orientierte Messfläche abbilden lässt.

Wenn daraus physiologisch wirksame Potentiale hinter Glasscheiben abgeleitet werden, ist es von Interesse, diese in Bezug zu entsprechenden langjährigen Mittelwerten bringen zu können.

Zu diesem Zweck werden für jeden Referenzzeitpunkt zusätzlich zur Stundensumme der Globalstrahlung auf die orientierte Fläche bei wolkenlosem Himmel auch die analoge Stundensumme bei statistischer Bewölkung und die Tagessumme auf die gleichbleibend orientierte Fläche bei statistischer Bewölkung errechnet.

Dazu angewandt wurden der Formelsatz zur Berechnung der terrestrischen Sonnenstrahlung nach Kreč in Verbindung mit, aus langjährigen Klimadaten rückgerechneten Werten für die Trübungsfaktoren nach Linke und Reitz.^{160,161,162}

Es ergeben sich, stets für die vertikale, zum Referenzzeitpunkt sonnenorientierte Messfläche, die folgenden Bestrahlungssummen (Tabelle 4, Tabelle 5, Tabelle 6):

07:00	März	Juni	Sept	
Datum [laufende Nr. des Tags im Jahr]	74	166	258	
Zeitpunkt [wahre mittlere Ortszeit]	7	7	7	
Azimut der Flächennormale [° von N i.UZS]	102,8	84,3	99,1	
Trübungsfaktor nach Linke [-]	10,74	12,37	10,58	
Trübungsfaktor nach Reitz [-]	0,28	0,30	0,27	
Stundensumme Referenz unbewölkt [Wh/m ²]	357	697	520	
Stundensumme langjährig bewölkt [Wh/m ²]	46	216	72	
Tagessumme langjährig bewölkt [Wh/m ²]	1.615	2.658	1.792	

Tabelle 4: Bestrahlungssummen 07:00 wolkenlos und vergleichend statistisch bewölkt

12:00	März	Juni	Sept	Dez
Datum [laufende Nr. des Tags im Jahr]	74	166	258	349
Zeitpunkt [wahre mittlere Ortszeit]	12	12	12	12
Azimut der Flächennormale [° von N i.UZS]	180	180	180	180
Trübungsfaktor nach Linke [-]	10,74	12,37	10,58	7,80
Trübungsfaktor nach Reitz [-]	0,28	0,30	0,27	0,20
Stundensumme Referenz unbewölkt [Wh/m ²]	749	523	726	713
Stundensumme langjährig bewölkt [Wh/m ²]	373	351	390	244
Tagessumme langjährig bewölkt [Wh/m ²]	2.304	2.754	2.551	1.094

Tabelle 5: Bestrahlungssummen 12:00 wolkenlos und vergleichend statistisch bewölkt

17:00	März	Juni	Sept	Dez
Datum [laufende Nr. des Tags im Jahr]	74	166	258	
Zeitpunkt [wahre mittlere Ortszeit]	17	17	17	
Azimut der Flächennormale [° von N i.UZS]	257,2	275,7	260,9	
Trübungsfaktor nach Linke [-]	10,74	12,37	10,58	
Trübungsfaktor nach Reitz [-]	0,28	0,30	0,27	
Stundensumme Referenz unbewölkt [Wh/m ²]	357	697	520	
Stundensumme langjährig bewölkt [Wh/m ²]	46	216	85	
Tagessumme langjährig bewölkt [Wh/m ²]	1.618	2.659	1.856	

Tabelle 6: Bestrahlungssummen 17:00 wolkenlos und vergleichend statistisch bewölkt

¹⁶⁰ Kreč (1995)

¹⁶¹ Heindl (1984)

¹⁶² Peter Holzer, 2009, Ausprogrammierung des Formelsatzes nach Kreč (1995)

Die graphische Ergebnisdarstellung der Bestrahlungssummen auf die, zum Referenzzeitpunkt vertikal zur Sonne orientierten Messfläche, erfolgt in den anschließenden drei Balkendiagrammen (Diagramm 16, Diagramm 17, Diagramm 18).

Bestrahlungssummen zu den Referenzzeitpunkten 07:00

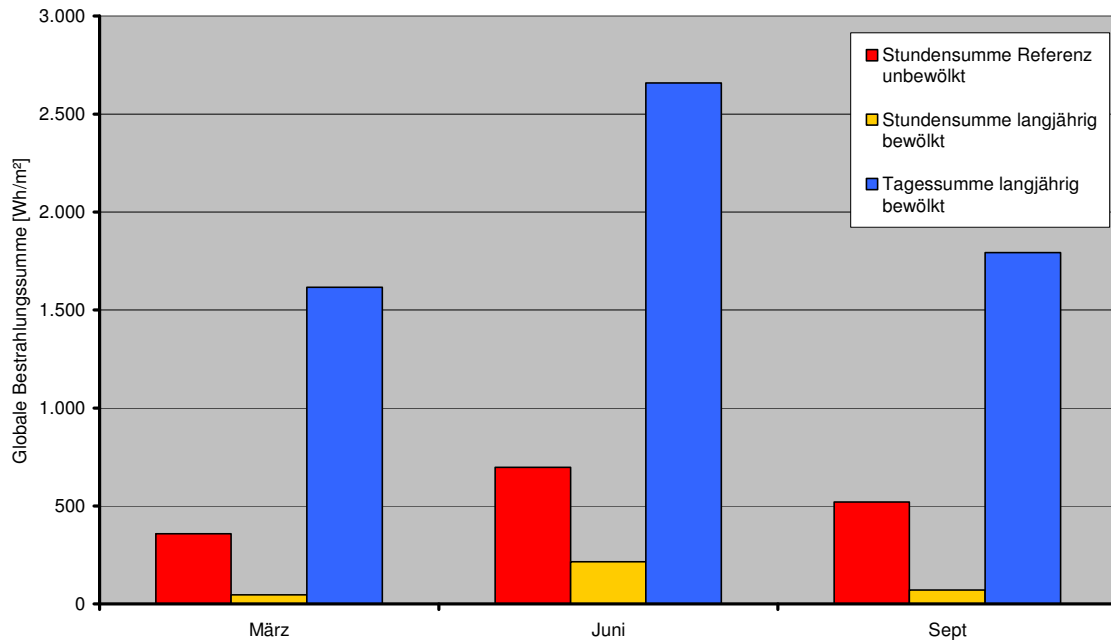


Diagramm 16: Bestrahlungssummen 07:00 wolkenlos und vergleichend statistisch bewölkt

Bestrahlungssummen zu den Referenzzeitpunkten 12:00

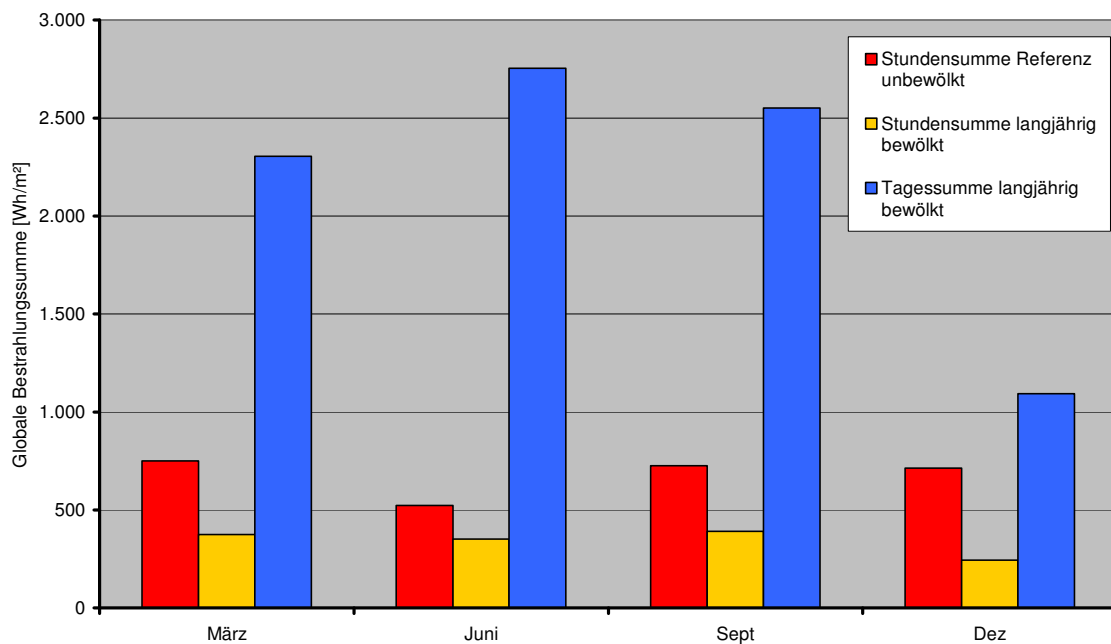


Diagramm 17: Bestrahlungssummen 12:00 wolkenlos und vergleichend statistisch bewölkt

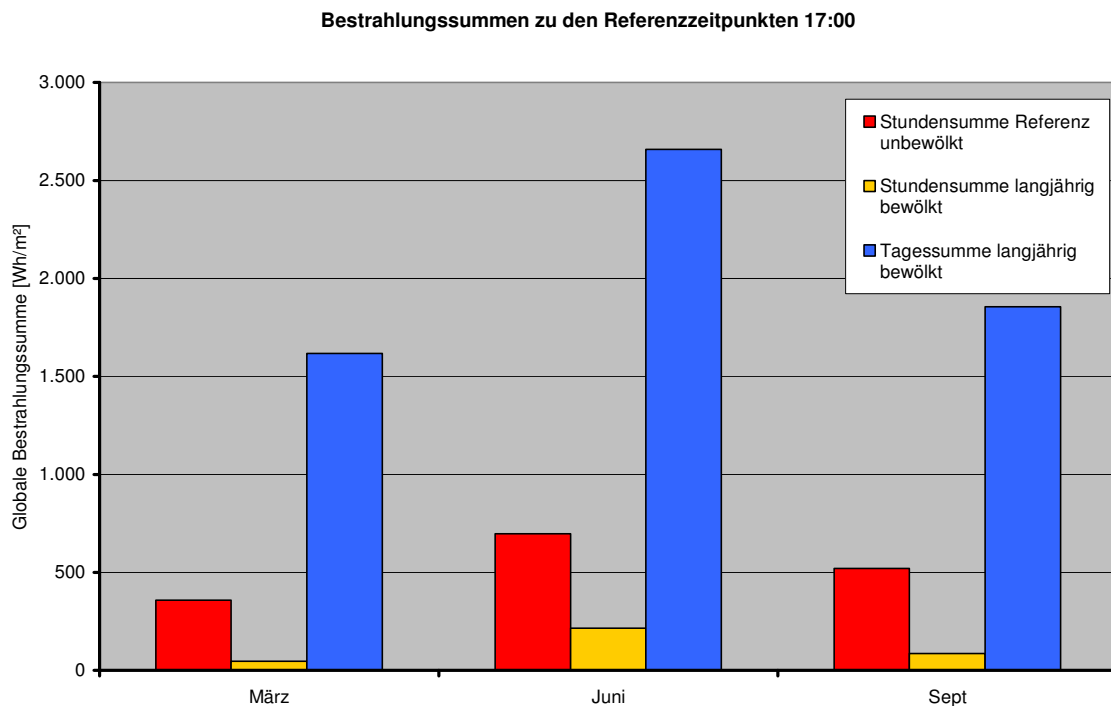


Diagramm 18: Bestrahlungssummen 17:00 wolkenlos und vergleichend statistisch bewölkt

4.5.2.2.3.1. Interpretation

Die vorangegangenen tabellarisch und grafisch dargestellten Ergebnisse können wie folgt interpretiert werden.

Während der Mittagsstunde an einem klaren 15. März wird auf einer vertikalen südorientierten Messfläche eine Bestrahlungssumme von 749 Wh/m^2 festgestellt. Zur selben Stunde unter Berücksichtigung statistischer Bewölkung beträgt die Bestrahlungssumme nur 373 Wh/m^2 oder 50% davon. Im langjährigen Mittel, also mit Wolken, trifft auf dieselbe Fläche eine tägliche Bestrahlungssumme von 2.304 Wh/m^2 . Das entspricht etwa dem 3,1-fachen der Stundensumme bei wolkenlosen Referenzbedingungen.

Während der Mittagsstunde an einem klaren 15. Juni wird auf einer vertikalen südorientierten Messfläche eine Bestrahlungssumme von 523 Wh/m^2 festgestellt. Zur selben Stunde unter Berücksichtigung statistischer Bewölkung beträgt die Bestrahlungssumme nur 351 Wh/m^2 oder 47% davon. Im langjährigen Mittel, also mit Wolken, trifft auf dieselbe Fläche eine tägliche Bestrahlungssumme von 2.754 Wh/m^2 . Das entspricht etwa dem 5,3-fachen der Stundensumme bei wolkenlosen Referenzbedingungen.

Während der Mittagsstunde an einem klaren 15. September wird auf einer vertikalen südorientierten Messfläche eine Bestrahlungssumme von 726 Wh/m^2 festgestellt. Zur selben Stunde unter Berücksichtigung statistischer Bewölkung beträgt die Bestrahlungssumme nur 390 Wh/m^2 oder 54% davon. Im langjährigen Mittel, also mit Wolken, trifft auf dieselbe Fläche eine tägliche Bestrahlungssumme von 2.551 Wh/m^2 .

Das entspricht etwa dem 3,5-fachen der Stundensumme bei wolkenlosen Referenzbedingungen.

Während der Mittagsstunde an einem klaren 15. Dezember wird auf einer vertikalen südorientierten Messfläche eine Bestrahlungssumme von 713 Wh/m^2 festgestellt. Zur selben Stunde unter Berücksichtigung statistischer Bewölkung beträgt die Bestrahlungssumme nur 244 Wh/m^2 oder 34% davon. Im langjährigen Mittel, also mit Wolken, trifft auf dieselbe Fläche eine tägliche Bestrahlungssumme von 1.094 Wh/m^2 . Das entspricht etwa dem 1,5-fachen der Stundensumme bei wolkenlosen Referenzbedingungen.

Vor diesem Hintergrund sind die Ergebnisse der Parameterstudie über die Wirkpotentiale der Strahlungsverhältnisse hinter einer Glasscheibe zu beurteilen und angemessen zu relativieren.

5. Strahlungsdurchgang durch technische Funktionsgläser

Im vorliegenden Kapitel wird der Strahlungsdurchgang durch technische Funktionsglasscheiben, als Grundlage für insbesondere die Bearbeitung der ersten Hypothese, also der Fragestellung nach der photophysiologischen Qualität des Tageslichts in Innenräumen erörtert. Darüber hinaus fließen die hier erarbeiteten Kennwerte auch als Parameter für die Modellierung einer Glasscheibe zur Untersuchung der zweiten Hypothese, der vergleichenden Potentialstudie von solarstrahlungsinduziertem thermischen Verhalten und optimierter Tageslichtnutzung ein.

Ganz bewusst wird die Betrachtung im Folgenden auf jene Qualitäten von Gläsern und Verglasungen beschränkt, die für die Abhandlung von zumindest einer der beiden aufgeworfenen Hypothesen von Relevanz sind. Nicht enthalten sind somit Erläuterungen zu statischen Qualitäten, zu produktionsbedingten Dimensionsbeschränkungen, zu Herstellungskosten oder ähnlichem, die aus Sicht der baupraktischen Anwendung ebenso von Wichtigkeit sind. Die Auswahl der, in dieser Arbeit diskutierten, technischen Funktionsglasscheiben wird auf heute baupraktisch zum Einsatz kommende Typen begrenzt.¹⁶³

Wobei unter dem Begriff der technischen Funktionsglasscheibe jene Palette an für die bautechnische Anwendung verfügbare Produkten verstanden wird, die zusätzlich zur immanenten Glasqualität der Transparenz für Licht gezielt herbeigeführte ergänzende Qualitäten der Wärmedämmung oder des Sonnenschutzes aufweisen.

Im Sinne einer Präzisierung der Kapitelüberschrift bezieht sich die vorgenommene Analyse des Strahlungsdurchgangs immer auf die terrestrische Sonnenstrahlung mit ihren im Kapitel 4 eingehend erläuterten Eigenschaften.

5.1. Physikalische Grundlagen

Beeinflussungen der einfallenden Strahlung treten beim Strahlungsdurchgang durch Gläser oder andere transparente Schichten stets an den beiden Oberflächen des Materials und im Inneren desselben auf.

An beiden Oberflächen, der Eintritts- und der Austrittsebene, zeigt sich das Phänomen der Reflexion und der Brechung. Im Inneren des Materials tritt das Phänomen der Extinktion durch Absorption auf. Die Phänomene der Reflexion und der Brechung zeigen sich darüber hinaus mit denselben Gesetzmäßigkeiten nicht nur an den Grenzflächen zwischen Luft beziehungsweise anderen Gasen oder Gasgemischen und einem transparenten Festkörper, sondern auch an den Grenzflächen zwischen zwei transparenten Festkörpern.

¹⁶³ Nicht berücksichtigt werden in diesem Sinn Materialien wie Silikatgläser oder Quarzgläser, die auf Grund ihrer Produktionskosten, Verarbeitbarkeit oder Ähnlichem bislang technischen oder medizinischen Spezialanwendungen vorbehalten sind.

Nachdem im Bauwesen stets aus planparallelen Schichten aufgebaute Verglasungen eingesetzt werden, erfolgt die Brechung bei Eintritt in eine transparente Schichte stets gegengleich zu jener beim Austritt aus dieser Schichte. Die Richtungsänderungen der Strahlung heben sich somit auf, weshalb die Brechung als Einzelphänomen im Strahlungsdurchgang von Glas im Bauwesen keine Rolle zukommt.

Nur mittelbar mit dem Strahlungsdurchgang durch Gläser im Zusammenhang steht das Phänomen der Emission, die insbesondere für den Wärmeschutz von Verglasungen eine zentrale Rolle spielt und daher im gegenständlichen Kapitel ebenfalls in aller Kürze diskutiert wird.

Die zentralen strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen sind somit jene für die Reflexion, die Absorption und die Transmission, definiert in der ÖNORM EN 410 – Glas im Bauwesen.¹⁶⁴

Für alle drei Phänomene werden dimensionslose Kennzahlen definiert: der Reflexionsgrad, der Absorptionsgrad und der Transmissionsgrad. Sie sind definiert als das Verhältnis der reflektierten beziehungsweise absorbierten beziehungsweise transmittierten Strahlungsintensität zur auftreffenden Strahlungsintensität. Die Summe der drei Kennzahlen ist für dieselbe Wellenlänge stets gleich eins.

5.1.1. Reflexion

Als Reflexion wird jenes Phänomen bezeichnet, das den Verlauf des Strahlengangs eines Strahlenbündels bei Auftreffen auf eine Oberfläche beschreibt. Dabei wird das auf der Oberfläche auftreffende Strahlenbündel von dieser mehr oder weniger stark und unter einer gesetzmäßigen Richtungsänderung zurückgeworfen.¹⁶⁵

Die Reflexion an der Glasoberfläche wird beschrieben durch die dimensionslose Kennzahl des direkten Strahlungsreflexionsgrades ρ , dem Verhältnis zwischen reflektierter und auftreffender Strahlungsintensität. Der Reflexionsgrad ist abhängig von der Wellenlänge der auftreffenden Strahlung und vom Einfallswinkel der auftreffenden Strahlung. Beide Wechselwirkungen lassen sich theoretisch berechnen, letztere durch die Fresnel'schen Gleichungen.¹⁶⁶

Baupraktisch wird im Einklang mit der ÖNORM EN 410 der spektrale Reflexionsgrad $\rho(\lambda)$ Wellenlängen abhängig für den Bereich von 300 nm bis 2.500 nm für einen quasi-parallelen, beinahe senkrechten Strahlungseinfall gemessen.

Durch gewichtete Mittelwertbildung über das solare Spektrum von 300 nm bis 2.500 nm beziehungsweise über das sichtbare Spektrum von 380 nm bis 780 nm werden aus dem spektralen Reflexionsgrad $\rho(\lambda)$ die Kennwerte des direkten Strahlungsreflexionsgrades ρ_e und des Lichtreflexionsgrades ρ_v gebildet.

¹⁶⁴ ÖNORM EN 410 (1998)

¹⁶⁵ Nach Bergmann-Schaefer (1966)

¹⁶⁶ Augustin Jean Fresnel, französischer Physiker und Ingenieur, 1788–1827

Die Richtungsabhängigkeit des Reflexionsgrades wird in der ÖNORM ÖNORM EN 410 nicht beschrieben. In der gegenständlichen Arbeit wurde sie unter Heranziehung des Softwarepakets WINDOW¹⁶⁷ und der Internationalen Glasdatenbank, abgekürzt mit IGDB¹⁶⁸, des Lawrence-Berkeley-National-Laboratory¹⁶⁹ berücksichtigt.

5.1.2. Absorption

Absorption tritt beim Strahlungsdurchgang durch Glas in Form einer Abschwächung der Strahlungsintensität auf. Die Gesetzmäßigkeit dieser Strahlungsextinktion durch Absorption wird, wie schon beim Strahlungsdurchgang durch die Atmosphäre erläutert, mit dem Lambert-Beer'schen Gesetz (Formel 19) beschrieben. Es gilt:

$$I_1 = I_0 \cdot e^{(-K \cdot l)}$$

mit K: Absorptionskonstante

mit l: Weglänge

mit I₁: Intensität der transmittierten Strahlung

mit I₀: Intensität der einfallenden Strahlung

Formel 19: Lambert-Beer'sches Gesetz der Strahlungsextinktion für den Durchgang durch Glas

Das Verhältnis von $I_1/I_0 = \exp(-K \cdot l)$ wird als Transmissionsgrad bezeichnet und in der einschlägigen Fachliteratur sowie auch in der ÖNORM ÖNORM EN 410 mit τ abgekürzt.

Wie auch die Reflexion ist die Absorption abhängig von der Wellenlänge der durchtretenden Strahlung und darüber hinaus auch signifikant von der Weglänge des Strahlungsdurchgangs und damit vom Einfallswinkel. Praktisch wird die Absorption von Glas zumeist mittelbar aus der Messung der Reflexion und der Transmission abgeleitet. Es gilt der der folgend beschriebene Zusammenhang (Formel 20).

$$\alpha(\lambda) = 1 - \rho(\lambda) - \tau(\lambda)$$

Formel 20: Zusammenhang zwischen spektralem Reflexions-, Absorptions- und Transmissionsgrad

¹⁶⁷ WINDOW 5.2.17a, Softwarepaket zur Berechnung strahlungsphysikalischer und thermischer Kennzahlen von Fenstern, <http://windows.lbl.gov/software/window/window.htm> (03.02.2009)

¹⁶⁸ International Glazing Database, Optical data for over 2900 glazing products, <http://windows.lbl.gov/materials/IGDB/default.htm> (03.02.2009)

¹⁶⁹ Lawrence-Berkeley-National-Laboratory, Berkeley, Kalifornien, USA,

5.1.3. Transmission

Die Transmission solarer Strahlung durch Glas wird analog der Reflexion und der Absorption mit dem Transmissionsgrad beschrieben und mit τ bezeichnet.

Wie bereits eingangs erläutert, ist der Transmissionsgrad stets die Ergänzung auf eins aus der Summe von Reflexionsgrad und Absorptionsgrad. Demgemäß ist auch der Transmissionsgrad abhängig von Wellenlängen und Einfallswinkel.

Die folgenden beiden Diagramme zeigen die Kennwerte des Reflexionsgrades, des Absorptionsgrades und des verbleibenden Transmissionsgrades für eine exemplarische unbeschichtete Einscheiben-Verglasung mit 6 mm Dicke, zunächst für einen quasi-parallel, beinahe senkrechten Strahlungseinfall über der Wellenlänge (Diagramm 19) und im Anschluss über dem Einfallswinkel gegen die Flächennormale (Diagramm 20).¹⁷⁰,

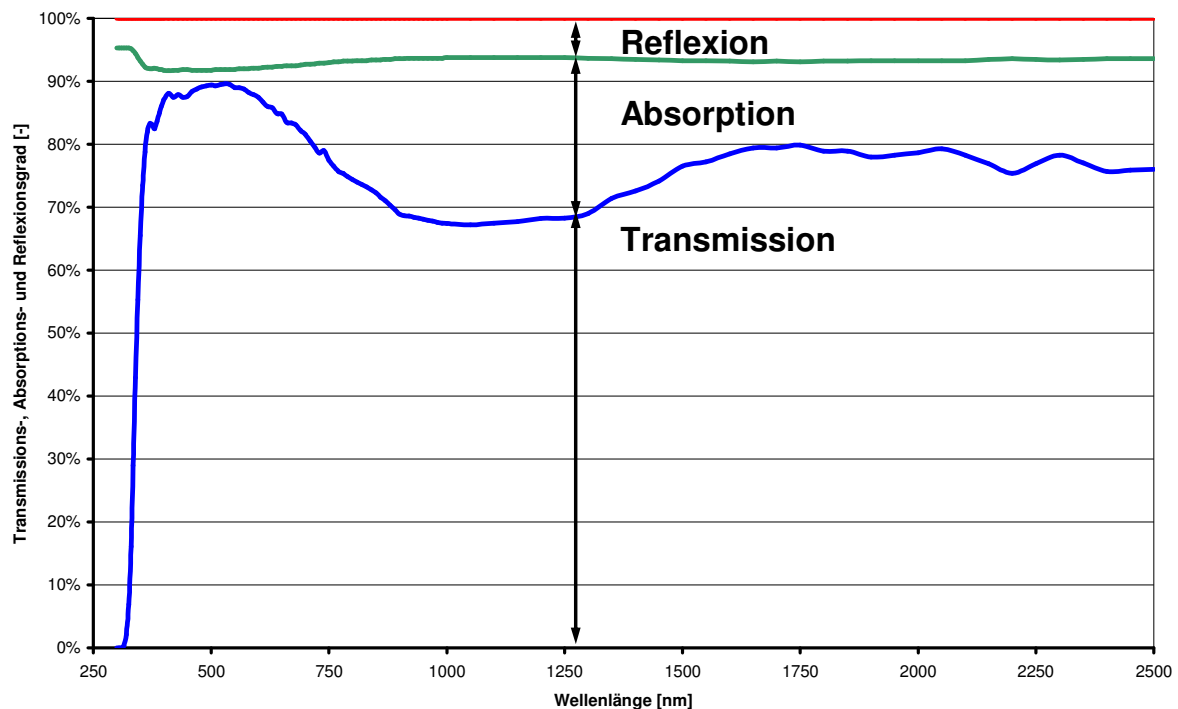


Diagramm 19: Reflexion, Absorption und Transmission einer 6mm Klarglasscheibe in Abhängigkeit von der Wellenlänge bei senkrechtem Strahlungseinfall

¹⁷⁰ Diagramm 19 und Diagramm 20: Peter Holzer, 2009, unter Verwendung der Software optics 5.1.2 mit IGDB 16.3, für PLANILUX 6 mm, ID 11839

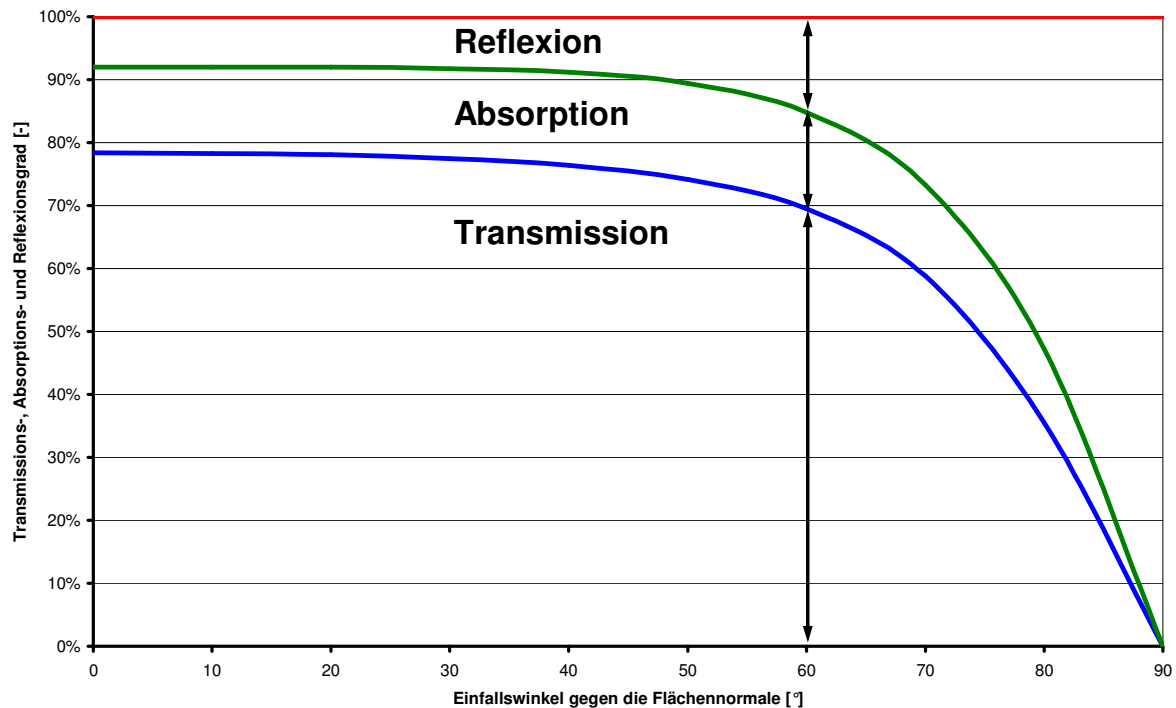


Diagramm 20: Reflexion, Absorption und Transmission einer 6mm Klarglasscheibe in Abhängigkeit vom Einfallswinkel (über das Spektrum gemittelte Werte)

Für den UV-A-Spektralbereich mit Wellenlängen zwischen 315 nm und 380 nm weist Bauglas einen rasch mit sinkender Wellenlänge gegen null fallenden Transmissionsgrad auf. Für Strahlung im UV-B-Spektralbereich zwischen 280 nm und 315 nm ist Bauglas praktisch intransparent. Zur Quantifizierung dieser, photophysiologisch besonders bedeutungsvollen Transmissionseigenschaften im UV-Bereich werden zwei Grenzwellenlängen eingeführt.

Zunächst λ_g als jene Wellenlänge, bei der der spektrale Transmissionsgrad von 50% überschritten wird und λ_0 als jene Wellenlänge, bei der die Verlängerung des steil abfallenden Teils der Transmissionskurve im Diagramm des Transmissionsgrades die x-Achse schneidet. λ_0 hat im Vergleich zu λ_g den Vorteil der weitgehenden Unempfindlichkeit gegenüber punktuellen Messfehlern und gegenüber abweichenden Eigenschaften einzelner Glasproben.

Das folgende Diagramm (Diagramm 21) zeigt diese beiden Grenzwellenlängen exemplarisch für eine unbeschichtete 6 mm dicke Einscheiben-Verglasung. Der Darstellungsbereich erstreckt sich zwischen den Wellenlängen von 280 nm bis 380 nm, umfasst also die Spektralbereiche von UV-B und UV-A. Es ergibt sich demnach λ_g mit 343 nm und λ_0 mit 325 nm.¹⁷¹

¹⁷¹ Diagramm 21 Peter Holzer, 2009, unter Verwendung der Software optics 5.1.2 mit IGDB 16.3, für PLANILUX 6 mm, ID 11839

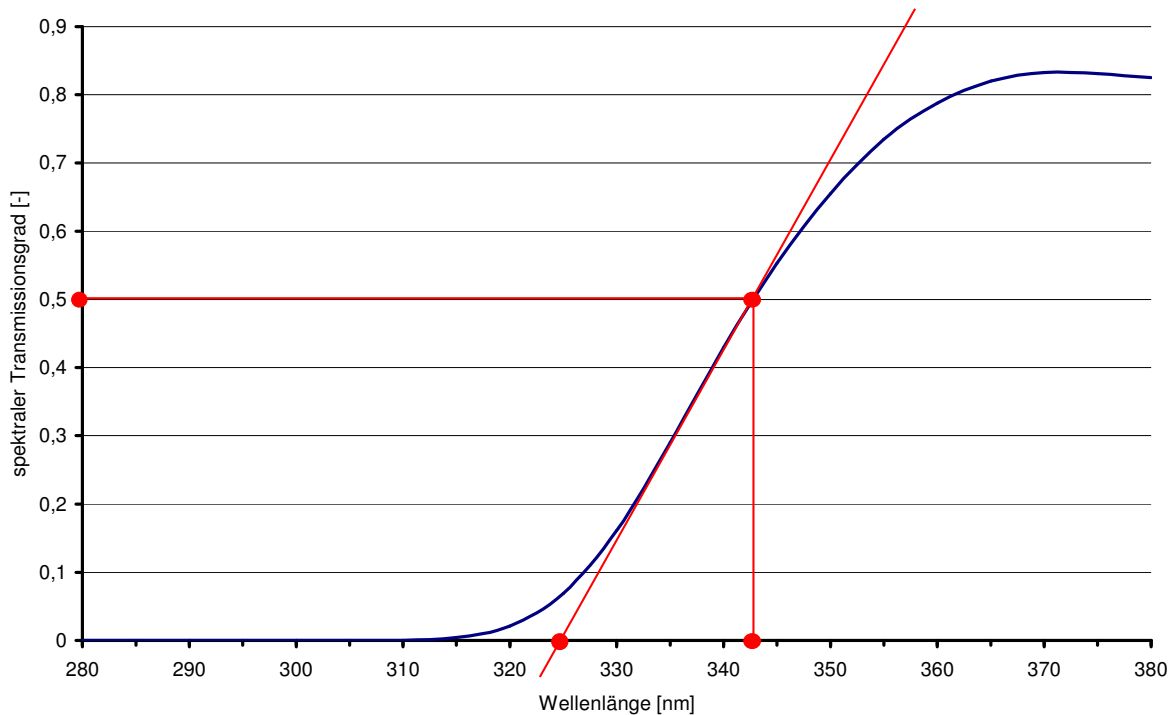


Diagramm 21: Transmissionsgrad von 6 mm Klarglas im UV-Bereich

5.1.4. Emission

Als Emission¹⁷² wird in der Physik allgemein die Aussendung von Energie oder Materie in Form von Wellen oder Teilchen bezeichnet. Im konkreten Anwendungsfall tritt die elektromagnetische Strahlung zwischen der Verglasung und der Umgebung oder auch zwischen Gläsern untereinander auf. Die für die Bauphysik elementaren Zusammenhänge sind im Stefan-Boltzmann'schen und im Kirchhoff'schen Gesetz beschrieben.^{173,174}

Das Stefan-Boltzmann'sche Gesetz (Formel 22) beschreibt die abgestrahlte Leistungsdichte einer schwarzen Oberfläche in Abhängigkeit von ihrer absoluten Temperatur:

$$\varrho = \sigma \cdot T^4$$

mit ϱ : abgestrahlte Leistungsdichte in W/m²

mit σ : Stefan-Boltzmann'sche Strahlungskonstante in W/(m²K⁴)

mit T: absolute Temperatur der Oberfläche in K

Formel 21: Stefan-Boltzmann'sches Gesetz für schwarze Strahler

¹⁷² Aus dem Lateinischen:emittere, aussenden

¹⁷³ Josef Stefan Boltzmann, österreichischer Physiker, 1835-1893

¹⁷⁴ Gustav Robert Kirchhoff, deutscher Physiker, 1824–1887

Mit der Einführung der Oberflächeneigenschaft des dimensionslosen Emissionsgrades lässt sich das Stefan-Boltzmann'sche Gesetz erweitern zu: (Formel 22)

$$\varrho = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

mit ϱ : abgestrahlte Leistungsdichte in W/m²

mit ε : Emissionsgrad (dimensionslos)

mit σ : Stefan-Boltzmann'sche Strahlungskonstante in W/(m²K⁴)

mit T: absolute Temperatur der Oberfläche in K

Formel 22: Erweitertes Stefan-Boltzmann'sches Gesetz für nicht schwarze Strahler

Die Stefan-Boltzmann'sche Strahlungskonstante σ bezeichnet das Emissionsvermögen einer ideal schwarzen Oberfläche, also einer Oberfläche mit dem Absorptionsgrad von eins. Sie beträgt 5,67 W/(m²K⁴). Der Emissionsgrad ε bezeichnet als dimensionsloser Faktor das Emissionsvermögen einer realen Oberfläche im Verhältnis zu jenem der ideal schwarzen Oberfläche.

Im Kirchhoff'schen Gesetz wird festgeschrieben, dass der Emissionsgrad eines Strahlers identisch ist mit seinem Absorptionsgrad bei gleicher Temperatur.

In der Verglasungstechnik wird der Emissionsgrad von Glasoberflächen durch Aufbringen dünner, hochtransparenter Metallbedampfungen gezielt gesenkt, um die Wärmeabstrahlung dieser Oberflächen zu reduzieren. Heute übliche Schichtdicken dieser Bedampfungen liegen bei 10 nm. Am häufigsten eingesetzte Materialien sind Silber, Gold und Aluminium. Die erzielten Emissionsgrade erreichen in der industriellen Fertigung vergleichsweise niedrige Werte von 3% bis 4%, während der Emissionsgrad von unbeschichtetem Glas einen Wert von etwa 86% erreicht.

5.2. Werkstofftechnische Grundlagen

Die Bezeichnung Glas leitet sich aus dem germanischen „glasa“, der Bezeichnung für Bernstein ab. Glas ist eine ohne wesentliche Kristallbildung erstarrte anorganische Schmelze aus Quarzsand¹⁷⁵, Zusatzstoffen wie Soda¹⁷⁶, auch als Natron bezeichnet, Pottasche¹⁷⁷, Manganoxid¹⁷⁸ und anderen Metalloxiden¹⁷⁹.

Hinsichtlich ihrer Funktion in der Glaszusammensetzung werden diese Bestandteile unterschieden in Netzwerkbildner wie Quarzsand, Netzwerkwandler wie Natriumoxid¹⁸⁰ oder Kaliumoxid¹⁸¹, Stabilisatoren wie Manganoxid und schließlich Flussmittel wie Soda oder Pottasche.

Glasarten werden insbesondere in Hinsicht auf ihre chemischen Hauptbestandteile unterschieden, wobei Kalknatronglas, Borosilikatglas und Bleiglas zusammen mehr als 95% der weltweiten Glasproduktion ausmachen.

5.2.1. Kalknatronglas

Für Bauanwendungen ist Kalknatronglas heute der praktisch ausschließlich eingesetzte Werkstoff. Neben dem Ausgangsmaterial Siliziumoxid mit einem Anteil von 70% bis 75% enthält Kalknatronglas einen hohen Anteil von zirka 15% Natriumoxid 5% bis 10% gebrannten Kalk¹⁸² und weitere Zuschlagstoffe.

Kalknatronglas zeichnet sich durch gute Lichtdurchlässigkeit, gute Verarbeitbarkeit und eine porenfreie Oberfläche bei gleichzeitig kostengünstiger Herstellbarkeit aus.

Wie bereits erwähnt, ist Kalknatronglas im UV-A-Spektralbereich für Lichtstrahlung nur gering transparent und ab dem UV-B-Spektralbereich praktisch intransparent, mit Grenzwellenlängen von $\lambda_g = 345 \text{ nm}$ und $\lambda_0 = 325 \text{ nm}$ bei 6 mm Glasdicke beziehungsweise von $\lambda_g = 335 \text{ nm}$ und $\lambda_0 = 320 \text{ nm}$ bei 4 mm Glasdicke.¹⁸³

¹⁷⁵ chemische Bezeichnung Siliziumoxid (SiO_2)

¹⁷⁶ chemische Bezeichnung Natriumcarbonat (Na_2CO_3)

¹⁷⁷ chemische Bezeichnung Kaliumcarbonat (K_2CO_3)

¹⁷⁸ chemische Bezeichnung Manganoxid (MgO)

¹⁷⁹ Thienel (2006)

¹⁸⁰ chemische Bezeichnung Natriumoxid (Na_2O)

¹⁸¹ chemische Bezeichnung Kaliumoxid (K_2O)

¹⁸² chemische Bezeichnung Kalziumoxid (CaO)

¹⁸³ Angaben für PLANILUX 4 mm und 6 mm, ID 11004 und ID 11839 aus der International Glazing Database, IGDB 16.3, <http://windows.lbl.gov/materials/IGDB/default.htm> (03.02.2009)

5.2.2. Borosilikatglas

Einem signifikant hohen Anteil von mehr als 80% des Ausgangsmaterials Siliziumoxid werden ein Anteil von zirka 13% Bortrioxid¹⁸⁴, sowie in geringen Mengen, weitere Zusatzstoffe beigemischt. Borosilikatglas weist eine hohe Chemikalienbeständigkeit und Hitzefestigkeit auf, weshalb es in chemischen und medizinischen Anwendungen sowie im Haushalt, jedoch nur in Sonderfällen im Baubereich beispielsweise als Panzerglas zum Einsatz kommt.¹⁸⁵ Ab dem UV-B-Spektralbereich hin zu höheren Wellenlängen ist Borosilikatglas bedingt strahlungsdurchlässig, mit Grenzwellenlängen von $\lambda_g = 300$ nm und $\lambda_0 = 285$ nm bei 4 mm Glasdicke.¹⁸⁶

5.2.3. Quarzglas

Quarzglas, auch als Kieselglas bezeichnet, besteht ausschließlich aus Quarzsand. Es weist einen signifikant hohen Transmissionsgrad im ultravioletten Bereich und auch im nahen Infrarotbereich auf. Die Grenzwellenlängen im UV-Spektralbereich liegen etwa bei $\lambda_g = 175$ nm und $\lambda_0 = 170$ nm im Gegensatz zu $\lambda_g = 345$ nm und $\lambda_0 = 330$ nm bei Kalknatronglas.^{187,188}

Die Herstellung von Quarzglas ist kostenintensiv. Die Anwendung von Quarzglas ist daher derzeit hochwertigen Produkten aus der Forschung, Gerätetechnik, Medizin und ähnlichen Anwendungen vorbehalten.¹⁸⁹

5.2.4. Eisenarmes Glas

Eisenarmes Glas, auch unter der Bezeichnung Weissglas gebräuchlich, weist einen sehr geringen Anteil an Eisenoxid¹⁹⁰ von weniger als 0,01% auf. Insbesondere im langwelligen sichtbaren Wellenlängenbereich als auch im nahen IR weist eisenarmes Glas eine deutlich höhere Transmission auf als normales Kalknatronglas. Im UV-Bereich ist der Transmissionsgrad geringfügig erhöht: Die diesbezüglichen Grenzwellenlängen liegen etwa bei $\lambda_g = 320$ nm und $\lambda_0 = 300$ nm im Gegensatz zu $\lambda_g = 345$ nm und $\lambda_0 = 330$ nm bei Kalknatronglas.^{191,192}

¹⁸⁴ Chemische Bezeichnung Bortrioxid (B_2O_3)

¹⁸⁵ Gängige Handelsnamen von Borosilikatglas sind: Jenaer Glas, Duran, Pyrex, Imlabor, Borofloat, Simax, Solidex, Fiolax

¹⁸⁶ Herstellerangaben für Schott Borofloat, <http://www.schott.com/hometech/german/download/> (06.03.2009)

¹⁸⁷ Herstellerangaben für Heraeus Quarzglas, http://www.heraeus-quarzglas.de/de/quarzglas/opticalproperties/Optical_properties.aspx (04.03.2009)

¹⁸⁸ Angaben für PLANILUX 6 mm, ID 11839 aus der International Glazing Database, IGDB 16.3, <http://windows.lbl.gov/materials/IGDB/default.htm> (03.02.2009)

¹⁸⁹ Namhafte Hersteller von Quarzglas sind z.B. Heraeus, Deutschland und Saint-Gobain Quarz

¹⁹⁰ Chemische Bezeichnung Eisenoxid (Fe_2O_3)

¹⁹¹ Herstellerangaben für Heraeus Quarzglas, http://www.heraeus-quarzglas.de/de/quarzglas/opticalproperties/Optical_properties.aspx (04.03.2009)

¹⁹² Angaben für PLANILUX 6 mm, ID 11839 aus der International Glazing Database, IGDB 16.3, <http://windows.lbl.gov/materials/IGDB/default.htm> vom 03.02.2009

Weissglas ist teurer als normales Kalknatronglas, ist aber in den bautechnisch erforderlichen Größen lieferbar und ist auch mit allen gängigen Techniken bearbeitbar. Weissglas kommt insbesondere als Abdeckung von Solarkollektoren oder Photovoltaikmodulen zum Einsatz.

5.3. Technische Funktionsglasscheiben

Im Folgenden werden die Eigenschaften von technischen Funktionsglasscheiben anhand von Kennzahlen skizziert, wobei sich der Umfang der Erläuterung konsequent auf jene Qualitäten beschränkt, die für die Beantwortung der Fragestellungen der gegenständlichen Arbeit von Relevanz sind.

5.3.1. Grundprinzipien

Zur gezielten Veränderung spezifischer physikalischer Eigenschaften wird für Bauanwendungen das Ausgangsmaterial Glas zu technischen Funktionsglasscheiben weiterverarbeitet und veredelt. Drei grundsätzlich unterschiedliche Einzelmaßnahmen werden dabei gegenwärtig singulär oder in Kombinationen angewandt.

- > Erstens das aditive Verbinden zweier oder mehrerer Glasscheiben unter Bildung eines Scheibenzwischenraums zu einer luftdicht verschlossenen funktionalen Einheit.
- > Zweitens das Aufbringen von Beschichtungen aus dünnen und daher weitestgehend transparenten Metalllagen, insbesondere aus Silber, Gold oder Aluminium an einer oder mehreren Glasoberflächen der Scheibenkombinationen.
- > Drittens die Füllung der Scheibenzwischenräume mit Edelgasen.

In der Mehrzahl dienen die genannten Maßnahmen der Verbesserung der Wärmedämmung und des Sonnenschutzes, wobei neben den diesbezüglichen Eigenschaften auch der Erhalt einer möglichst hohen Lichttransmission ein Qualitätskriterium darstellt.

5.3.1.1. Mehrscheibenverglasungen

Die Kombination zweier Glasscheiben zu einer Mehrfachverglasung mit einem definierten Scheibenzwischenraum zielt funktional auf eine Verbesserung des Wärmeschutzes ab. Die dauerhaften, untrennbaren verbundenen Scheiben stellen den aktuell marktdominierenden Typ der Isolierverglasung dar.^{193,194,195,196}

¹⁹³ Der Ursprung der Mehrscheibenverglasung ist die Hintereinanderanordnung zweier Fenster, wie sie bereits aus römischen Bädern überliefert sind, wie sie in unserem Kulturkreis als Winterfenster seit dem 16. Jahrhundert umgesetzt wurde und wie sie über das Doppelfenster zu Beginn des 19. Jahrhunderts zum Kastenfenster als Baukultur prägendes Element des Biedermeier und der Gründerzeit weiterentwickelt wurde. In den Verbundfenstern, wie sie seit den 30er Jahren des vorigen Jahrhunderts Verwendung finden, wurden die beiden Scheiben gekoppelt und der Scheibenzwischenraum erheblich verringert.

¹⁹⁴ Bernard (2009)

¹⁹⁵ Ein erstes diesbezügliches Patent wurde in den USA bereits 1865 angemeldet, die industrielle Fertigung startete aber erst in den 50er Jahren.

¹⁹⁶ aus Pilkington Glaskompendium, Ausgabe 10, 2007, <http://www.pilkington.com/europe/austria/german/building+products/weitere+downloads.htm> (06.03.2009)

Der Glasrandverbund, das technisch anspruchsvolle Verbindungselement der Isolierverglasung, wird heute mit einem Abstandhalter aus Aluminium, Edelstahl oder Kunststoff und meist zwei Dichtungsstufen aus innen Butyl und außen Thiokol oder auch Polyurethan, bei außenexponiertem Glasrandverbund auch Silikon, ausgeführt.^{197,198}

Zur eindeutigen Benennung der jeweiligen Oberflächen von Mehrfachverglasungen wurde die Nomenklatur eingeführt, die Scheibenoberflächen beginnend mit der äußersten nach innen ansteigend durchnummerieren. Ebene 1 ist demnach die Außenoberfläche der nach außen abschließenden Scheibe, Ebene 2 ist die Innenseite derselben Scheibe und so weiter.

Der Wärmedurchgangskoeffizient, im Weiteren mit der Abkürzung U-Wert bezeichnet,¹⁹⁹ der Verglasung verbessert sich durch den Schritt von der Einscheiben-Verglasung zur Isolierverglasung von $U = 5,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ auf $U = 2,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Der Wärmedurchgangswiderstand wird dabei von $0,175 \text{ (m}^2\text{K)/W}$ auf $0,350 \text{ (m}^2\text{K)/W}$ erhöht, was geringfügig mehr als einer Verdopplung entspricht. Der Wärmetransport im Luftspalt erfolgt dabei zu etwa $\frac{2}{3}$ durch Wärmestrahlung zwischen den Scheiben und nur zu etwa $\frac{1}{3}$ durch Wärmeleitung und Konvektion.^{200,201}

5.3.1.2. Beschichtungen

Zur Verringerung des Wärmetransports im Scheibenzwischenraum durch Strahlung werden an einer oder beiden Glasoberflächen gegen den Scheibenzwischenraum transparente Metallbedampfung von zirka 10 nm Dicke und mit einer gezielt niedrigen Emissivität im Infrarotbereich aufgebracht. Die effektivsten Materialien dafür sind Silber und Gold. Funktionsbeschichtungen werden aktuell mehrlagig aufgebracht und senken den Emissionsgrad der Oberfläche im relevanten Infrarotbereich von zirka 89% auf 3% bis 4%.

Mit einer heute handelsüblichen Beschichtung auf der 3. Ebene einer Zweischeiben-Isolierverglasung wird der U-Wert der oben skizzierten Verglasung von zuvor noch $2,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ auf nur mehr $1,4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ gesenkt.

Bei der Optimierung der Sonnenschutzigenschaften von Funktionsglasscheiben erfolgt die Aufbringung der Beschichtung stets auf der 2. Ebene. Diese Beschichtung hat zum Ziel gute Transparenz im sichtbaren Strahlungsbereich sowie einen hohen Reflexionsgrad

¹⁹⁷ Mittlerweile historische Entwicklungen waren die Randverschweißung, wie sie unter den Produktnamen Gado und Sedo von der deutschen Flachglas bis in die frühen 90er Jahre gefertigt wurde und die Randverlötung mit einem Bleisteg, die unter dem Produktnamen Thermopane vertrieben wurde.

¹⁹⁸ aus Gestalten mit Glas, 6. Auflage, Interpane AG, 2002

¹⁹⁹ siehe dazu auch Kapitel 5.3.2.1.

²⁰⁰ Ergebnisse eigener Berechnungen unter Heranziehung der ÖNORM EN 673 für 6 mm Einfachverglasung und einer Zweischeiben-Isolierverglasung von je 6 mm Glasstärke und 16 mm luftgefülltem Scheibenzwischenraum, mit beiden Scheiben unbeschichtet.

²⁰¹ ÖNORM EN 673 (2003)

und somit niedrige Emissivität im infraroten Bereich zu erreichen. Sie weist daher eine entsprechende maximale Selektivität auf.

Die folgenden beiden Diagramme zeigen den Verlauf des spektralen Transmissionsgrades über der Wellenlänge von 250 nm bis 2.500 nm (Diagramm 22) und von 280 nm bis 480 nm (Diagramm 23) für ein unbeschichtetes Zweischeiben-Isolierglas und vergleichend für ein luftgefülltes Zweischeiben-Wärmeschutzglas.

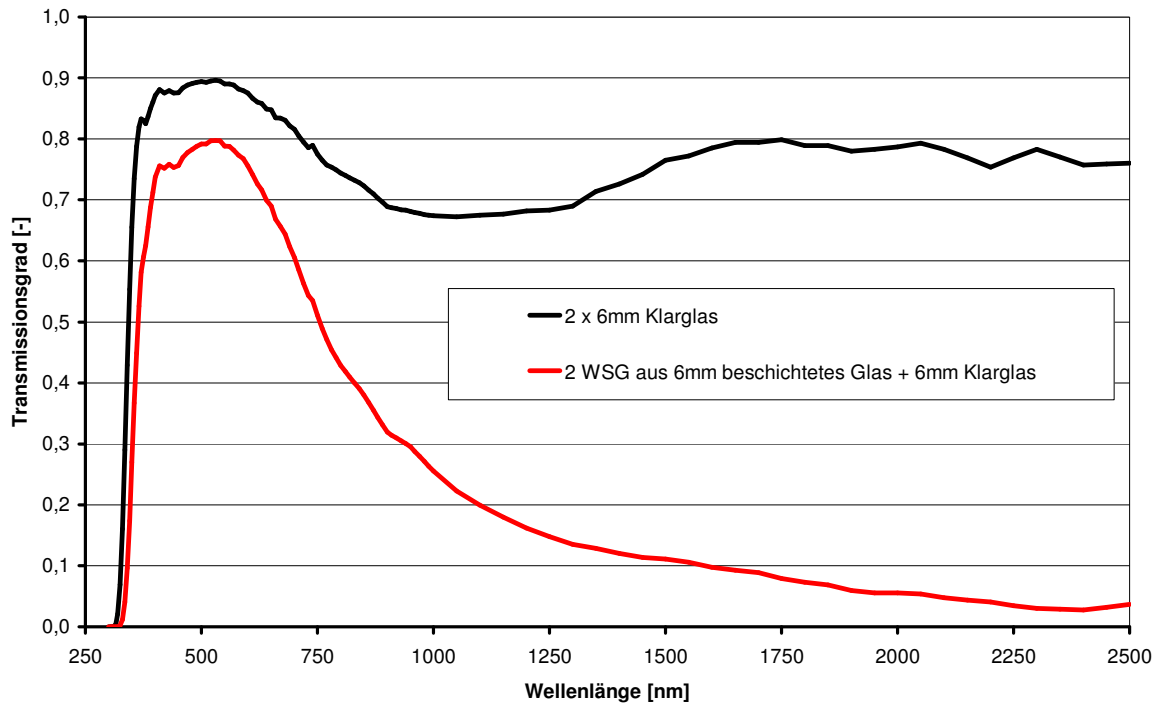


Diagramm 22: Effekt der Low-e-Beschichtung auf Ebene 3 auf den spektralen Transmissionsgrad in einem Zweischeibenglas (dargestellter Wellenlängenbereich von 250 nm bis 2.500 nm)

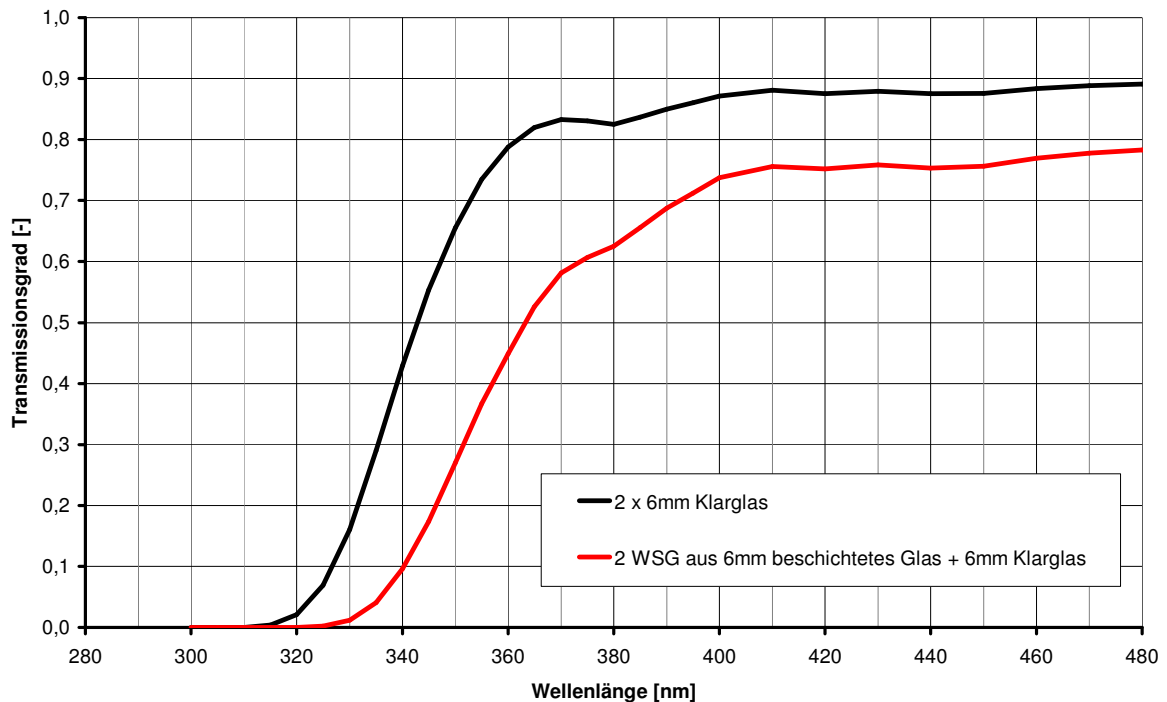


Diagramm 23: Effekt der Low-e-Beschichtung auf den spektralen Transmissionsgrad in einem Zweischiebenglas (dargestellter Wellenlängenbereich 280 nm bis 480 nm)

5.3.1.3. Gasfüllung des Scheibenzwischenraums

Wie bereits erwähnt, stellt die dritte Maßnahme zur Verbesserung der Wärmedämmung von Funktionsglasscheiben die Füllung der Scheibenzwischenräume mit schweren Gasen dar, wodurch die Wärmeleitung und die Ausbildung von Konvektion verringert werden. Heute gebräuchliche Füllgase sind die Edelgase Argon oder Krypton. Xenon wird wegen seines hohen Preises und seiner beschränkten Verfügbarkeit nicht mehr eingesetzt. Billige Alternativen wie insbesondere CO₂ haben sich bis dato nicht durchgesetzt. Letzteres wegen seiner hohen Neigung zur Diffusion durch die Dichtmaterialien des Glasrandverbunds. Gasfüllgrade von 90% können heute in industrieller Fertigung garantiert werden. Hinsichtlich der Dauerhaftigkeit der Gasfüllgrade lässt die einschlägige Produktnorm eine jährliche Gasverlustrate von 1% zu.

Der U-Wert der bereits vorgestellten Referenzverglasung wird, ausgehend von 2 x 6 mm dicken Glasscheiben, mit 16 mm Scheibenzwischenraum, beschichtet auf Ebene 3, durch die Füllung mit Argon von zuvor 1,4 W/(m²K) auf nunmehr 1,1 W/(m²K) verbessert. Auf die Strahlungstransmission hat die Gasfüllung so gut wie keinen Einfluss.

5.3.2. Kennzahlen technischer Funktionsglasscheiben

Im gegenständlichen Kapitel werden jene Kennzahlen definiert und zusammengefasst, die im Sinne der vorliegenden Fragestellungen von Relevanz sind und jene technischen Funktionsglasscheiben beschreiben, die in der gegenständlichen Arbeit als Referenzverglasungen herangezogen werden.²⁰²

5.3.2.1. Wärmedurchgangskoeffizient

Der Wärmedurchgangskoeffizient von Verglasungen ist definiert als die stationäre Wärmestromdichte je 1 K Temperaturdifferenz zwischen den angrenzenden Umgebungstemperaturen. Er wird stets ohne Randeffekte und demnach für den mittleren Bereich der Verglasung angegeben. Seine Berechnung ist in der europäischen Normung in der EN 673 – Glas im Bauwesen, Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten festgelegt.²⁰³

Als Formelzeichen wird in der genannten Norm „U“ ohne ergänzenden Index und die Einheit $W/(m^2K)$ verwendet. In der Fachliteratur und in Produktinformationen der Glashersteller kommt aber weitgehend durchgängig das Formelzeichen U_g zur Anwendung.²⁰⁴

In der gegenständlichen Arbeit wird die Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten von Verglasungen mit dem Softwarepaket Calumen 2.3.1 durchgeführt, einer Entwicklung der Saint-Gobain Gruppe, zertifiziert nach EN 673 und ÖNORM EN 410 durch das Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE), Freiburg und den Werten entsprechend der nachfolgenden Tabelle (Tabelle 7).²⁰⁵

Bezeichnung	Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert)
Abkürzung	U, U_g
Einheit	$W/(m^2K)$
Normative Verankerung	EN 673 +A1 + A2, zuletzt Dezember 2002
Berechnungswerkzeug	Softwarepaket Calumen 2.3.1

Tabelle 7: Festlegungen zum Wärmedurchgangskoeffizient

²⁰² In Anbetracht der vielfältigen Varianten und der in der Fachliteratur und Normung verwendeten Begrifflichkeit werden gegebenenfalls auch gebräuchliche alternative Benennungen angegeben.

²⁰³ ÖNORM EN 673 (2003)

²⁰⁴ Der ergänzende Index g steht dabei für das deutsche „Glas“ oder das englische „glas“.

²⁰⁵ Calumen 2.3.1, Softwarepaket mit Zertifizierung nach EN 673 und EN 410 zur Berechnung der lichttechnischen, energetischen und thermischen Performance einer Auswahl von Saint-Gobain Verglasungen, www.saint-gobain-glass.com/calumen/ (06.03.2009)

5.3.2.2. Gesamtenergiedurchlassgrad

Der Gesamtenergiedurchlassgrad, im Folgenden mit der Abkürzung g-Wert bezeichnet, von Verglasungen ist definiert als das Verhältnis zwischen rückseitig abgegebener und vorderseitig eingestrahelter Leistungsdichte. Mathematisch ist er die Summe des direkten Strahlungstransmissionsgrades und des sekundären Wärmeabgabegrades. Seine Berechnung ist in der europäischen Normung definiert in der ÖNORM EN 410 – Glas im Bauwesen, Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen.²⁰⁶ Als Formelzeichen wird in der genannten Norm und der überwiegenden Fachliteratur der Buchstabe „g“ in den Einheiten % oder dimensionslos verwendet.

In der gegenständlichen Arbeit wird die Berechnung des Gesamtenergiedurchlassgrades von Verglasungen mit dem Softwarepaket Calumen 2.3.1, einer zuvor bereits genannten Entwicklung der Saint-Gobain Gruppe durchgeführt. Der Gesamtenergiedurchlassgrad wird dort entsprechend den Festlegungen laut der folgenden Tabelle (Tabelle 8) berechnet.

Bezeichnung	Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert)
Abkürzung	g
Einheit	% oder dimensionslos
Normative Verankerung	ÖNORM EN 410, April 1998
Berechnungswerkzeug	Softwarepaket Calumen 2.3.1

Tabelle 8: Festlegungen zum Gesamtenergiedurchlassgrad

5.3.2.3. Transmissionsgrad

Der Transmissionsgrad von Verglasungen ist definiert als das Verhältnis zwischen durchgelassener also transmittierter und eingestrahelter Strahlungsdichte.

Seine Berechnung ist in der europäischen Normung definiert in der ÖNORM EN 410 – Glas im Bauwesen, Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen.²⁰⁷

Der spektrale Transmissionsgrad ist aus Messung mit einem Spektroradiometer für quasi-parallelen, beinahe senkrechten Strahlungseinfall zu bestimmen.

Ausgehend von diesen Messergebnissen des spektralen Transmissionsgrades im Wellenlängenbereich von 300 nm bis 2.500 nm werden in der ÖNORM EN 410 die drei folgenden, über definierte Wellenlängenbereiche der Normallichtart D65²⁰⁸ gewichtete, gemittelte Transmissionsgrade angegeben. Erstens der direkte Strahlungstransmissionsgrad, als das Ergebnis der gewichteten Mittelung des spektralen Strahlungstransmissionsgrades von 300 bis 2.500 nm. Zweitens der

²⁰⁶ ÖNORM EN 410 (1998)

²⁰⁷ ÖNORM EN 410, (1998)

²⁰⁸ Die Normlichtart D65 ist eine von der CIE erstmals 1964 publizierte relative spektrale Intensitätsverteilung, entsprechend einer Farbtemperatur von 6.500 K. Normativ ist sie festgelegt in ISO/CIE 10526, 2007 10 15, CIE standard illuminants for colorimetry.

Lichttransmissionsgrad, als das Ergebnis der gewichteten Mittelung des spektralen Strahlungstransmissionsgrades von 380 nm bis 780 nm. Und schließlich drittens der ultraviolette Transmissionsgrad, als das Ergebnis der gewichteten Mittelung des spektralen Strahlungstransmissionsgrades über die Wellenlängenbereiche von UV-A und UV-B von 280 nm bis 380 nm.

Als Formelzeichen wird in der genannten Norm der griechische Buchstabe τ mit ergänzenden Indizes in Prozent oder als dimensionslose Kennzahl verwendet. In der Fachliteratur und in Herstellerangaben wird gelegentlich auch der Großbuchstabe T mit erläuternden Indizes verwendet.

In der gegenständlichen Arbeit wird der direkte spektrale Transmissionsgrad $\tau(\lambda)$ berechnet mit dem Softwarepaket optics 5.1.2 in Verbindung mit IGDB 16.3. Beide Softwareprodukte sind Entwicklungen des Lawrence-Berkeley-National-Laboratory²⁰⁹. Die über spektrale Bereiche gemittelten Kennzahlen des direkten Strahlungstransmissionsgrades, des Lichttransmissionsgrades und des ultravioletten Transmissionsgrades werden berechnet mit dem bereits mehrfach genannten Softwarepaket Calumen 2.3.1 und sind entsprechend der anschließenden Tabelle festgelegt (Tabelle 9).

Bezeichnung	Transmissionsgrad, mit präzisierenden Angaben: - spektraler Transmissionsgrad, - direkter Strahlungstransmissionsgrad, - Lichttransmissionsgrad, - ultravioletter Transmissionsgrad
Abkürzung	τ mit präzisierenden Indizes wie - $\tau(\lambda)$ - τ_e - τ_V - τ_{UV}
Einheit	% oder dimensionslos
Normative Verankerung	ÖNORM EN 410, April 1998
Berechnungswerkzeug	Softwarepaket optics 5.1.2 für $\tau(\lambda)$ Softwarepaket Calumen 2.3.1 für τ_e , τ_V und τ_{UV}

Tabelle 9: Festlegungen zum Transmissionsgrad

5.3.2.4. Reflexionsgrad

Der Reflexionsgrad von Verglasungen ist definiert als das Verhältnis zwischen zurückgeworfener also reflektierter und eingestrahelter Strahlungsdichte.

²⁰⁹ Lawrence-Berkeley-National-Laboratory, Berkeley, Kalifornien, USA

Seine Berechnung ist analog dem Transmissionsgrad in der europäischen Normung in der ÖNORM EN 410 – Glas im Bauwesen, Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen festgelegt.²¹⁰

Auch hinsichtlich der Bestimmung des Reflexionsgrades gilt das über den Transmissionsgrad Gesagte. Dem entsprechend sind unterschiedliche Ausprägungen des Reflexionsgrades zu präzisieren. Zunächst der spektrale Reflexionsgrad, der durch Messung mit einem Spektroradiometer für quasi-parallelen, beinahe senkrechten Strahlungseinfall bestimmt wird. Weiters der direkte Strahlungsreflexionsgrad, als das Ergebnis der gewichteten Mittelung des spektralen Strahlungsreflexionsgrades von 300 nm bis 2.500 nm. Drittens der Lichtreflexionsgrad, als das Ergebnis der gewichteten Mittelung des spektralen Strahlungsreflexionsgrades von 380 nm bis 780 nm. Und schließlich der ultraviolette Reflexionsgrad, als das Ergebnis der gewichteten Mittelung des spektralen Strahlungsreflexionsgrades über die Wellenlängenbereiche des UV-A-Spektralbereiches und des UV-B-Spektralbereiches zwischen 280 nm und 380 nm.

Als Formelzeichen wird in der genannten Norm der griechische Buchstabe ρ mit ergänzenden Indizes in Prozent oder als dimensionslose Kennzahl verwendet. In der Fachliteratur und in Herstellerangaben wird gelegentlich auch der Großbuchstabe R mit erläuternden Indizes verwendet.

In der gegenständlichen Arbeit wird der direkte spektrale Reflexionsgrad $\rho(\lambda)$ mit dem bereits genannten Softwarepaket optics 5.1.2 in Verbindung mit IGDB 16.3 berechnet. Die über spektrale Bereiche gemittelten Kennzahlen des direkten Strahlungsreflexionsgrades, des Lichtreflexionsgrades und des ultravioletten Reflexionsgrades werden ermittelt mit dem bereits mehrfach genannten Softwarepaket Calumen 2.3.1.

Wie in den vorangegangenen physikalischen Grundlagen erläutert, weist der Reflexionsgrad eine deutliche Abhängigkeit vom Einstrahlwinkel auf, beschrieben durch die Fresnel'schen Gleichungen. Diese Abhängigkeit wird in den Untersuchungen der photophysiologischen Tageslichtqualität hinter Verglasungen durch eben diese Fresnelgleichungen, entnommen dem bereits mehrfach erwähnten Softwarepaket WINDOW 5.2.17a abgebildet.²¹¹ Die Festlegungen zum Reflexionsgrad sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst (Tabelle 10).

²¹⁰ ÖNORM EN 410 (1998)

²¹¹ WINDOW 5.2.17a, Softwarepaket zur Berechnung strahlungsphysikalischer und thermischer Kennzahlen von Fenstern, <http://windows.lbl.gov/software/window/window.html> (03.02.2009)

Bezeichnung	Reflexionsgrad, mit präzisierenden Angaben: - spektraler Reflexionsgrad, - direkter Strahlungsreflexionsgrad, - Lichtreflexionsgrad, - ultravioletter Reflexionsgrad
Abkürzung	ρ mit präzisierenden Indizes wie - $\rho(\lambda)$ - ρ_e - ρ_v - ρ_{UV}
Einheit	% oder dimensionslos
Normative Verankerung	ÖNORM EN 410, April 1998
Berechnungswerkzeug	Softwarepaket optics 5.1.2 für $\tau(\lambda)$ Softwarepaket Calumen 2.3.1 für τ_e , τ_v und τ_{UV}

Tabelle 10: Festlegungen zum Reflexionsgrad

5.3.2.5. Selektivitätskennzahl

Die Selektivitätskennzahl ist eine, in den Herstellerangaben zu Verglasungen gebräuchlich angegebene, Kennzahl zur Beschreibung der Qualität von Sonnenschutzverglasungen, einen minimierten Gesamtenergiedurchlassgrad bei gleichzeitig hohem verbleibenden Lichttransmissionsgrad aufzuweisen.

Die Selektivitätskennzahl wird im Allgemeinen mit dem Buchstaben S bezeichnet und als dimensionslose Verhältniszahl angegeben. Entsprechend der folgenden Formel (Formel 23) berechnet sie sich aus:

$$S = \tau_v / g$$

Formel 23: Berechnung der Selektivitätskennzahl

Bei der Herstellung von Sonnenschutzgläsern wird demnach eine möglichst hohe Selektivitätskennzahl angestrebt. Nach oben begrenzt ist die Selektivitätskennzahl aus der physikalischen Gegebenheit, dass bei Tageslicht beziehungsweise bei Normlicht D65 nur etwa 55% der Strahlung im sichtbaren Bereich auftreten, womit ab einer Selektivitätskennzahl von $1 / 0,55 = 1,81$ zwangsläufig für eine weitere Senkung des Gesamtenergiedurchlassgrades auch Anteile des Tageslichttransmissionsgrades abgemindert werden müssen. Zwar können auch Selektivitätskennzahlen von knapp über zwei erreicht werden, allerdings nur um den Preis bereits nennenswerter Farbverschiebungen des transmittierten Lichts. Die folgende Tabelle (Tabelle 11) zeigt die Festlegungen zur Selektivitätskennzahl.

Bezeichnung	Selektivitätskennzahl
Abkürzung	S
Einheit	% oder dimensionslos
Normative Verankerung	keine
Berechnungswerkzeug	Ableitung aus den Ergebnissen des Softwarepakets Calumen 2.3.1

Tabelle 11: Festlegungen zur Selektivitätskennzahl

5.3.2.6. Emissionsvermögen

Das Emissionsvermögen von Oberflächen von Gläsern ist zwar keine Kennzahl zur Beschreibung des spektralen Transmissionsvermögens oder der Wärmeschutzqualität einer Glasscheibe, sie ist aber ein wesentlicher Bildungsparameter für beide dieser Qualitäten und wird daher an dieser Stelle ebenfalls diskutiert.

Das Emissionsvermögen wurde in der gegenständlichen Arbeit bereits in einem Unterkapitel der physikalischen Grundlagen kurz beschrieben. Es ist demnach eine Variable im Stefan-Boltzmann'schen Gesetz und geht als linearer Faktor in die Strahlungsleistung eines Körpers ein.

Das Emissionsvermögen ist eine dimensionslose Kennzahl zwischen den beiden theoretischen Extremata von null und eins, wobei der Wert von eins den ideal schwarzen Körper abbildet.

Das Emissionsvermögen von Glas ist in hohem Maß Wellenlängen abhängig. Im Rahmen der Bauphysik ist das Emissionsvermögen von Verglasungen im Raumtemperaturbereich von Interesse, also mit einem Strahlungsmaximum bei zirka 10.000 nm. Im Bereich dieser Wellenlängen ist Glas praktisch strahlungsundurchlässig, weshalb dort in guter Näherung gilt:

$$\varepsilon_n = 1 - R_n$$

mit ε_n ... normales Emissionsvermögen bei 283 K

mit R_n ... normales Reflexionsvermögen bei 283 K

Formel 24: Berechnung des normalen Emissionsvermögens

Laut EN 673²¹² wird aus diesem normalen Emissionsvermögen (Formel 24) über einen Korrekturfaktor nahe eins das korrigierte Emissionsvermögen ermittelt.

In der gegenständlichen Arbeit wird das spektrale Emissionsvermögen und das korrigierte Emissionsvermögen berechnet mit dem bereits genannten Softwarepaket optics 5.1.2 in Verbindung mit IGDB 16.3 und den dementsprechenden in der folgenden Tabelle (Tabelle 12) angeführten Festlegungen.

²¹² ÖNORM EN 673 (2003)

Bezeichnung	Emissionsvermögen, mit präzisierenden Angaben: - spektrales Emissionsvermögen - normales Emissionsvermögen - korrigiertes Emissionsvermögen
Abkürzung	ϵ , mit präzisierenden Indizes: - $\epsilon(\lambda)$ - ϵ_n - ϵ
Einheit	dimensionslos
Normative Verankerung	EN 673
Berechnungswerkzeug	Softwarepaket optics 5.1.2

Tabelle 12: Festlegungen zum Emissionsvermögen

5.3.3. Handelsübliche Verglasungstypen

Unter den beschriebenen physikalischen Randbedingungen, unter Kombination der beschriebenen Komponenten technischer Funktionsglasscheiben und unter Heranziehung der genannten Kennzahlen des Strahlungsdurchgangs und des Wärmeschutzes lassen sich in der Bauanwendung insbesondere die beiden Verglasungstypen der Wärmeschutzverglasung und der Sonnenschutzverglasung identifizieren. Zu Vergleichszwecken wird auch der Typ der unbeschichteten Einscheiben-Verglasung bearbeitet.

5.3.3.1. Wärmeschutzverglasungen

Wärmeschutzverglasungen im Bauwesen bestehen im Allgemeinen aus einer Kombination zweier oder dreier Glasscheiben, mit gasdicht abgeschlossenen Scheibenzwischenräumen, mit einer oder zwei Low-e-Beschichtungen je Scheibenzwischenraum und mit Gasfüllungen in den Scheibenzwischenräumen.

Der U-Wert der Verglasung ist in dieser Anordnung eine Funktion aus der Scheibenanzahl, dem Scheibenabstand, der Art und dem Füllgrad des Gases im Scheibenzwischenraum und der Anzahl, Anordnung, Emissivität und des Transmissionsgrades der Beschichtung beziehungsweise gegebenenfalls der Beschichtungen.

Unter der Vereinbarung, die Scheibenoberflächen in fortlaufenden Reihenfolgen von außen nach innen zu nummerieren, werden bei Zweischeiben-Wärmeschutzverglasungen die Low-e-Beschichtungen durchwegs auf Ebene 3 und bei Dreischeiben-Wärmeschutzverglasungen auf den Ebenen 2 und 5 aufgebracht.²¹³ Die Emissivität handelsüblicher Beschichtungen liegt aktuell im Infrarotbereich bei 3% bis 4%.

²¹³ Früher wurden die Beschichtungen bei Dreischeiben-Wärmeschutzverglasungen auf den Ebenen 3 und 5 aufgebracht, was thermisch effektiver, aber produktionstechnisch aufwändiger ist.

Als Gasfüllungen sind nahezu ausschließlich Argon und Krypton, selten Gemische daraus, mit wirtschaftlich herstellbaren Füllgraden von 90% im Einsatz.

In Kombination mit 4 mm und 6 mm Glasscheiben und Scheibenzwischenräumen von 10 bis 16 mm sind somit Wärmedurchgangskoeffizienten nach EN 673 bis 1,1 W/(m²K), in Einzelfällen auch 1,0 W/(m²K) erreichbar.

5.3.3.2. Sonnenschutzverglasungen

Sonnenschutzverglasungen im Bauwesen bestehen konstruktiv aus den selben Elementen wie Wärmeschutzverglasungen, mit üblicherweise nur zwei Scheiben, gasdichtem Scheibenzwischenraum, Gasfüllung und Oberflächenbeschichtung.

Der wesentliche Unterschied liegt in der Positionierung und der Materialcharakteristik der Oberflächenbeschichtungen. Bei Zweischeiben-Sonnenschutzverglasungen werden die Low-e-Beschichtungen überwiegend auf Ebene 2, in Ausnahmefällen auch auf Ebene 1 aufgebracht und häufig bis in den nahen Infrarotbereich wirksam ausgeführt, auch unter Inkaufnahme verminderter Transparenz im sichtbaren roten Spektralbereich.

Gesamtenergiedurchlassgrade herunter bis knapp über 20% sind heute bei nach wie vor hinreichend neutraler Farbcharakteristik herstellbar. Die Selektivitätskennzahl erreicht dabei Werte bis 1,9.

5.4. Festlegung der Referenzverglasungen für die Parameterstudien

Für die beiden Potentialstudien innerhalb der gegenständlichen Arbeit sind begründet Referenzverglasungen festzulegen. Einerseits für die Untersuchung der physiologischen Tageslichtqualität hinter technischen Funktionsglasscheiben und andererseits für die gekoppelte Untersuchung des solarstrahlungsinduzierten thermischen Verhaltens und der Tageslichtversorgung einer konstruktivistisch modellhaften Laubengangwohneinheit.

Für die erste Fragestellung werden aus dem Spektrum der marktgängigen technischen Funktionsglasscheiben eine Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung, eine Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung und eine Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung gewählt. Zu Vergleichszwecken werden die Berechnungen auch für eine unbeschichtete Einscheibenverglasung durchgeführt.

Für die zweite Fragestellung hat sich die Wahl im Einklang mit dem konstruktivistischen Ansatz am Mindeststandard der Wiener Bauordnung und der ÖNORM B 8110-1 zu orientieren. Diesbezügliche Übereinstimmung wurde erzielt mit einer Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung mit den charakteristischen Werten $U=1,2$, $g=0,62$ und $\tau_v=0,90$.

5.4.1. Funktionsglasscheiben zur Untersuchung des photophysiologicalen Tageslichtangebotes im Sinne von Hypothese 1

Vor dem oben erläuterten Hintergrund wurden die folgenden technischen Funktionsglasscheiben und eine Referenzglasscheibe ausgewählt.

Einscheibenglas, 6, unbeschichtet als Referenzglasscheibe

Wärmedurchgangskoeffizient	$U_g = 5,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
Gesamtenergiedurchlassgrad	$g = 0,82$
Direkter Strahlungstransmissionsgrad	$\tau_e = 0,79$
Lichttransmissionsgrad	$\tau_v = 0,89$
UV-Transmissionsgrad	$\tau_{UV} = 0,53$
Direkter Strahlungsreflexionsgrad außen	$\rho_e = 0,07$
Lichtreflexionsgrad außen	$\rho_v = 0,08$
Beschichtung	keine Beschichtung vorhanden

Zugrunde gelegt wurden die Daten des Produkts PLANILUX 6 mm von Saint-Gobain Glass. In der International Glazing Database ist dieses Produkt mit der ID 11839 dokumentiert und wird identisch auch im Softwarepaket Calumen abgebildet.

Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung, 6-16A-6

Wärmedurchgangskoeffizient	$U_g = 1,1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
Gesamtenergiedurchlassgrad	$g = 0,60$
Direkter Strahlungstransmissionsgrad	$\tau_e = 0,49$
Lichttransmissionsgrad	$\tau_v = 0,78$
UV-Transmissionsgrad	$\tau_{UV} = 0,29$
Direkter Strahlungsreflexionsgrad außen	$\rho_e = 0,21$
Lichtreflexionsgrad außen	$\rho_v = 0,11$
Beschichtung	PLANITHERM ULTRA N auf Ebene 3

Diese technische Funktionsglasscheibe wurde aufgebaut aus zwei Glasscheiben PLANILUX 6 mm von Saint-Gobain Glass, aus der Beschichtung PLANITHERM ULTRA N, ebenfalls von Saint-Gobain Glass, auf Ebene 2 und aus einem Scheibenzwischenraum von 16 mm mit 90% Argon-Füllung. In der International Glazing Database ist die Kombination aus PLANILUX 6 mm und PLANITHERM ULTRA N unter der Bezeichnung PLANITHERM ULTRA in 6 mm Dicke mit der ID 11040 dokumentiert und wird identisch auch im Softwarepaket Calumen abgebildet.

Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung, 6-12A-6-12A-6

Wärmedurchgangskoeffizient	$U_g = 0,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
Gesamtenergiedurchlassgrad	$g = 0,48$
Direkter Strahlungstransmissionsgrad	$\tau_e = 0,38$
Lichttransmissionsgrad	$\tau_v = 0,70$
UV-Transmissionsgrad	$\tau_{UV} = 0,18$
Direkter Strahlungsreflexionsgrad außen	$\rho_e = 0,26$
Lichtreflexionsgrad außen	$\rho_v = 0,14$
Beschichtung	PLANITHERM ULTRA N auf Ebenen 2 und 5

Diese technische Funktionsglasscheibe wurde aufgebaut aus zwei Glasscheiben PLANILUX 6 mm von Saint-Gobain Glass, aus der Beschichtung PLANITHERM ULTRA N, ebenfalls von Saint-Gobain Glass, auf Ebene 2 und aus einem Scheibenzwischenraum von 16 mm mit 90% Argon-Füllung. In der International Glazing Database ist die Kombination aus PLANILUX 6 mm und PLANITHERM ULTRA N unter der Bezeichnung PLANITHERM ULTRA in 6 mm Dicke mit der ID 11040 dokumentiert und wird identisch auch im Softwarepaket Calumen abgebildet.

Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung, 6-16A-6

Wärmedurchgangskoeffizient	$U_g = 1,1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
Gesamtenergiedurchlassgrad	$g = 0,27$
Direkter Strahlungstransmissionsgrad	$\tau_e = 0,24$
Lichttransmissionsgrad	$\tau_v = 0,50$
UV-Transmissionsgrad	$\tau_{UV} = 0,09$
Direkter Strahlungsreflexionsgrad außen	$\rho_e = 0,32$
Lichtreflexionsgrad außen	$\rho_v = 0,18$
Beschichtung	COOL-LITE 154 SKN auf Ebene 2
Selektivitätskennzahl	$S = 1,85$

Diese technische Funktionsglasscheibe wurde aufgebaut aus zwei Glasscheiben PLANILUX 6 mm von Saint-Gobain Glass, aus der Beschichtung COOL-LITE 154 SKN, ebenfalls von Saint-Gobain Glass, auf Ebene 2 und aus einem Scheibenzwischenraum von 16 mm mit 90% Argon-Füllung. In der International Glazing Database ist die Kombination aus PLANILUX 6 mm und COOL-LITE 154 SKN unter der Bezeichnung PLANITHERM COOL-LITE 154 SKN in 6 mm Dicke mit der ID 11036 dokumentiert und wird identisch auch im Softwarepaket Calumen abgebildet.

5.4.2. Funktionsglasscheiben zur Untersuchung der thermischen Qualität und der Tageslichtversorgung im Sinne von Hypothese 2

Vor dem oben erläuterten Hintergrund wurde die folgende technische Funktionsglasscheibe festgelegt:

Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung, 6-16A-6

Wärmedurchgangskoeffizient	$U_g = 1,2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
Gesamtenergiedurchlassgrad	$g = 0,61$
Direkter Strahlungstransmissionsgrad	$\tau_e = 0,49$
Lichttransmissionsgrad	$\tau_v = 0,78$
UV-Transmissionsgrad	$\tau_{UV} = 0,27$
Direkter Strahlungsreflexionsgrad außen	$\rho_e = 0,21$
Lichtreflexionsgrad außen	$\rho_v = 0,12$
Beschichtung	PLANITHERM FUTUR N auf Ebene 3

Diese technische Funktionsglasscheibe wurde aufgebaut aus zwei Glasscheiben PLANILUX 6 mm von Saint-Gobain Glass, aus der Beschichtung PLANITHERM FUTUR N, ebenfalls von Saint-Gobain Glass, auf Ebene 2 und aus einem Scheibenzwischenraum von 16 mm mit 90% Argon-Füllung. Für die gekoppelte Untersuchung der thermischen und visuellen Qualität der Laubengangeinheit sind keine spektralen Daten erforderlich, wodurch mit den Berechnungsergebnissen aus Calumen das Auslangen gefunden wird.

5.5. Strahlungsdurchgang durch die Referenzverglasungen

Wie das folgende Diagramm (Diagramm 24) zeigt, weisen die vier Referenzverglasungen Einscheibenglas, Zweischeiben-Wärmeschutzglas, Dreischeiben-Wärmeschutzglas und Zweischeiben-Sonnenschutzglas charakteristische und signifikant unterschiedliche Verläufe der Transmissionsgrade über der Wellenlänge auf.

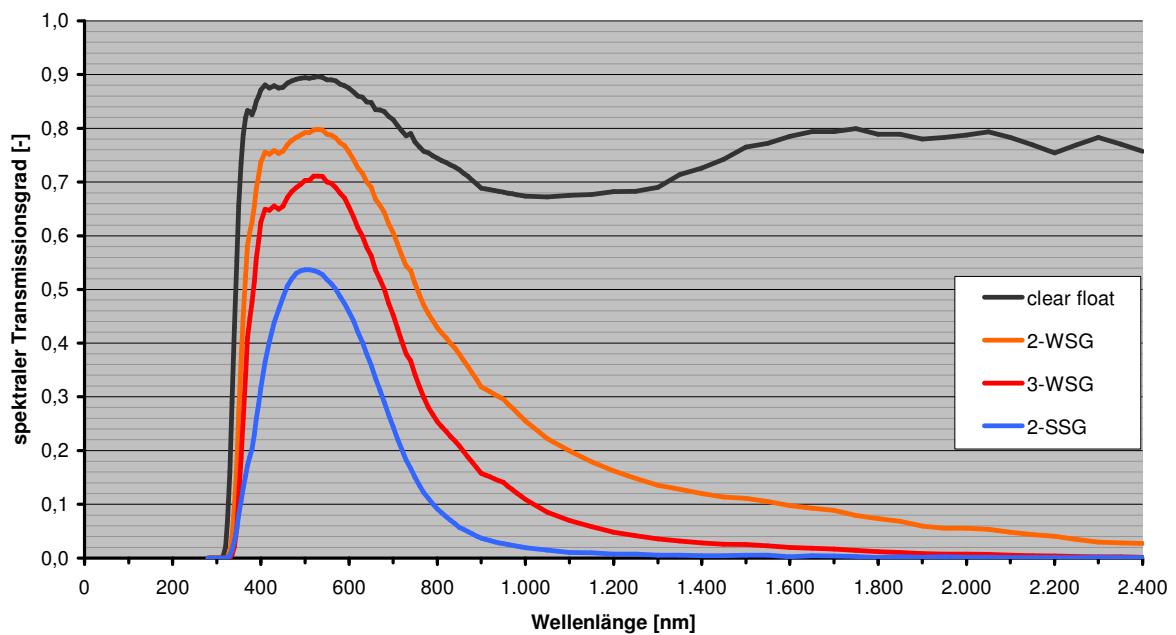


Diagramm 24: Spektraler Transmissionsgrad der Referenzverglasungen

6. Photobiologie des Menschen

Ausgehend vom terrestrischen Strahlungsangebot werden, für den Menschen relevante, photobiologische Wirkungen ausgewählt und erläutert. Für einige dieser Wirkungen liegen spektral aufgelöste Wirkungs-Kurven vor. Als spektrale Wirkungs-Kurven werden dabei die über der Wellenlänge aufgetragenen spektrale Empfindlichkeiten für die jeweilige photobiologische Wirkung bezeichnet. Diese Wirkungskurven stellen die Korrelation her zwischen einerseits der physikalischen Größe der spektralen Bestrahlungsstärke und andererseits der biologischen Größe der photophysiologicalen Wirkung, ausgedrückt durch die Einheit der photobiologisch wirksamen Bestrahlungsstärke. Es ist darauf hinzuweisen, dass die spektralen Wirkungskurven stets nur eine relative Korrelation zwischen den beiden Größen herstellen, normiert auf den Maximalwert der relativen spektrale Empfindlichkeit des betrachteten photobiologischen Vorganges von Eins. Es gelten die nachfolgend beschriebenen Zusammenhänge:²¹⁴ (Formel 25) und (Formel 26).

$$E_{biol} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{\lambda}(\lambda) \cdot s(\lambda)_{biol} \cdot d(\lambda)$$

mit E_{biol} photobiologisch wirksame Bestrahlungsstärke [W/m²]

mit $E_{\lambda}(\lambda)$ spektrale Bestrahlungsstärke

mit $s(\lambda)$ relative spektrale Empfindlichkeit des betrachteten photobiologischen Vorganges, normiert auf den Maximalwert $s(\lambda)_{biol,max} = 1$ (Wirkungsspektrum)

mit λ_1, λ_2 Grenzwellenlängen für den Empfindlichkeitsbereich

Formel 25: Berechnung einer photobiologisch wirksamen Bestrahlungsstärke E_{biol} aus der relativen spektralen Empfindlichkeit $s(\lambda)_{biol}$

$$X_{biol} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} X_{\lambda}(\lambda) \cdot s(\lambda)_{biol} \cdot d(\lambda)$$

mit X_{biol} photobiologisch wirksame Bestrahlungsstärke [W/m²]

mit $X_{\lambda}(\lambda)$ spektrale Bestrahlungsstärke

mit $s(\lambda)$ relative spektrale Empfindlichkeit des betrachteten photobiologischen Vorganges, normiert auf den Maximalwert $s(\lambda)_{biol,max} = 1$ (Wirkungsspektrum)

mit λ_1, λ_2 Grenzwellenlängen für den Empfindlichkeitsbereich

Formel 26: Berechnung einer photobiologisch wirksamen Bestrahlungsstärke X_{biol} aus der relativen spektralen Empfindlichkeit $s(\lambda)_{biol}$.

Eine Sonderstellung unter den spektralen Wirkungskurven nimmt die Helligkeitsempfindlichkeit $v(\lambda)$ ein. Sie bildet nicht nur die relative Empfindlichkeit

²¹⁴ DIN 5031-10 (2000)

zwischen der spektralen Bestrahlungsstärke und betrachteten photobiologischen Wirkung, dem Helligkeitsempfinden, ab, sondern führt mit der photometrischen Konstante auch eine absolute Korrelation zwischen spektraler Bestrahlungsstärke und photobiologischer Wirkung und mit der Beleuchtungsstärke auch eine eigene Einheit für diese Wirkung ein.²¹⁵ Es gilt (Formel 27):

$$E_v = K_m \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{e\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d(\lambda)$$

- mit E_{vis} Beleuchtungsstärke [$\text{lm}/\text{m}^2 = \text{lx}$]
mit $E_{e\lambda}(\lambda)$ spektrale Bestrahlungsstärke [$\text{W}/(\text{m}^2\text{nm})$]
mit $V(\lambda)$ relatives Helligkeitsempfinden, normiert auf den Maximalwert $v(\lambda)_{\text{max}} = 1$
mit K_m photometrische Konstante: 683 [lm/W]
mit λ_1, λ_2 Grenzwellenlängen für den Empfindlichkeitsbereich

Formel 27: Berechnung der Beleuchtungsstärke aus dem spektralen Helligkeitsempfinden $v(\lambda)$

Auf dieser Grundlage kann schließlich festgestellt werden, ob und unter welchen Bedingungen wirkungsrelevante Strahlungs Dosen im Innenraum beziehungsweise im Vergleich dazu im angrenzenden Außenraum erzielt werden. Dabei betreffen die Wirkungen zunächst die der Strahlung direkt ausgesetzten Organe Haut und Augen, aber auch die Zähne.²¹⁶ Die Beschreibung der photobiologischen Phänomene erfolgt nach dem Auftreten der jeweiligen Wirkungs-Kurven im terrestrischen Spektrum mit ansteigender Wellenlänge. In Bezug zu diesen spektralen Wirkungs-Kurven werden in den folgenden Kapiteln die Wechselwirkungen zwischen dem menschlichen Organismus und dem Angebot an Solarstrahlung skizziert.

6.1. Photobiologie im ultravioletten Spektralbereich

Als ultraviolette Strahlung wird die nicht ionisierende Strahlung im Wellenlängenbereich zwischen der Röntgenstrahlung und dem sichtbaren Licht bezeichnet.²¹⁷ Die ultraviolette Strahlung ist auf Grund ihrer physikalischen Eigenschaften der optischen Strahlung zuzurechnen.²¹⁸ Die Unterteilung der ultravioletten Strahlung in die Teilspektren²¹⁹ UV-C,

²¹⁵ DIN 5031-3 (1982)

²¹⁶ Jiao (2007)

²¹⁷ Es wird auf Grund des Absorptionsverhaltens der Erdatmosphäre nur Nahe Ultraviolette Strahlung im Umfang der Wellenlänge von 200 nm bis 400 nm betrachtet und hier im speziellen die Wellenlängen über 280 nm. Ferne und extreme Ultraviolette Strahlung sind für den vorliegenden Text nicht relevant.

²¹⁸ Peharda (2007)

²¹⁹ Ultraviolett wird bei den Teilspektralbezeichnungen mit UV abgekürzt.

UV-B, UV-A² und UV-A¹ erfolgte unter anderem auf Grund ihrer unterschiedlichen photobiologischen Wirksamkeit. Die Einteilung in die drei Bereiche UV-A, UV-B und UV-C geht zurück auf Coblenz.²²⁰ Auf Grund der Wellenlängenabhängigkeit erythemaler²²¹ Hautreaktionen erfolgt die Einteilung in UV-A-Strahlung zwischen 400 nm und 315 nm, UV-B-Strahlung zwischen 315 nm und 280 nm sowie der UV-C-Strahlung unterhalb von 280 nm.²²² Als Untergrenze der UV-A-Strahlung legt die Deutsche Industrienorm 380 nm fest, als Grenze zwischen dem UV-A und UV-B-Strahlungsspektrum 315 nm.²²³ Die Deutsche Industrie Europeanorm setzt diesen Wert bei 320 nm fest.²²⁴ Einige Autoren wie J. Arnold, K. Degitz, G. Hofbauer und R. Dummer, T. Schwarz, unterscheiden innerhalb des UV-A-Spektrums ausgehend von unterschiedlichen Pigmentierungs- beziehungsweise Immunreaktionen in UV-A¹ zwischen 340 nm und 400 nm und UV-A² zwischen 315 nm und 340 nm.²²⁵

6.1.1. Rezeptororgane im ultravioletten Spektralbereich

Neben dem Auge und den Zähnen ist in erster Linie die menschliche Haut zu physiologisch reizadäquaten Reaktionen auf UV-Strahlungseinwirkungen befähigt. Unter diesem Aspekt wird der strukturelle Aufbau des Organs Haut umrissen und auf seine optischen Eigenschaften sowie ausgewählte photobiologische Wirkungen vertiefend eingegangen.

6.1.1.1. Die menschliche Haut

Die Haut bildet die begrenzende Oberfläche des menschlichen Körpers. Sie erreicht beim Erwachsenen eine Flächenausdehnung von bis zu 2 m² und einen Gesamtkörpergewichtanteil zwischen 7% und 15%.²²⁶ Die Haut lässt sich in drei funktionale Schichten unterteilen (Abbildung 26). Die unmittelbare Begrenzung zur Umwelt wird von der Oberhaut, im weiteren als Epidermis bezeichnet, gebildet. An die Epidermis schließt die Lederhaut an, die im Folgenden als Dermis bezeichnet wird. Darunter liegt die dritte und innerste Schichte, die Unterhaut, anschließend als Subcutis bezeichnet. Dieser dreischichtige Aufbau liegt im gesamten Organ vor, auch wenn Dicke und Ausformung der einzelnen Schichten in Abhängigkeit von der Funktionszone am Körper stark schwanken.²²⁷

²²⁰ Coblenz (1932)

²²¹ Als Erythem wird eine spezielle Hautrötung bezeichnet, die in Kapitel 6.1.3.1 beschrieben wird.

²²² Coblenz (1932)

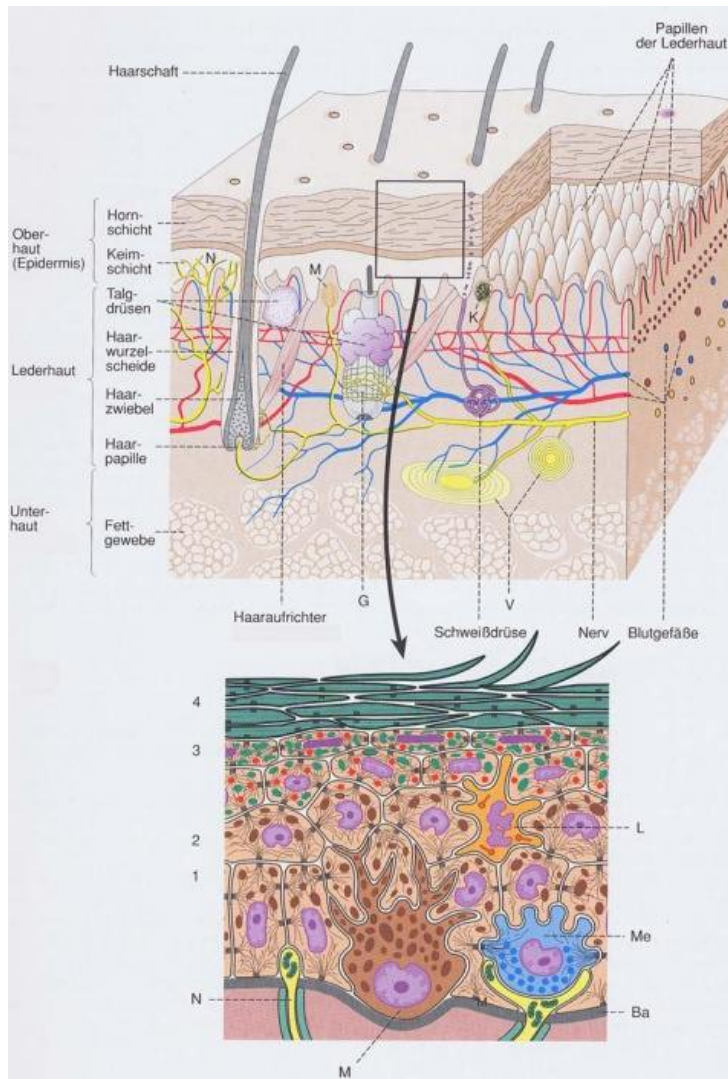
²²³ DIN 5031-7 (1984)

²²⁴ DIN EN 60335-2-27 (2009)

²²⁵ Weitere Angaben der DIN 5031-7 zur Benennung von Wellenlängenbereichen sind im Anhang in Kapitel 11.4 angeführt.

²²⁶ Kanitakis (2002)

²²⁷ Vgl. Abbildung Speckmann (1998)



- 1 ... Basalzellschicht
- 2 ... Stachelzellschicht
- 3 ... Körnerschicht
- 4 ... Hornschicht
- L ... Langerhans-Zellen
- Me ... Merkel-Zellen
- Ba ... Basalmembran
- M ... Melanozyten
- N ... freie Nervenendigung

Abbildung 26: Darstellung des Schichtaufbaus der menschlichen Haut mit einem Detailschnitt der Epidermis

Die Epidermis weist eine Dicke von 60 µm bis 180 µm auf und besteht zu etwa 90% aus hornbildenden Zellen, den Keratinozyten. Diese Keratinozyten werden laufend von einer Lage epidermaler Stammzellen gebildet, die als Basalzellschicht bezeichnet wird. Die Basalzellschicht liegt an der Basalmembran an, die die Grenze zur Dermis darstellt. Durch die ständigen Zellneubildungen werden die Keratinozyten an die Hautoberfläche gedrängt, die sie etwa ein Monat nach ihrer Entstehung erreichen. Während dieser Zeitspanne differenzieren sich die Keratinozyten aus. Sie verändern ihre Form, Größe, Zusammensetzung und Vernetzung untereinander. So durchlaufen sie die Stadien Basalzelle, Stachelzelle und Körnerzelle. Die äußerste Schicht der Epidermis wird als Hornschicht bezeichnet. Sie wird aus abgestorbenen, abgeplatteten, kernlosen und verhornten schuppenförmigen Keratinozyten gebildet, die Korneozyten genannt werden.^{228,229,230}

²²⁸ Wokalek (1992)

²²⁹ Kanitakis (2002)

²³⁰ Altmeyer (2005)

Die Epidermis reduziert die Verletzungsgefahr für das angrenzende Gewebe und schützt es vor Austrocknung. Darüber hinaus finden sich in der Epidermis aber auch Zellen, die spezielle Funktionen erfüllen, beispielsweise dendritische Melanozyten, Langerhans-Zellen und Merkel-Zellen. Auf die Melanozyten geht die Fähigkeit der Haut zur Selbstfärbung zurück, da die Melanozyten das Pigment Melanin synthetisieren können. Die Melanozyten liegen in den tieferen Bereichen der Epidermis. Die Langerhans-Zellen können in die Haut eingedrungene Fremdkörper durch Phagozytose neutralisieren. Sie stellen also ein Teilsystem der menschlichen Immunabwehr dar. Die Merkel-Zellen sind Rezeptoren für Berührungseize.^{231,232,233}

Die Dermis schließt unterhalb an die Basalmembran der Epidermis an. Sie ist je nach Körperregion 1 mm bis 2 mm dick und besteht vorwiegend aus Bindegewebe, das die mechanische Belastbarkeit und Dehnbarkeit der Haut gewährleistet. Die Dermis kann in zwei funktionale Schichten unterteilt werden, die sich in ihrer Zellstruktur deutlich unterscheiden. Die äußere Schicht wird als Papillenschicht bezeichnet. Sie bildet, in Abhängigkeit von der mechanischen Beanspruchung einer Hautregion, eine Vielzahl konischer Erhebungen, die Papillen aus. Die Papillen ragen in die Epidermis hinein. Dadurch wird einerseits die feste Verbindung der beiden Hautschichten gewährleistet und andererseits eine möglichst große Fläche zur Diffusion von Nährstoffen aus der gefäßführenden Dermis in die gefäßlose Epidermis generiert. Neben den kapillaren Blutgefäßen finden sich in den Papillen noch Meissnersche Tastkörper, Vater-Pacini-Körperchen und freie Nervenendigungen. Die Meissnerschen Tastkörper sind Rezeptoren für leichte Berührungen und liefern so die Erregungsmuster des Tastsinns. Die Vater-Pacini-Körperchen rezipieren Reize durch Druck und Vibration. Die freien Nervenendigungen sind empfindlich für Schmerz und Temperatur.^{234,235,236}

Die Papillenschicht geht an ihrer Unterseite in die zweite Schicht der Dermis über, die als Netzsicht bezeichnet wird. Die Netzsicht besteht aus Proteinen, die mehrere Lagen kollagener und elastischer Bindegewebsfasern bilden, sodass stabile räumliche Strukturen entstehen. Darüber hinaus befinden sich in der Netzsicht Schweißdrüsen, Talgdrüsen und Haarfollikel mit daran angelagerten glatten Muskelzellen.^{237,238}

Die Subcutis liegt unterhalb der Dermis und bildet eine elastisch verschiebliche Verbindung zu den darunter angrenzenden Strukturen, wie beispielsweise Muskelgewebe oder Knochensubstanz. Die Subcutis besteht überwiegend aus, von losem Bindegewebe umgebenen Fettzellen. Das derart gebildete Fettgewebe dient zur Speicherung von Nährstoffen, zur Wärmeisolation und als Polster zur Druckaufnahme. In der Subcutis verlaufen darüber hinaus eine Vielzahl von Nervenfasern und Blutgefäßen. Weiters wird in der Dermis und der Subcutis Wasser vorgehalten.^{239,240,241,242}

²³¹ Wokalek (1992)

²³² Kanitakis (2002)

²³³ Altmeyer (2005)

²³⁴ Wokalek (1992)

²³⁵ Kanitakis (2002)

²³⁶ Altmeyer (2005)

²³⁷ Wokalek (1992)

²³⁸ Altmeyer (2005)

²³⁹ Loth (1986)

6.1.1.1.1. Eindringtiefe der ultravioletten Strahlung in die menschliche Haut

Grundsätzlich besteht ein Zusammenhang zwischen der Wellenlänge der UV-Strahlung und ihrem Transmissionsvermögen durch die Schichten der menschlichen Haut. So nimmt die Eindringtiefe mit größerer Wellenlängen zu.²⁴³ Über diesen prinzipiellen Zusammenhang hinaus ist die Eindringtiefe abhängig vom Zustand der Haut, beispielsweise ihrem Wasser- und Fettgehalt sowie ihrer Pigmentierung. Die Eindringtiefe der UV-Strahlung unterliegt daher individuellen wie auch hautregionalen Schwankungen. Die Werte der folgenden Tabelle (Tabelle 13) gelten daher exemplarisch.²⁴⁴

	UV-C bei 280 nm	UV-B bei 297 nm	UV-A bei 365 nm
Epidermis Hornschicht 0 µm bis 20 µm	7,9%	25%	64%
Epidermis belebt ab 20 µm bis 70 µm	0,024%	2,4%	19%

Tabelle 13: Prozentanteile der auf die Hautoberfläche auftreffenden UV-Strahlung, die unterschiedlich tiefe epidermale Schichten erreichen

Die angeführten Werte machen deutlich, dass die UV-A-Strahlung und in geringem Ausmaß auch die UV-B-Strahlung die sensible Basalzellschicht und die darin eingebetteten Melanozyten erreichen kann. Etwa ein Prozent der UV-A-Strahlung durchdringt die Dermis in ihrer kompletten Stärke und erreicht so die Subcutis.²⁴⁵

6.1.1.2. Das menschliche Auge

Da die UV-Strahlung, ganz im Gegensatz zur sichtbaren Lichtstrahlung, dem Auge nach heutigem Wissensstand keine rezeptoradäquaten Reize bietet, beschränken sich ihre photobiologischen Wirkungen auf Beeinträchtigungen beziehungsweise Schädigungen. Die Photophysiologie des Auges wird daher in Kapitel 6.2.1. im Rahmen der Beschreibung des visuellen Systems erläutert.

UV-B-Strahlung wird von der Hornhaut und der Linse des Auges weitgehend absorbiert. Die langwellige UV-A-Strahlung kann diese Medien zum Teil durchdringen und erreicht den Glaskörper des Auges. Bis zu zwei Prozent der UV-A-Strahlung erreichen die Netzhaut, im Folgenden als Retina bezeichnet, die an den Glaskörper anliegt.

Angeführt werden soll die mit zunehmendem Alter auftretende Vergilbung der Linse des menschlichen Auges, die teils durch UV-Bestrahlung verursacht wird. Darüber hinaus besteht ein erhöhtes Risiko, bei lang anhaltender Bestrahlung im UV-B-Spektralbereich

²⁴⁰ Loth (1987)

²⁴¹ Wokalek (1992)

²⁴² Altmeyer (2005)

²⁴³ Everett (1966)

²⁴⁴ Vgl. Bruls (1984)

²⁴⁵ Raab (1990)

an grauem Star²⁴⁶ zu erkranken. Weiters kann übermäßige UV-Strahlungsexposition zu Hornhautentzündungen²⁴⁷ beziehungsweise Retinaentzündungen²⁴⁸ führen. Schließlich soll darauf hingewiesen werden, dass maligne Melanome auch auf der Retina²⁴⁹ entstehen können.²⁵⁰

6.1.2. Photoadaptive Wirkungen im ultravioletten Spektralbereich

Verschiedene körpereigene Mechanismen ermöglichen es, die Auftrittshäufigkeit von Schäden, die durch Wirkungen des Lichtes im kurzwelligen UV-Strahlungsbereich hervorgerufen werden können, zu reduzieren.

6.1.2.1. Lichtschwiele

Eine durch Bestrahlung vorwiegend im UV-B-Spektralbereich hervorgerufene Verdickung der Epidermis wird als Lichtschwiele bezeichnet. Die Verdickung entsteht durch eine beschleunigte Bildung von epidermalen Keratinozyten und einer Zunahme der Aufbauhöhe der Hornschicht.^{251,252} Durch die Lichtschwiele wird die Transmission von UV-B-Strahlung durch die Epidermis reduziert, sodass die Dermis in diesem Spektralbereich weitgehend bestrahlungsfrei bleibt. In Bezug auf die langwelligere UV-A-Strahlung ist die Wirksamkeit der Lichtschwiele gering. Die Rückbildung der Lichtschwiele bei Ausbleiben entsprechender Strahlungsreize dauert mehrere Wochen.²⁵³

6.1.2.2. Pigmentierung

Unter UV-Bestrahlung synthetisieren die in der epidermalen Basalzellschicht vorliegenden Melanozyten in einem mehrstufigen Prozess, der als Melanogenese bezeichnet wird, aus Tyrosin das Pigment Melanin. Tyrosin ist eine nicht essentielle Aminosäure, die in den meisten Proteinen vorkommt und mit der Nahrung aufgenommen wird. Grundsätzlich können zwei Ausprägungsformen der Melanin basierten Pigmentierung unterschieden werden: die Sofortpigmentierung und die verzögerte Pigmentierung.²⁵⁴

²⁴⁶ Lateinische Bezeichnung: Katarakt

²⁴⁷ Lateinische Bezeichnung: Keratitis

²⁴⁸ Lateinische Bezeichnung: Retinitis

²⁴⁹ Lateinische Bezeichnung: Retinales Melanom

²⁵⁰ Vgl. Kanski (2008)

²⁵¹ Fitzpatrick (1986)

²⁵² Pearse (1987)

²⁵³ Braun-Falco (1996)

²⁵⁴ Fritsch (2004)

6.1.2.2.1. Sofortpigmentierung

Die Sofortpigmentierung tritt unter UV-Bestrahlung mit Wellenlängen zwischen 300 nm und 440 nm auf. Das Wirkungsmaximum liegt mit 340 nm im UV-A-Bereich.²⁵⁵ Die kurzfristig auftretende und nur wenige Stunden anhaltende Sofortpigmentierung beruht auf einer chemischen Konformation, also einer Veränderung der Raumstruktur der Melaninmoleküle. Darüber hinaus erfolgt eine Umverteilung der Pigmente innerhalb der Epidermis. Die Schutzwirkung der Sofortpigmentierung vor UV-Strahlung ist gering.²⁵⁶

6.1.2.2.2. Verzögerte Pigmentierung

Die verzögerte Pigmentierung ist ein mehrstufiger Prozess, der unter UV-Bestrahlung im Wellenlängenbereich von 285 nm und 340 nm abläuft. Das Wirkungsmaximum liegt knapp unter 300 nm im UV-B-Bereich.²⁵⁷ Im Zuge der verzögerten Pigmentierung wird vermehrt neues Melanin in den Melanozyten gebildet. Nach Beendigung dieser Melanogenese wandern die ausgereiften Melaninpolymere an die Peripherie der Melanozyten und treten schließlich in das Zytoplasma der umliegenden Keratinozyten über.^{258,259} Melanin liegt in den Ausprägungsformen Eumelanin und Phäomelanin vor. Eumelanin weist eine höhere UV-Absorption auf und bewirkt eine Braunfärbung der Haut. Ein überwiegendes oder ausschließliches Vorliegen von Phäomelanin hingegen führt zur Rotfärbung der Haut. Die Farbveränderung der Haut tritt etwa 72 Stunden nach der UV-Strahlungseinwirkung auf.²⁶⁰

Das folgende Diagramm (Diagramm 25) zeigt die unterschiedlichen Wirkungs-Kurven der Sofortpigmentierung und der verzögerten Pigmentierung.²⁶¹

²⁵⁵ DIN 5031-10 (2000)

²⁵⁶ Ortonne (2003)

²⁵⁷ DIN 5031-10 (2000)

²⁵⁸ Ortonne (2003)

²⁵⁹ Fritsch (2004)

²⁶⁰ Fritsch (2004)

²⁶¹ Vgl. Abbildung DIN 5031-10 (2000)

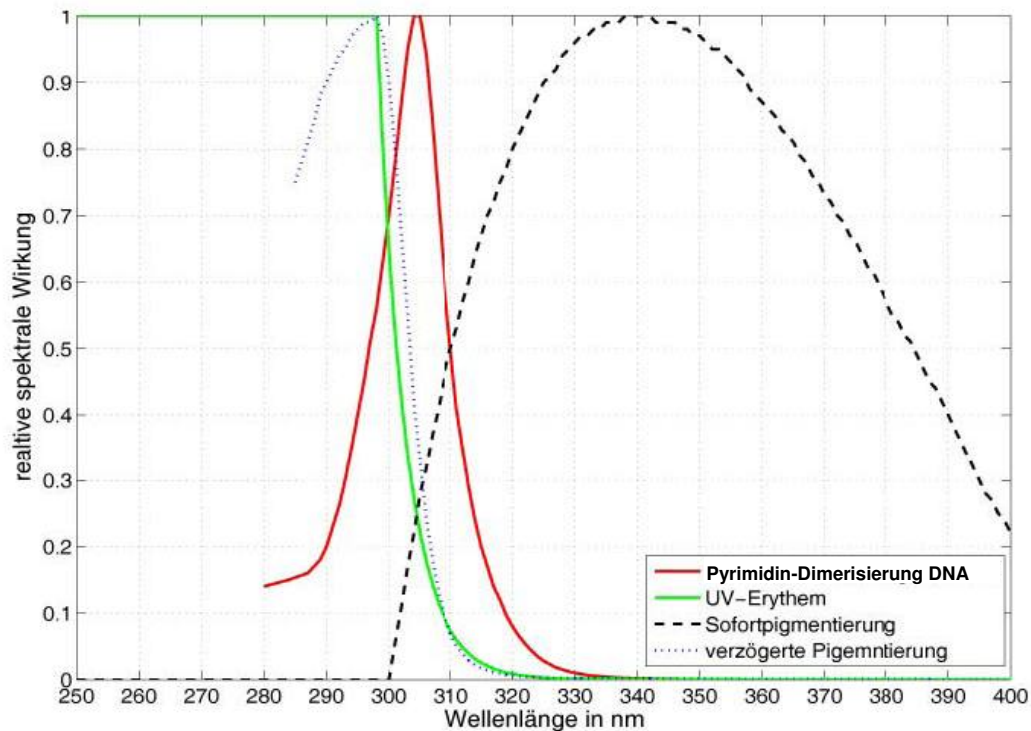


Diagramm 25: Spektrale Wirkungs-Kurven: Sofortpigmentierung und verzögerte Pigmentierung nach DIN 5031-10

Darüber hinaus werden auch die photopathologischen Wirkungs-Kurven zur Pyrimidin-Dimerisierung und zur Erythembildung dargestellt, die im Anschluss erläutert werden.

6.1.3. Photopathologische Wirkungen im ultravioletten Spektralbereich

Da die Energie des Photonenstroms umgekehrt proportional zur Wellenlänge ist, können Lichteinwirkungen im kurzwelligen UV-Strahlungsbereich schädigende Veränderungen in den molekularen Strukturen des Rezeptororgans Haut hervorrufen. Ein Beispiel dafür ist die Pyrimidin-Dimerisierung, bei der es zu einer bereichsweisen Verklebung der beiden Stränge der in den Zellkernen vorliegenden Desoxiribonucleinsäure kommt.²⁶² Im Weiteren wird die Desoxiribonucleinsäure mit DNA abgekürzt. Durch die Verklebung kann die DNA nicht mehr repliziert werden.²⁶³

6.1.3.1. Erythembildung

Als Erythem wird eine mit bloßem Auge erkennbare Hautrötung bezeichnet. Ein Erythem wird durch eine lokal stärkere Durchblutung der Haut hervorgerufen, die unterschiedliche Ursachen haben kann. Photobiologisch werden Erytheme sowohl durch Bestrahlung im ultravioletten als auch im infraroten Spektralbereich hervorgerufen. Ultraviolette Bestrahlung bewirkt, entsprechend der abgebildeten Wirkungs-Kurve nach CIE^{264,265}

²⁶² DIN 5031-10 (2000)

²⁶³ Buselmaier (2006)

²⁶⁴ CIE (1987)

(Diagramm 26), das Auftreten eines hellroten und gleichmäßig gefärbten Erythems. Die Rötung tritt erst einige Stunden nach der Bestrahlung auf und klingt langsam, im Allgemeinen in einem Zeitraum von drei bis vier Tagen wieder ab.²⁶⁶

Die minimale Erythemdosis, abgekürzt mit MED, ist definiert als jene minimale Bestrahlungsdosis in mJ/cm^2 oder J/m^2 , die ein scharf abgrenzbares, gerade noch erkennbares Erythem mit einer Mindestfläche von 1 cm^2 hervorruft.²⁶⁷ Die Empfindlichkeit gegenüber UV-Strahlung und damit die MED ist stark vom Individuum abhängig. Wobei durch eine qualitative Beschreibung von Hauttypen Individuengruppen mit ähnlicher Empfindlichkeit zusammengefasst werden können. Exemplarisch sei hier die Hauttypklassifikation nach Fitzpatrick (Tabelle 14) angeführt.²⁶⁸

Hauttyp	Erythem	Bräunung	Haarfarbe	Augen	Haut
I	immer	keine	rot rotblond	grün	sommersprossig
II	immer	manchmal	blond	blau	hellhäutig
III	selten	immer	dunkelblond braun	braun	mittelstark pigmentiert
IV	sehr selten	immer	dunkel	dunkel	dunkelhäutig
V	nie				braun
VI	nie				schwarz

Tabelle 14: Hauttypen des Menschen modifiziert nach Fitzpatrick

Um eine quantitative Abschätzung möglich zu machen, wurde für den Hauttyp II eine standardisierte gewichtete MED von $250 \text{ J}/\text{m}^2$ festgesetzt.²⁶⁹ Diese standardisierte MED dient einer grundlegenden Risikoeinschätzung, hat aber keinen Anspruch auf individuelle Gültigkeit. Eine Applikation von etwa vier MED führt beim Hauttyp II zur Ausbildung von Sonnenbrand²⁷⁰ ohne Blasenbildung.²⁷¹

Um Missdeutungen, speziell unzulässige Verallgemeinerungen im Umgang mit der MED zu verhindern, wurde eine Objektivierung vorgenommen und eine Standard Erythemdosis mit der Abkürzung SED definiert. Eine SED wurde durch die Commission Internationale de l'Éclairage, mit der Abkürzung CIE und der deutschen Bezeichnung Internationale Beleuchtungskommission, mit einer gewichteten flächenbezogenen Strahlungsenergie von $100 \text{ J}/\text{m}^2$ festgesetzt.^{272,273}

²⁶⁵ CIE (1993)

²⁶⁶ Schulungbaum (1994)

²⁶⁷ Lowe (1990)

²⁶⁸ Fitzpatrick (1988)

²⁶⁹ Deutsche Strahlenschutzkommission (2001)

²⁷⁰ Der medizinische Begriff für Sonnenbrand ist Dermatitis solaris.

²⁷¹ Taylor (1990)

²⁷² CIE (1987)

²⁷³ CIE (1993)

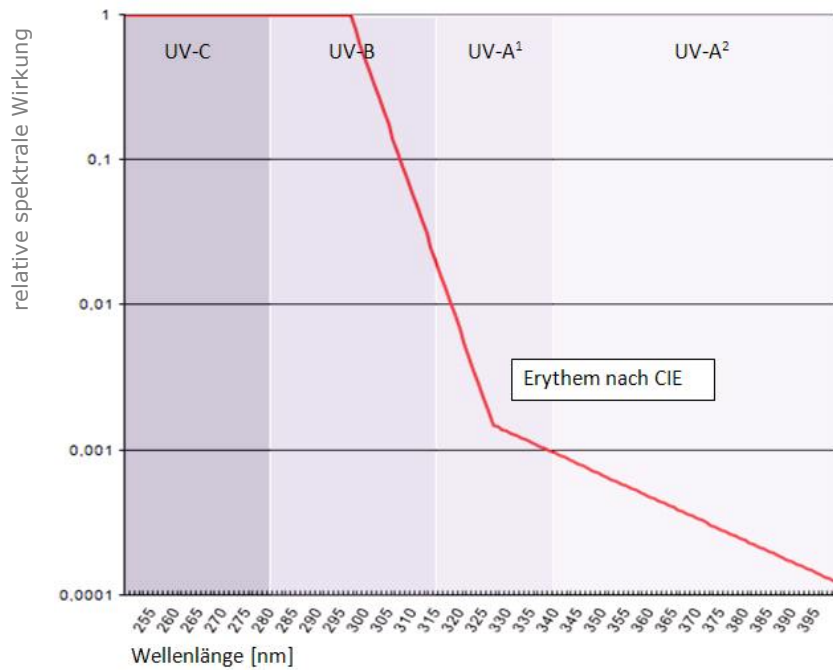


Diagramm 26: Spektrale Wirkungs-Kurve: Erythem nach CIE 1987/1993

6.1.3.2. Photokarzinogenität

Als Karzinome beziehungsweise Sarkome werden die zwei unterschiedlichen Ausbildungsformen von Tumoren bezeichnet. Tumore sind anatomische Strukturen, die bei der krankhaften Vermehrung von bösartigen Zellen entstehen. Karzinome werden jene Tumore genannt, die ihren Ausgang in einem Deck- oder Drüsengewebe²⁷⁴ nehmen. Photokarzinome²⁷⁵ entstehen zumeist durch direkte oder indirekte Einwirkung von solarer Strahlung²⁷⁶ auf dieses Gewebe. Die Wirkungs-Kurve zur Photokarzinogenität nach CIE (Diagramm 27) zeigt die diesbezügliche spektrale Sensitivität der Haut.²⁷⁷

²⁷⁴ Sarkome entstehen im Unterschied dazu im Muskel-, Nerven- oder Bindegewebe.

²⁷⁵ Umgangssprachlich werden diese Photokarzinome häufig unter dem Begriff „Hautkrebs“ subsumiert.

²⁷⁶ Andere Ursachen können etwa ererbte genetische Defekte sein.

²⁷⁷ CIE (1999)

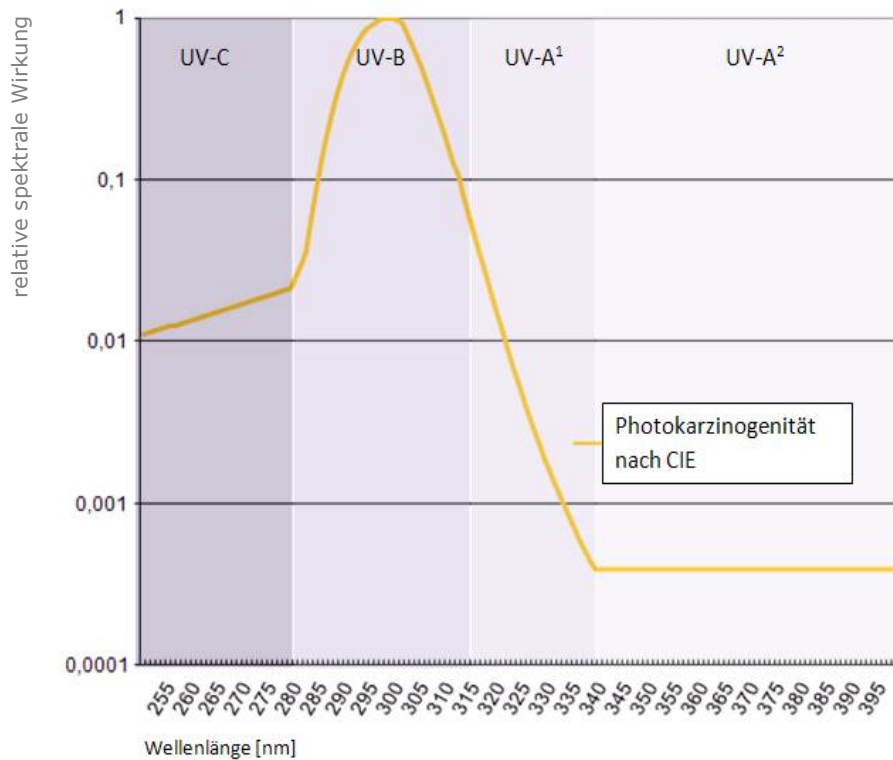


Diagramm 27: Spektrale Wirkungs-Kurve: Photokarzinogenität nach CIE 1999

Im Folgenden werden die drei am häufigsten auftretenden Photokarzinome, das Basaliom, das Spinaliom und das maligne Melanom, aus photopathologischer Sicht kurz charakterisiert.²⁷⁸ Gemeinsam ist diesen drei Photokarzinomen, dass ihr Ursprung in einer Veränderung des Gewebes der Haut²⁷⁹ liegt

6.1.3.2.1. Basaliom und Spinaliom

Die Photokarzinome Basaliom und Spinaliom werden durch direkte Schädigung von in der Haut vorliegenden DNA-Strukturen durch Licht hervorgerufen, wobei Photonen aus dem ultravioletten Spektralbereich von einer DNA-Struktur der Haut absorbiert werden.²⁸⁰ Das führt zu einer Veränderung dieser DNA-Struktur, die durch unterschiedliche körpereigene Mechanismen repariert oder eliminiert werden muss. Gelingt das nicht, wird die Veränderung bei der Zellteilung laufend als Fehlinformation weiter gegeben, was zur Erkrankung des Gewebes führt.

Basaliome werden vorwiegend durch die vergleichsweise langwellige UV-A-Strahlung verursacht, die - wie eingangs beschrieben - eine größere Eindringtiefe in die Haut

²⁷⁸ Es ist darauf hinzuweisen, dass die in Diagramm 27 abgebildete Wirkungs-Kurve: Photokarzinogenität nach CIE 1999 die unterschiedlichen Photokarzinome nicht differenziert, obwohl diese unterschiedliche spektrale Sensitivitäten aufweisen.

²⁷⁹ Photokarzinome können auch in den oralen und genitalen Schleimhäuten oder am Auge auftreten.

²⁸⁰ Davies (2002)

aufweist als die kurzwelligere UV-B-Strahlung. Von der Schädigung betroffen sind die in der Haut befindlichen Zellen embryonaler Haarkeime. Die UV-B-Strahlung schädigt vorwiegend oberflächlich gelegene DNA-Strukturen was zur Bildung von Spinaliomen führen kann.

6.1.3.2.2. Malignes Melanom

Als malignes Melanom wird ein Photokarzinom der Melanozyten der Haut bezeichnet. Es wird zu über 90% durch indirekte, solarstrahlungsbedingte Schädigung von DNA-Strukturen hervorgerufen.²⁸¹ Die indirekte Schädigung erfolgt durch die Absorption eines Photons des ultravioletten Spektralbereichs durch ein Molekül, das selbst kein Bestandteil einer DNA-Struktur ist. Das veränderte Molekül löst seinerseits eine photochemische Reaktion innerhalb des Körpers aus, die in weiterer Folge zu einer Schädigung von DNA-Strukturen führt. Maligne Melanome werden vorwiegend durch UV-A-Strahlung hervorgerufen.²⁸²

Das Auftreten eines Photokarzinoms kann nicht mit einer konkret quantifizierbaren Bestrahlungsdosis verbunden werden. Dennoch sind qualitative Parameter abbildbar (Diagramm 28), die das Risiko an einem Photokarzinom zu erkranken, beschreiben.²⁸³

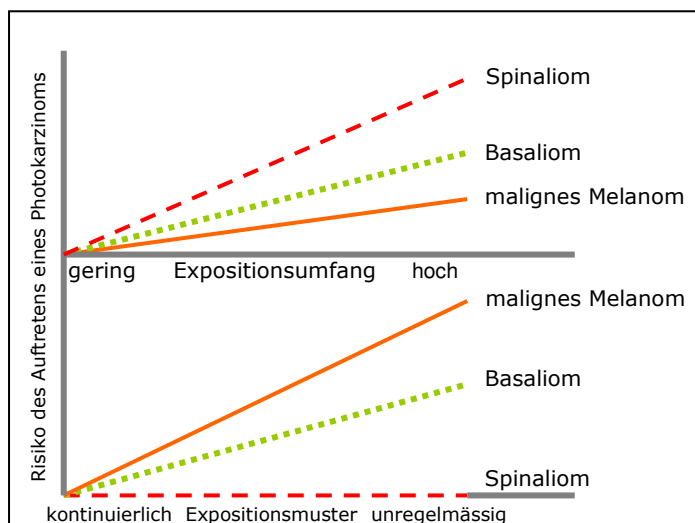


Diagramm 28: Qualitative Risikoabschätzung über das Auftreten von Photokarzinomen

So besteht ein Bezug zwischen der Auftrittshäufigkeit der unterschiedlichen Photokarzinome und dem Expositionsumfang einerseits sowie dem Expositionsmuster andererseits. Das maligne Melanom tritt entsprechend der Abbildung (Diagramm 28) mit besonderer Häufigkeit dann auf, wenn die Bestrahlung im ultravioletten Spektralbereich unregelmäßig erfolgt, eine Erhöhung des Expositionsumfangs führt hingegen nur zu einer moderaten Risikoerhöhung.

²⁸¹ Davies (2002)

²⁸² Armstrong (2001)

²⁸³ Vgl. Abbildung überarbeitet: Armstrong (2001)

6.1.4. Photophysiologische Wirkungen im ultravioletten Spektralbereich

Das in der menschlichen Haut unter der Einwirkung von ultravioletter Strahlung gebildete Cholecalciferol wird als Vitamin D₃ bezeichnet und zur Gruppe von fünf unterscheidbaren D Vitaminen gezählt. Da Vitamine als lebenswichtige organische Verbindungen definiert sind, die nicht als Energieträger dienen und nicht vom Körper selbst synthetisiert werden können, stellt Cholecalciferol als photosynthetisch hergestelltes Eigenprodukt des menschlichen Körpers im Grunde kein Vitamin sondern ein Hormon dar.²⁸⁴ Nach derzeitigem Wissenstand stellt die körpereigene Synthese von Vitamin D₃ den zentralen photophysiologischen Prozess im ultravioletten Spektralbereich dar.

6.1.4.1. Vitamin D₃ Photosynthese

Der Ausgangsstoff für die Photosynthese von Vitamin D₃ ist 7-Dehydrocholesterol, ein Sterin das in der menschlichen Epidermis als Stoffwechselprodukt der Verdauung vorliegt. Wie bei allen Sterinen wird das molekulare Grundgerüst von 7-Dehydrocholesterol von einem Steran gebildet, das aus einem fünfgliedrigen und drei sechsgliedrigen geschlossenen Ringen besteht (Abbildung 27).

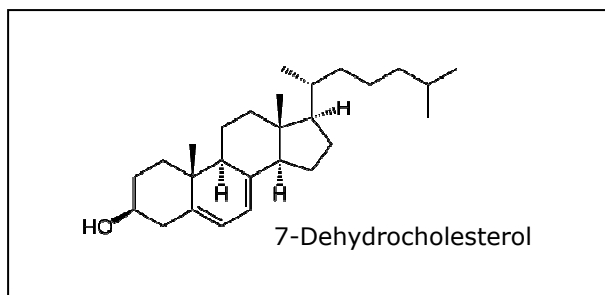


Abbildung 27: Molekularstruktur von 7-Dehydrcholesteral als exemplarisches Steran

Unter Einwirkung von ultravioletter Strahlung mit einer Wellenlänge zwischen 252 nm und 330 nm²⁸⁵ wird der mittlere der drei sechsgliedrigen Ringe aufgebrochen. Die so entstehende Verbindung wird als Pre-Vitamin D₃ bezeichnet. Für diesen Vorgang liegt eine Wirkungs-Kurve nach CIE (Diagramm 29) vor.²⁸⁶

²⁸⁴ Im Folgenden Text wird an der tradierten Bezeichnung Vitamin D₃ festgehalten.

²⁸⁵ CIE (2006)

²⁸⁶ CIE (2006)

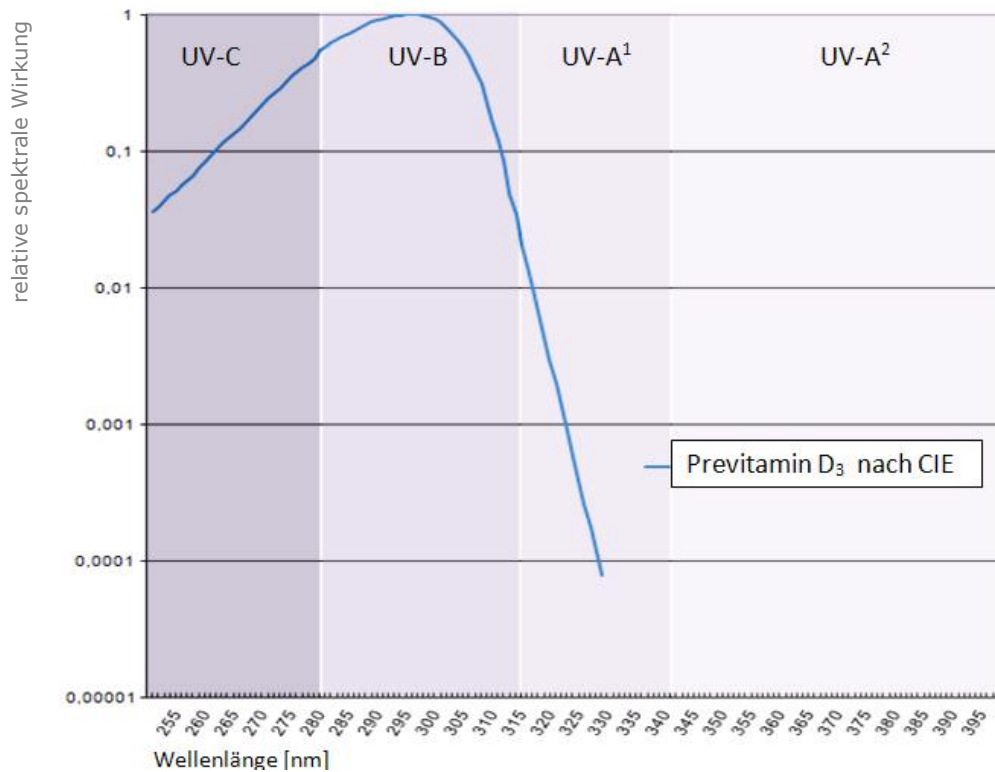


Diagramm 29: Spektrale Wirkungs-Kurve: Pre-Vitamin D₃ Synthese nach CIE 2006

Pre-Vitamin D₃ ist instabil und wird in einem thermischen Umwandlungsprozess in Vitamin D₃ umgesetzt. Vitamin D₃ kann in die Blutbahn übertreten und wird dort von Trägersubstanzen vorwiegend von Vitamin D bindenden Proteinen weiter transportiert zur Leber.

Dieser Prozess (Abbildung 28) der Photosynthese von Vitamin D₃ kann nur ab einer Schwellenbestrahlungsstärke von 18 mJ/cm² Haut ablaufen.^{287,288,289,290} Parallel wird dann sowohl Pre-Vitamin D₃ als auch Vitamin D₃ unter Einwirkung ultravioletter Strahlung in die physiologisch nicht aktiven²⁹¹ Substanzen Lumisterol, Tachysterol sowie Suprasterol I, Suprasterol II und 5,6-Transvitamin D₃ umgesetzt. Die Bildung dieser Substanzen verhindert eine übermäßige Produktion von Vitamin D₃ bei intensiver ultravioletter Bestrahlung und bannt so die Gefahr einer Selbstvergiftung durch eine Überdosis Vitamin D₃.

²⁸⁷ Hollis (2005)

²⁸⁸ Andere Quellen geben eine etwas höhere Schwellenbestrahlung von 200 J/m² erforderlich, siehe dazu Fisch (2000).

²⁸⁹ Fisch (2000)

²⁹⁰ Das bedeutet, dass die Photosynthese von Vitamin D₃ bei einer geringeren Dosis von umgerechnet 180 J/m² Haut einsetzt als sie zum Auftreten eines minimalen Erythems für den Hauttyp II mit 250 J/m² erforderlich ist.

²⁹¹ Obwohl die Inaktivität der Substanzen entsprechend dem bisherigen Erkenntnisstand der Forschung gegeben ist, sind diese für den Organismus nicht wirkungslos, wie der Schutz vor Überdosierung zeigt.

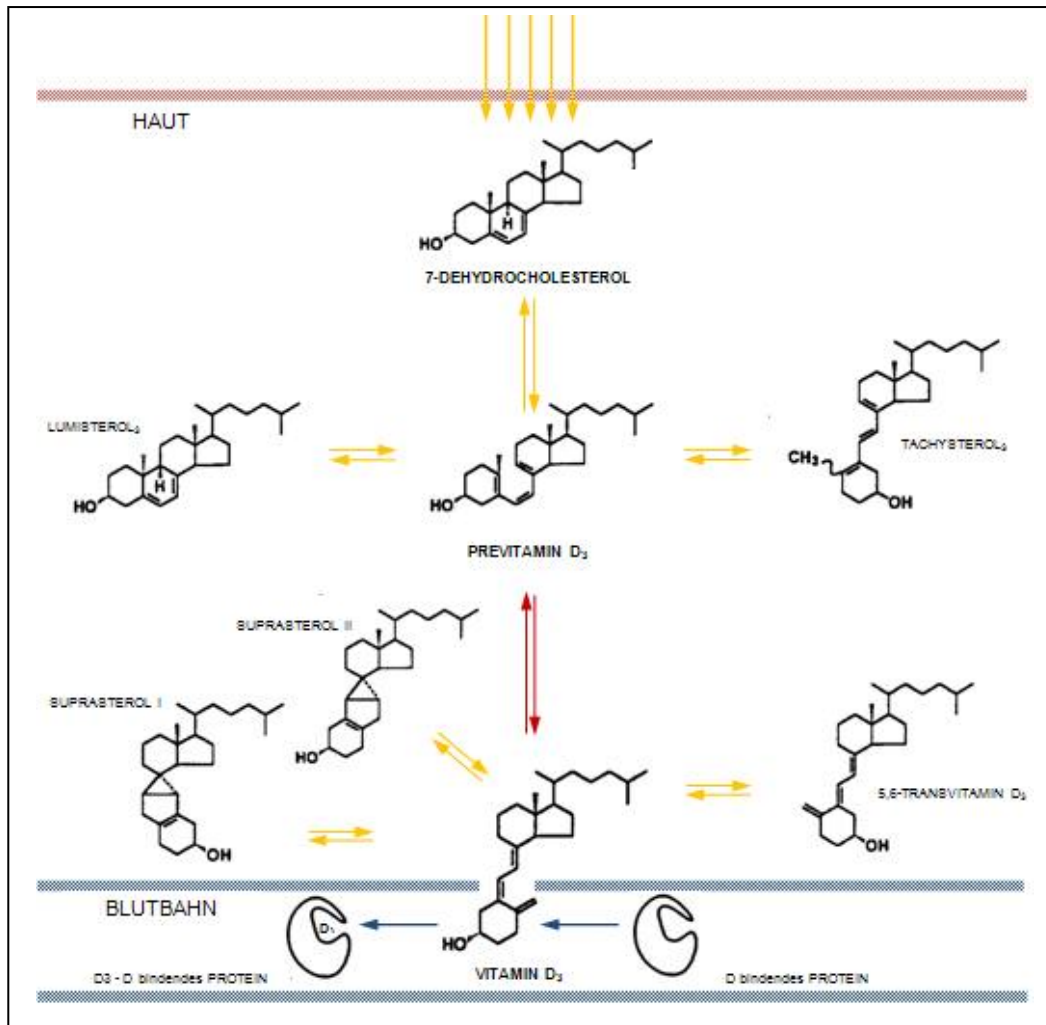


Abbildung 28: Photosynthese von Previtamin D₃ und biochemische Folgereaktionen

In der Leber wird Vitamin D₃ zu 25(OH) Vitamin D₃ umgesetzt. Die Halbwertszeit von im Blutkreislauf befindlichem 25(OH) Vitamin D₃ beträgt je nach der durchschnittlichen Vitamin D Versorgung 12 bis 60 Tage.^{292,293} Der 25(OH) Vitamin D₃ Spiegel wird daher als Messgrundlage für die Beurteilung des Vitamin D Status eines Menschen herangezogen. Die physiologisch aktive Form des Vitamin D₃ entsteht allerdings erst nach einem weiteren Umsetzungsprozess. Dabei wird in der Blutbahn befindliches 25(OH) Vitamin D₃ den Nieren zugeführt und dort zu 1,25(OH)₂D₃ umgewandelt. Diese als Calcitriol bezeichnete Form des Vitamin D₃ kann von Vitamin D bindenden Proteinen in der Blutbahn transportiert und zu über dreißig unterschiedlichen Zielzellen und Zielorganen befördert werden.²⁹⁴ Das erklärt die vielfältige Wirksamkeit von 1,25(OH)₂D₃.²⁹⁵

²⁹² Wissenschaftlicher Lebensmittelausschuss der Europäischen Kommission (2002) Halbwertszeit Angabe dort 30-60 Tage.

²⁹³ Zittermann (2003), Halbwertszeitangabe dort 12-19 Tage.

²⁹⁴ Zittermann (2003)

²⁹⁵ Pietschmann (2003)

6.1.4.2. Vitamin D₃ Versorgung

Das folgende Diagramm (Diagramm 30) stellt eine Beziehung zwischen der Blutserumkonzentration von 25(OH) Vitamin D₃ und dem Erfüllungsgrad von Vitamin D₃ abhängigen Körperfunktionen in % her, der unter dem jeweiligen Versorgungsstatus erreicht werden kann.²⁹⁶

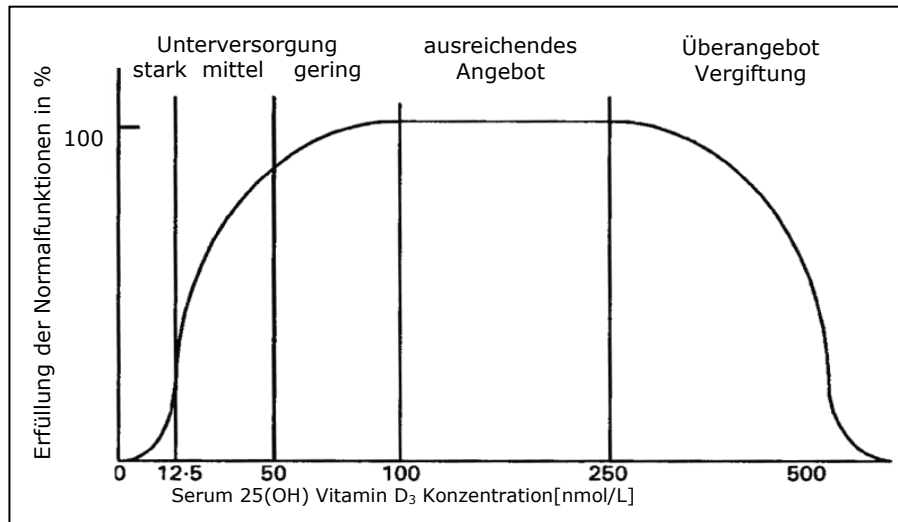


Diagramm 30: Funktionskurve des Vitamin D₃ Status

Zahlreiche Studien befassen sich mit der Ermittlung des durchschnittlichen Vitamin D₃ Status, den eine bestimmte Bevölkerungsgruppe tatsächlich aufweist. Die Tabelle (Tabelle 15) im Anschluss bietet eine Übersicht ausgewählter Studienergebnisse, die einerseits zeigen, dass von einer ausreichenden Vitamin D₃ Versorgung der europäischen Bevölkerung nicht ausgegangen werden kann, andererseits werden spezielle Phänomene ablesbar.²⁹⁷

²⁹⁶ Zittermann (2003)

²⁹⁷ Vgl. Zittermann (2003)

Altersgruppe, Land und studienspezifische Differenzierungen		Durchschnittliche 25(OH) Vitamin D ₃ Serumkonzentration [nmol/L]	
		Sommer	Winter
Kinder			
1	Deutschland ²⁹⁸	84	43
2	Großbritannien hellhäutig ²⁹⁹	80	52
3	Großbritannien dunkelhäutig ³⁰⁰	36 - 42	
4	Spanien ³⁰¹	75	32
Jugendliche			
5	Frankreich ³⁰²	71	21
6	Finnland ³⁰³	63	34
Junge Erwachsene			
7	Deutschland ³⁰⁴	70	30
8	Zentral- und Westeuropa ³⁰⁵	68	42
	Türkei ³⁰⁶		
9	Frauen westliche Kleidung	56	
10	Frauen traditionelle Kleidung	32	
11	Frauen streng islamische Kleidung	9	
Ältere Erwachsene			
12	Großbritannien ³⁰⁷	35	23
13	Italien ³⁰⁸		28
14	Griechenland ³⁰⁹		24
In einer Pflegeanstalt lebend			
15	Schweiz ³¹⁰		18
16	Frankreich ³¹¹	8	

Tabelle 15: Überblick über ausgewählte Studienergebnisse betreffend den Vitamin D₃ Status in unterschiedlichen europäischen Ländern differenziert nach Populationsgruppen und Winter- beziehungsweise Sommerhalbjahr

Zwei Tendenzen werden besonders deutlich: Die Vitamin D₃ Versorgung jüngerer Menschen ist generell besser als die der Älteren, und der Vitamin D₃ Status korreliert mit dem jahreszeitlichen terrestrischen Solarstrahlungsangebot. Darüber hinaus zeigt ein Vergleich der Ergebnisse der Zeilen zwei und drei, dass dunkel pigmentierte Personen bei

²⁹⁸ Zittermann (1987)

²⁹⁹ Davies (1999)

³⁰⁰ Lawson (1999)

³⁰¹ Docio (1998)

³⁰² Guillemant (2001)

³⁰³ Lehotonen (1999)

³⁰⁴ Zittermann (1998)

³⁰⁵ McKenna 1992

³⁰⁶ Alagol (2000)

³⁰⁷ Hegarty (1994)

³⁰⁸ Van der Wielen (1995)

³⁰⁹ Van der Wielen (1995)

³¹⁰ Bischoff (1999)

³¹¹ Fardellone (1995)

gleichem Strahlungsangebot eine signifikant niedrigere durchschnittliche 25(OH) Vitamin D₃ Serumskonzentration aufweisen als hellhäutige. Die Werte der Zeilen neun, zehn und elf belegen den direkten Zusammenhang zwischen der Größe der Hautfläche, die ultravioletter Strahlung ausgesetzt wird, und dem Vitamin D₃ Status einer Person.

Wenn das Angebot an ultravioletter Strahlung zur photosynthetischen Herstellung von Vitamin D₃ nicht ausreicht, wird eine orale Einnahme von Vitamin D₃ empfohlen. Als medizinische Maßeinheit für die Dosierung von Vitamin D₃ ist eine international Unit (IU) auf Grund der zu beobachteten Wirksamkeit wie folgend (Formel 28) definiert worden:³¹²

$$1 \text{ IU Vitamin D}_3 \triangleq 65,0 \text{ mmol Vitamin D}_3 \triangleq 0,025 \mu\text{g Vitamin D}_3$$

Formel 28: Maßeinheit für die Dosierung von Vitamin D₃ laut WHO

Die in der Literatur empfohlenen Vitamin D₃ Tagesdosen zur Aufrechterhaltung eines ausreichenden 25(OH) Vitamin D₃ Blutserumspiegels in Strahlungsmangelsituationen sind unterschiedlich. Zu bemerken ist allerdings ein allgemeiner Trend zur Erhöhung dieser Dosen. Exemplarisch zitiert wird hier eine auf umfassende in vivo Untersuchungen³¹³ gestützte Empfehlung zur tägliche Einnahme von mindestens 1.000 IU.^{314,315}

6.1.4.3. Klassische Vitamin D₃ Mangelerscheinungen

Die zentrale Rolle der ultravioletten Strahlungsexposition der Haut und damit des Vitamins D₃ für den Kalzium- und Phosphatstoffwechsel des Menschen wird seit annähernd 200 Jahren beschrieben.³¹⁶ Andere als „nicht-klassisch“ bezeichnete Funktionen des Vitamins D werden erst seit 1980 systematisch beobachtet und sind Gegenstand der aktuellen Forschung. Ausgangsbasis für viele Studien sind epidemiologisch nachgewiesene Bezüge zwischen dem lokalen ultravioletten Strahlungsangebot einer Region und statistischen Häufungen von Krankheitsbildern, die dieser Region zugeordnet werden können.³¹⁷ Im Folgenden werden zunächst die klassischen Wirkungen zu geringer ultravioletter Strahlungsexposition beziehungsweise mangelnder Vitamin D₃ Versorgung beschrieben. Im Anschluss werden die nicht klassischen Wirkungen entsprechend der Häufigkeit ihres Auftretens in der aktuellen österreichischen Todesursachenstatistik skizziert.³¹⁸

³¹² IUs werden von der Weltgesundheitsorganisation für unterschiedlichste in der Medikation relevante Stoffe definiert.

³¹³ Tangpricha (2003)

³¹⁴ Holick (2004)

³¹⁵ Der durch diese Dosierung erreichte 25(OH) Vitamin D₃ Serumspiegel beträgt entsprechend der Individualität der untersuchten Personen zwischen 78-100 nmol/L \triangleq 30-40 ng/ml.

³¹⁶ Molozolowski (1939)

³¹⁷ Spina (2006)

³¹⁸ http://www.statistik.at/web_de/statistiken/gesundheit/todesursachen/todesursachen_im_ueberblick/index.html, (08.06.2008)

6.1.4.3.1. Vitamin D₃ und der Stoffwechsel von Knochen und von Muskeln

Um eine optimale Effektivität der Resorption von Kalzium aus der Nahrung durch den Darm zu erreichen, ist eine 25(OH) Vitamin D₃ Serumskonzentration von mindestens 78 nmol/L erforderlich.³¹⁹ Ist die Vitamin D₃ Versorgung nicht ausreichend, sinkt die Rate des aus der Nahrung entnehmbaren Kalziums und damit die Kalzium Serumskonzentration. Dieses Absinken wird durch eine Mobilisierung von Kalzium aus den Knochen ausgeglichen. Parallel dazu setzt die Produktion von Parathhormon in den Nebenschilddrüsen ein, um die Produktion von 1,25(OH)₂D₃ in den Nieren anzuregen. Ein hoher Parathormonspiegel induziert aber auch eine geringere Resorption von Phosphor aus der Nahrung bei gleichzeitig erhöhter Ausscheidung von Phosphor mit dem Urin. Die daraus resultierende inadäquate Versorgung der Knochen mit Kalzium und Phosphor führt zu Erkrankungen wie Rachitis und Osteomalazie.³²⁰

6.1.4.3.1.1. Rachitis und Osteomalazie

Beide Erkrankungen basieren auf der selben oben beschriebenen Störung der Mineralisation der Knochen. Als Rachitis wird die Krankheit bezeichnet, wenn sie im Kindheitsalter und damit in der Wachstumsperiode des Skeletts auftritt. Der Knochen erreicht nicht die nötige Stabilität und bleibt zu weich, zusätzlich verzögert sich die entsprechende Verkalkung von knorpeligen Strukturen. Es kommt dadurch zu teils schweren Deformationen des Skelettes. Während die Rachitis auf Grund massiven Strahlungsmangels in den frühindustriellen Bergbaumetropolen Großbritanniens epidemischen Charakter mit einer Auftrittshäufigkeit von bis zu 96% hatte, tritt die Krankheit heute selten auf.^{321,322} Im Erwachsenenalter wird die entsprechende Mineralisationsstörung als Osteomalazie bezeichnet. Die erkrankten Knochen weisen einen zu geringen Anteil von bis etwa 60% mineralisierter Substanz auf.³²³ Es treten dumpfe Schmerzen im Inneren der Gliedmaßen und eine Erhöhung des Knochenfrakturrisikos auf.^{324,325}

6.1.4.3.1.2. Myopathie

Mit der unzureichenden Versorgung der Knochen mit Kalzium und Phosphor gehen oft auch Erkrankungen der glatten Skelettmuskulatur und der Herzmuskulatur, wie Muskelschwäche, reduzierte oder verlangsamte Muskelreaktion³²⁶ und Muskelschwund einher. Diese unter dem Begriff Myopathie zusammengefassten Erkrankungen treten bei einem den Kalziumstoffwechsel der Muskelzellen beeinträchtigenden Mangel an

³¹⁹ Heaney (2003)

³²⁰ Holick (2004)

³²¹ Hobday (2006)

³²² Rajakumar (2003)

³²³ Leidig (2002)

³²⁴ Behrman (2000)

³²⁵ Holick (2007)

³²⁶ Verhaar (2000)

1,25(OH)₂ Vitamin D₃ auf.³²⁷ Eine Supplementierung der Nahrung mit Vitamin D₃ normalisiert die Muskelstärke und verbessert die Muskelfunktion³²⁸ bei Patienten mit ursprünglich besonders niedrigem Versorgungsstatus.³²⁹ Die Stärkung und Reaktionsfähigkeit der Muskulatur ist für die Prävention von Stürzen von größter Bedeutung, insbesondere wenn, wie bei Osteomalazie- und Osteoporose-Patienten, das Knochenbruchrisiko erhöht ist.³³⁰

6.1.4.3.1.3. Osteoporose

Als Osteoporose bezeichnet man eine Erkrankung, bei der ein beschleunigter Rückgang der Knochendichte und eine dadurch bedingte Frakturanfälligkeit der Knochenstrukturen beobachtet wird. Die Ursachen des Auftretens von Osteoporose sind vielfältig, etwa eine erbliche Disposition, Schilddrüsenüberfunktion, Folsäuremangel, Cortisolüberproduktion, Bewegungsarmut, Störungen des Kalziumstoffwechsels, ...³³¹ Etwa 45% aller hellhäutigen Frauen im Alter über 50 Jahren leiden an verminderter Knochendichte bedingt durch Osteoporose, wobei Frauen ein rund 3,5 faches Erkrankungsrisiko tragen als Männer.³³² Osteoporose verläuft zunächst unmerklich und wird meist im Zuge einer Knochendichtemessung festgestellt. Beeinträchtigungen treten auf, wenn es auf Grund der Erkrankung zu Knochenbrüchen kommt. Die Zahl der jährlichen Hüftknochenfrakturen liegt in Österreich etwa bei 14.000 wobei rund 90% der Vorfälle auf Osteoporoseerkrankungen zurückzuführen sind.^{333,334,335}

Die Wirksamkeit einer kombinierten Verabreichung von Vitamin D₃ und Kalzium zur Osteoporoseprävention, zur Reduktion der Knochenabbaugeschwindigkeit und Senkung des Sturzrisikos nach dem Ausbruch der Erkrankung wird in zahlreichen Studien sehr unterschiedlich bewertet.^{336,337,338,339,340,341} In einer umfassenden Metaanalyse von 17 Studien zum Thema Sturzrisiko und von 23 Studien zur Entwicklung der Knochendichte wurden Datensätze von über 50.000 Personen vergleichend ausgewertet.³⁴²

³²⁷ Wolters (2005)

³²⁸ Ziambaras (1997)

³²⁹ Wolters (2005)

³³⁰ Bischoff-Ferrari (2004)

³³¹ Ringe (2001)

³³² Melton (1992)

³³³ Köck (2001)

³³⁴ Klimot (2007)

³³⁵ 14.000 ist eine Schätzung aus der Verknüpfung der Daten aus Melton (1992) und Köck (2001)

³³⁶ Grant (2005)

³³⁷ Porthouse (2005)

³³⁸ Cruz (2003)

³³⁹ Avenell (2005)

³⁴⁰ Boonen (2006)

³⁴¹ Holick (2006)

³⁴² Tang (2007)

Es wurde beobachtet, dass die Verabreichung von Vitamin D₃ alleine keine signifikanten Effekte zeigt. Bei der Verabreichung von Kalzium oder einer Kombination von Kalzium und Vitamin D₃ wurde hingegen eine deutliche Reduktion des Sturzrisikos um durchschnittlich etwa 12% festgestellt. Ein wesentlicher Einfluss auf das Ergebnis kommt dabei der Dosierung zu. Die Verabreichung von Kalzium in Dosen über 1.200 mg am Tag führt zu einer Risikoreduktion bis zu 20%, eine niedrigere Dosierung lediglich zu einer Reduktion um 6%. Bei einer konstanten Dosierung von Kalzium bewirkt die zusätzliche Verabreichung von weniger als 800 IU Vitamin D₃ am Tag eine maximale Risikosenkung um 13%. Bei Dosierungen über 800 IU Vitamin D₃ täglich konnte hingegen ein bis zu 16% reduziertes Sturzrisiko festgestellt werden. Bei konsequenter Einnahme einer Kombination von Kalzium und Vitamin D₃ in entsprechend hoher Dosierung kann schließlich eine Reduktion des Sturzrisikos um bis zu 24% erreicht werden.

Durch die Verabreichung von Kalzium beziehungsweise von Kalzium und Vitamin D₃ in entsprechend hoher Dosierung, nahm die Knochendichte der Hüfte um durchschnittlich 0,54%, die der Wirbelsäule um durchschnittlich 1,19% weniger ab.

6.1.4.4. Nicht klassische Vitamin D₃ Mangelerscheinungen

Das folgende Diagramm (Diagramm 31) gibt einen Überblick über die aktuelle österreichische Todesursachenstatistik und unterstreicht damit die unterschiedliche Relevanz bestimmter Erkrankungen für die Gesamtbevölkerung.³⁴³

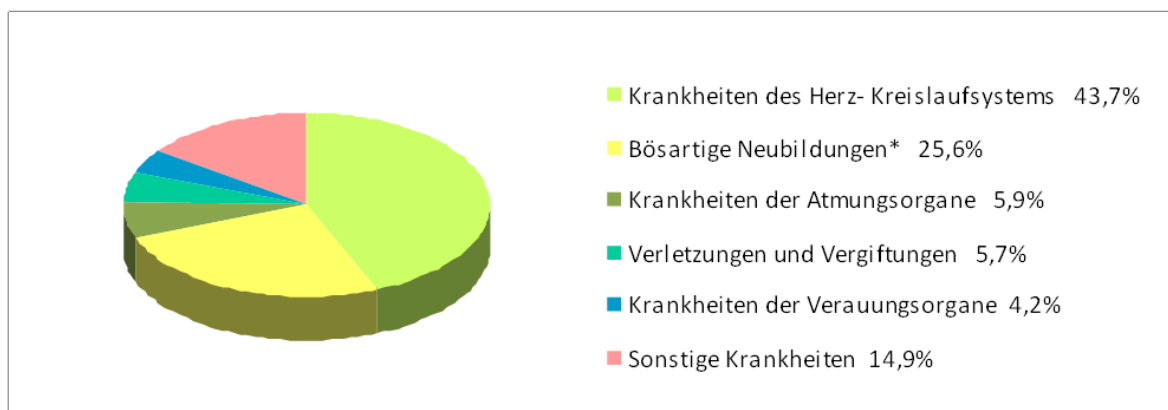


Diagramm 31: Gestorbene nach Todesursachen 2006 Österreich gesamt

*Unter „bösartige Neubildungen“ werden alle Krankheiten mit Tumorbildung, häufig auch als „Krebserkrankungen“ bezeichnet, zusammengefasst. Ein Todesfall durch Lungenkrebs wird also der Gruppe: Bösartige Neubildungen, ein Todesfall in Folge einer Lungenentzündung der Gruppe: Krankheiten der Atmungsorgane, zugerechnet.

³⁴³ http://www.statistik.at/web_de/statistiken/gesundheit/todesursachen/todesursachen_im_ueberblick/index.html, (08.06.2008)

6.1.4.4.1. Herzkreislaufsystem

Zu den umfassendsten epidemiologischen Studien betreffend Herzkreislauferkrankungen gehört die „Framingham Offspring Heart Study“.³⁴⁴ Sie liefert seit 1948 ohne Unterbrechung aus mehreren Kohorten Daten unter anderem zu möglichen Risikofaktoren in Zusammenhang mit dem Auftreten von Herzkreislauferkrankungen. Eine Auswertung der 25(OH) Vitamin D₃ Serumskonzentration und der Auftrittshäufigkeit von Herzkreislauferkrankungen liefert die folgenden Ergebnisse:³⁴⁵ Von 1.739 Personen mittleren Alters ohne vorangegangenen Herzkreislauferkrankungen wiesen 28% eine 25(OH) Vitamin D₃ Serumskonzentration von weniger als 39 mol/L und 9% von weniger als 26 mol/L auf.³⁴⁶ Während eines Beobachtungszeitraums von etwa fünf Jahren und fünf Monaten traten bei 120 Personen erstmals Herzkreislauferkrankungen auf. Das Erkrankungsrisiko war in der Gruppe mit einer 25(OH) Vitamin D₃ Serumskonzentration von unter 39 mol/L 1,62 mal und in der Gruppe mit einer 25(OH) Vitamin D₃ Serumskonzentration von unter 26 mol/L 1,8 mal höher als im Durchschnitt. Diese Causalität konnte allerdings nur bei jener Gruppe von Personen festgestellt werden, die innerhalb des Beobachtungszeitraums auch erhöhte Blutdruckwerte aufwiesen.

Abseits der „Framingham Offspring Heart Study“ konnte eine zeitliche Parallelität der niedrigsten Blutserumkonzentration von 25(OH)Vitamin D₃ und der höchsten Herzkreislauf bedingten Sterblichkeitsraten im Jahresverlauf nachgewiesen werden.³⁴⁷ Ein schwach inverser Zusammenhang zwischen der Blutserumkonzentration von 1,25(OH)₂D₃ und dem diastolischen³⁴⁸ Bluthochdruck konnte ebenfalls beobachtet werden.³⁴⁹

6.1.4.4.2. Moderation von Krebserkrankungen

Neben der endokrinen³⁵⁰ Hormonsekretion von 1,25(OH)₂D₃ aus den Nieren, wurden auch autokrine Hormonwirkungen von 1,25(OH)₂D₃ festgestellt. Das bedeutet, dass 1,25(OH)₂D₃ also auch in einer Vielzahl von Zellen aus 25(OH)Vitamin D₃ selbst hergestellt werden kann, beispielsweise in Knochenzellen oder in der Plazenta.³⁵¹ Darüber hinaus kann 1,25(OH)₂D₃ auch in Krebszellen, die im Körper entstanden sind, gebildet werden.³⁵² Hier übernimmt 1,25(OH)₂D₃ eine das Zellwachstum regulierende beziehungsweise eine die Zellvermehrung moderierende Funktion.³⁵³

³⁴⁴ Framingham Heart Study (1948 laufend)

³⁴⁵ Wang (2008)

³⁴⁶ Die Angaben zum Serumsspiegel erfolgen im Original Text in ng/mL. Um eine Vergleichbarkeit mit der Tabelle „Überblick über Studienergebnisse betreffend den Vitamin D Status in unterschiedlichen Europäischen Ländern differenziert nach Populationsgruppen und Winter- bzw. Sommerhalbjahr“ zu ermöglichen, wurde in mol/L umgerechnet.

³⁴⁷ Douglas (1991)

³⁴⁸ Blutdruck während der Entspannungs- und Füllphase des Herzens

³⁴⁹ Scragg (1992)

³⁵⁰ endokrin: Hormonsekretion in den Blutkreislauf; parakrin: Hormonsekretion in benachbarte Zellen; autokrin: Hormon wirkt in der Zelle, in der es produziert wird

³⁵¹ Weisman (1979)

³⁵² Schwartz (1998)

³⁵³ Tangpricha (2001)

6.1.4.4.2.1. Häufigkeitsverteilung unterschiedlicher Krebsarten

Entsprechend der Häufigkeitsverteilung von Tumorlokalisationen, laut dem österreichischen Krebsregister (Diagramm 32),³⁵⁴ werden im Folgenden jene Krebsarten diskutiert, für die der Vitamin D Status der erkrankten Person von Relevanz ist.³⁵⁵

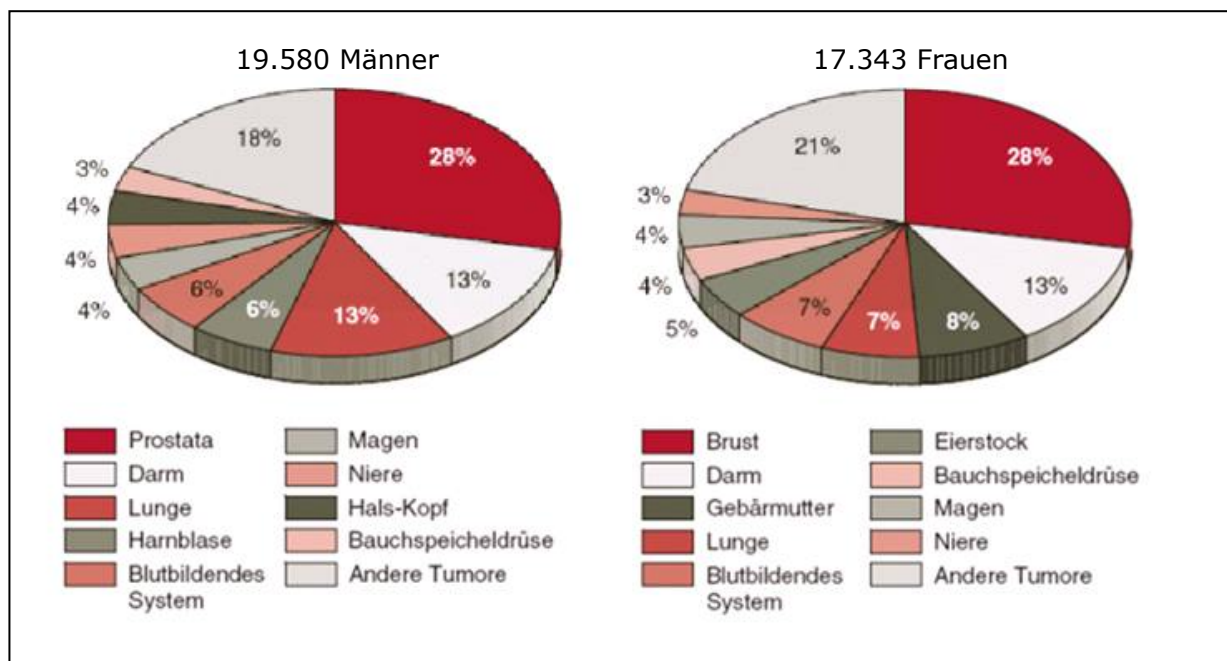


Diagramm 32: Tumorlokalisationen nach Geschlecht, Österreich gesamt 2004, österreichisches Krebsregister Stand 11.09.2007

6.1.4.4.2.2. Prostatakrebs

Eine inverse Beziehung zwischen dem Auftreten von Prostatakreberkrankungen und dem Angebot an ultravioletter Strahlung konnte sowohl in epidemiologischen Studien auf Basis des lokalen Strahlungsangebots^{356,357,358,359} als auch ausgehend von individuell erhaltenen Strahlungsmengen^{360,361} eindeutig nachgewiesen werden. Ein Vergleich von Studien, die die lebenslange ultraviolette Expositionsdauer von Individuen kumulieren, kommt zu der Einschätzung, dass das Erkrankungsrisiko im Quartil mit der geringsten Expositionsdauer um etwa das Dreifache höher ist als im Quartil mit der längsten

³⁵⁴ http://www.statistik.at/web_de/statistiken/gesundheit/krebserkrankungen/krebsinzidenz_im_ueberblick/020524.html, (08.06.2008)

³⁵⁵ Vgl. dazu auch folgende kompilatorische Erhebung: Krickler (2006)

³⁵⁶ Hanchette (1992)

³⁵⁷ Grant (2003)

³⁵⁸ Freedman (2002)

³⁵⁹ John (2004)

³⁶⁰ Luscombe (2001)

³⁶¹ Bodiwala (2003)

Expositionsdauer.³⁶² Untersuchungen zur 25(OH) Vitamin D₃ Serumkonzentration liefern derzeit keine vereinheitlichbaren Aussagen.³⁶³

6.1.4.4.2.3. Brustkrebs

In einer epidemiologischen Studie wurde ein inverser Zusammenhang zwischen dem natürlichen Angebot an Tageslicht und dem Auftreten von Brustkrebs festgestellt. Im beobachteten Gebiet wurden Unterschiede des Erkrankungsrisikos bis zum 1,8 fachen ermittelt, wobei das höchste Risiko in den städtischen Regionen mit geringem Strahlungsangebot zugeordnet ist.³⁶⁴ Ebenfalls festgestellt wurde ein inverser Zusammenhang zwischen berufsbedingter Lichtexposition und der Erkrankungshäufigkeit.³⁶⁵ Ein Bezug zwischen einer niedrigen 25(OH)D Blutserumkonzentration und einem erhöhten Erkrankungsrisiko vor allem bei älteren Frauen konnten ebenfalls nachgewiesen werden.³⁶⁶ Allerdings gibt es auch Studien, die diese Ergebnisse nicht oder nicht signifikant abbilden.³⁶⁷

6.1.4.4.2.4. Darmkrebs

Basierend auf einer umfassenden Erhebung von Daten bezüglich Wohnort, Arbeitsumfeld und Todesursachen über einen zehnjährigen Erfassungszeitraum hinweg, konnten signifikante Bezüge zwischen Darmkrebserkrankungen und ultravioletter Strahlungsexposition hergestellt werden. Das geringste Risiko wurde dabei für jene Personengruppe ausgewiesen, die ihren Wohnort in Regionen mit hohem Strahlungsangebot hat und in nicht landwirtschaftlichen aber vorwiegend im Freien ausübenden Berufen arbeitet.³⁶⁸ Auch Untersuchungen betreffend die 25(OH) Vitamin D₃ Serumkonzentration weisen einen inversen Bezug zwischen dem Erkrankungsrisiko und der Höhe der Serumkonzentration aus, wobei die Ergebnisse quantitativ durchaus von einander abweichen. So wird im Vergleich zu einer ausreichenden 25(OH) Vitamin D₃ Serumkonzentration ein etwa doppelt so hohes Erkrankungsrisiko ab einem Serumspiegel von unter 78 mol/L^{369,370} beziehungsweise ab einem Serumspiegel von unter 52 mol/L³⁷¹ angegeben.³⁷²

³⁶² Moon (2005)

³⁶³ Giovannucci (2005)

³⁶⁴ Garland (1990)

³⁶⁵ Freedman (2002)

³⁶⁶ Bertone-Johnson (2005)

³⁶⁷ Laden (1997)

³⁶⁸ Freedman (2002)

³⁶⁹ Garland (1989)

³⁷⁰ Feskanich (2004)

³⁷¹ Tangrea (1997)

³⁷² Die Angaben zum Serumspiegel erfolgen im Originaltext in ng/mL. Um eine Vergleichbarkeit mit der Tabelle „Überblick über Studienergebnisse betreffend den Vitamin D Status in unterschiedlichen Europäischen Ländern differenziert nach Populationsgruppen und Winterbeziehungsweise Sommerhalbjahr“ zu ermöglichen, wurde in mol/L umgerechnet.

6.1.4.4.2.5. Eierstockkrebs

Ein überwiegender Teil der vorliegenden epidemiologischen Studien weist eine signifikant inverse Beziehung zwischen der Eierstockkrebssterblichkeitsrate und dem lokalen Angebot an ultravioletter Strahlung aus.^{373,374,375,376} Ebenso liegt eine Studie vor, die einen Zusammenhang zwischen oraler Vitamin D Unterversorgung und dem Auftreten von Eierstockkrebs nachweist.³⁷⁷

6.1.4.4.2.6. Non-Hodgkin Lymphom

Unter der Bezeichnung Non-Hodgkin Lymphome werden jene Krebsarten zusammengefasst, bei denen eine krankhafte Vermehrung von Abwehrzellen in den Lymphknoten vorliegt.³⁷⁸ Noch in den 1990er Jahren wurde davon ausgegangen, dass ultraviolette Strahlung das Auftreten von Non-Hodgkin Lymphomen begünstigt.³⁷⁹ Aktuellere epidemiologische Studien haben jedoch einen klar inversen Zusammenhang zwischen erhöhtem Strahlungsangebot am Ort^{380,381,382} sowie individuell höheren erhaltenen Strahlungsmengen^{383,384} und dem Auftreten von Non-Hodgkin Lymphomen aufgezeigt. Bemerkenswert ist, dass unregelmäßige Expositionsmuster mit kurzen intensiven Bestrahlungen bis hin zum Auftreten von Sonnenbrand eine eindeutig präventive Wirkung im Bezug auf Non-Hodgkin Lymphome haben.³⁸⁵

6.1.4.4.2.7. Krebstherapie

Die Heilungschancen bei Brustkrebs, Prostatakrebs und Darmkrebs³⁸⁶ sowie bei Hodgkin Lymphomen³⁸⁷ stehen in Zusammenhang mit dem Vitamin D Status der erkrankten Personen. So ist das Risiko an einer der genannten Krebserkrankungen zu sterben am geringsten, wenn der Zeitpunkt der Diagnose und damit das Einsetzen einer Behandlung in den Sommer oder Herbst, also die Jahreszeiten mit der allgemein höchsten Vitamin D₃ Blutserumkonzentration, fällt.

³⁷³ Lefkowitz (1994)

³⁷⁴ Grant (2002)

³⁷⁵ Freedman (2002)

³⁷⁶ Grant (2003)

³⁷⁷ Salazar-Martinez (2002)

³⁷⁸ Sie unterscheiden sich von Hodgkin Lymphomen dadurch, dass Zusammenschlüsse von erkrankten Zellen ausbleiben und daher keine als Riesenzellen bezeichneten Einheiten gefunden werden.

³⁷⁹ Bentham (1996)

³⁸⁰ Freedman (1997)

³⁸¹ Grant (2002)

³⁸² Hu (2004)

³⁸³ Hughes (2004)

³⁸⁴ Smedby (2005)

³⁸⁵ Smedby (2005)

³⁸⁶ Robsahm (2004)

6.1.4.4.3. Moderation des Immunsystems

Unter dem Begriff Immunsystem wird eine Vielfalt von im Körper stattfindenden Abläufen zusammengefasst, die der Reinhaltung des Organismus von körperfremden und defekten körpereigenen Einheiten dienen. Zwischen den unterschiedlichen Abläufen innerhalb des Immunsystems selbst und zwischen dem Immunsystem und anderen Systemen des menschlichen Organismus bestehen vielfache, in ihren Wirkmechanismen oft noch nicht erschöpfend geklärte Bezüge.³⁸⁸ Die Bedeutung der ultravioletten Strahlung und damit des Vitamin D₃ für das Immunsystem wurde in den 1970er Jahren erstmals thematisiert und der Begriff Photoimmunologie eingeführt.^{389,390} Im Folgenden werden jene Abläufe im Immunsystem skizziert (Abbildung 29), auf die Vitamin D₃ eine nachweisliche und bereits beschriebene Wirkung ausübt.³⁹¹

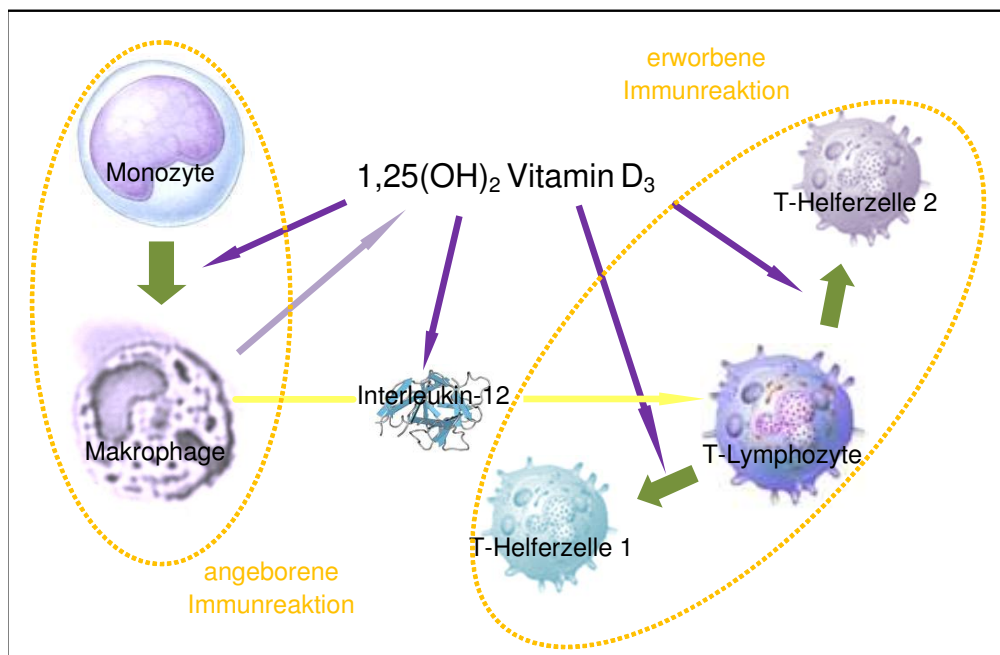


Abbildung 29: Interaktionen zwischen 1,25(OH) Vitamin D₃ und dem Immunsystem

³⁸⁷ Porojnicu (2005)

³⁸⁸ Burmester (2006)

³⁸⁹ Fisher (1987)

³⁹⁰ Die Autoren (Fisher 1987) wiesen bereits in den 1970er Jahren nach, dass Mäuse die einen übertragenen Hauttumor normalerweise abstoßen können diese Fähigkeit verlieren, wenn sie vor der Transplantation ultravioletter Strahlung ausgesetzt werden. Eine vergleichbare Reaktion war bis dato nur durch Gabe von, die Immunreaktion dämpfender Medikamente beobachtet worden. Ausgehend von diesem Studienergebnis entwickelte sich das Forschungsfeld der Photoimmunologie.

³⁹¹ Abbildung vereinfacht und grafisch neu aufbereitet nach: Pietschmann (2003)

Der menschliche Organismus kann auf eine als körperfremd erkannte Einheit mit angeborenen oder erworbenen Immunreaktionen antworten, wobei dem $1,25(\text{OH})_2$ Vitamin D_3 in beiden Abläufen eine differenzierende und modulierende Funktion zukommt.³⁹²

Monozyten werden im Knochenmark gebildet und wandern von dort in die Blutbahn ein, in der sie dann zirkulieren. Beim Zusammentreffen von Monozyten und als körperfremd erkannten Einheiten differenziert sich die Monozyte je nach Art dieser Einheit und Lokalisierung im Gewebe in unterschiedliche Makrophage aus.³⁹³ Dieser Prozess wird von $1,25(\text{OH})_2$ Vitamin D_3 gefördert,^{394,395} das in weiterer Folge auch die phagozytischen³⁹⁶ Funktionen der Makrophagen stimuliert.^{397,398}

Es werden aber auch unterschiedliche Wirkungen von $1,25(\text{OH})_2$ Vitamin D_3 beschrieben, die spezifische Aktivitäten von Monozyten und Makrophagen hemmen.^{399,400} Beispielsweise wird die Bildung von Interleukin -12 in den Makrophagen durch $1,25(\text{OH})_2$ Vitamin D_3 reduziert.⁴⁰¹ Dadurch beeinflusst $1,25(\text{OH})_2$ Vitamin D_3 , die auf Interleukine⁴⁰² gestützte Kommunikation zwischen den unterschiedlichen Zellen des Immunsystems.

Eine wichtige Rolle innerhalb der erworbenen Immunreaktion kommt den T-Lymphozyten zu, die ebenfalls im Knochenmark gebildet werden und zur weiteren Ausreifung in die Thymusdrüse einwandern. Die T-Lymphozyten können sich zu Subzelltypen mit unterschiedlichen Funktionen innerhalb des Immunsystems weiterentwickeln.⁴⁰³ Dem $1,25(\text{OH})_2$ Vitamin D_3 kommt dabei eine gewichtige Funktion bei der Ausdifferenzierung von T-Lymphozyten in T-Helferzellen des Typs 1 und 2 zu. Eine höhere Serumkonzentration von $1,25(\text{OH})_2$ Vitamin D_3 hemmt dabei die Bildung von T-Helfer 1 Zellen, die die zelluläre Immunantwort⁴⁰⁴ unterstützen, und fördert hingegen das Entstehen von T-Helfer 2 Zellen, die für die humorale Immunantwort⁴⁰⁵ bedeutsam sind.⁴⁰⁶

³⁹² Pietschmann (2003)

³⁹³ Burmester (2006)

³⁹⁴ Provvedini (1986)

³⁹⁵ Orikasa (1993)

³⁹⁶ Als Phagozytose bezeichnet man die aktive Aufnahme eines Partikels in das Innere einer Zelle.

³⁹⁷ Cohen (1986)

³⁹⁸ Girasole (1990)

³⁹⁹ Xu (1993)

⁴⁰⁰ Spittler (1997)

⁴⁰¹ Lemire (1994)

⁴⁰² Als Interleukine werden in den Zellen des Immunsystems gebildete Hormone bezeichnet, die der Kommunikation innerhalb dieses Systems dienen.

⁴⁰³ Mosmann (1986)

⁴⁰⁴ Bei der erworbenen zellulären Immunantwort wird die Antigen-Antikörperreaktion von T-Killerzellen ausgelöst.

⁴⁰⁵ Bei der erworbenen humoralen Immunantwort erfolgt die Antigen-Antikörperreaktion in Form der Produktion von spezifischen Antikörpern durch B-Lymphozyten, die ihrerseits nicht in der Thymusdrüse sondern im Knochenmark ausdifferenzieren.

⁴⁰⁶ Pietschmann (2003)

6.1.4.4.3.1. Autoimmunkrankheiten

Vitamin D₃ Mangel begünstigt das Auftretende von Erkrankungen, die auf Fehlfunktionen des Immunsystems zurückgehen. Besondere Bedeutung kommt dabei den immunsuppressiven, also die Aktivität des Immunsystems dämpfenden, Wirkungen von Vitamin D₃ im Bereich der Autoimmunerkrankungen zu.⁴⁰⁷ Gemeinsam ist den Autoimmunerkrankungen, dass in ihrem Verlauf T-Helferzellen des Typ 1 körpereigene Strukturen zerstören.⁴⁰⁸

6.1.4.4.3.2. Multiple Sklerose

Als Multiple Sklerose wird eine entzündliche Autoimmunkrankheit bezeichnet, bei der die Ummantelung der zentralen Nerven, die Markscheide, nach und nach von Autoantikörper abgebaut wird.⁴⁰⁹ Die Erkrankungsursachen sind derzeit nicht vollständig bekannt. Ebenso ist die Heilung von Multiple Sklerose aktuell nicht möglich. Die Krankheit kann verschiedene Verlaufsformen mit kontinuierlicher oder schubweiser Verschlimmerung der neurologischen Ausfälle annehmen.

Zwischen dem lokalen Angebot an ultravioletter Strahlung und der Auftrittshäufigkeit von Multipler Sklerose konnte eine inverse Beziehung in epidemiologischen Studien nachgewiesen werden.⁴¹⁰ So erkranken nahe des Äquators von 100.000 Einwohner 1 bis 2 an Multipler Sklerose. Jenseits des 50. Breitengrades sind es hingegen über 200 Erkrankungsfälle pro 100.000 Einwohner.

Umfassende Kohortenstudien belegen einen Zusammenhang zwischen der oralen Vitamin D₃ Aufnahme und dem Risiko an Multipler Sklerose zu erkranken.^{411,412} Das Quintil mit der höchsten Vitamin D₃ Einnahme wies darin ein um etwa 30% niedrigeres Erkrankungsrisiko auf. Personen, die regelmäßig ein Vitamin D₃ hältiges Multivitaminpräparat einnahmen, wiesen ein um etwa 40% niedrigeres Risiko an Multipler Sklerose zu erkranken auf.⁴¹³

Schließlich konnte ein Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit des Krankheitsfortschritts von Multipler Sklerose und dem Jahresverlauf⁴¹⁴ festgestellt werden, wobei der rasanteste Fortschritt im April und der langsamste im Oktober beobachtet wurden.⁴¹⁵

⁴⁰⁷ Norval (2001)

⁴⁰⁸ Cantorna (2004)

⁴⁰⁹ Mark (2006)

⁴¹⁰ Hayes (2003)

⁴¹¹ Munger (2004)

⁴¹² Michels (2003)

⁴¹³ Munger (2004)

⁴¹⁴ Die Studie wurde an Personen im süddeutschen Raum durchgeführt, bei denen im Durchschnitt im Frühjahr die niedrigste und im Herbst die höchste 25(OH) Vitamin D₃ Serumskonzentration vorliegt.

⁴¹⁵ Auer (2000)

6.1.4.4.3.3. Typ 1a Diabetes Mellitus

Als Diabetes wird eine Stoffwechselerkrankung bezeichnet, bei der ein Mangel des Hormons Insulin vorliegt. Die Krankheit wird auf Basis der Ursachen ihres Auftretens typisiert. Dem Typ 1a liegt eine Autoimmunreaktion mit genetischer Prädisposition zugrunde, dabei werden die Insulin produzierenden β -Zellen der Langerhanschen-Inselzellen in der Bauchspeicheldrüse fälschlicherweise als körperfremd erkannt und in einem entzündlichen Prozess zerstört.⁴¹⁶ Insulin kann nicht mehr produziert werden, wodurch der im Blut als Verdauungsprodukt zirkulierende Traubenzucker nicht mehr in die Muskel- und Fettzellen aufgenommen wird. Darüber hinaus wird die Zuckerneubildung in der Leber nicht mehr gehemmt, sodass Körperfett nicht mehr aufgebaut oder gespeichert werden kann. Typ 1a Diabetes Mellitus tritt häufig aber nicht ausschließlich im Kindes- und Jugendalter auf.⁴¹⁷

Es liegen mehrere epidemiologische Studien vor, die einen direkten Bezug zwischen der Höhe des Diabetes Mellitus Typ 1a Erkrankungsrisikos und steigendem Breitengrad feststellen.^{418,419} Ebenso wurde eine negative Korrelation zwischen dem jährlichen ultravioletten Strahlungsangebot und dem Auftreten von Diabetes Mellitus Typ 1a belegt.⁴²⁰ Fall-Kontroll-Studien weisen einen inversen Zusammenhang zwischen der Verabreichung von Vitamin D₃ im frühen Kindheitsalter und dem Auftreten von Diabetes Mellitus Typ 1a nach.^{421,422} Zum gleichen Ergebnis kommt eine Kohortenstudie bei der 10.366 Kindern eine Dosis von täglich 2.000 IU Vitamin D₃ verabreicht wurde. 30 Jahre später lag die Zahl der aufgetretenen Erkrankungen um 22% unter dem zu erwartenden Wert.^{423,424}

6.1.4.4.3.4. Rheumatoide Arthritis

Als rheumatoide Arthritis wird eine Autoimmunerkrankung bezeichnet, bei der bestimmte Kommunikationsstoffe des Immunsystems in den Geweben von Gelenken übermäßig auftreten. Dadurch kommt es einerseits zu einem entzündlichen Prozess, der schließlich zur Auflösung der betroffenen Gewebe und andererseits zur Aktivierung Knochensubstanz abbauender Zellen, den Osteoklasten, führt. Diese zerstört die Knochenstrukturen der betroffenen Gelenke. Die Krankheit verläuft meistens in Schüben, die jeweils einige Wochen andauern.⁴²⁵

⁴¹⁶ Ponsonby (2005)

⁴¹⁷ Schatz (2006)

⁴¹⁸ Diabetes Epidemiology Research International Group (1988)

⁴¹⁹ EURODIAB ACE study Group (2000)

⁴²⁰ Staples (2003)

⁴²¹ EURODIAB Substudy 2 Study Group (1999)

⁴²² Stene (2000)

⁴²³ Hypponen (2001)

⁴²⁴ Im englischsprachigen Ursprungstext wird die Rate ratio angegeben. Zur leichteren Verständlichkeit für den Leser wird dieser Begriff aus der epidemiologischen Statistik vereinfacht und als Prozent Angabe angeführt.

⁴²⁵ Miehle (1999)

Es liegen nur wenige Studien vor, die Zusammenhänge zwischen dem Vitamin D₃ Status und der Auftrittshäufigkeit beziehungsweise dem Verlauf von Rheumatoider Arthritis beschreiben. Eine Kohorten-Studie unter 29.368 Frauen höheren Alters zeigt eine inverse Beziehung zwischen Vitamin D reicher Ernährung und dem Auftreten von Rheumatoider Arthritis. Das Erkrankungsrisiko liegt dabei im bestversorgten Tertiel um 28% unter dem des Tertiel mit der geringsten Versorgung. Werden mindestens 400 IU Vitamin D₃ als Nahrungszusatz verabreicht, sinkt das Erkrankungsrisiko weiter und liegt dann um 34% niedriger als im Tertiel ohne zusätzliche Gabe von Vitamin D₃.⁴²⁶

In einer Fall-Kontrollstudie wurde nachgewiesen, dass durch die Verabreichung von synthetischen Vitamin D₃ Metaboliten die Heftigkeit der Symptome der rheumatoiden Arthritis gemildert wurde.⁴²⁷ Zwei Studien ordnen einem niedrigen 1,25(OH)₂D₃ Status einen beschleunigten Krankheitsfortschritt der rheumatoiden Arthritis zu.^{428,429}

6.1.4.4.3.5. Chronisch-entzündliche Darmerkrankungen

Unter dem Sammelbegriff der chronisch-entzündlichen Darmerkrankungen werden kontinuierlich oder wiederkehrend verlaufende Erkrankungen wie Morbus Crohn oder Colitis Ulcerosa zusammengefasst. Es wird derzeit davon ausgegangen, dass es sich bei diesen beiden Krankheiten um Autoimmunerkrankungen der Darmschleimhaut handelt, wobei die auslösenden Faktoren noch nicht bekannt sind.⁴³⁰ Einige Studien legen Bezüge zwischen dem Angebot an ultravioletter Strahlung und dem Auftreten von chronisch-entzündlichen Darmerkrankungen nahe. So wurde ein höheres Erkrankungsrisiko für Personen ausgewiesen, die ihren Beruf überwiegend in Innenräumen ausüben.⁴³¹ Darüber hinaus liegt eine Studie für den europäischen Raum vor, die eine direkte Korrelation zwischen erhöhtem Erkrankungsrisiko und steigendem nördlichen Breitengrad des Wohnortes herstellt.⁴³²

6.1.4.4.4. Infektionskrankheiten

Vitamin D₃ steht durch seine vielfältigen Funktionen im Immunsystem auch im Zusammenhang mit der Fähigkeit, Infektionskrankheiten effektiv abzuwehren. So konnte Lupus vulgaris, eine in der Haut lokalisierte Form der Tuberkulose, vor der Entdeckung der Antibiotikatherapie durch die Bestrahlung mit natürlichem Tageslicht geheilt werden.⁴³³ Die detaillierte Wirkungskaskade von Vitamin D₃ in Bezug auf unterschiedliche Ausprägungsformen der Tuberkulose ist Gegenstand aktueller Forschungen.⁴³⁴ Ein ausreichender Vitamin D₃ Status gilt darüber hinaus als Grundlage einer adäquaten

⁴²⁶ Merlino (2004)

⁴²⁷ Andjelkovic (1999)

⁴²⁸ Oelzner (1999)

⁴²⁹ Kroger (1993)

⁴³⁰ Hayes (2003)

⁴³¹ Cucino (2001)

⁴³² Shivananda (1996)

⁴³³ Norval (2001)

⁴³⁴ Sasidharan (2002)

Immunabwehr von viralen Infekten der Atemwege. So werden auch Bezüge zwischen dem Vitamin D₃ Status einer Person und ihrer Anfälligkeit für Infektionen durch Grippeviren untersucht.⁴³⁵ Im Gegensatz dazu können die immunsuppressiven Wirkungen ultravioletter Strahlungsexposition zum Ausbruch viraler Infektionen - wie dem herpes simplex virus⁴³⁶ - führen.⁴³⁷

⁴³⁵ Cannell (2006)

⁴³⁶ Herpes simplex wird umgangssprachlich häufig als Fieberblase bezeichnet.

⁴³⁷ Norval (2001)

6.2. Photobiologie im sichtbaren Spektralbereich

Die nicht ionisierende Strahlung im Wellenlängenbereich von 380 nm bis 780 nm zwischen der ultravioletten Strahlung und der infraroten Strahlung wird als sichtbares Licht bezeichnet.^{438,439} Licht dieses Wellenlängenbereichs tritt mit Materie derart in Interaktion, dass für den menschlichen Sehapparat verarbeitbare Reize entstehen.⁴⁴⁰ Darüber hinaus gehen vom sichtbaren Licht auch nicht visuelle photobiologische Wirkungen aus.

Mit dem Ziel, Sehaufgaben besser bewältigen zu können, wird das natürliche Tageslichtangebot durch künstliches Licht ergänzt oder ersetzt. Bezugnehmend auf das Thema der vorliegenden Arbeit werden im Folgenden Studien, die auf Kunstlichtexposition beruhen nur dann berücksichtigt, wenn ihre Ergebnisse auch in Hinsicht auf natürliche Tageslichtsituationen von Relevanz sind.^{441,442}

6.2.1. Grundzüge der Photobiologie des visuellen Systems

Das visuelle System des Menschen wird in die drei Bereiche Auge, Sehbahn und primäre Sehrinde unterteilt. Im Anschluss wird die Funktionsweise des visuellen Systems in ihren Grundzügen unter spezieller Berücksichtigung der Photophysiologie und Neurologie skizziert.⁴⁴³

⁴³⁸ ISO 10527 (2007)/CIE S 014-1 (2006)

⁴³⁹ DIN 5031-7 (1984)

⁴⁴⁰ Der durch die Norm ISO 10527:2007(E)/CIE S 014-1/E:2006 definierte Wellenlängenbereich von 380 nm bis 780 nm referenziert auf einen „Normalbetrachter“. Die individuelle visuelle Empfindlichkeit weicht von diesen Werten ab.

⁴⁴¹ In der CIE 158: Ocular lighting effects on human physiology and behaviour, wird dazu sinngemäß bemerkt, dass die verbreitete Ansicht Tageslicht sei gesünder als künstliches Licht experimentell nicht nachvollzogen werden kann, solange ein ausgewogenes Kunstlichtspektrum vorliegt. Die Autoren der vorliegenden Arbeit erlauben sich in diesem Zusammenhang die Bemerkung, dass handelsübliche Leuchtmittel das natürliche Tageslichtspektrum zumeist nur rudimentär wiedergeben. Die sowohl in ihrer Spektralverteilung und Intensität ständig wechselnde Qualität natürlichen Tageslichts wird durch künstliche Lichtquellen jedenfalls nicht nachvollzogen.

⁴⁴² CIE 158 (2004)

⁴⁴³ In Kapitel 6.2.1 wird gut gesichertes und tradiertes Grundlagenwissen unter dem Blickwinkel der vorgelegten Arbeit selektiert und zusammengeführt. Dafür kamen medizinische Übersichtswerke als Quellen in Betracht, die regelmäßig aktualisiert wurden und deren letztes Erscheinen nicht länger als 2001 zurückliegt. 2001 gilt als jenes Jahr seit dem die Koexistenz eines visuellen und eines nichtvisuellen Systems im Auge als gesichert angesehen werden kann. Die derart ausgewählten Quellen sind:

Rohen J., Funktionelle Neuroanatomie, Lehrbuch und Atlas, 6. Auflage, 2001

Benninghoff A., Drenckhahn D., Zenker W., Anatomie, Makroskopische Anatomie, Histologie, Embryologie, Zellbiologie, Band 2, Herz-Kreislauf-system, Lymphatisches System, endokrines System, Nervensystem, Sinnesorgane, Haut, 16. Auflage, 2004

Klinke R., Pape H., Silbernagl S., Physiology, 5. Auflage, 2005

Welsch U., Sobotta, Lehrbuch Histologie, 2. Auflage, 2006

Schmidt R., Lang F., (Herausgeber), Physiologie des Menschen mit Pathophysiologie, 30. Auflage, 2007

6.2.1.1. Rezeption visueller Reize

Die für sichtbares Licht reizadäquaten Rezeptoren befinden sich im Inneren des menschlichen Auges. Um diese Rezeptoren zu erreichen, passiert das Licht den dioptrischen Apparat, der die Gesamtheit der lichtdurchlässigen Medien des Auges umfasst. Das Licht fällt dabei, den Gesetzen der Optik folgend, durch die mit einem Tränenfilm überzogene stark brechende Hornhaut, die mit Kammerwasser gefüllte vordere Augenkammer, die in ihrem Durchmesser variable Pupillenöffnung der Iris, die in ihrer Krümmung und damit Brechstärke veränderliche Linse und den ebenfalls formveränderlichen brechenden Glaskörper, auf die als Retina bezeichnete Rezeptorfläche.^{444,445}

Die Retina stellt entwicklungsgeschichtlich eine Ausstülpung des Gehirns dar und ist daher eine Struktur des Zentralnervensystems.⁴⁴⁶ In der Retina findet die Umwandlung des externen optischen Reizes in körpereigene elektrische Erregungspotentiale statt, wobei unterschiedliche Zonen der Retina spezifische Empfindlichkeiten aufweisen. Speziell zu erwähnen ist eine eng begrenzte grubenförmige Mulde der Retina, die gegenüber der Pupillenöffnung liegt und als Fovea bezeichnet wird. Die Fovea ist besonders für die Rezeption direkter Strahlung ausgestattet.^{447,448} Die Retina weist eine durchschnittliche Dicke von 200 µm auf.⁴⁴⁹ Sie kann, wie im Folgenden abgebildet (Abbildung 30), entsprechend der in ihr vorliegenden neuronalen Zellen in sechs⁴⁵⁰ Schichten unterschiedlicher Funktionalität unterteilt werden.⁴⁵¹

Auf diese Quellen wird im vorliegenden Kapitel 6.2.1 nur passagenweise verwiesen, oder wenn quantifizierende oder definierende Aussagen getroffen werden. Zusätzliche andere Quellen werden den jeweils zu belegenden Aussagen direkt zugeordnet.

⁴⁴⁴ Schmidt (2007)

⁴⁴⁵ Klinke (2005)

⁴⁴⁶ Rohen (2001)

⁴⁴⁷ Schmidt (2007)

⁴⁴⁸ Klinke (2005)

⁴⁴⁹ Benninghoff (2004)

⁴⁵⁰ In der gewählten Literatur werden bis zu zehn retinale Schichten unterschieden. Beispielsweise wird auch innerhalb einer Schicht von gleichartigen Neuronen in die zellkernhaltige Lage und rein dendritische Lagen ausdifferenziert. Im Rahmen dieser Arbeit hat sich diese weitergehende Differenzierung als nicht unbedingt nötig erwiesen und es wurde lediglich Schichten gleichartiger Neuronen beschrieben.

⁴⁵¹ http://thebrain.mcgill.ca/flash/i/i_02/i_02_cl/i_02_cl_vis/i_02_cl_vis.html, 15.03.2009

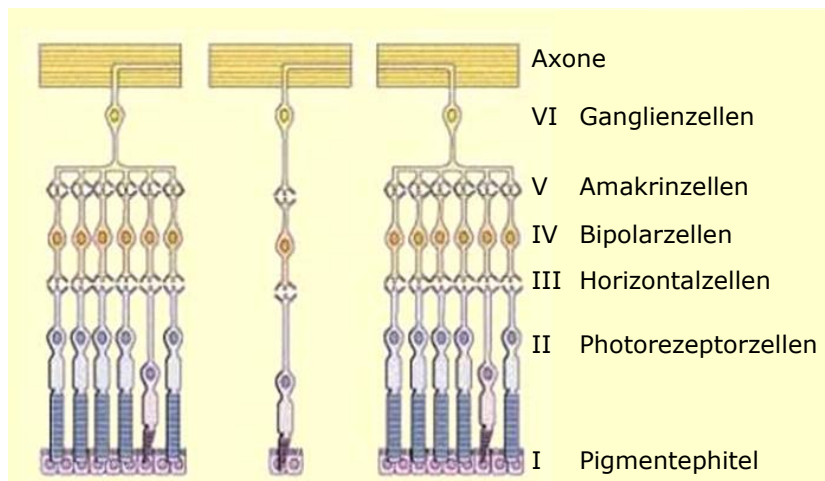


Abbildung 30: Schematische Darstellung des Schichtaufbaus der Retina

Die dem Licht abgewandte äußerste erste Schicht der Retina wird als Pigmentepithel bezeichnet. Durch das Pigmentepithel werden den Rezeptorzellen ständig lichtsensible Vitamin A Derivate aus der Nahrung zugeführt, die für die Funktionsfähigkeit der Rezeptoren unabdingbar sind.^{452,453} Darüber hinaus stellt die dunkle Färbung des Pigmentepithels sicher, dass das Licht nach dem Durchtritt durch die inneren retinalen Schichten absorbiert und nicht in das Auge rückreflektiert wird.^{454,455}

Die zweite Schicht wird von unterschiedlichen Photorezeptorzellen gebildet, deren lichtempfindliche Außensegmente in das Pigmentepithel hinein ragen. Auf Grund struktureller Merkmale wie der Form, der Anzahl und Verteilung auf der Retina, der Verschaltung untereinander und der chemischen Zusammensetzung der eingelagerten Sehpigmente werden zwei Ausprägungsformen von Photorezeptoren unterschieden, die Stäbchen und die Zapfen.^{456,457}

Die dritte Schicht wird aus Horizontalzellen gebildet, die Querverbindungen unter den Rezeptorzellen herstellen. Die Bipolarzellen bilden die vierte Schicht. Sie stellen Längsverbindungen zwischen den Rezeptorzellen und den Ganglienzellen der innersten retinalen Schicht her. In der fünften Schicht befinden sich die Amakrinen Zellen, denen sowohl längs wie querverbindende Funktionen zukommen. So stellen die Amakrinen Zellen sowohl zusätzliche Verbindungen zwischen den Ganglienzellen und den Bipolarzellen, als auch Verbindungen der Ganglienzellen untereinander her.⁴⁵⁸

⁴⁵² Schmidt (2007)

⁴⁵³ Klinke (2005)

⁴⁵⁴ Rohen (2001)

⁴⁵⁵ Aus anatomischer Sicht kann das Pigmentepithel als eine Schicht der Retina beschrieben werden, auch wenn durch die Positionierung der Blut-Retinalschranke und dem nur adhäsiv gebunden Spaltraum zwischen dem Pigmentepithel und Photorezeptorzellen eine vergleichsweise strikte Schichtgrenze vorliegt. Vgl. dazu auch Welsch (2006)

⁴⁵⁶ Rohen (2001)

⁴⁵⁷ Klinke (2005)

⁴⁵⁸ Rohen (2001)

Die sechste und - wie bereits erwähnt - innerste Schicht der Retina besteht aus Ganglienzellen. Von jeder Ganglienzelle geht ein Axon aus. Diese zu einem Strang gebündelten Axone der Ganglienzellen bilden den Sehnerv, der in der Papille die Retina durchtritt und das Auge verlässt. Der Bereich der Papille ist daher frei von Rezeptorzellen und für optische Reize nicht empfindlich.^{459,460}

6.2.1.1.1. Skotopisches Sehen

Bei sehr geringer Lichtintensität mit einer Leuchtdichte unter $0,001 \text{ cd/m}^2$, wie sie etwa während einer klaren Halbmondnacht erreicht wird, basiert unsere visuelle Wahrnehmung allein auf der Aktivität der Stäbchen.⁴⁶¹ Die unterste Sehschwelle der visuellen Wahrnehmung wird folglich durch die Stäbchen mit einer Beleuchtungsstärke von $0,0001 \text{ lx}$ definiert.⁴⁶² Die Zapfen sind für Lichtreize mit derart niedriger Intensität nicht empfindlich. Die Verteilung der unterschiedlichen Rezeptorzellen auf der Retina (Abbildung 31) ist daher für die Wahrnehmungsqualitäten ausschlaggebend. Eine Retina trägt etwa 100 bis 125 Millionen Stäbchen, wobei die Fovea frei von Stäbchen bleibt.^{463,464,465,466,467,468} Unter skotopischen Bedingungen ist scharfes Sehen im Fixationspunkt daher nicht möglich. Die höchste Stäbchendichte tritt in einem ringförmigen Bereich rund um die Fovea unter einem Sehwinkel von etwa 20° auf, wo durchschnittlich 160.000 Stäbchen pro mm^2 in der Retina vorliegen. Die Dichte der Stäbchen sinkt kontinuierlich zur Peripherie hin. Für das dort auftreffende Streulicht sind Stäbchenrezeptoren besonders empfindlich.⁴⁶⁹

⁴⁵⁹ Rohen (2001)

⁴⁶⁰ Schmidt (2007)

⁴⁶¹ Schierz (2007)

⁴⁶² Rea (2006)

⁴⁶³ Kanski (2008)

⁴⁶⁴ Rohen (2001)

⁴⁶⁵ Benninghoff (2004)

⁴⁶⁶ Klinke (2005)

⁴⁶⁷ Welsch (2006)

⁴⁶⁸ Schmidt (2007)

⁴⁶⁹ Lindsay (1977)

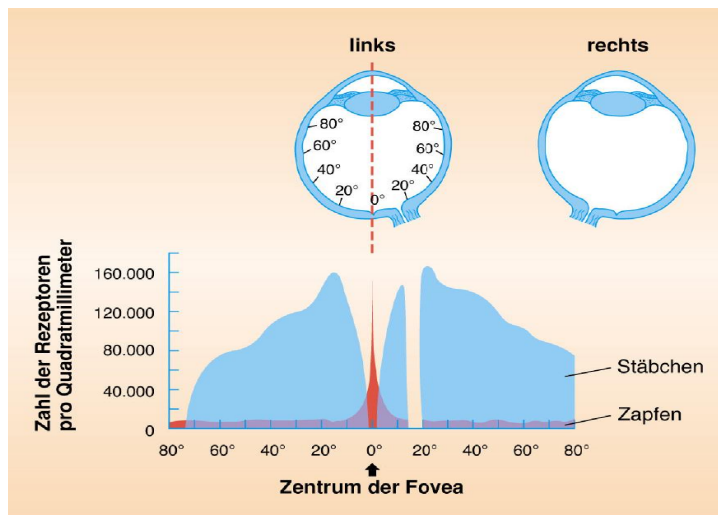


Abbildung 31: Verteilung der Photorezeptoren auf der Retina

Im Mittel konvergieren 120 Stäbchen auf eine Ganglienzelle. Trotz der hohen Lichtempfindlichkeit der Stäbchen führt diese hohe Konvergenz zu einer etwa 20 mal geringeren Konturenschärfe verglichen mit zapfenvermittelten Wahrnehmungsbildern.⁴⁷⁰ Im Folgenden werden die photochemischen Reaktionen der Stäbchen Photorezeptorzellen auf Lichteinwirkung bis hin zum Entstehen eines elektrischen Erregungspotentials skizziert.

Im Außensegment der Stäbchen Rezeptoren befindet sich ein in Scheiben aufgebautes, sich ständig erneuerndes Membransystem. In jeder der bis zu 2.000 Scheiben pro Rezeptorzelle sind etwa eine Million Molekularkomplexe des Sehpigments Rhodopsin eingelagert. Es besteht aus dem Glykoprotein Opsin, an welches das Vitamin A Derivat 11-cis-Retinal als chromophore Gruppe angelagert ist. Wenn Licht auf dieses Sehpigment fällt, geht das 11-cis-Retinal in die Form all-trans-Retinal über. Das bedingt eine geringfügige Änderung der dreidimensionalen Struktur des Opsins, wodurch die als Metarhodopsin II bezeichnete photoaktivierte Form des Sehpigments entsteht. Metarhodopsin II wird durch einen enzymatischen Prozess zu Rhodopsin regeneriert. Bei sehr starker Belichtung wird das all-trans-Retinal nicht nur in die Form 11-cis-retinal rückgeführt, sondern zum Vitamin A-Derivat Retinol reduziert, das erst wieder zu 11-cis-retinal rückoxidiert werden muss.⁴⁷¹

Das Auftreten von Metarhodopsin II führt zu einer Anregung des Enzyms zyklische Guanosinmonophosphat-Phosphodiesterase, in weiterer Folge mit cGMP-Phosphodiesterase abgekürzt. Da ein einzelnes photoaktiviertes Sehpigment zur Anregung hunderter cGMP-Phosphodiesterase Enzymmoleküle führen kann, spricht man von einer biochemischen Kaskade. Die Anregung des Enzyms cGMP-Phosphodiesterase führt zu Spaltung von cGMP. cGMP ist ein sogenannter zweiter Transmitter, dem vermittelnde Wirkungen innerhalb der Rezeptorzelle zukommen. Als Spaltprodukt liegt GMP vor. Dadurch vermindert sich die cGMP-Konzentration in der Rezeptorzelle, was die Durchgängigkeit der Rezeptorzellmembran für Natriumionen (Na^+) und Calciumionen

⁴⁷⁰ Rohen (2001)

⁴⁷¹ Schmidt (2007)

(Ca²⁺) reduziert.^{472,473} Das führt zu einer Veränderung des Membranpotentials der Rezeptorzelle. Dieses Potential liegt bei einer nicht belichteten depolarisierten Rezeptorzelle bei etwa -30 mV.⁴⁷⁴ Durch Belichtung wird die Rezeptorzelle zunehmend bis zu einem Wert von etwa -70 mV hyperpolarisiert.⁴⁷⁵ Auf Grund dieser Hyperpolarisation der Photorezeptorzellen wird der Neurotransmitter Glutamat an den Synapsen der Zellen vermindert ausgeschüttet. Dadurch wird die Weiterleitung eines körpereigenen Erregungspotentials entlang der Sehbahn angestoßen.

6.2.1.1.2. Wirkungs-Kurve skotopisches Sehen

Wie bereits erläutert, liegt mit Rhodopsin in den Stäbchen nur ein lichtempfindliches Sehpigment vor. Die Regenerationszeit von Rhodopsin beträgt etwa 30 Minuten.⁴⁷⁶ Dieser Zeit entspricht auch die Dauer der Dunkeladaptation bis zur Erreichung voller visueller, skotopischer Leistungsfähigkeit. Obwohl die Stäbchen ihr Absorptionsmaximum im blaugrünen Bereich des Spektrums des sichtbaren Lichtes aufweisen, erscheinen weiße Flächen unter dem spektralen Angebot des skotopischen Sehens eher blau.⁴⁷⁷

Das Rhodopsin der Stäbchenrezeptorzellen weist sein Absorptionsmaximum bei einer Wellenlänge von 500 nm auf.⁴⁷⁸ Die höchste Sensitivität erreicht das menschliche Auge bei Aktivität der Stäbchen im Wellenlängenbereich von etwa 507 nm. Die Wirkungs-Kurve (Diagramm 33) wurde von der CIE im Jahr 1951 standardisiert und mit $V'(\lambda)$ bezeichnet.⁴⁷⁹

⁴⁷² Schmidt (2007)

⁴⁷³ Kaupp (1994)

⁴⁷⁴ Klinke (2005)

⁴⁷⁵ Klinke (2005)

⁴⁷⁶ Kanski (2008)

⁴⁷⁷ Kanski (2008)

⁴⁷⁸ Loguinova (2008)

⁴⁷⁹ CIE (1951)

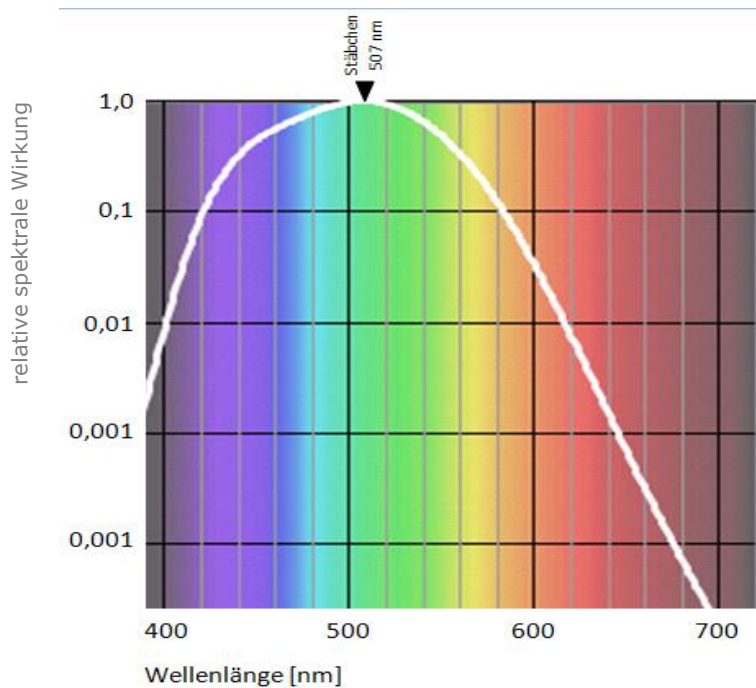


Diagramm 33: Wirkungs-Kurve $V'(\lambda)$ der Hellempfindlichkeit nach CIE unter skotopischen Bedingungen

Diese Wirkungs-Kurve basiert auf einer Adaptierung von Ergebnissen der Messreihen von Wald⁴⁸⁰ und Crawford⁴⁸¹ zur Hellempfindlichkeit unter nächtlichen Sehbedingungen.

6.2.1.1.3. Photopisches Sehen

Bei Leuchtdichten über 3 cd/m^2 sind die Zapfenrezeptoren in ihren drei Typen aktiv. Das ermöglicht eine den Tageslichtbedingungen entsprechende umfassende visuelle Wahrnehmungleistung. Die Zapfenrezeptoren sind besonders empfindlich für direkt axial einstrahlendes Licht.⁴⁸²

Die photochemischen Reaktionen der Zapfenrezeptoren auf Lichteinwirkungen entsprechen in ihren Grundzügen jenen der Stäbchen. So liegen in den Außensegmenten der Zapfenrezeptoren Sehpigmente vor, die ebenfalls aus einem 11-cis-Retinal und einem Proteinbaustein bestehen. Die Proteinbausteine der Zapfenrezeptoren weichen in ihrer Molekularstruktur geringfügig von der des Opsin der Stäbchen ab. Darüber hinaus sind die Proteinbausteine der Zapfenrezeptoren in drei Ausprägungsformen ausdifferenziert. Diese drei unterscheidbaren Sehpigmente werden als Zapfenopsine bezeichnet.^{483,484} Auf der unterschiedlichen Photosensitivität der Zapfenopsine beruht das Vorliegen von drei unterschiedlichen photopischen Wirkungs-Kurven.

⁴⁸⁰ Wald (1945)

⁴⁸¹ Crawford (1949)

⁴⁸² Kanski (2008)

⁴⁸³ Klinke (2005)

⁴⁸⁴ Schmidt (2007)

Eine Retina trägt etwa sechs bis sieben Millionen Zapfen. 6% davon sind Zapfen blauen Typs. Sie finden sich nicht im Zentrum der Fovea sondern an ihrem Rand. Dort unter einem Sehwinkel von 1° tritt die höchste Dichte von etwa 2.000 Zapfen blauen Typs pro mm² Retina auf. Zur Peripherie hin nimmt die Dichte bis auf 500 Zapfen blauen Typs pro mm² Retina ab.⁴⁸⁵

31% der Zapfen gehören zum grünen, 63% der Zapfen zum roten Typ. Rund die Hälfte aller Zapfen roten und grünen Typs sind in der Fovea konzentriert. Die in der Fovea angeordneten Rezeptorenzellen sind schlank ausgeformt und in einem hexagonalen Muster mit bis zu 160.000 Zapfen pro mm² extrem dicht gepackt angeordnet. Die Dichte der Zapfen roten und grünen Typs reduziert sich zur Peripherie hin bis auf 10.000 pro mm² Retina.⁴⁸⁶

Durchschnittlich konvergieren sechs Zapfen auf eine Ganglienzelle. In der Fovea sinkt dieser Wert bis auf eins ab. Das heißt, dass jede einzelne Zapfenrezeptorzelle über nur eine Bipolarzelle mit nur einer retinalen Ganglienzelle verbunden ist. Die niedrige Konvergenz der Zapfen führt zu hoher Konturschärfe, obwohl die Zapfen prinzipiell eine geringere Lichtsensitivität im Vergleich mit den Stäbchen aufweisen. Darüber hinaus stimmt unter photopischen Bedingungen der Fixationspunkt mit der Stelle des schärfsten Sehens überein.

6.2.1.1.4. Photopische Wirkungs-Kurve

Wie das folgende Diagramm (Diagramm 34) zeigt, weisen die Zapfenrezeptoren, entsprechend der Ausdifferenzierung der Molekularstruktur ihrer Zapfenopsine, Absorptionsmaxima in drei unterschiedlichen Wellenlängenbereichen des Lichts auf.⁴⁸⁷

⁴⁸⁵ Schmidt (2007)

⁴⁸⁶ Schmidt (2007)

⁴⁸⁷ Stockman (2000)

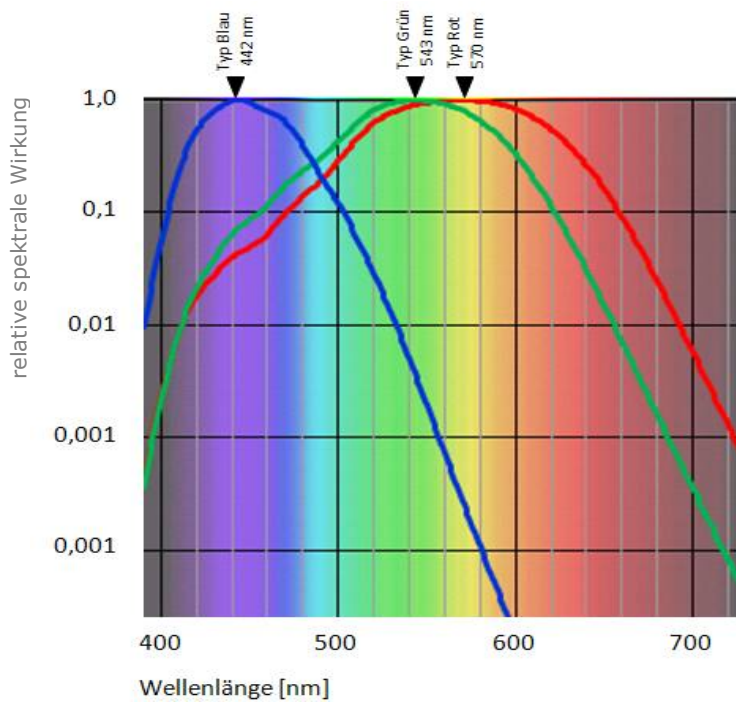


Diagramm 34: Wirkungs-Kurven der Hellempfindlichkeit der drei Zapfen-Typen unter photopischen Bedingungen

Die in der Retina vorliegenden Zapfen werden demzufolge in die Typen blau mit einem Absorptionsmaximum bei 442 nm, grün mit einem Absorptionsmaximum bei 543 nm und rot mit einem Absorptionsmaximum bei 570 nm eingeteilt.⁴⁸⁸ Die Regenerationszeit der drei Zapfenopsine beträgt etwa drei bis sechs Minuten. Entsprechend rasch kann auch die Helladaptation als Anpassung an die jeweilige Lichtintensität zur Erreichung voller visueller photopischer Leistungsfähigkeit erfolgen.⁴⁸⁹

6.2.1.1.5. Mesopisches Sehen

Bei niedriger Lichtintensität mit Leuchtdichten zwischen 0,001 cd/m² und 3 cd/m² sind sowohl die Stäbchen als auch die Zapfen aktiv.⁴⁹⁰ Lichtsituationen, in denen derart mesopisch wahrgenommen wird, liegen während der ersten 45 Minuten nach Sonnenuntergang oder im nächtlichen Straßenverkehr vor. Unter mesopischen Bedingungen wird die Farbwahrnehmung durch die Aktivität der Stäbchen beeinflusst. Es kommt zu einer Verschiebung in den kurzwelligeren Spektralbereich. Rote und gelbe Farbtöne werden vergraut wahrgenommen, zwischen grün und blau kann nur unzureichend differenziert werden. Dieses Phänomen wird als Purkinje-Effekt bezeichnet.⁴⁹¹

⁴⁸⁸ Stockman (2000)

⁴⁸⁹ Kanski (2008)

⁴⁹⁰ Schierz (2007)

⁴⁹¹ Purkinje (1825)

6.2.1.2. Verarbeitung von Erregungspotentialen visuellen Ursprungs

Bereits im Auge, dem ersten der drei Bereiche des visuellen Systems, werden die aus rezipierten Reizen aufgebauten endogenen Erregungspotentiale weiter verarbeitet. Ebenso ist die Sehbahn an dieser Verarbeitung beteiligt, sodass in der primären Sehrinde bereits vorstrukturierte Erregungsmuster einlangen. Zwischen diesen drei Bereichen bestehen vielfältige laterale Beziehungen. Darüber hinaus bestehen vielfältige und weiterführende Vernetzungen zu nicht visuellen Systemen.

6.2.1.2.1. Entstehung retinaler Reaktivitätsmuster

Die Erregungspotentialfolgen, die an einzelne Nervenzellen innerhalb des Sehnervs übermittelt werden, stammen von Rezeptorzellen aus einem abgegrenzten Bereich der Retina. Ein derartiger annähernd kreisförmiger Bereich wird als rezeptives Feld bezeichnet. Die Größe der rezeptiven Felder ist je nach deren Lage auf der Retina unterschiedlich. Im Bereich der Fovea gegenüber der Pupille sind die rezeptiven Felder am kleinsten, die Konvergenz der Verschaltung retinaler Zellen ist dort am niedrigsten und sinkt wie bereits beschrieben auf eins, so dass je eine Rezeptorzelle einer Ganglienzelle zugeordnet ist. Rezeptive Felder an der Peripherie des Auges sind größer und umfassen viele Rezeptorzellen. Die Konvergenz der Verschaltung großer rezeptiver Felder ist hoch, da die Erregungspotentiale vieler Rezeptorzellen zunächst an eine geringere Zahl von Bipolarzellen weitergeleitet werden, die Erregungspotentiale dieser Bipolarzellen werden wiederum an einer einzigen Ganglienzelle zusammengeführt.
^{492,493,494}

Jedes rezeptive Feld weist zwei Bereiche auf, ein kreisringförmiges Umfeld und ein von diesem umschlossenes Zentrum. Wird ein rezeptives Feld belichtet, reagieren die nachgeordneten Bipolar- und Ganglienzellen mit charakteristischen Mustern. Die Ausbildung derartiger Reaktivitätsmuster kann im visuellen System mehrfach an unterschiedlicher Stellen beobachtet werden, wo rezeptive Felder und nachgeordnete Nervenzellen zusammenwirken. Im Folgenden werden diese Reaktivitätsmuster am Beispiel der retinalen Ganglienzellen beschrieben.^{495,496,497}

Reagiert eine retinale Ganglienzelle auf einen Lichtreiz im Zentrum des ihr zugeordneten rezeptiven Feldes mit Depolarisation, bezeichnet man sie als On-Zentrum Ganglienzelle. Die On-Zentrum Ganglienzelle überträgt beim Vorliegen eines Reizes im Zentrum des rezeptiven Feldes die meisten Erregungspotentiale. Eine retinale Ganglienzelle mit Off-Zentrum hingegen überträgt die meisten Erregungspotentiale, wenn der Umfeldbereich des ihr zugeordneten rezeptiven Feldes durch Licht gereizt wird, das Zentrum aber dunkel bleibt. Die beiden Ausprägungsformen On-Zentrum Ganglienzelle und Off-Zentrum Ganglienzelle liegen in der Retina gleich häufig vor. Die unterschiedliche

⁴⁹² Eysel (2007)

⁴⁹³ Klinke (2005)

⁴⁹⁴ Schmidt (2007)

⁴⁹⁵ Eysel (2007)

⁴⁹⁶ Klinke (2005)

⁴⁹⁷ Schmidt (2007)

Ausdifferenzierung der Reaktivitätsmuster dient der Verstärkung von Kontrasten zur Gewährleistung einer möglichst deutlichen Wahrnehmung.^{498,499}

Einen anderen Vorgang zur Verstärkung der Wahrnehmung von Kontrasten stellt die laterale Übertragung von Erregungspotentialen benachbarter Photorezeptorzellen dar. Diese Potentiale werden von den Horizontalzellen vermittelt und wirken grundsätzlich hemmend auf die jeweils benachbarten Rezeptorzellen. Der hemmende Effekt wird egalisiert, solange die benachbarten Rezeptorzellen einem gleich starken Reiz ausgesetzt sind. Kommt es aber zu einer Veränderung der Reizintensität und damit zur Bildung unterschiedlich starker Erregungspotentiale, so geht von den wenig gereizten Rezeptorzellen auch eine geringere Hemmung durch die Horizontalzellen an die benachbarten Rezeptorzellen aus. Die stark gereizten Rezeptorzellen übertragen hingegen auch eine starke Hemmung. Daher wird an der Grenze zwischen starkem und schwachem Reiz der Intensitätsunterschied der Erregungspotentiale größer als abseits des Grenzbereiches. Dieser Effekt wird als laterale Hemmung bezeichnet. Er ermöglicht das deutliche Erkennen von Grenzlinien zwischen Flächen unterschiedlicher Helligkeit.⁵⁰⁰

Auch die Amakrinzellen, die die Ganglienzellen lateral verbinden und zusätzliche Verküpfungen zu den Bipolarenzellen herstellen, folgen dem beschriebenen Reaktivitätsmuster von rezeptivem Felde und nachgeordnetem Neuron. Die Amakrinzellen liegen folglich sowohl als On-Zentrum als auch als Off-Zentrum Amakrinzellen vor. On-Zentrum Amakrinzellen hemmen nachgeordnete On-Zentrum Ganglienzellen und aktivieren Off-Zentrum Ganglienzellen. Entsprechend hemmen Off-Zentrum Amakrinzellen nachgeordnete Off-Zentrum Ganglienzellen und aktivieren On-Zentrum Ganglienzellen. Die Amakrinzellen tragen dadurch ebenfalls zur Verstärkung der Intensitätsunterschiede der Erregungspotentiale bei, bevor diese Erregungspotentiale in den Ganglienzellen in elektrische Potentiale für die Leitung entlang der Axone umgewandelt werden.^{501,502,503}

Die Ganglienzellen liegen in unterschiedlichen Ausformungen betreffend die Anzahl und Länge ihrer Dendriten, die Übertragungsgeschwindigkeit der elektrischen Potentiale entlang ihrer Axone sowie die Aspekte der Wahrnehmung, die von ihnen bedient werden, vor. Etwa 90% der Ganglienzellen gehören dem parvozellulären System an. Sie bedienen kleinere rezeptive Felder und übertragen die elektrischen Potentiale tonisch mit mittlerer Geschwindigkeit. Sie vermitteln vorwiegend Aspekte der Farb- und Formwahrnehmung. Rund 5% der Ganglienzellen gehören dem magnozellanulären System an. Ihre Dendriten sind lang und vielfach verästelt. Ganglienzellen des magnozellanulären Systems bedienen große rezeptive Felder und übertragen elektrische Potentiale rasch und in kurze Salven strukturiert. Sie reagieren auch auf vergleichsweise niedrige Erregungspotentiale und

⁴⁹⁸ Eysel (2007)

⁴⁹⁹ Schmidt (2007)

⁵⁰⁰ Reichardt (1962)

⁵⁰¹ Klinke (2005)

⁵⁰² Schmidt (2007)

⁵⁰³ Rohen (2001)

vermitteln vorwiegend Aspekte der Wahrnehmung von Bewegungen. Die verbleibenden etwa 5% Ganglienzellen werden dem konizellulären System zugerechnet. Sie zeichnen sich durch eine langsame Übertragung elektrischer Potentiale aus und bedienen die Motorik des Auges, beispielsweise den Pupillenreflex darüber hinaus aber auch nichtvisuelle vegetative Funktionen.^{504,505, 506}

6.2.1.2.2. Leitung von Erregungspotentialen zum Hypothalamus

Der Sehnerv verläßt die Augenhöhle durch einen knöchernen Gang und gelangt so in das Innere des Schädels in den Bereich der vorderen Schädelgrube. Dort laufen der Sehnerv des linken und der Sehnerv des rechten Auges aufeinander zu, sodass es zu einer Kreuzung der beiden Bündel kommt. In dieser Sehnervkreuzung werden die beiden Sehnerven aufgefasert und neu gebündelt. Dabei kreuzen sich die Nervenfasern aus dem nasalen⁵⁰⁷ Bereich der Retina und wechseln so in die jeweils gegenüberliegende Gehirnhälfte. Die Nervenfasern aus den Schläfen zugewandten Bereichen der Retina hingegen passieren die Nervenkreuzung ohne die Gehirnhälften zu wechseln.⁵⁰⁸

Die derart neuvereinigten Nervenfaserbündel werden als Sehstränge bezeichnet. Die überwiegende Zahl der Nervenfasern der Sehstränge laufen zum seitlichen Kniehöcker weiter. Sie werden als Nervenfasern der klassischen Sehbahn bezeichnet. Einige Nervenfasern zweigen jedoch in drei Bündeln strukturiert vor dem Eintritt in den seitlichen Kniehöcker vom Sehstrang ab. Diese Nervenfasern bedienen verschiedene visuelle und nicht visuelle Subsysteme. Die Nervenstrangführung wird in der nachstehenden Abbildung (Abbildung 32) veranschaulicht.^{509,510,511}

⁵⁰⁴ Vetter (2001)

⁵⁰⁵ Schmidt (2007)

⁵⁰⁶ Rohen (2001)

⁵⁰⁷ Mit „nasal“ wird die, der Nase näher liegende Hemisphäre der Retina bezeichnet.

⁵⁰⁸ Schmidt (2007)

⁵⁰⁹ http://thebrain.mcgill.ca/flash/a/a_02/a_02_cr/a_02_cr_vis/a_02_cr_vis.html, 15.03.2009

⁵¹⁰ Rohen (2001)

⁵¹¹ Schmidt (2007)

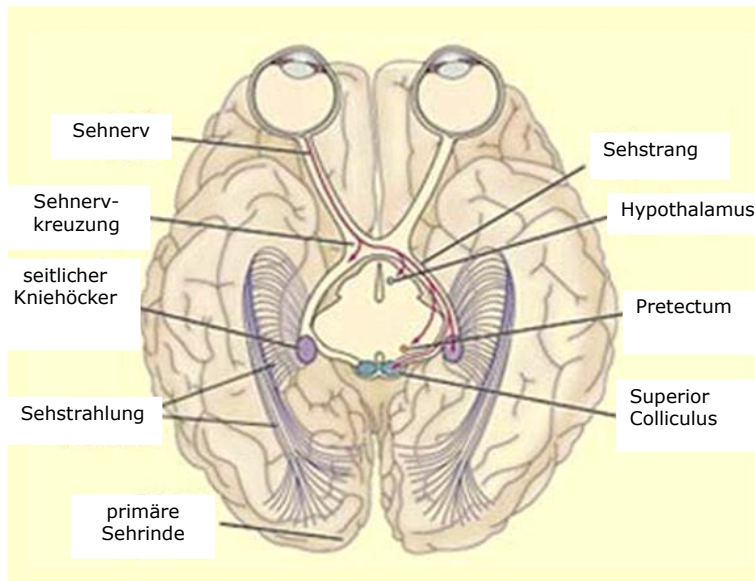


Abbildung 32: Darstellung des Verlaufs der Sehbahn vom Auge bis zur primären Sehrinde

Das erste abzweigende Nervenfaserbündel vermittelt Erregungspotentiale an den im Hypothalamus liegenden suprachiasmatischen Nucleus als Impulsgeber für die tageszeitliche Rhythmik. Das zweite abzweigende Nervenfaserbündel verläuft zum Pretectum, einer Struktur des Mittelhirns, die die Öffnungsweite der Pupille in Abhängigkeit von Helligkeitsänderungen steuert. Das dritte und größte der abzweigenden Nervenfaserbündel umfasst etwa 10% aller von der Retina ausgehenden Axone. Es erreicht den superioren Colliculus im oberen Bereich des Mittelhirns und den Nucleus opticus accessorius. Erregungspotentiale, die im superioren Colliculus einlangen, werden an Motoneuronen des Stammhirnbereiches weitergeleitet, die die Ausrichtung des Kopfes auf Objekte im peripheren Gesichtsfeld auslösen. Erregungspotentiale, die im Nucleus opticus accessorius eingehen, werden an Motoneuronen weitergeleitet, die Augenbewegungen zum Ausgleich von Kopfbewegungen anregen und damit einen kontinuierlichen Reizfluss auf die Retina unterstützen.^{512,513}

Abschließend ist darauf hinzuweisen, dass zwischen den neuronalen Bahnen vielfältige laterale Verbindungen bestehen. Beispielsweise ist der superioren Colliculus mit einem neuronalen Kern im Thalamus, der als Pulvinar bezeichnet wird über neuronale Bahnen verbunden. Gleichzeitig existieren neuronale Verbindungen zwischen dem Pulvinar und dem visuellen Cortex der Großhirnrinde. Das Pulvinar wird daher als Struktur betrachtet, die ausgehend von einer spezifischen Wahrnehmungsinterpretation, wesentlich zur Koordination von Bewegung und visueller Aufmerksamkeit beiträgt.^{514,515}

⁵¹² Rohen (2001)

⁵¹³ Schmidt (2007)

⁵¹⁴ Rohen (2001)

⁵¹⁵ Schmidt (2007)

6.2.1.2.3. Umsetzung von Reaktivitätsmustern im seitlichen Kniehöcker

Die Nervenfasern der klassischen Sehbahn erreichen den seitlichen Kniehöcker, der von einer sechsschichtigen Struktur des Zwischenhirns am hinteren Ende des Sehhügels gebildet wird. Hier werden die von den Ganglienzellen der Retina ausgehenden Axone das erste Mal synaptisch neu verschaltet. Wobei die Funktion des seitlichen Kniehöckers über die eines lediglich mechanischen Neuverschaltens weit hinaus geht. Erhält der Kniehöcker doch etwa 80% seiner Erregungspotentiale nicht von der Retina, sondern aus den für das Sehen relevanten Bereichen der Großhirnrinde. Die Umschaltung läuft also in lateralem Bezug zum Erregungsbild auf der Großhirnrinde ab.^{516,517,518}

Auf jeder der sechs halbschalenförmig aneinanderliegenden Schichten des seitlichen Kniehöckers bilden sich die rezeptiven Felder entsprechend ihrer Lokalisierung auf der Retina wieder ab. So wird die Topografie der Retina festgehalten, wobei dem Bereich der Fovea proportional mehr Fläche zugeordnet wird als der Peripherie. Die sechs Schichten liegen in Bezug auf diese retinale Topografie exakt übereinander. Wie die folgende Abbildung (Abbildung 33) zeigt, wird jede Schicht von jeweils nur einem System von Ganglienzellen bedient und ausschließlich vom linken oder rechten Auge erreicht.⁵¹⁹ Die mit 1 und 2 bezeichneten innersten Schichten sind ausschließlich dem magnozellulären Ganglienzellensystem zugeordnet, die Schichten 3 bis 6 dem parvozellulären Ganglienzellensystem. Im seitlichen Kniehöcker der rechten Gehirnhälfte erhalten die Schichten 1, 4 und 6 Erregungspotentiale aus dem linken, die Schichten 2, 3 und 5 aus dem rechten Auge. Spiegelbildlich erreichen im Kniehöcker der linken Gehirnhälfte Erregungspotentiale aus dem rechten Auge die Schichten 1, 4 und 6 und aus dem linken Auge die Schichten 2, 3 und 5.^{520,521,522}

⁵¹⁶ Sillito (2006)

⁵¹⁷ Rohen (2001)

⁵¹⁸ Schmidt (2007)

⁵¹⁹ Die englischsprachigen Texte innerhalb der Abbildung 32 liegen im Fließtext ins Deutsche übertragen vor.

⁵²⁰ http://thebrain.mcgill.ca/flash/i/i_02/i_02_cr/i_02_cr_vis/i_02_cr_vis.html, (15.03.2009)

⁵²¹ Rohen (2001)

⁵²² Schmidt (2007)

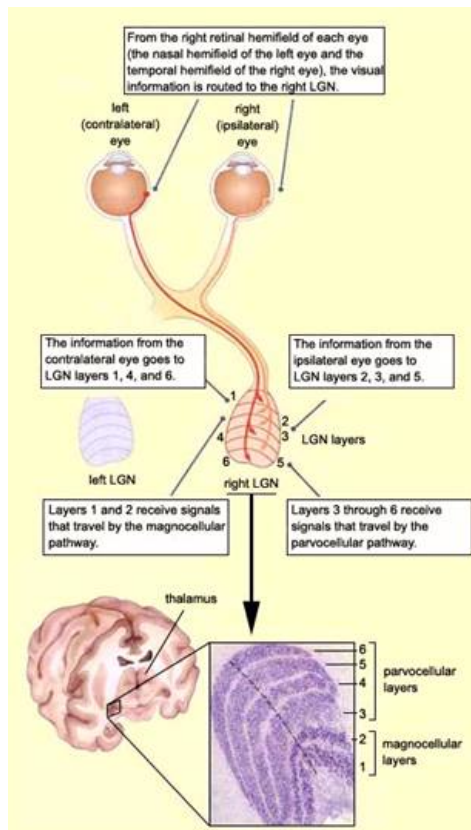


Abbildung 33: Neuronale Einbindung der Schichten des seitlichen Kniehöckers in die Sehbahn

6.2.1.2.4. Umsetzung der Erregungspotentialmuster im primären visuellen Cortex

Die Neuronen, die als Teil der klassischen Sehbahn vom seitlichen Kniehöcker in feinen Bündeln bogenförmig durch die innere Gehirnkapsel zur Großhirnrinde ziehen, werden Sehstrahlung genannt. Die Sehstrahlung endet in einer funktionalen Einheit der Großhirnrinde, die als primäre Sehrinde oder wie auch im Folgenden als primärer visueller Cortex bezeichnet wird. Wird der primäre visuelle Cortex in Bezug zu anderen Cortexregionen gesetzt, trägt er in der Literatur zumeist die Bezeichnung Area V1.^{523,524,525}

Wie ein großer Teil der Großhirnrinde besteht auch der visuelle Cortex aus in sechs funktionalen Schichten ausdifferenzierten Neuronen. Die gebräuchliche römische Nummerierung der Schichten erfolgt von Innen nach Außen fallend. Die an die innere Hirnmasse anschließende neuronale Schicht wird folglich mit Nummer VI, die äußerste Schicht mit Nummer I bezeichnet. Wobei Schicht IV in die Subschichten IV A, IV B, IV C_α und IV C_β in der Abfolge von IV A außen nach IV C_β innen weiter unterteilt wird. Die sechsschichtige Struktur weist eine Gesamtdicke von etwa 2 mm auf.^{526,527,528}

⁵²³ Rohen (2001)
⁵²⁴ Schmidt (2007)
⁵²⁵ Klinke (2005)
⁵²⁶ Rohen (2001)
⁵²⁷ Schmidt (2007)
⁵²⁸ Klinke (2005)

Vom seitlichen Kniehöcker kommende Axone enden in den Schichten IV und VI des primären visuellen Cortex. Die häufigste neuronale Verbindung erfolgt dabei in der Subschicht IV C über die Sternzellen. Sternzellen sind vergleichsweise kleine, dendritenreiche Interneuronen. Die Neuronen des magnozellulären Systems enden in der Subschicht IV C_α und Teile des parvozellulären Systems in der Subschicht IV C_β. Die verbleibenden Axone des parvozellulären Systems enden in den Schichten II und III.⁵²⁹ Die Sternzellen leiten die eingehenden Erregungspotentiale weiter an Pyramidalzellen, die in anderen Schichten des primären visuellen Cortex liegen. Die Pyramidalzellen der Schichten III und IV B leiten Erregungspotentiale hingegen an funktionale Einheiten der Großhirnrinde außerhalb des primären visuellen Cortex weiter. Die Pyramidalzellen der Schichten V und VI erreichen mit ihren Axonen Bereiche außerhalb der Großhirnrinde. Beispielsweise verbinden Axone der Pyramidalzellen aus der Schicht V den primären visuellen Cortex mit dem superior Colliculus. Axone der Pyramidalzelle aus der Schicht VI erreichen den seitlichen Kniehöcker.^{530,531,532}

Neben der horizontalen Strukturierung des primären visuellen Cortex in Schichten von Neuronen mit unterschiedlichen Eigenschaften in Bezug auf ihre Verschaltung innerhalb der Sehbahn, existiert auch eine radiale Unterteilung dieser Hirnstruktur. Gruppen von Neuronen bilden durch Stapelung Säulen aus, die durch mehrere Schichten des primären visuellen Cortex reichen. Obwohl innerhalb einer Säule Neuronen unterschiedlicher Struktur vorliegen können, werden diese nur von bestimmten Erregungspotentialen adressiert und zeigen bei Aktivierung prinzipiell gleichartige reaktive Erregungsmuster. Grundsätzlich können drei Typen von Säulen unterschieden werden: Orientierungssäulen, Cytochromoxidasensäulen⁵³³ im Folgenden als Blobs bezeichnet und Dominanzsäulen.^{534,535,536}

Die Orientierungssäulen empfangen Erregungspotentiale aus dem magnozellulären und aus dem parvozellulären System. Überwiegend erfolgt in diesen Säulen die Dedektierung der Orientierung und Bewegung, zum Teil aber auch der Form eines Lichtreizes. Eine Orientierungssäule wird aus einfachen, komplexen und hyperkomplexen neuronalen Zellen gebildet. Axone des magnocellulären Systems erreichen die Orientierungssäulen in der Schicht IV C_α und übertragen ihre Erregungspotentiale dort an einfache Zellen. Eine einfache Zelle weist ein in zwei Bereiche unterteiltes, etwa ellipsenförmiges, rezeptives Feld auf. Das Zentrum eines solchen Feldes hat die Form einer sehr langgestreckten Ellipse und ist immer ein On-Zentrum. Beidseitig flankiert wird dieser Bereich von

⁵²⁹ Waters (2003)

⁵³⁰ Rohen (2001)

⁵³¹ Schmidt (2007)

⁵³² Klinke (2005)

⁵³³ In der Literatur zumeist als Cytochromoxidase-Flecken bezeichnet. Zur leichteren Verständlichkeit wird diese Struktur, da ebenfalls säulenförmig aufgebaut, im vorliegenden Grundlagentext Cytochromoxidasensäule genannt.

⁵³⁴ Rohen (2001)

⁵³⁵ Schmidt (2007)

⁵³⁶ Klinke (2005)

annähernd sichelförmigen Off-Umfeldbereichen. Eine einfache Zelle baut Erregungspotentiale auf, wenn ein länglich gestreckter Lichtreiz das On-Zentrum ihres rezeptiven Feldes aktiviert. Das bedeutet, dass die Ausrichtung des Stimulus der des On-Zentrumsbereiches entsprechen muss. Abweichungen von mehr als 5° nach links oder rechts rufen bereits keine Aktivität der einfachen Zellen mehr hervor. Die einfachen Zellen einer Orientierungssäule erhalten Erregungspotentiale aus nur einem Auge, das bedeutet, sie dedektieren monokulare Reize.^{537,538}

Die einfachen Zellen aus Schicht IV C_α der Orientierungssäulen übertragen ihre Erregungspotentiale an Neuronen der Schicht IV B. Hier liegen komplexe Zellen, deren rezeptive Felder ebenfalls eine festgelegte Orientierung aufweisen, aber größer sind als die der einfachen Zellen. Darüber hinaus weisen die rezeptiven Felder der komplexen Zellen keine klar abgegrenzten On- beziehungsweise Off-Bereiche auf. Eine komplexe Zelle baut nur dann ein Erregungspotential auf, wenn sich ein Lichtreiz der bevorzugten Richtung innerhalb des rezeptiven Feldes bewegt. In Schicht IV B bestehen vielfache laterale Beziehungen zwischen den Neuronen. Daher erhalten eine Mehrzahl der komplexen Zellen Erregungspotentiale aus beiden Augen, wodurch die Integration von Erregungsmustern, die zum binocularen Sehen befähigt, ermöglicht wird. Die folgende Abbildung (Abbildung 34) versucht eine schematische Darstellung der Lagebeziehungen der rezeptiven Felder innerhalb einer sowie in benachbarten Orientierungssäulen.^{539,540,541}

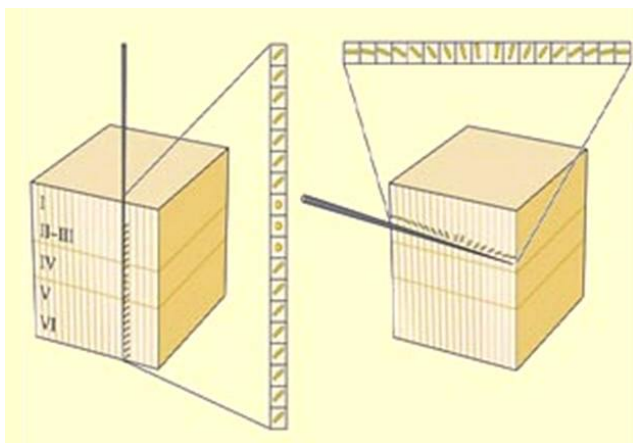


Abbildung 34: Lagebeziehungen der rezeptiven Felder der Zellen innerhalb einer Orientierungssäule und in benachbarten Orientierungssäulen

Aus der Schicht IV B werden über Pyramidalzellen Erregungspotentiale von den komplexen Zellen der Orientierungssäulen in den sekundären visuellen Cortex mit der Kurzbezeichnung V2 übertragen. Dort konvergieren die Axone der Pyramidalzellen an Neuronen, die hyperkomplexen Zellen genannt werden. Aus den Erregungsmustern unterschiedlicher komplexer Zellen integrieren die Hyperkomplexen Zellen Informationen

⁵³⁷ Kandel (2000)

⁵³⁸ Klinke (2005)

⁵³⁹ http://thebrain.mcgill.ca/flash/a/a_02/a_02_cl/a_02_cl_vis/a_02_cl_vis.html, 15.03.2009

⁵⁴⁰ Kandel (2000)

⁵⁴¹ Klinke (2005)

über die Länge und die Winkelbeziehungen von Lichtreizen mit bevorzugter Ausrichtung.^{542,543}

Axone des parvocellulären Systems erreichen die Orientierungssäulen in Schicht IV C_{β} des primären visuellen Cortex. Sie übertragen ihre Erregungspotentiale dort an Neuronen, die als konzentrische doppelte Gegenfarbenzellen bezeichnet werden. Diese Zellen weisen kleine, annähernd kreisförmige rezeptive Felder auf, die in zwei Bereiche unterteilt sind, ein kreisringförmiges Umfeld und ein von diesem umschlossenes Zentrum. Konzentrische doppelte Gegenfarbenzellen liegen in vier Ausbildungsformen vor, zwei zur Dedektierung von rot-grün Kontrasten und zwei zur Dedektierung von blaugelb Kontrasten. Das Reaktivitätsmuster einer konzentrischen doppelten Gegenfarbenzelle zeigt beispielsweise eine Aktivierung durch Erregungspotentiale von grün-Zapfen im Zentrumsbereich und eine Hemmung durch Erregungspotentiale von grün-Zapfen im Umfeld. Erregungspotentiale von rot-Zapfen haben antagonistische Wirkung.^{544,545}

Die konzentrischen doppelten Gegenfarbenzellen aus Schicht IV C_{β} der Orientierungssäulen übertragen ihre Erregungspotentiale an lateral vernetzte Neuronen der Schicht III, die nicht in Blobs lokalisiert sind. Diese Neuronen integrieren daher Erregungspotentiale aus beiden Augen. Es wird davon ausgegangen, dass sie zur Dedektierung der Form von Objekten beitragen. Zur Dedektierung von Farben vermitteln einerseits die konzentrischen doppelten Gegenfarbenzellen aus Schicht IV C_{β} ihre Erregungspotentiale an die Schichten II und III der Blobs. Diese gehören dem parvocellulären System an. Andererseits werden die Schichten II und III der Blobs auch unmittelbar von Neuronen des konizellulären Systems selbst erreicht. In den Blobs liegen Stapel konzentrischer doppelter Gegenfarbenzellen vor. Die an einem Blob einlangenden Erregungspotentiale stammen ausschließlich von einem Auge.^{546,547}

In Abhängigkeit von der Herkunft des Erregungspotentiales aus dem linken oder dem rechten Auge werden Dominanzsäulen gebildet, wobei immer eine Dominanzsäule des linken neben einer des rechten Auges angeordnet ist. Ein Areal mit der Fläche von 2mm mal 2mm auf dem primären visuellen Cortex umfasst zumindest zwei Dominanzsäulen, 16 Blobs und eine Vielzahl von Orientierungssäulen zwischen diesen Blobs. Ein derartiger Satz von Säulen, kann einlangende Erregungsmuster nach Orientierung, Farbe und Bewegung eindeutig analysieren und wird als Hyperkolumne (Abbildung 35) bezeichnet.^{548,549,550}

⁵⁴² Kandel (2000)

⁵⁴³ Klinke (2005)

⁵⁴⁴ Kandel (2000)

⁵⁴⁵ Klinke (2005)

⁵⁴⁶ Kandel (2000)

⁵⁴⁷ Klinke (2005)

⁵⁴⁸ http://thebrain.mcgill.ca/flash/a/a_02/a_02_cl/a_02_cl_vis/a_02_cl_vis.html, (15.03.2009)

⁵⁴⁹ Kandel (2000)

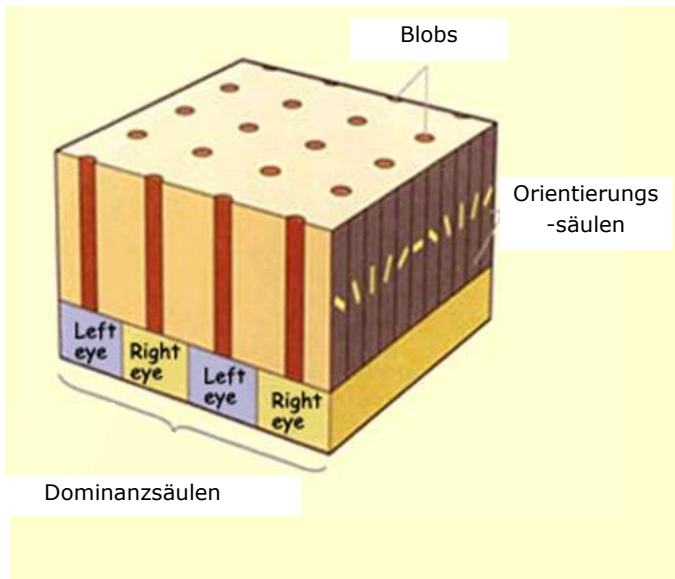


Abbildung 35: Schematische Darstellung einer Hyperkolumne

6.2.1.2.5. Umsetzung der Erregungspotentialmuster in nachgeordneten Hirnarealen

Der weitere Prozess der Verarbeitung und Integration der Erregungsmuster zu einer umfassenden Wahrnehmung, die eine Interaktion mit der Umwelt ermöglicht, ist nur in groben Zügen gesichert erforscht. Grundsätzlich liegen zwei Korridore vor.^{551,552} In Bezug auf die Lage der beteiligten Gehirnareale wird in den ventralen⁵⁵³ und den dorsalen⁵⁵⁴ Korridor unterschieden⁵⁵⁵, in Bezug auf die verarbeiteten Strukturen in einen vorwiegend Form und Farbe detektierenden intrinsischen Korridor und einen vorwiegend mit Raumbezügen und Bewegung befassten extrinsischen Korridor.^{556,557,558}

⁵⁵⁰ Klinke (2005)

⁵⁵¹ In der englischsprachigen Literatur wird zurückgehend auf Ungerleider L. und Mishkin M. 1982 die Bezeichnung „pathway“ gewählt, in der deutschsprachigen Literatur finden sich unterschiedliche Übersetzungen wie „Bahn“, die Bezeichnung Korridor wurde im Rahmen dieser Arbeit gewählt.

⁵⁵² Ungerleider (1982)

⁵⁵³ Ventral bedeutet wörtlich übersetzt „bauchseitig“ und wird hier im Sinne von Gehirn unterseitig verwendet. Ebenfalls gebraucht wird die gehirntopographische Bezeichnung temporal.

⁵⁵⁴ Dorsal bedeutet wörtlich „rückseitig“. Ebenfalls gebraucht wird die gehirntopografische Bezeichnung pariental.

⁵⁵⁵ Die Bezeichnungen ventral und dorsal werden den Bezeichnungen temporal und pariental wird an dieser Stelle vorgezogen, weil nicht alle ventral beziehungsweise dorsal liegenden, an der visuellen Verarbeitung beteiligten Gehirnstrukturen dem temporalen beziehungsweise parientalen Hirnlappen angehören.

⁵⁵⁶ Intrinsisch steht in diesem Zusammenhang etwa für „die Sache selbst definierend“, extrinsisch für „die Sache durch den Bezug zu anderem definierend“.

⁵⁵⁷ Kandel (2000)

⁵⁵⁸ Klinke (2005)

Die im primären visuellen Cortex, im Folgenden als Area V1 bezeichnet, verarbeiteten Erregungsmuster werden teils an den sekundären visuellen Cortex mit der Areabezeichnung V2, teils an den mittleren temporalen Hirnlappen mit der Areabezeichnung V5 weitergeleitet. Area V2 weist eine mit dem Säulensystem von Area V1 korrespondierende Streifenstruktur auf. Besondere Bezüge bestehen dabei zwischen den Orientierungssäulen aus Area V1 und den als dicke Streifen bezeichneten Bereich, sowie den Interstreifenbereichen von Area V2. Die Blobs aus Area V1 übertragen Erregungsmuster an dünne Streifen des Area V2. Aus den dicken Streifen und den Interstreifenbereichen des Area V2 erfolgen Erregungsmusterübertragungen an die Areas V3A und V5 und von dort weiter in dorsale Hirnregionen wie VIP⁵⁵⁹, MST⁵⁶⁰, LIP⁵⁶¹ und V7A. Aus den dünnen und Interstreifenbereichen des Area V2 werden Erregungsmuster an die Areas V3 und V4 und von dort weiter in die ventralen Hirnregionen TEO⁵⁶² und TE⁵⁶³ geleitet. Zwischen einer Vielzahl der genannten Hirnregionen bestehen laterale Bezüge; sowohl vor der Trennung in die Korridore, beispielsweise zwischen dem Area V2 und der Region PO,⁵⁶⁴ als auch innerhalb der Korridore, etwa zwischen den Regionen TEO und TE.^{565,566}

6.2.2. Visuelle Ergonomie

Das Ziel der visuellen Ergonomie besteht darin, Räume so zu gestalten, dass sie der physiologischen Leistungsfähigkeit des visuellen Systems des Menschen optimal entsprechen. In diesem Zusammenhang beschreiben die bis dato in Kapitel 6.2 erläuterten visuellen Wirkungs-Kurven die Wellenlängen spezifische Empfindlichkeit der verschiedenen Photorezeptorzellen für Strahlungsintensität. Die entsprechend dieser Empfindlichkeiten in den Photorezeptorzellen entstehenden Erregungspotentiale bilden das physiologische Ausgangsmaterial für die visuelle Wahrnehmung. Darüber hinaus kommt aber die umfassende Wahrnehmungsleistung, die einen dreidimensionalen Raumeindruck vermittelt, in der Eigen- und Fremdbewegungen kontinuierlich ablaufen und zeitlich räumliche Bezüge hergestellt werden können, erst durch vielfältige Verarbeitungsprozesse dieser Erregungspotentiale innerhalb des visuellen Systems und verbundenen nicht visuellen Systemen zustande.

Ausreichende Helligkeit und eine ausgewogene Spektralverteilung sind daher notwendig aber keineswegs hinreichende Bedingungen zur Gewährleistung visueller Ergonomie. So zählt die den visuellen Verarbeitungsprozessen immanente Verstärkung von Kontrasten zu jenen Eigenschaften, die in Hinsicht auf die visuelle Leistungsfähigkeit

⁵⁵⁹ VIP bezeichnet den dorsalen interparientalen Hirnlappenbereich

⁵⁶⁰ MST bezeichnet den mittleren oberen temporalen Hirnlappenbereich

⁵⁶¹ LIP bezeichnet den lateralen interparientalen Hirnlappenbereich

⁵⁶² TEO rostraler Bereich des unteren temporalen Hirnlappens

⁵⁶³ TE visuell unimodaler Bereich des unteren temporalen Hirnlappens (erhält ausschließlich visuelle Erregungsmuster)

⁵⁶⁴ PO bezeichnet dem okzipitalen Hirnlappen

⁵⁶⁵ Kandel (2000)

⁵⁶⁶ Klinke (2005)

jenseits von Helligkeit und spektralem Angebot speziell zu berücksichtigen sind. Betrachtet man beispielsweise eine dunkle Fläche, die von hellen Gitterlinien überlagert ist, nimmt man die Kreuzungspunkte der hellen Gitterlinien auf Grund der Kontrastverstärkung dunkler wahr, als die Gitterlinien selbst. Fixiert man einen dunklen Kreuzungspunkt hellt er sich auf und erscheint schließlich ebenso hell wie die Gitterlinien.^{567,568} Diese Wahrnehmung ist uneindeutig und wird im Allgemeinen als nicht angenehm empfunden. Daher sind Bauteile mit stark kontrastierenden, kleinteiligen Strukturen, wie Gitter oder Netze, gelochte Bleche oder Platten, auf ihre visuelle Ergonomie in der konkreten räumlichen Anwendung hin zu überprüfen.

Die chromatische Aberration ist ein weiteres Phänomän, das jenseits ausreichender Helligkeit und ausgewogener spektraler Verteilung in Hinsicht auf die Erreichung visueller Ergonomie zu berücksichtigen ist. Licht unterschiedlicher Wellenlängen wird entsprechend den Regeln der Optik im Dioptrischen Apparat des Auges verschieden stark gebrochen. Eine exakte und gleichzeitige Fokussierung von Licht weit auseinanderliegender Wellenlängen in der Fovea ist daher nicht möglich.⁵⁶⁹ So kann die Grenzlinie zwischen einer roten und einer blauen Fläche nicht scharf wahrgenommen werden, da der Unterschied in den Brechwerten zwischen den roten und den blauen Wellenlängen bis zu zwei Dioptrien⁵⁷⁰ betragen kann.⁵⁷¹ Das Auftreten unscharfer Konturen durch chromatische Aberration ist durch entsprechende Farbgestaltung speziell dort zu vermeiden, wo anspruchsvolle Sehaufgaben zu leisten sind oder im Blickfeld von Hauptblickrichtungen.

6.2.2.1. Wirkungs-Kurve zur Hellempfindlichkeit $V(\lambda)$

Im thematischen Rahmen dieser Arbeit werden vordringlich nicht visuelle Lichtwirkungen unter Bezugnahme auf die Spektralverteilung und die Strahlungsleistung untersucht. Im Bereich der visuellen Wirkungen wird die Wellenlängen bezogene Strahlungsleistung über eine Wirkungs-Kurve (Diagramm 35) mit der Bezeichnung $V(\lambda)$ zur Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges in Bezug gesetzt.⁵⁷²

⁵⁶⁷ Diese Gitterstruktur wird auf Grund der Erstbeschreibung des Phänomens durch Herman L. als Hermann Gitter bezeichnet.

⁵⁶⁸ Hermann (1870)

⁵⁶⁹ Ucke (1999)

⁵⁷⁰ BGBl. Nr. 742/1988 ST0281 Maß- und Eichgesetz , Artikel I,§ 2 (6) 4. für die Brechkraft von optischen Systemen die Dioptrie (dpt), die gleich ist der Brechkraft eines optischen Systems mit der Brennweite von 1 Meter in einem Medium mit der Brechzahl 1

⁵⁷¹ Schober (1970)

⁵⁷² DIN 5031-3 (1982)

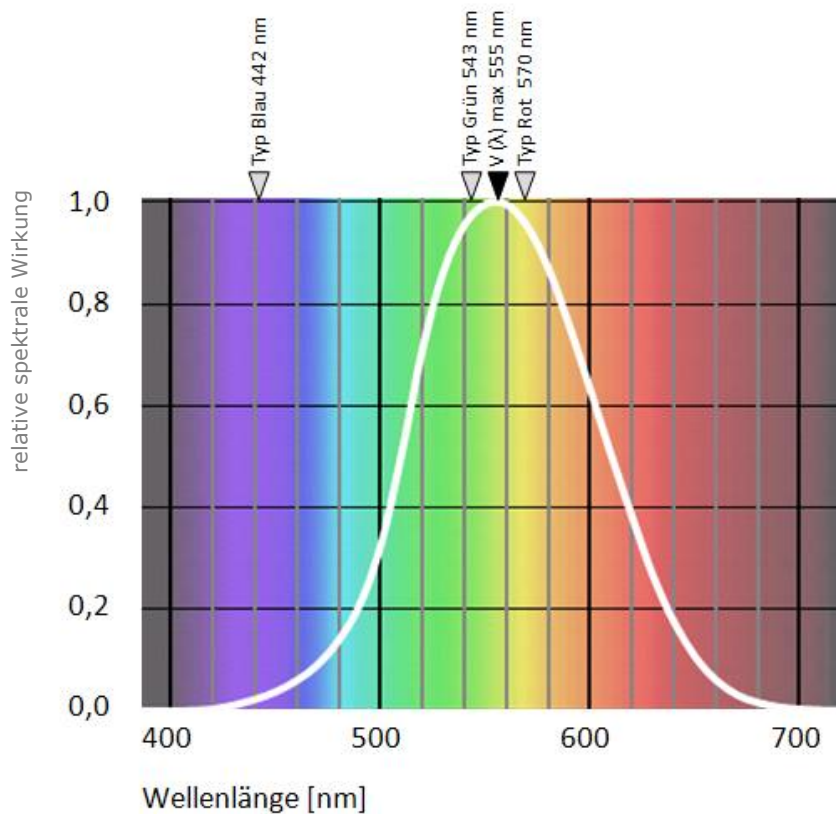


Diagramm 35: Wirkungs-Kurve $V(\lambda)$ der Hellempfindlichkeit des Auges nach DIN 5031-3 unter photopischen Bedingungen

Die Wirkungs-Kurve bringt zum Ausdruck, dass im menschlichen Auge bei Verabreichung von monochromatischem Licht der gleichen Strahlungsleistung ein unterschiedlicher Helligkeitseindruck in Abhängigkeit von der Wellenlänge des angebotenen Lichts entsteht. Der größte Helligkeitseindruck wird in der $V(\lambda)$ nach DIN 5031-3 aus dem Jahr 1982 bei einer Wellenlänge von 555 nm ausgewiesen. Diese Angabe geht auf die $V(\lambda)$ nach CIE aus dem Jahr 1924 zurück und stellt einen experimentell ermittelten approximativen Wert dar, der die unterschiedlichen Helligkeitsempfindlichkeiten der vier visuellen Photorezeptoren nicht berücksichtigt, sondern in eine Kurve zusammenführt.⁵⁷³ Die Empfindlichkeitsmaxima der drei Zapfenrezeptoren sind in der obigen Abbildung durch beschriftete Pfeile markiert. Auch wenn diese Empfindlichkeitsmaxima teils weit von 555 nm abweichen, so bleibt dennoch festzuhalten, dass die zapfenrezeptorspezifischen Empfindlichkeitsmaxima absolut verglichen, deutliche Empfindlichkeitsunterschiede in Bezug auf die angebotene Strahlungsleistung aufweisen. So ist das menschliche Auge für Licht im grünen Farbbereich grundsätzlich wesentlich helligkeitsempfindlicher als für Licht im blauen oder roten Farbbereich.

Entsprechend der $V(\lambda)$ Wirkungs-Kurve wurde die photometrische Konstante definiert. Sie stellt einen Zusammenhang zwischen der Strahlungsleistung einer Lichtquelle in Watt und ihrem Lichtstrom in Lumen her. Die photometrische Konstante besagt, dass monochromatisches Licht mit einer Wellenlänge von 555 nm und einer Strahlungsleistung

⁵⁷³ Gibson (1924)

von einem Watt für das menschliche Auge eine Helligkeitsempfindung mit dem Lichtstrom von 683 Lumen entstehen läßt.^{574,575}

Zur Erreichung visueller Ergonomie lediglich auf die Kriterien der Helligkeit entsprechend der $V(\lambda)$ Hellempfindlichkeitskurve und der Spektralverteilung einzugehen, ist nicht ausreichend. Es wird ausdrücklich auf die Bedeutung der Verarbeitungsprozesse innerhalb des gesamten visuellen Systems hingewiesen und auf Faktoren wie Farbkontraste oder Helligkeitskontraste sowie Bildausschnitte, die einen ergonomisch befriedigenden Ablauf dieser Prozesse beeinträchtigen können. Diese Verarbeitungsprozesse sind jedoch nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit. Als Ausgangsbasis für weitere Untersuchungen wird die $V(\lambda)$ Hellempfindlichkeitskurve also im Sinne der Sicherstellung von Grundvoraussetzungen ausgewiesen. Darüber hinaus wird so ein grundsätzlicher quantitativer Vergleich des im Innenraum vorliegenden Lichtangebotes für visuelle und nicht visuelle Wirkungen ermöglicht.

6.2.3. Nicht visuelle photobiologische Wirkungen

Seit den 1980er Jahren⁵⁷⁶ werden die Zusammenhänge zwischen dem Strahlungsangebot im sichtbaren Spektralbereich und physiologischen Wirkungen abseits der visuellen Wahrnehmung mit zunehmender Intensität diskutiert.^{577,578,579,580} Im Jahr 2001 konnte mit der Erstellung von Wirkungs-Kurven (Diagramm 36) für die Suppression von Melatonin erstmals eine derartige nicht visuelle physiologische Reaktion auf Strahlung im sichtbaren Spektralbereich quantifiziert werden.^{581,582}

⁵⁷⁴ Nachdem der Zusammenhang gilt: $cd = lm/sr$, konnte ein Bezug zu der ursprünglichen Definition der Candela nach Hefner-Alteneck aus dem Jahr 1884 als Einheit der Lichtstärke I hergestellt werden, die lautet: "Als Lichteinheit dient die (in horizontaler Richtung ausgestrahlte) Lichtstärke einer in ruhig stehender, reiner atmosphärischer Luft frei brennenden Flamme, welche aus dem Querschnitt eines massiven mit Amylacetat gesättigten Dochtes aufsteigt, der ein kreisrundes Dochtröhrchen aus Neusilber von 8 mm inneren und 8,3 mm äußeren Durchmesser und 25 mm freistehender Länge vollkommen ausfüllt bei einer Flammenhöhe von 40 mm vom Rande des Dochtröhrchens aus und wenigstens 10 Minuten nach dem Anzünden gemessen".

⁵⁷⁵ Hefner-Alteneck (1884)

⁵⁷⁶ Lewy (1980)

⁵⁷⁷ Klein (1991)

⁵⁷⁸ Wehr (1991)

⁵⁷⁹ Wettenberg (1993)

⁵⁸⁰ Morin (1994)

⁵⁸¹ Brainard (2001)

⁵⁸² Thapan (2001)

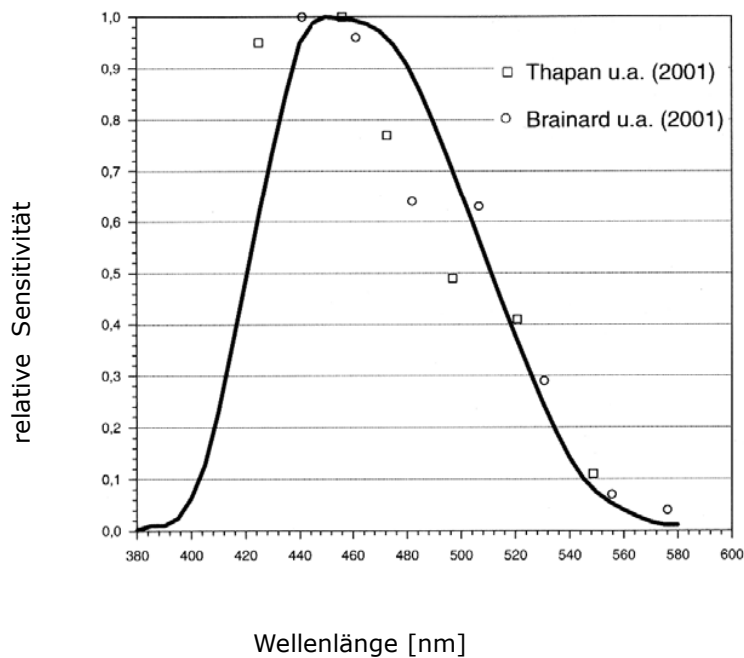


Diagramm 36: Wirkungs-Kurve für die Melatonin Suppression bezogen auf die Wellenlänge des angebotenen Lichts nach Thapan et. al. und nach Brainard et. al.

Festgehalten wurde dabei das Absinken des Melatonin Hormonspiegels im Blutplasma von Versuchspersonen in Abhängigkeit der Wellenlänge von annähernd monochromatischem⁵⁸³ Licht, das in festgelegten Dosen am Auge dieser Versuchspersonen verabreicht wurde. Brainard wählte dafür acht verschiedene Wellenlängen und 90 Minuten Bestrahlungsdauer, Thapan sechs Wellenlängen und 30 Minuten Bestrahlungsdauer.

6.2.3.1. Rezeption nicht visueller Reize

Als Rezeptoren, die die nicht visuelle Wirkung der Suppression von Melatonin vermitteln, wurde eine spezifische Untergruppe von Ganglienzellen in der entsprechenden retinalen Schicht im Inneren des menschlichen Auges identifiziert.⁵⁸⁴ Nur etwa 1% der retinalen Ganglienzellen^{585,586,587} gehört zu dieser Untergruppe.^{588,589,590} Sie unterscheiden sich in ihren Eigenschaften deutlich von den übrigen Ganglienzellen. So liegt ausschließlich in den Ganglienzellen dieser Untergruppe das lichtsensitive Melanopsin, ein Opsin auf

⁵⁸³ Das verabreichte Licht wies Bandbreiten bis zu 29 nm auf.

⁵⁸⁴ Berson (2002)

⁵⁸⁵ Berson (2002)

⁵⁸⁶ Sekaran (2003)

⁵⁸⁷ Foster (2005)

⁵⁸⁸ In der Literatur finden sich Werte von 0,2% (Dacey, 2005) bis 3% (Rea, 2005) für die spezifische Ganglienzellen Untergruppe

⁵⁸⁹ Dacey (2005)

⁵⁹⁰ Rea (2005)

Vitamin A-Basis, vor.^{591,592,593,594} Derartige Ganglienzellen werden daher auch mit der Abkürzung mc für „melanopsin containing“⁵⁹⁵ versehen und auch im Folgenden so bezeichnet. Mit Ausnahme der Fovea und der Papille sind die mcGanglienzellen auf der Retina relativ gleichmäßig verteilt, wobei die größte Dichte mit etwa 20 Zellen/mm² in der Umgebung der Fovea auftritt und an der Peripherie auf etwa 5 Zellen/mm² absinkt.⁵⁹⁶

Die mcGanglienzellen gehören dem konizellulären System an und haben entsprechend weit verästelte Dendriten mit einem Felddurchmesser von etwa 400 µm in der Nähe der Fovea und bis zu 1200 µm an der retinalen Peripherie. Da auch in den Dendriten der mcGanglienzellen Melanopsin vorliegt, ist trotz der geringen Anzahl an Rezeptorzellen eine flächendeckende Sensitivität der Retina gewährleistet.^{597,598} Es wird derzeit davon ausgegangen, dass die mcGanglienzellen die generelle Lichtintensität der Umgebung dedektieren, jedoch keine Details.⁵⁹⁹ Die Empfindlichkeit der mcGanglienzellen ist daher im Vergleich mit den visuellen Rezeptoren gering. Die untere Empfindlichkeitsschwelle wird bei einer Beleuchtungsstärke je nach Quelle zwischen 3 lx^{600,601} und 30 lx⁶⁰² angenommen. Entsprechend der Zugehörigkeit zum konizellulären System ist die Reaktionsgeschwindigkeit niedrig und das Reaktionsmuster tonisch.^{603,604,605} Darüber hinaus dürften die mcGanglienzellen im unteren Bereich der Retina sensibler reagieren als im oberen.^{606,607} Wobei etwa 30% der mcGanglienzellen über amakrine Verschaltungen auch Erregungspotentiale von Zapfen des blauen Typs⁶⁰⁸ und möglicherweise auch von den Stäbchen erhalten.^{609,610}

⁵⁹¹ Provencio (1998)

⁵⁹² Berson (2002)

⁵⁹³ Hattar (2004)

⁵⁹⁴ Panda (2002)

⁵⁹⁵ Das englische „melatonin containing“ bedeutet auf Deutsch Melatonin beinhaltend.

⁵⁹⁶ Dacey (2005)

⁵⁹⁷ Berson (2002)

⁵⁹⁸ Dacey (2005)

⁵⁹⁹ Wong (2005)

⁶⁰⁰ Zeitzer (2000)

⁶⁰¹ Cajochen (2007)

⁶⁰² Rea (2006)

⁶⁰³ Berson (2002)

⁶⁰⁴ Rea (2005)

⁶⁰⁵ Groos (1985)

⁶⁰⁶ Glickman (2003)

⁶⁰⁷ Lasko (1999)

⁶⁰⁸ Dacey (2005)

⁶⁰⁹ Rea (2005)

⁶¹⁰ He (2003)

6.2.3.2. Verarbeitung von Erregungspotentialen nicht visuellen Ursprungs

Die photochemische Umsetzung von Lichtreizen in elektrische Erregungspotentiale durch die mcGanglienzellen als nicht visuelle Photorezeptoren des Auges ist aktuell Gegenstand der Forschung. So liegt, anders als bei den visuellen Photorezeptoren, derzeit keine verbindliche Wirkungs-Kurve vor, die die Empfindlichkeit der mcGanglienzellen in Bezug auf die Entstehung von Erregungspotentialen selbst beschreibt, die ursächlich für alle weiteren Wirkungen ist. Die bereits erwähnte Wirkungs-Kurve zur Melatonin Suppression steht lediglich in einem mittelbaren Zusammenhang mit der Empfindlichkeit der mcGanglienzellen.

Melanopsin unterscheidet sich in einigen seiner Aminosäuresequenzen von allen bisher aufgefundenen Wirbeltier Opsinen.⁶¹¹ Melanopsin wurde daher als photosensitives Opsin der mcGanglienzellen hinterfragt. Dennoch dürfte nach heutigem Wissensstand Melanopsin auch im menschlichen Auge vollständig und eigenständig funktionsfähig sein. Die im Rahmen der Reizrezeption auftretende biochemische Kaskade von Melanopsin entspricht eher der von Opsinen wirbelloser Tiere, was als Hinweis auf den evolutionsgeschichtlich weitaus längeren Bestand des nicht visuellen im Vergleich zum visuellen System gedeutet werden kann.⁶¹²

Festgestellt werden konnte, dass Melanopsin nur photosensitiv ist, wenn ein cis-isoformes⁶¹³ Vitamin A Derivat, wahrscheinlich in der Funktion einer chromophoren Gruppe, zur Verfügung steht. Es gibt Hinweise dafür, dass Melanopsin bistabil ist, also zwei haltbare Verbindungen mit chromophoren Gruppen eingehen kann, was die Wellenlängen spezifische Sensitivität des Opsins verändert, wodurch eine reizadäquate reaktive und eine nicht reaktive Form vorliegt.^{614,615,616}

Durch die Verbindung von Melanopsin mit einer chromophoren Gruppe kommt es zu einer Anregung von Guaninnucleotid bindenden Proteinen in Form einer biochemischen Kaskade. Diese resultiert schlussendlich in einer Erhöhung der Ca^{2+} Ionenkonzentration im Inneren der mcGanglienzellen. Das führt zur Ausbildung eines Membranpotentials.⁶¹⁷ Die dadurch hyperpolarisierte Rezeptorzelle gibt ein körpereigenes elektrisches Erregungspotential entlang einer neuronalen Bahn weiter, die in ihrer Gesamtheit als retinohypothalmatischer Trakt bezeichnet wird.

Der retinohypothalmatische Trakt beginnt an den Dendriten der mcGanglienzellen. Interpretiert man diese dendritische Verästelung als rezeptives Feld, so sind mcGanglienzellen nach heutigem Forschungsstand grundsätzlich On-Zentrum

⁶¹¹ Qiu (2005)

⁶¹² Melyan (2005)

⁶¹³ Beispielsweise 9-cis-Retinal oder 11-cis-Retinal

⁶¹⁴ Rea (2005)

⁶¹⁵ Qiu (2005)

⁶¹⁶ Melyan (2005)

⁶¹⁷ Newman (2003)

Rezeptorzellen. Eine Hemmung durch rezeptoradäquate Reize wurde bis dato nicht beobachtet, jedoch wird eine hemmende Wirkung durch Erregungspotentiale, die über amakrine Verschaltungen aus dem skotopischen System eingehen, für möglich gehalten.⁶¹⁸

Die Axone der mcGanglienzellen sind als Teil des retinohypothalamischen Traktes integrative Faserstränge des Sehnervs. Sie folgen zunächst der Sehbahn, indem sie das Auge an der Papille durch einen Knochengang verlassen und in die vordere Schädelgrube eintreten. Dort durchlaufen sie die Sehnervkreuzung und folgen den Sehsträngen, bis der überwiegende Großteil der von den mcGanglienzellen stammenden neuronalen Fasern von den Sehsträngen im ersten von drei bereits beschriebenen Nervenfaserbündeln abzweigt. Das abzweigende Nervenfaserbündel zieht in die Hirnregion des Hypothalamus.^{619,620}

Grundsätzlich erreichen Erregungspotentiale der mcGanglienzellen eine Vielzahl von Hirnregionen, wie die verschiedenen Kerne des Hypothalamus, und des Pretectums, den superioren Colliculus aber auch den seitlichen Kniehöcker, der als zentrale neuronale Schaltstelle des visuellen Systems bereits beschrieben wurde.^{621,622} Ebenso erreichen aber auch Erregungspotentiale der visuellen Rezeptorzellen die Kerne des Hypothalamus. Der retinohypothalamische Trakt und die Sehbahn stellen daher keine strikt getrennten Passagen dar.⁶²³

Der suprachiasmatische Nucleus ist einer der neuronalen Kerne des Hypothalamus. Er liegt spiegelbildlich in beiden Hälften des Zwischenhirns vor und stellt das Projektionsziel der meisten neuronalen Fasern des retinohypothalamischen Traktes dar. Der Eingang von Erregungspotentialen aus den mcGanglienzellen im suprachiasmatischen Nucleus hemmt die Aktivität eines benachbart liegenden Hirnkerns, der als paraventriculärer Nucleus bezeichnet wird. Langen nur wenige Erregungspotentiale im suprachiasmatischen Nucleus ein, wird diese Hemmung aufgehoben. Der paraventriculäre Nucleus vermittelt dann Erregungspotentiale in einer neuronalen Schleife über eine Schaltstelle des vegetativen Nervensystems in der grauen Substanz des oberen Rückenmarks zurück in das Zwischenhirn zur Zirbeldrüse.^{624,625}

In den sekretorischen Neuronen der Zirbeldrüse wird durch das Einlangen der elektrischen Potentiale das Enzym Tryptophan-Hydroxylase aktiviert. Tryptophan-Hydroxylase bestimmt die Geschwindigkeit des Ablaufes der Biosynthese von Melatonin.

⁶¹⁸ Rea (2005)

⁶¹⁹ Schmidt (2007)

⁶²⁰ Rohen (2001)

⁶²¹ Dacey (2005)

⁶²² Hattar (2004)

⁶²³ Moore (1997)

⁶²⁴ Schmidt (2007)

⁶²⁵ Rohen (2001)

Tryptophan, eine durch Spaltung von Nahrungsproteinen bereitgestellte essenzielle Aminosäure, wird durch Tryptophan-Hydroxylase zu L-5-Hydroxy-Tryptophan hydroxyliert. Liegt nicht genügend Tryptophan vor, kommt dieser Prozess zum Erliegen. L-5-Hydroxy-Tryptophan wird durch eine L-Aminosäure-Decarboxylase⁶²⁶ zu 5-Hydroxytryptamin, im Folgenden als Serotonin bezeichnet, konvertiert.^{627,628,629} Ein geringer Teil des Serotonin wird schließlich durch eine Acetylierung⁶³⁰ und eine nachfolgend O-Methylierung⁶³¹ zu Melatonin metabolisiert.⁶³²

Melatonin wird von der Zirbeldrüse in die Blutbahn abgegeben und durch die Blutzirkulation als Botenstoff zu verschiedenen Zielgeweben transportiert, die Melatonin adäquate Rezeptoren tragen.⁶³³ Melatonin wird durch Metabolisierung in der Leber rasch abgebaut. Die Abbauprodukte werden über den Urin ausgeschieden.⁶³⁴

⁶²⁶ Kohlendioxid wird abgespalten.

⁶²⁷ Hardman (1998)

⁶²⁸ Bayer (2006)

⁶²⁹ Bei Tryptophan reicher Ernährung wird auch in den enterochromofinen Zellen des Darms wird aus Tryptophan Melatonin über die Zwischenstufe Serotonin synthetisiert.

⁶³⁰ Eine Acetylgruppe wird angelagert. Eine Acetylgruppe besteht aus einer Carbonylgruppe (CO) und einer Methylgruppe (CH₃).

⁶³¹ Methyl (CH₃) wird in eine organische Verbindung durch Anlagerung an Sauerstoff (O) eingefügt.

⁶³² Hardman (1998)

⁶³³ Reppert (1995)

⁶³⁴ Schmidt (2007)

6.2.3.3. Melatonin Suppression Wirkungs-Kurve

Melatonin kommt in der Vermittlung des exogenen Signals der Umgebungslichtintensität für die Synchronisation der endogenen Rhythmik des Menschen eine zentrale Rolle zu. Aktuelle Studien differenzieren diese Rolle und beschreiben komplexere und teils noch nicht erschöpfend erforschte Zusammenhänge im System dieser Rhythmik. Beispielsweise tritt bei nachtaktiven Säugetieren das höchste Aktivitätsniveau zeitgleich mit dem Erreichen der höchsten Melatonin Blutserumskonzentration auf.⁶³⁵ Auch die Behandelbarkeit von Schlafstörungen durch die Verabreichung von exogenem Melatonin wird durch verschiedene Studien sehr unterschiedlich bewertet.⁶³⁶

Eine Erhöhung der Melatonin Blutserumkonzentration ist demzufolge als grundlegende Information über das Auftreten des Umgebungszustands „Dunkelheit“ zu interpretieren, nicht aber als unmittelbarer Initiator für den Schlaf-Wach-Rhythmus, die zyklische Körpertemperaturabsenkung oder andere zyklische Veränderungen im Rahmen der rhythmischen Systeme des Menschen. Insofern erscheint eine weitere Ausdifferenzierung der Wirkungs-Kurve für die Melatonin Unterdrückung sinnvoll. Derzeit liegt zur Melatonin Suppression eine Kurve (Diagramm 37) mit der Bezeichnung „circadiane Wirkungsfunktion $c(\lambda)$ “ für die Messung circadianer Strahlungsgrößen von Gall aus dem Jahr 2004 vor.^{637,638}

⁶³⁵ Scheer (2005)

⁶³⁶ Buscemi (2006)

⁶³⁷ Hubalek (2007)

⁶³⁸ Vgl. Gall (2004)

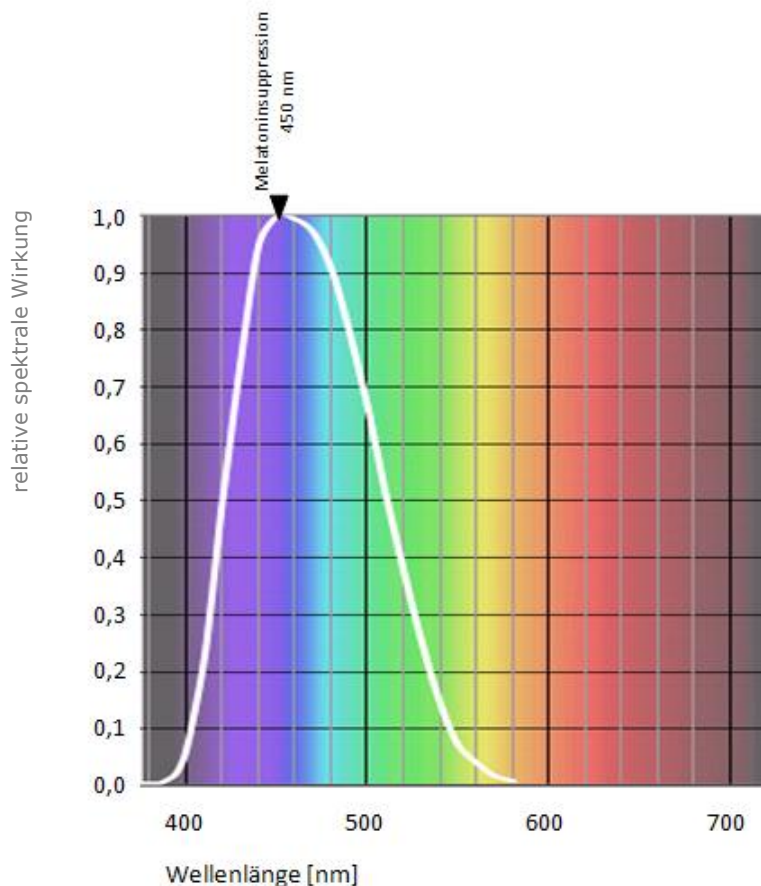


Diagramm 37: Wirkungs-Kurve $c(\lambda)$ für die Melatonin Suppression als circadiane Wirkfunktion nach Gall 2004

Die als Ausgangsbasis für die Entwicklung einer circadianen Metrik erarbeitete Wirkungs-Kurve $c(\lambda)$ ist aus den beiden bereits beschriebenen Wirkungs-Kurven nach Brainard und Thapan durch Mittelung ihrer Werte abgeleitet worden. $c(\lambda)$ wurde im kurzwelligen Bereich durch die Transmissionskurve des menschlichen Auges $b(\lambda)$ ⁶³⁹ ergänzt und in 5 nm Schritten geglättet mit dem Maximalwert von 1 bei 450 nm dargestellt.⁶⁴⁰

Die Wirkungs-Kurve $c(\lambda)$ ermöglicht die rechnerische Ermittlung des, für die Melatonin Suppression relevanten spektralen Strahlungsangebotes im Gebäudeinneren, nach dem Durchgang durch eine Funktionsglasscheibe. Bei der weiteren Verwendung der ermittelten Daten darf nicht außer Acht gelassen werden, dass die nicht visuelle Reizrezeption ein, als sub-additiv bezeichnetes, Verhalten gegenüber polychromatischem Licht zeigt. Das bedeutet, dass beispielsweise von einer Kombination aus monochromatischem blauen und monochromatischem gelben Licht eine geringere Wirkung ausgeht als von dem monochromatischen blauen Licht alleine.^{641,642}

⁶³⁹ ÖNORM EN 14255-4 (2007)

⁶⁴⁰ Gall (2004)

⁶⁴¹ Rea (2006)

⁶⁴² Rea M. legt in diesem Zusammenhang in Rea (2006) eine andere Wirkungs-Kurve der spektralen Empfindlichkeit für die Melatonin Suppression vor.

Die folgend abgebildete Dosis-Wirkungs-Kurve (Diagramm 38) stellt einen Bezug zwischen der Suppression von Melatonin im Blutplasma und der Beleuchtungsstärke an der Hornhaut des Auges in lx her.⁶⁴³ Zur Ermittlung der Kurve wurden 23 Versuchspersonen während der Nacht 6,5 Stunden lang mit dem als „kalt weiß“ bezeichneten Licht einer Fluoreszenzlampe⁶⁴⁴ bestrahlt.⁶⁴⁵

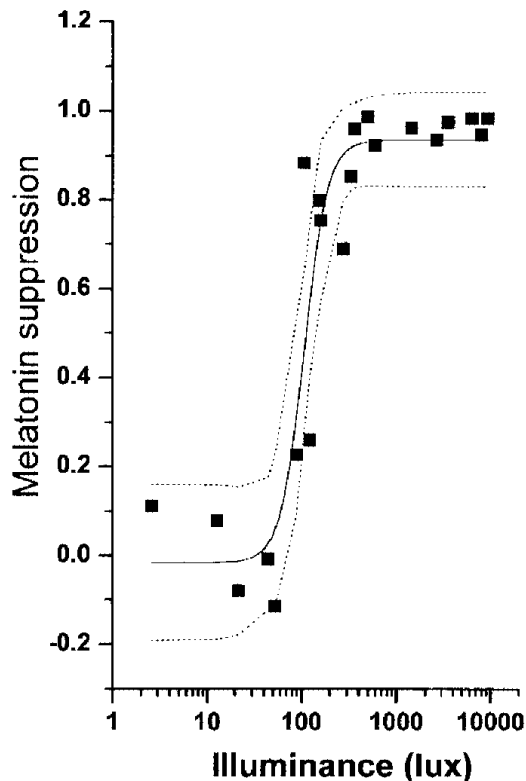


Diagramm 38: Dosis-Wirkungs-Kurve für die Melatonin Suppression in Bezug zur Hornhautbeleuchtungsstärke nach Zeitzer 2000

Festgestellt werden kann, dass bereits bei einer relativ niedrigen Beleuchtungsstärke von etwa 100 lx eine 50% Suppression des Melatonin Spiegels im Plasma auftritt. Die völlige Suppression tritt bei etwa 1000 lx ein.⁶⁴⁶

⁶⁴³ Zeitzer (2000)

⁶⁴⁴ Das Leuchtmittel wird von den Studienautoren Zeitzer M., Dijk D., Kronauer R., Brown E., Czeisler C. nicht exakt spezifiziert. Dennoch ist davon auszugehen, dass die Spektralverteilung des von einer Fluoreszenzlampe emittierten Lichtes deutlich von der natürlichen Tageslichts abweicht. Die Wellenlängen bezogene Wirkungs-Kurve zur Melatonin Suppression nach Thapan K. und Brainard G. lag zur Zeit der Ermittlung der Beleuchtungsstärke bezogenen Dosis – Wirkungs-Kurve zur Melatonin Suppression noch nicht vor.

⁶⁴⁵ Zeitzer (2000)

⁶⁴⁶ Zu bemerken ist, dass die eigentlich relevante Beleuchtungsstärke an der Retina im Normalfall nicht mit der Beleuchtungsstärke an der Hornhaut übereinstimmt und keinesfalls mit einer beispielsweise auf einer horizontalen Arbeitsebene gemessenen Beleuchtungsstärke gleichgesetzt werden darf.

Im Folgenden werden einige nicht visuelle photobiologische Wirkungen des Lichtes im sichtbaren Spektralbereich im Überblick skizziert. Die Wirkungen wurden den Diskussionsschwerpunkten der aktuellen wissenschaftlichen Literatur entsprechend ausgewählt und den Bereichen Botenstoffe, circadiane Rhythmik, Aktiviertheit im Wachzustand, Moderation der Zellentwicklung und Psychophysiologie zugeordnet. Zwischen den Wirkungen gibt es vielfache Querbezüge, darüberhinaus bestehen Überschneidungen zwischen den angegebenen Themenbereichen.

6.2.3.4. Wirkungen auf Botenstoffe

Durch die Aufgabe, Informationen innerhalb des Organismus oder zwischen Organismen weiterzuleiten, kommt den Botenstoffen bei der Steuerung komplexer Körperfunktionen wie dem Wachstum, der Erregungsleitung, der Fortpflanzung und Vergleichbaren besondere Bedeutung zu. Botenstoffe, deren Produktion oder Wirksamkeit lichtsensitiv ist, setzen vielfältige Abläufe im Organismus in einen indirekten Bezug zum Umgebungslicht. Sie bilden so den Ausgangspunkt unterschiedlicher photobiologischer Wirkungen und werden daher einleitend beschrieben. Indirekte photobiologische Wirkungen zu identifizieren, abzugrenzen und in ihren Zusammenhängen zu beschreiben ist Gegenstand der laufenden Forschung.⁶⁴⁷

6.2.3.4.1. Melatonin

Wie bereits beschrieben, erfolgt in der Zirbeldrüse die lichtinduzierte Biosynthese des Hormons Melatonin. Über die Blutzirkulation wird Melatonin zu Zielgeweben beziehungsweise Zielzellen transportiert, die Proteinmoleküle exponieren können, und so das Hormon binden. Sie werden als Melatoninrezeptoren bezeichnet. Die Melatoninrezeptoren zeichnen sich dadurch aus, dass sie zwei unterschiedlichen Proteinklassen angehören. Die Melatoninrezeptoren mit den Kurzbezeichnungen MT1 und MT2 sind G-Protein⁶⁴⁸ gekoppelte Rezeptoren. Melatoninrezeptoren mit der Kurzbezeichnung MT3 liegen als Chinon-Reduktase-Enzym vor. Die Sensitivität der Melatoninrezeptoren unterliegt einer circadianen Rhythmik, ist aber von der Melatonin Serumkonzentration unabhängig. Die Mechanismen, die der Funktionalität und Sensitivität der Melatoninrezeptoren zu Grunde liegen, sind vielfach ungeklärt. Dadurch kann eine Vielzahl von Melatonin modulierten physiologischen Prozessen in ihrer Komplexität derzeit nicht erschöpfend erklärt werden.⁶⁴⁹

Als gesichert gilt, dass Melatonin auf die Abstimmung der endogenen Rhythmen des menschlichen Organismus Einfluss hat und die Synchronisation mit exogenen Lichtsituationen hervorruft. Beeinflusst wird dadurch etwa die Schlafdauer und Schlafqualität, die Aktivität im Wachzustand und die Körpertemperatur. Darüber hinaus wird Melatonin als Moderator unterschiedlicher Hormone wie dem Stoffwechsel- und Stresshormon Cortisol, dem Wachstumshormon Somatotrophin und Sexualhormonen wie Östrogen untersucht. Wie bereits beschrieben wurde, geht Melatonin aus dem

⁶⁴⁷ Witt-Enderby (2003)

⁶⁴⁸ Eine inhomogene Gruppe von Proteinen, die Guanin Nucleotid beziehungsweise Guanosintriphosphat binden können.

⁶⁴⁹ Witt-Enderby (2003)

Neurotransmitter Serotonin hervor, der unter anderem das psychologische Befinden beeinflusst. Weiters wird Melatonin in Bezug zur, als Hämatopoese bezeichneten, Bildung von Blutzellen, gesetzt. Melatonin moderiert die Immunabwehr. Schließlich weist Melatonin eine stark antioxidative Wirkung auf.^{650,651,652}

6.2.3.4.2. Serotonin

Das Monoamin Serotonin wird ebenfalls zu den Botenstoffen des Organismus gezählt, ist aber nicht wie Melatonin ein Hormon, sondern ein Neurotransmitter. Das bedeutet, dass Serotonin zu jenen Stoffen gehört, die die Kommunikation neuronaler Zellen untereinander vermitteln. Etwa 90% des Serotonins werden in den enterochromaffinen Zellen der Darmschleimhaut synthetisiert, die verbleibenden 10% in der Lunge, der Milz und im Zentralnervensystem.^{653,654} Wobei Serotonin im Gehirn durch einen anderen Typ von Tryptophan-Hydroxylase mit der Kurzbezeichnung TPH2 synthetisiert wird als Serotonin in extraneuronalen Geweben. Dort liegt Tryptophan-Hydroxylase eines Typs mit der Kurzbezeichnung TPH1 vor.^{655,656}

Das neuronale serotonerge System trägt wesentlich zur Stabilität der psychischen Befindlichkeit des Menschen bei. Mangel an Serotonin begünstigt das Auftreten von Depressionen, Epilepsie, Schizophrenie, Angstzuständen und Zwangsstörungen. Darüber hinaus wird auch die Qualität des Schlafes durch das neuronale serotogene System reguliert. Über eine Einflussnahme auf das männliche Sexualverhalten wird diskutiert.⁶⁵⁷ Die beiden serotonergen Systeme dürften sich gegenseitig beeinflussen, aber nicht in unmittelbarer Wechselwirkung miteinander stehen. Am Auftreten von Migräne sind beide serotonerge Systeme beteiligt, ebenso am Metabolismus der Nahrungs- und Flüssigkeitsaufnahme. Das extraneuronale serotonerge System nimmt Einfluss auf die Regulierung der Gefäßverengung und des Blutdrucks, der Insulinsekretion, des Immunsystems und der Blutstillung. Darüber hinaus moderiert Serotonin prä- und postnatale Entwicklungsprozesse.^{658,659}

Im neuronalen serotonergen System wird Serotonin im Zellplasma der Neuronen der Raphe-Kerne gebildet. Der Name leitet sich von der Lokalisierung dieser neuronalen Kerne, an der als Raphe bezeichneten Medianlinie zwischen den Stammhirnhälften ab. Neuronales Serotonin wird durch die Axone der Neuronen zu den Synapsen transportiert. Dort wird es in als Vesikeln bezeichneten kleinen Bläschen gesammelt und gespeichert.

⁶⁵⁰ Bayer (2006)

⁶⁵¹ Schobersberger (2007)

⁶⁵² Monk (1997)

⁶⁵³ Heinemann (2008)

⁶⁵⁴ Hopf (2003)

⁶⁵⁵ Walther (2007)

⁶⁵⁶ Walther (2003)

⁶⁵⁷ Mathers (2007)

⁶⁵⁸ Walther (2007)

⁶⁵⁹ Hopf (2003)

Wird das Neuron erregt, dringen die Vesikel an die Zelloberfläche und öffnen sich dort in den synaptischen Spalt, also den schmalen Raum zwischen den Synapsen zweier Neronen. Dieser Vorgang wird als Exocytose bezeichnet. Da die Erregungsleitung zumeist in einer definierten Richtung abläuft wird die exocytierende Synapse als Präsynapse bezeichnet.⁶⁶⁰ Ist Serotonin in den synaptischen Spalt abgegeben worden, erhöht sich dort seine aktuelle Konzentration, was die Erregungsweiterleitung an die Postsynapse ermöglicht. Das Serotonin im synaptischen Spalt wird entweder an einen Rezeptor der präsynaptischen oder der postsynaptischen Nervenendigung gebunden oder, wie in der Abbildung (Abbildung 36) gezeigt, über Serotonin-Transporter wieder in die Präsynapse rücktransportiert.⁶⁶¹

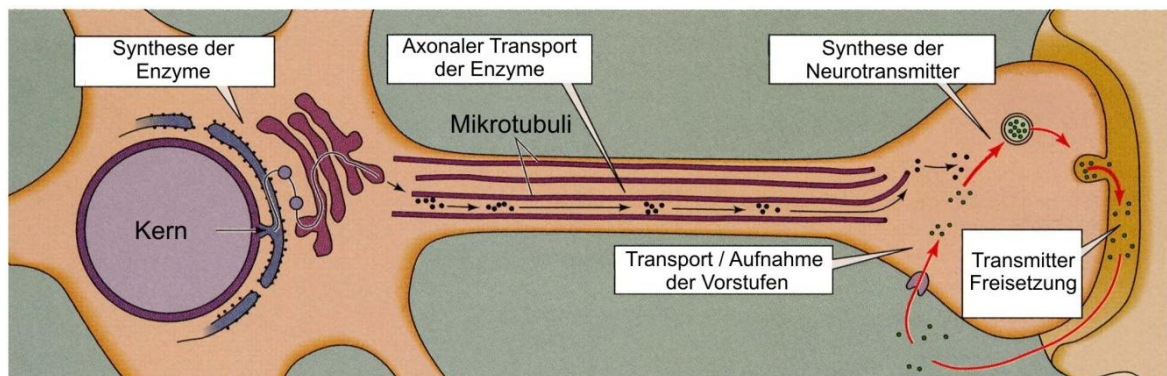


Abbildung 36: Neurotransmitter Synthese und Präsynaptische Prozesse

Es besteht aber auch die Möglichkeit, dass das Serotonin frei in der Umgebung des synaptischen Spalts verbleibt und dort durch das Enzym Monoaminoxidase mit der Kurzbezeichnung MAO TypA abgebaut wird. Derzeit sind 14 verschiedene Rezeptoren für Serotonin bekannt, die in sieben Familien zusammengefasst werden. Mit einer Ausnahme sind alle Serotonin Rezeptoren G-Protein⁶⁶² gekoppelt. Der Ausnahme Rezeptor ist ein Liganden⁶⁶³ gesteuerter Ionenkanal.⁶⁶⁴

2008 wurde erstmals ein photophysiologischer Mechanismus auf Basis einer Untersuchung an 88 Personen beschrieben. Nachgewiesen werden konnte ein Zusammenhang zwischen dem Angebot an Umgebungslicht und der Konzentration von Serotonin im synaptischen Spalt. Bei niedrigem Lichtangebot ist die Zahl der Serotonin-Transporter, die Serotonin aus dem synaptischen Spalt zurück in die Präsynapse transportieren, erhöht. Dadurch sinkt die Serotoninkonzentration im Synaptischen Spalt rasch ab und die Übertragung von Erregungspotentialen wird reduziert.⁶⁶⁵

⁶⁶⁰ Hopf (2003)

⁶⁶¹ www.fz-juelich.de/inb/inb-1/datapool/page/214/Neurotransmitter%20Synthese%20SS2005.ppt -, 18:45,05.01.2009

⁶⁶² Eine inhomogene Gruppe von Proteinen, die Guanin Nucleotid beziehungsweise Guanosintriphosphat binden können.

⁶⁶³ Liganden sind Atome oder Moleküle, die beide Elektronen, die für die Bildung einer Elektronenpaarbindung mit einem Ion nötigen sind zur Verfügung stellen können.

⁶⁶⁴ Heinemann (2008)

⁶⁶⁵ Praschak-Rieder (2008)

6.2.3.4.3. Cortisol und Endorfine

Eine unmittelbare Lichtwirkung auf die Produktion von Cortisol in der Nebennierenrinde^{666,667,668} sowie auf das Endorphinsystem^{669,670,671} wird diskutiert.^{672,673} Jedenfalls geht die Biosynthese von Cortisol vom Hypothalamus aus, der, wie beschrieben, von Erregungspotentialen erreicht wird, die durch Lichtreize hervorgerufen werden. In den sekretorischen Neuronen des paraventricularen Kerns des Hypothalamus wird Corticolibrin produziert und über die portalen Blutgefäße zur Hypophyse transportiert. Dort stimuliert Corticolibrin die Sekretion von Adrenocorticotropin, das wieder über die Blutbahn zur Nebennierenrinde gelangt und dort eine vermehrte Synthese von Cortisol und seine Ausschüttung nach etwa 15 bis 30 Minuten bewirkt. Cortisol wirkt als Hormon seinerseits auf die Hypophyse und den Hypothalamus ein.^{674,675}

Der Cortisol Hormonspiegel im Blut zeigt eine deutliche circadiane Rhythmik mit einem Höchststand kurz vor dem Erwachen und einem Tiefststand etwa um Mitternacht, also zu Beginn der Schlafphase.⁶⁷⁶ Darüber hinaus verändert sich der Cortisol Hormonspiegel aber auch reaktiv auf starke exogene Reize, die eine mögliche Erhöhung des Energiebedarfs signalisieren.⁶⁷⁷

⁶⁶⁶ Koller (2007)

⁶⁶⁷ Weingrill (2004)

⁶⁶⁸ Sharma (2006)

⁶⁶⁹ Rasmussen (2003)

⁶⁷⁰ Muñoz-Hoyos (2007)

⁶⁷¹ Ouezzani (2005)

⁶⁷² CIE 158 (2004)

⁶⁷³ Lockley (2006)

⁶⁷⁴ Buijs (1998)

⁶⁷⁵ Löffler (2008)

⁶⁷⁶ Bailey (2001)

⁶⁷⁷ Baum (1997)

6.2.3.5. Circadiane Rhythmik

Der in 6.2.3.2 beschriebene Prozess der Vermittlung eines endogenen Lichtreizes vom Auge als endogenes Signal an das menschliche Hormonsystem ermöglicht, die unterschiedlichen körpereigenen Rhythmen aufeinander abzustimmen und in Bezug zu den durch das Tageslicht determinierten natürlichen Umgebungsrhythmen zu setzen. Die meisten endogenen Rhythmen des Menschen sind circadian. Das bedeutet sie durchlaufen einen Zyklus innerhalb von etwa 24 Stunden. Darüber hinaus gibt es aber auch endogene Rhythmen von anderer Dauer, häufig auftretend sind etwa 90 minütige, etwa monatliche oder etwa jährliche Zykluslängen.⁶⁷⁸ Die endogenen Rhythmen des Menschen basieren auf negativen molekularen Rückkopplungsschleifen, die unmittelbar durch die genetische Codierung jeder Körperzelle aufrechterhalten werden. Dabei dringen Proteine aus dem Cytoplasma in den Zellkern ein und unterbinden dadurch den Vorgang der eigenen Reproduktion.⁶⁷⁹

Im suprachiasmatischen Nucleus des Menschen liegt eine derartige negative molekulare Rückkopplungsschleife vor, die im Anschluss abgebildet wird (Abbildung 37). Sie geht von Genen mit der Bezeichnung *per*⁶⁸⁰ beziehungsweise *cry*⁶⁸¹ aus. Die Gene *per* und *cry* werden nur aktiv, wenn an einem definierten Bereich ihrer jeweiligen Desoxiribonucleinsäure, im Folgenden als DNA bezeichnet, ein Komplex von zwei Proteinen angelagert ist. Der Bereich des DNA-Stranges an dem der Proteinkomplex angelagert werden kann, wird als E-box bezeichnet. Der anzulagernde Proteinkomplex besteht aus einem Proteinmolekül mit der Bezeichnung CLOCK⁶⁸² und einem Proteinmolekül das als BMAL 1⁶⁸³ bezeichnet wird. Sobald ein CLOCK/BMAL 1 Komplex an die E-box der DNA eines *per* oder *cry* Gens angelagert ist, erfolgt die Transkription der DNA in eine messenger Ribonucleinsäure, im Folgenden mit mRNA abgekürzt.^{684,685}

Im Gegensatz zur DNA kann die mRNA den Zellkern verlassen und in das Cytoplasma übergehen. Dort lagern sich Ribosome an die mRNA an und synthetisieren entsprechend ihres von der DNA transkribierten genetischen Codes PER beziehungsweise CRY Proteinmoleküle. Isolierte PER Proteinmoleküle degenerieren rasch, bilden sie aber Proteinkomplexe, bleiben sie über einen längeren Zeitraum stabil. Es können PER/PER Komplexe oder PER/CRY Komplexe gebildet werden. Diese Proteinkomplexe dringen nun ihrerseits zurück in den Zellkern. Dort treten sie mit den CLOCK/BMAL 1 Komplexen derart in Wechselwirkung, dass eine Anlagerung dieser CLOCK/BMAL 1 Komplexe an die E-box der Gene *per* und *cry* unterbleibt.^{686,687,688,689,690}

⁶⁷⁸ Schobersberger (2007)

⁶⁷⁹ Whitmore (2000)

⁶⁸⁰ „*per*“ steht als Abkürzung für das englische *period* auf Deutsch: die Dauer

⁶⁸¹ „*cry*“ steht als Abkürzung für *Cryptochrome*

⁶⁸² „*CLOCK*“ steht für *Taktgeber*

⁶⁸³ „*BMAL*“ steht als Abkürzung für *brain and muscle aryl hydrocarbon receptor nuclear translocator (ARNT)-like*

⁶⁸⁴ Schmidt (2007)

⁶⁸⁵ Whitmore (2000)

⁶⁸⁶ Schmidt (2007)

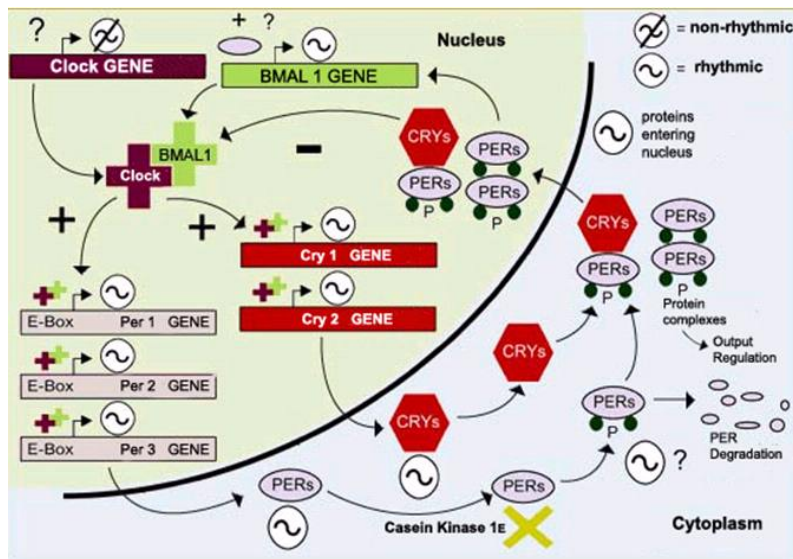


Abbildung 37: Ablaufschema der negativen molekularen Rückkopplungsschleife im suprachiasmatischen Nucleus des Menschen

Im Zellkern degenerieren die PER/PER und PER/CRY Komplexe nach und nach. Gleichzeitig werden im Cytoplasma keine PER und CRY Proteinmoleküle mehr nachgebildet, da keine entsprechenden mRNAs mehr den Zellkern verlassen. Nach etwa 24 Stunden kann die Anlagerung von CLOCK/BMAL 1 Komplexen an die E-box der Gene per und cry und damit der zyklische Gesamtprozess wieder beginnen.^{691,692}

Die circadianen endogenen Rhythmen des Menschen, wie die eben beschriebene negative molekulare Rückkopplungsschleife im suprachiasmatischen Nucleus, werden durch exogene Reize mit der durch die natürliche Umwelt vorgegebenen Tagesrhythmik synchronisiert. Diese exogenen Reize gehen beispielsweise vom Umgebungslicht, der Umgebungstemperatur oder dem Nahrungsangebot⁶⁹³ aus und werden häufig als Zeitgeber⁶⁹⁴ bezeichnet. Der Vorgang der Synchronisation selbst wird Entrainment genannt.

⁶⁸⁷ Whitmore (2000)

⁶⁸⁸ Griffin (1999)

⁶⁸⁹ http://thebrain.mcgill.ca/flash/a/a_11/a_11_m/a_11_m_hor/a_11_m_hor.html

⁶⁹⁰ Die Abbildung liegt adaptiert nach Whitmore (2000) unter der angegebenen Internet Adresse vor.

⁶⁹¹ Schmidt (2007)

⁶⁹² Whitmore (2000)

⁶⁹³ Mellow (2005)

⁶⁹⁴ Die Bezeichnung „Zeitgeber“ wird teils auch in der englischsprachigen Fachliteratur verwendet.

6.2.3.5.1. Verschiebung des circadianen Rhythmus

Licht gilt als Zeitgeber mit der höchsten Wirksamkeit für das Entrainment des menschlichen Organismus.^{695,696,697,698,699} Wenn exogene Zeitgeber nicht zur Verfügung stehen, beginnen die endogenen Rhythmen des Menschen frei zu laufen. Wobei die regelmäßig wechselnde Abfolge von Phasen hoher Leistungsbereitschaft mit Erholungsphasen, vergleichbar einem oszillierenden System, grundsätzlich erhalten bleibt.⁷⁰⁰ Dabei stellt sich eine subjektive und individuumsbezogene Tageslänge von zumeist etwas mehr als 24 Stunden ein.⁷⁰¹ Es werden aber auch individuelle Tageslängen angegeben, die mit lediglich 19 oder bis zu 27 Stunden deutlich von diesem Wert abweichen.⁷⁰² Darüber hinaus liegen Beobachtungen vor, dass beim Ausbleiben exogener Zeitgeber über mehrere subjektive Tageslängen hinweg, unterschiedliche endogene Zyklen, wie beispielsweise der Schlaf-Wach-Rhythmus und der Wechsel der Körpertemperatur tendenziell unterschiedliche Längen annehmen können.⁷⁰³ Es kann also sowohl die Synchronisation mit der Umgebung nicht erfolgen als auch die Bezugnahme der unterschiedlichen endogenen Rhythmen aufeinander nur eingeschränkt gewährleistet werden.

Das Entrainment erfolgt durch eine Verschiebung der endogenen Rhythmen entsprechend der Umgebungssituation. Das bedeutet aber, dass die Reaktion der endogenen oszillierenden Systeme auf einen Zeitgeber, je nach Größe der aktuellen Phasenverschiebung zwischen dem endogenen Rhythmus und dem Umgebungsrhythmus, unterschiedlich ausfallen muss. Dieser Zusammenhang kann durch eine Phase-Response-Kurve beschrieben werden. Im Folgenden werden zwei Phase-Response-Kurven⁷⁰⁴ unterschiedlicher Autoren zur Verschiebung des circadianen Rhythmus vergleichend dargestellt (Abbildung 38).^{705,706,707,708}

⁶⁹⁵ Roenneberg (1997)

⁶⁹⁶ Czeusker (1999)

⁶⁹⁷ Rajaratnam (2001)

⁶⁹⁸ Roenneberg (2003a)

⁶⁹⁹ Mistlberger (2004)

⁷⁰⁰ Wever (1990)

⁷⁰¹ Ehrenstein (2002)

⁷⁰² Roenneberg T., Mellow M., Das Leben im Zeitraum Tag, http://www.imp-muenchen.de/Das_Leben_im_Zeitrau.chrono_lit.1.html, (01.30.2008); http://www.notfallpflege.ch/Das_Leben_im_Zeitraum_Tag.pdf, (15.02.2009)

⁷⁰³ Dement (1976)

⁷⁰⁴ Die Darstellungen beider Kurven wurden im Sinne einer besseren Vergleichbarkeit bearbeitet. Beispielsweise wurden die gleich lautenden Bezeichnungen „verlangsamen“ für die, in den Originalabbildungen abweichenden Begriffe „Nachstellen“ (Roenneberg) und „Verzögerung“ (Moore, Naumann) gewählt. Zu beachten ist die unterschiedliche Zählweise der 24 Stunden des Tages beginnend mit 06:00 exogener Tageszeit (Roenneberg) beziehungsweise mit 0 vergangenen Stunden des subjektiven Tages (Moore, Naumann).

⁷⁰⁵ Vgl. Roenneberg T., Mellow M., Das Leben im Zeitraum Tag, http://www.imp-muenchen.de/Das_Leben_im_Zeitrau.chrono_lit.1.html, (01.30.2008); http://www.notfallpflege.ch/Das_Leben_im_Zeitraum_Tag.pdf, (15.02.2009)

⁷⁰⁶ Vgl. Roenneberg (2003b)

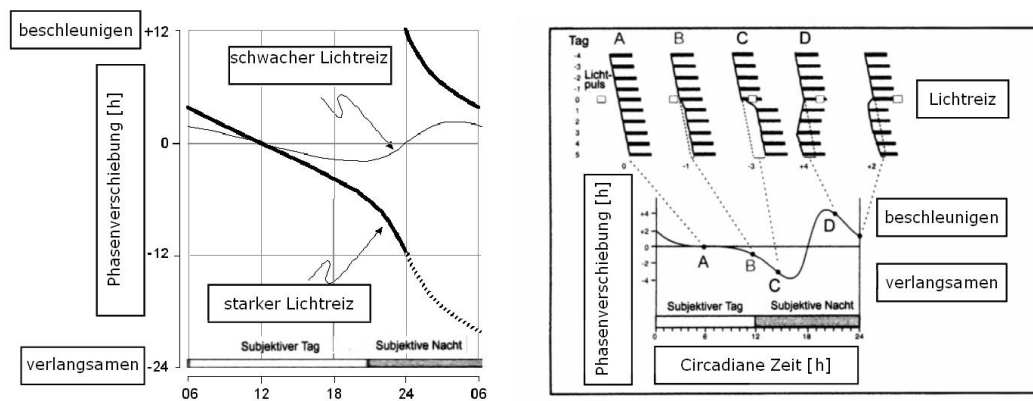


Abbildung 38: Vergleichende Darstellung von zwei Phase-Response-Kurven unterschiedlicher Autoren zur Verschiebung der circadianen Rhythmik

Die beiden Darstellungen stimmen in ihrer grundsätzlichen Aussage überein. So zeigt ein Lichtreiz, der zur Mittagszeit des subjektiven Tages auftritt, keine phasenverschiebende Wirkung. Ein Lichtreiz zu Beginn des subjektiven Tages führt zu einer positiven Phasenverschiebung, also einer Beschleunigung der endogenen Abläufe, am Ende des subjektiven Tages zu einer negativen Phasenverschiebung, also einer Verlangsamung der endogenen Abläufe. Ein Lichtreiz zu Beginn der subjektiven Nacht führt zu einer negativen Phasenverschiebung, also zu einer Verlangsamung der endogenen Abläufe. Im Gegensatz dazu führt ein Lichtreiz am Ende der subjektiven Nacht zu einer positiven Phasenverschiebung und damit zu einer Beschleunigung der endogenen Abläufe. Jedoch wird in der linken Darstellung in einen starken und einen schwachen Lichtreiz unterschieden. Grundsätzlich führt der starke Lichtreiz zu einer größeren Phasenverschiebung. Im Fall des Auftretens eines starken Lichtreizes spät in der subjektiven Nacht wird eine bis zu zwölfstündige Phasenverschiebung ausgewiesen, die in Fortsetzung des Trends als negative Phasenverschiebung aber ebenso auch als positive Phasenverschiebung interpretiert werden kann.

Es ist auffallend, wie stark die beiden Darstellungen der Phase-Response-Kurve im möglichen Ausmaß der ausgewiesenen Länge der Phasenverschiebungen von einander abweichen. Während die linke Darstellung wie beschrieben von einer Phasenverschiebung von bis zu zwölf Stunden ausgeht, betragen die maximalen Werte der Phasenverschiebung bei der rechten Darstellung lediglich bis zu vier Stunden. Jedenfalls aber wird deutlich, dass die Länge der circadianen Phasenverschiebung in Zusammenhang mit der Stärke des Zeitgebers Licht steht. In der folgenden abgebildeten Dosis-Wirkungs-Kurve (Diagramm 39) wird die Länge der Phasenverschiebung des endogenen rhythmischen Ansteigens und Absinkens des Melatonin Blutserumspiegels in Bezug zur Beleuchtungsstärke an der Hornhaut des Auges in lx gesetzt.⁷⁰⁹ Zur Ermittlung der Kurve wurden 23 Versuchspersonen 6,5 Stunden lang, beginnend in der frühen subjektiven Nacht, mit dem Licht einer Fluoreszenzlampe⁷¹⁰ bestrahlt.⁷¹¹

⁷⁰⁷ Vgl. Moore (1999)

⁷⁰⁸ Vgl. Naumann (2005)

⁷⁰⁹ Zeitzer (2000)

⁷¹⁰ Wie bereits erwähnt wird das Leuchtmittel von den Studienautoren Zeitzer M., Dijk D., Kronauer R., Brown E., Czeisler C. nicht exakt spezifiziert. Dennoch ist davon auszugehen,

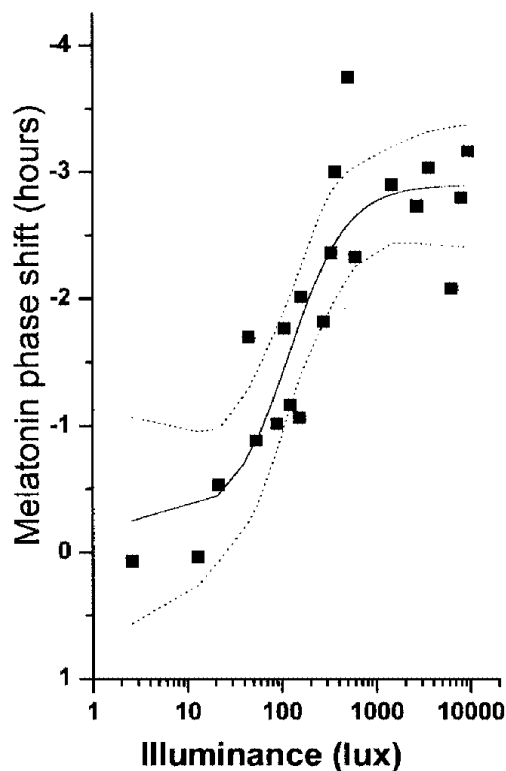


Diagramm 39: Dosis-Wirkungs-Kurve der Phasenverschiebung des endogenen rhythmischen Ansteigens und Absinkens des Melatonin Blutserumspiegels in Bezug zur Hornhautbeleuchtungsstärke nach Zeitzer 2000

Festgestellt werden kann, dass eine phasenverschiebende Wirkung bereits bei der niedrigsten eingesetzten Beleuchtungsstärke von lediglich 3 lx auftritt und die maximale Phasenverschiebung auch bei einer hohen Beleuchtungsstärke von 9.100 lx nicht weiter ausgedehnt werden kann. Bei einer Beleuchtungsstärke von etwa 100 lx tritt eine mittlere Phasenverschiebung von etwa 1,5 Stunden auf.⁷¹²

6.2.3.5.2. Schlaf-Wach-Rhythmik

Der Schlaf-Wach-Rhythmus ist endogen festgelegt und in seiner Länge und auch in seiner grundsätzlichen Lage im Verhältnis zum exogenen Rhythmus von Sonnenaufgang und Sonnenuntergang individuumsabhängig. Je nach dieser Lagebeziehung zwischen

dass die Spektralverteilung des von einer Fluoreszenzlampe emittierten Lichtes deutlich vom natürlichen Tageslicht abweicht. Die Wellenlängen bezogene Wirkungs-Kurve zur Melatonin Suppression nach Thapan (2001) und Brainard (2001) lag zur Zeit der Ermittlung der Beleuchtungsstärke bezogenen Dosis-Wirkungs-Kurve zur Melatonin Suppression noch nicht vor.

⁷¹¹ Zeitzer (2000)

⁷¹² Auch für diese Dosis-Wirkungs-Kurve gilt, dass die eigentlich relevante Beleuchtungsstärke an der Retina im Normalfall nicht mit der Beleuchtungsstärke an der Hornhaut übereinstimmt und keinesfalls mit einer beispielsweise auf einer horizontalen Arbeitsebene gemessenen Beleuchtungsstärke gleichgesetzt werden darf.

endogenem und exogenem Rhythmus können unterschiedliche Chronotypen beschrieben werden, wobei der Chronotyp eines Individuums im Lauf der Lebensentwicklung alters- und geschlechtsspezifischen Veränderungen unterliegt. Das folgende Diagramm⁷¹³ zeigt diese Veränderungen (Diagramm 40) basierend auf einer Studie⁷¹⁴, die etwa 25.000 Individuen berücksichtigt und eine Chronotypologie anwendet, die anhand des Zeitpunkts der Mitte der Schlafphase an arbeitsfreien Tagen in sieben Typen⁷¹⁵ differenziert.

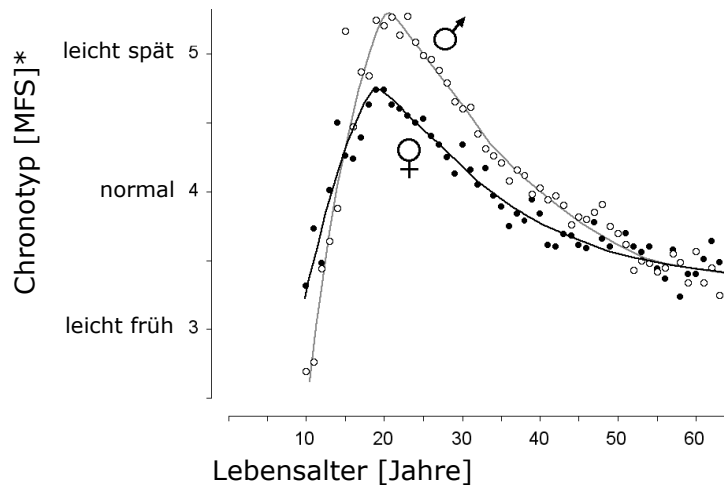


Diagramm 40: Alters- und geschlechtsspezifische Entwicklung des Chronotyps

*MFS steht als Abkürzung für midpoint of sleep on free days.

Kinder sind demnach vorwiegend frühe Chronotypen. Mit zunehmendem Alter verschiebt sich der durchschnittliche Mittelpunkt der bevorzugten Schlafzeit laufend in die spätere exogene Nacht. In der Adoleszenz zeigt sich eine Trendwende, die Frauen durchschnittlich im Alter von 19,5 Jahren, Männer im Alter von 20,9 Jahren vollziehen. Ab einem Lebensalter von etwa 50 Jahren unterscheiden sich Frauen und Männer in ihrem Chronotyp nicht mehr.

Schulpflichtige Kinder und Jugendliche sowie berufstätige Menschen unterliegen exogenen Zeitplänen wie Unterrichtsbeginn oder vorgeschriebenen Regelarbeitszeiten, die als soziales Entrainment bezeichnet werden. Eine in den Vereinigten Staaten von Amerika auf Basis einer Umfrage an 1.000 Teilnehmern durchgeführte Studie vergleicht die Schlaf-Wach-Rhythmik an Arbeitstagen mit der an arbeitsfreien Tagen. Das folgende Diagramm (Diagramm 41) zeigt diesbezügliche Schwankungen der gesamten Schlafdauer an einem Tag.⁷¹⁶

⁷¹³ Vgl. Roenneberg (2004)

⁷¹⁴ Roenneberg (2004)

⁷¹⁵ Diese sieben Chronotypen werden mit den Bezeichnungen extrem früh, moderat früh, leicht früh, normal, leicht spät, moderat spät und extrem spät charakterisiert.

⁷¹⁶ National Sleep Foundation, 2008 Sleep in America Poll, Summary of Findings, <http://www.sleepfoundation.org/atf/cf/%7Bf6bf2668-a1b4-4fe8-8d1a-a5d39340d9cb%7D/2008%20POLL%20SOF.PDF>, (15.02.2009)

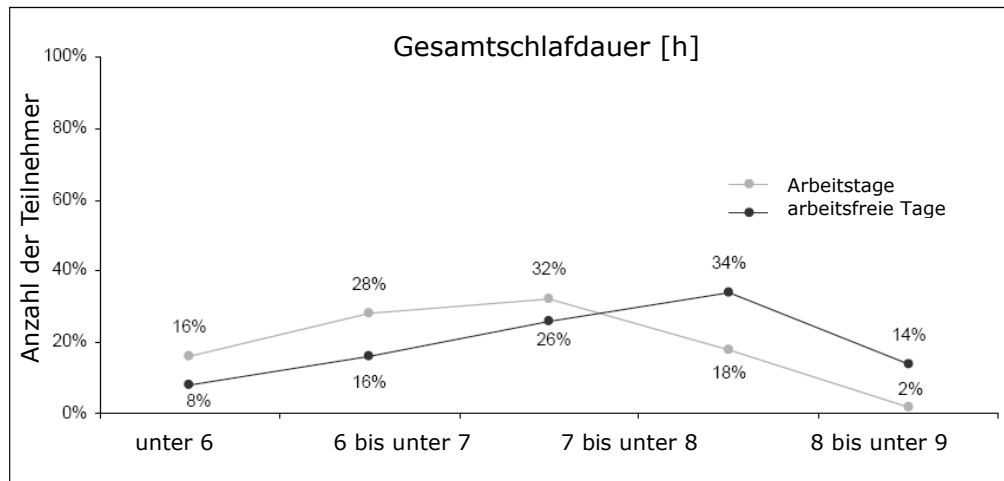


Diagramm 41: Vergleich der gesamten Schlafdauer an Arbeitstagen und an arbeitsfreien Tagen

An Arbeitstagen unterliegen die Teilnehmer dem sozialen Entrainment und der Schlaf-Wach-Rhythmus muss entsprechend angepasst werden. An arbeitsfreien Tagen treten die in ihren individuellen Ausprägungen unterschiedlichen Chronotypen wieder deutlicher hervor. Die durchschnittliche Gesamtschlafdauer an Arbeitstagen beträgt sechs Stunden und vierzig Minuten, an arbeitsfreien Tagen beträgt sie sieben Stunden und fünfundzwanzig Minuten.⁷¹⁷ Eine vergleichbare europäische Studie mit 500 Teilnehmern zeigt ähnliche Ergebnisse, wobei hier die durchschnittliche Gesamtschlafdauer an Arbeitstagen sieben Stunden und zweiundzwanzig Minuten, an arbeitsfreien Tagen acht Stunden und siebenundzwanzig Minuten beträgt.⁷¹⁸ Daraus wird gefolgert, dass das soziale Entrainment für den überwiegenden Großteil der betroffenen Menschen auf Grund ihres Chronotyps zu früh erfolgt.^{719,720} Neben den endogenen Rhythmen werden auch die jahreszeitlichen Veränderungen des solaren exogenen Rhythmus durch das soziale Entrainment nicht entsprechend nachvollzogen.

Im Rahmen einer Studie⁷²¹ wurde untersucht, ob ein Zusammenhang zwischen der durchschnittlichen Aufenthaltsdauer im Freien und der Anpassungsfähigkeit an das soziale Entrainment besteht. Beobachtet werden konnte, dass mit längerer Aufenthaltsdauer im Freien die Schlafphase in Bezug zur exogenen Ortszeit zunehmend nach vor verschoben wird (Diagramm 42), was die Anpassung an exogene soziale Rhythmen für die meisten Chronotypen erleichtert.^{722,723}

⁷¹⁷ National Sleep Foundation, 2008 Sleep in America Poll, Summary of Findings, <http://www.sleepfoundation.org/atf/cf/%7Bf6bf2668-a1b4-4fe8-8d1a-a5d39340d9cb%7D/2008%20POLL%20SOF.PDF>, (15.02.2009)

⁷¹⁸ Roenneberg (2003a)

⁷¹⁹ Roenneberg (2003a)

⁷²⁰ Taylor (2006)

⁷²¹ Roenneberg (2003a)

⁷²² Roenneberg (2003b)

⁷²³ Vgl. Roenneberg (2003a)

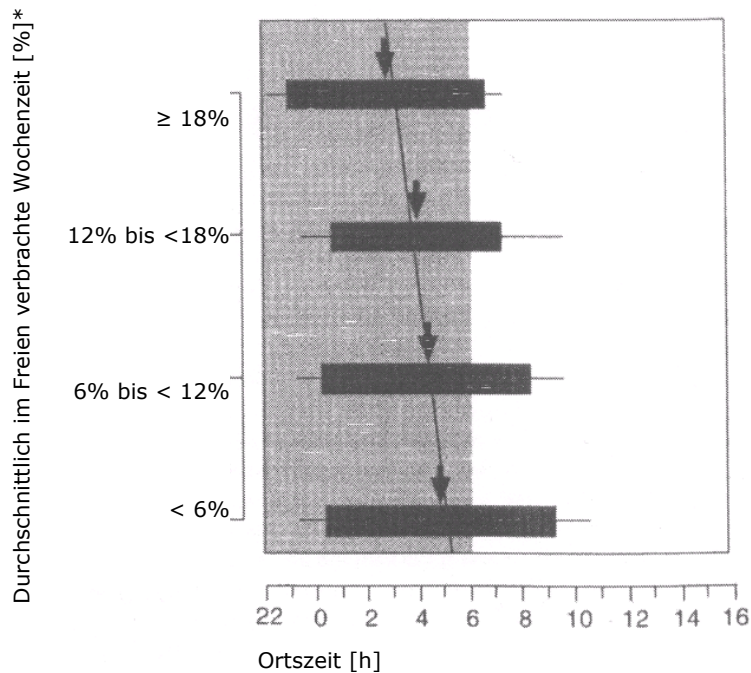


Diagramm 42: Einfluss der Aufenthaltsdauer im Freien auf die zeitliche Lage der Schlafphase an arbeitsfreien Tagen

*Die Zeitangabe erfolgt in der originalen Abbildung in Stunden je Woche, wobei zehnstündige Intervalle gewählt wurden.⁷²⁴

Anzumerken ist, dass eine in Deutschland durchgeführte Studie, die vergleichbare Daten zur Aufenthaltsdauer im Freien erhebt, zu dem Ergebnis kommt, dass durchschnittlich lediglich 10% der Gesamtlebenszeit außerhalb von geschlossenen Räumen⁷²⁵ verbracht wird.⁷²⁶ Darüber hinaus wäre es nutzbringend, auf die bereits erläuterte Phase-Response-Kurve zur Verschiebung des endogenen circadianen Rhythmus Bezug zu nehmen, und nicht nur die Aufenthaltsdauer, sondern auch das zeitliche Muster des Aufenthalts zu kennen.

⁷²⁴ Da in vergleichbaren Studien mit anderen Zeitspannen, beispielsweise der gesamten Lebenszeit, und anderen Zeitintervallen gearbeitet wird, erscheint die Angabe in Prozent sinnvoll im Sinne einer erleichterten Vergleichbarkeit.

⁷²⁵ Beim Vergleich von Studien, die sich auf die Aufenthaltsdauer im Freien beziehen, ist zu differenzieren, ob als „im Freien“ das außerhalb von Gebäuden sein, oder der tatsächliche Aufenthalt im Freien gemeint ist. Beispielsweise verbringen die meisten Menschen ihren Weg zur Arbeit nicht im Freien, sondern in geschlossenen Verkehrsmitteln, in denen kein volles Tageslichtspektrum oder im Fall des Transports unter Grund Kunstlicht angeboten wird.

⁷²⁶ Deutsches Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (1996)

6.2.3.5.3. Krankhafte Schlafstörungen

Schlafstörungen treten unter der erwachsenen Bevölkerung der postindustrieller Gesellschaft häufig auf. So geben 65% der Teilnehmer, der bereits erwähnten in den Vereinigten Staaten von Amerika durchgeführten Befragung, an, einige Nächte pro Woche innerhalb des zuletzt vergangenen Monats unter Schlafstörungen gelitten zu haben. 44% aus dieser Gruppe sind jede oder beinahe jede Nacht mit Schlafproblemen konfrontiert. Mit 49% gibt beinahe die Hälfte der Befragten an, einige Tage der Woche im letzten vergangenen Monat unerholt aufgewacht zu sein. 42% der Teilnehmer geben an, an einigen Tagen der Woche innerhalb des letzten vergangenen Monats mehrfach innerhalb einer Nacht aufgewacht zu sein. Weiters geben von den Befragten 29% an, regelmäßig zu früh aufzuwachen und nicht mehr einschlafen zu können. 26% der Teilnehmer geben an, zumindest an einigen Tagen der Woche innerhalb des letzten vergangenen Monats Einschlafprobleme gehabt zu haben.⁷²⁷

Krankhafte Störungen der Schlaf-Wach-Rhythmik und des Schlafes können durch unterschiedlichste exogene Faktoren wie beispielsweise Lärm, Nahrungsinhaltsstoffe oder Licht, und endogene Faktoren wie eine genetische Disposition, Schwangerschaft, nicht schlafbezogene Krankheiten oder Vergleichbares begünstigt sein oder ausgelöst werden. Oft liegt auch eine Kombination aus diesen Faktoren vor. Die genaue Betrachtung und Bewertung der Lebenssituation eines Menschen hinsichtlich des stärksten exogenen Zeitgebers Licht ist beim Auftreten von Schlafstörungen jedenfalls von besonderer Wichtigkeit.⁷²⁸ Grundsätzlich ist festzustellen, ob natürliches Tageslicht speziell in den morgendlichen und abendlichen Dämmerungsphasen wahrgenommen werden kann, ob die Umgebungslichtintensität ein deutliches Tag-Nacht-Muster zeigt und ob die nächtliche Dunkelphase durch Licht aus künstlichen Quellen unterbrochen oder beeinträchtigt wird.

Eine über den Rahmen der natürlichen Chronotypen hinausgehende und über längere Zeit dauerhafte Verschiebung des endogenen Schlaf-Wach-Rhythmus in Bezug auf den exogenen Tagesrhythmus liegt beim Auftreten des Delayed Sleep Phase Syndrome, im Weiteren mit DSPS abgekürzt, und des Advanced Sleep Phase Syndrom, im Weiteren als ASPS bezeichnet, vor. Das DSPS betrifft vorwiegend jüngere Erwachsene, denen es unmöglich ist zur Morgenzeit aufzuwachen um aufzustehen. DSPS Patienten ist es somit unmöglich sich dem sozialen Entrainment anzupassen. Zumindest in leichten Fällen von DSPS unterstützt das morgendliche Entrainment mit Licht die Normalisierung der Lage des endogenen Schlaf-Wach-Rhythmus.⁷²⁹ Vom ASPS sind vorwiegend ältere Erwachsene betroffen. Sie schlafen vor 19:00 ein, erwachen in weiterer Folge in den mittleren Nachtstunden und können nicht wieder einschlafen.⁷³⁰

Neben diesen, die Phasenlage des Schlafes betreffenden Krankheiten, sind auch häufig auftretende oder lang anhaltende Ein- und Durchschlafstörungen, sowie mangelnde

⁷²⁷ National Sleep Foundation, 2008 Sleep in America Poll, Summary of Findings, <http://www.sleepfoundation.org/atf/cf/%7Bf6bf2668-a1b4-4fe8-8d1a-a5d39340d9cb%7D/2008%20POLL%20SOF.PDF>, (15.02.2009)

⁷²⁸ Lack (2003)

⁷²⁹ Lack (2007)

⁷³⁰ Wright (2006)

Schlafqualität selbst zu den krankhaften Schlafstörungen zu zählen. Das Restless Legs Syndrom, im Weiteren als RLS bezeichnet, zeigt Kribbeln, Ziehen oder Schmerzen in den Beinen, manchmal auch in den Armen als typische Symptomatik.⁷³¹ Diese Symptome können durch Bewegung kurzzeitig gelindert werden. Das RLS tritt in Ruhezuständen auf und zeigt in seiner Intensität eine circadiane Rhythmik mit den stärksten Beeinträchtigungen in den mittleren Nachstunden.⁷³² Die vom RLS Betroffenen können daher nicht oder schlecht einschlafen beziehungsweise durchschlafen. Die Ursachen für das Auftreten von RLS sind noch nicht abschließend erforscht. Von einer genetischen Disposition⁷³³ wird ausgegangen. Im Zusammenhang mit dieser genetischen Disposition ist eine Stoffwechselstörung des Gehirns zu beobachten, die eine Unterversorgung des Organs mit Eisen und dem Neurotransmitter Dopamin⁷³⁴ zur Folge hat.⁷³⁵ Unter Bezugnahme auf die starke circadiane Rhythmisierung des RLS wurde auch ein direkter Zusammenhang zwischen dem Tageslichtangebot und dem Auftreten der Symptome beobachtet.⁷³⁶

Da die Schlafphasen von vorrangiger Bedeutung für die Erholung des menschlichen Organismus in vielfältiger Hinsicht sind, ziehen anhaltende krankhafte Schlafstörungen Folgeerkrankungen nach sich. So sind etwa 20 bis 30% aller Erwachsenen von essenziellen Gesundheitsproblemen auf Grund von derartigen Schlafstörungen betroffen.⁷³⁷

6.2.3.5.4. Circadiane Rhythmisierung von Demenzkranken und Frühgeborenen

Der Sammelbegriff Demenz beschreibt unterschiedliche Erkrankungen, bei denen sich die geistige Leistungsfähigkeit verringert, wobei neben dem Gedächtnis noch zumindest ein weiterer Aspekt wie beispielsweise die räumliche Orientierung oder das Lernvermögen betroffen sind.⁷³⁸ Häufig liegt auch eine Verringerung der zeitlichen Orientierungsfähigkeit und eine reduzierte endogene circadiane Rhythmik vor. In diesem Zusammenhang untersuchen aktuelle Studien, ob ein verstärktes Entrainment durch Licht Demenzkranke in ihrer zeitlichen Orientierung unterstützen kann. So zeigten 22 an Demenz erkrankte Personen eine verbesserte Anpassung der Lage des endogenen an den exogenen Tagesrhythmus und eine Normalisierung des Wechsels von leistungsbereiten und Erholungsphasen, nachdem die Beleuchtungsstärke in den bevorzugten Aufenthaltszonen unter Tags von durchschnittlich 436 lx auf durchschnittlich 1.136 lx angehoben wurde. Im Gegensatz zu diesen quantitativen Veränderungen des circadianen Rhythmus konnte keine Steigerung der qualitativen Unterschiede zwischen

⁷³¹ Ceballos-Baumann (2005)

⁷³² Michaud (2004)

⁷³³ Muhle (2008)

⁷³⁴ Dopamin wird aus der nicht essenziellen Aminosäure Tyrosin biosynthetisiert. Wie bereits beschrieben, ist Tyrosin auch jene Aminosäure, aus der, unter UV-Licht Einwirkung Melanin in den Melanozyten der menschlichen Haut photosynthetisiert wird.

⁷³⁵ Winkelmann (2007)

⁷³⁶ Sethi (2008)

⁷³⁷ Schobersberger (2007)

⁷³⁸ Fröstl (2001)

leistungsbereiten und der Erholungsphasen beobachtet werden.⁷³⁹ Eine andere Studie zeigt eine Verbesserung des Durchschlafvermögens von Demenzkranken durch eine Intensivierung des Umgebungslichtes am Morgen und am Abend.⁷⁴⁰ Dem widerspricht ein etwas älteres Studienergebnis, das keine Verbesserung der Schlafqualität, aber eine Stabilisierung der circadianen Rhythmik und ein späteres Auftreten der Phase höchster Leistungsfähigkeit durch die Intensivierung des Umgebungslichtes am Morgen beschreibt.⁷⁴¹

Frühgeborene zeigen eine noch nicht oder nicht vollständig ausgebildete endogene circadiane Rhythmik. Es wurde untersucht, ob die allgemeine Entwicklung der Frühgeborenen durch die Gestaltung der exogenen Lichtbedingungen beeinflusst wird. So vergleicht eine Studie an 41 Frühgeborenen deren Gewichtszunahme, die Dauer bis zur ersten oralen Nahrungsaufnahme, die Anzahl der Tage an denen die Atmung unterstützt werden musste und andere Indikatoren. Unter zyklisch wechselndem Umgebungslicht mit einer elfstündigen Tagphase mit einer durchschnittlichen horizontalen Beleuchtungsstärke von 201 lx und einer dreizehnstündigen Nachtphase mit einer durchschnittlichen horizontalen Beleuchtungsstärke von 32 lx zeigten die Frühgeborenen eine signifikant bessere Entwicklung als unter annähernd konstanter horizontaler Beleuchtungsstärke zwischen 232 lx und 274 lx im Durchschnitt. So konnten die Frühgeborenen, die unter zyklischen Umgebungslichtbedingungen betreut wurden, nach durchschnittlich 59 Tagen, die unter nichtzyklischen Bedingungen, nach erst 75 Tagen in häusliche Pflege entlassen werden.⁷⁴² Andere Studien zeigen, dass die Entwicklung und Stabilisierung der endogenen circadianen Rhythmik der Frühgeborenen durch zyklisch gestaltetes Umgebungslicht in der ersten Lebensphase signifikant gefördert wird.^{743,744}

6.2.3.5.5. Jet Lag

Als Jet Lag Syndrom wird eine Störung des Entrainments bezeichnet, das durch das rasche Überschreiten mehrerer Zeitzonen verursacht wird. Es tritt nach der Absolvierung eines Langstreckenfluges mit zunehmender Häufigkeit auf, je größer der Zeitunterschied zwischen der lokalen Zeit am Start- und am Zielort ist. So zeigt sich das Jet Lag Syndrom ab einem Zeitunterschied von fünf Stunden bei etwa 90% aller Reisenden und äußert sich durch Einschlafprobleme, Durchschlafstörungen, Tagschläfrigkeit, Gereiztheit, Konzentrationsschwierigkeiten, Verdauungsstörungen und Appetitlosigkeit.⁷⁴⁵ Die Intensität der Symptome und die Zeit, die zur Anpassung an den örtlichen Umgebungsrythmus benötigt wird, sind individuell stark unterschiedlich, wobei Untersuchungen vorliegen, die junge Menschen als im Allgemeinen stärker vom Jet Lag

⁷³⁹ Van Someren (1997)

⁷⁴⁰ Ancoli-Israel (2003)

⁷⁴¹ Ancoli-Israel (2002)

⁷⁴² Whitman (1995)

⁷⁴³ Rivkees (2003)

⁷⁴⁴ Jacobs (2004)

⁷⁴⁵ Schobersberger (2007)

Syndrom betroffen ausweisen.^{746,747} Durchschnittlich werden die endogenen Rhythmen um etwa 60 Minuten pro Tag derart verschoben, dass eine Übereinstimmung mit den Umgebungsrhythmen vor Ort wieder erreicht wird.⁷⁴⁸

Das Jet Lag Syndrom ermöglicht ein gezieltes Studium der Symptomatik und damit eine Verbesserung der Diagnostik von circadianen Rhythmusstörungen im Allgemeinen. Die Prävention und Behandlung des Jet Lag Syndroms durch die Verabreichung von Melatonin wird sowohl in Hinsicht auf die grundsätzliche Wirksamkeit als auch auf mögliche Wechselwirkungen mit Medikamenten kontroversiell diskutiert.^{749,750,751}

6.2.3.6. Aktiviertheit im Wachzustand

Auch der Grad der Aktiviertheit im Wachzustand unterliegt einem tageszyklischen Muster, welches sich aus der Überlagerung von zumindest drei unterschiedlichen Prozessen, der circadianen Rhythmik, der Veränderung des Homöostatischen Drucks und der Schlafinertie ergibt. Sowohl stabile Phasen hoher Aktiviertheit als auch eine klare Abgrenzung zwischen Wachphase und Schlafphase können sich nur einstellen, wenn diese drei Prozesse geeignet aufeinander bezogen sind.⁷⁵² Das im Folgenden abgebildete Ablaufschema (Diagramm 43) skizziert diese Bezüge zwischen circadianem Rhythmus, Homöostatischem Druck und Schlafinertie über eine Tageslänge hinweg beginnend mit einem um 06:00 morgens angenommenen Erwachen.⁷⁵³

⁷⁴⁶ Waterhouse (2002)

⁷⁴⁷ Ariznavarreta (2002)

⁷⁴⁸ Schobersberger (2007)

⁷⁴⁹ Herxheimer (2001)

⁷⁵⁰ Buscemi (2006)

⁷⁵¹ Arendt (2006)

⁷⁵² Cajochen (2007)

⁷⁵³ Vgl. Abbildung überarbeitet und erweitert nach: Moore (2004)

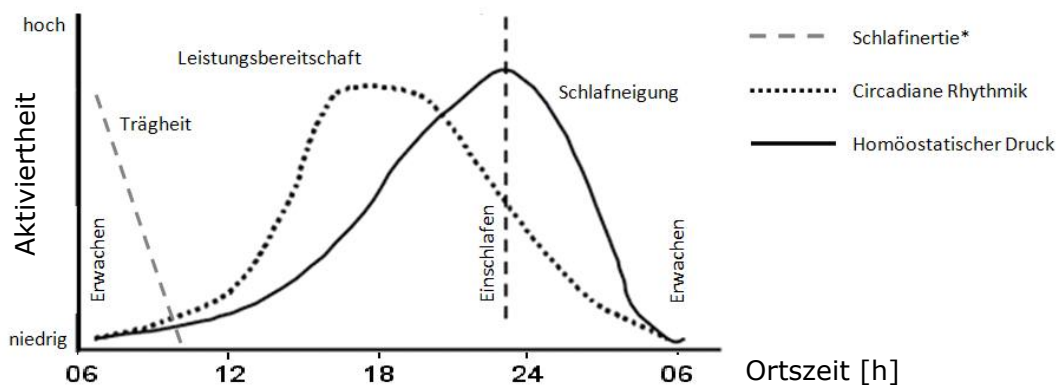


Diagramm 43: Ablaufschema der Bezüge von circadianem Rhythmus, homöostatischem Druck und Schlafinertie

*Die Schlafinertie ist in der original Abbildung von Moore nicht berücksichtigt. Zum Verständnis des tageszyklischen Musters der Aktiviertheit im Wachzustand ist die Schlafinertie jedoch von großer Bedeutung. Daher wurde die prinzipielle Tendenz ihres Verlaufs simplifiziert als Gerade in das Ablaufschema eingefügt.

Wie bereits beschrieben, wird durch den endogenen circadianen Rhythmus der Wechsel und die Ausprägung von leistungsbereiten Phasen und Erholungsphasen grundlegend bestimmt. In der Phase nach dem Erwachen wird dieser circadiane Rhythmus überlagert von der Schlafinertie, die als morgendliche Trägheit beschrieben werden kann. Die schlafinerte Phase definiert sich durch geringere Aufmerksamkeit und langsamere Reaktionsgeschwindigkeit. Sie dauert individuell und situationsbezogen unterschiedlich lange, zwischen 15 Minuten und vier Stunden,⁷⁵⁴ wobei späte Chronotypen im Vergleich zu frühen eine längere Schlafinertie zeigen.⁷⁵⁵ Während der gesamten wachen Phase eines Tages nimmt das Bedürfnis zu schlafen ständig zu, man spricht von einem Steigen des homöostatischen Drucks.⁷⁵⁶

Vom Ausgangspunkt des Erwachens nimmt die Leistungsbereitschaft über etwa zehn Stunden hinweg stetig zu. Die Schlafinertie fällt in den ersten Stunden nach dem Erwachen rasch ab, der homöostatische Druck steigt nur langsam. Aus der Überlagerung dieser drei Prozesse resultiert eine zunächst ansteigende und dann stabile Aktiviertheit bis etwa in die mittleren Nachmittagsstunden. Etwa um 16:00 zeigt der stete Anstieg der Leistungsbereitschaft einen Wendepunkt und bleibt getrieben vom circadianen Rhythmus nun für etwa vier Stunden auf hohem Niveau. Gleichzeitig beschleunigt sich die Zunahme des homöostatischen Drucks und damit erhöht sich die Schlafneigung. Die Aktiviertheit sinkt am Übergang von steigender zu stabiler Leistungsbereitschaft fühlbar ab. Nach etwa 20:00 reduziert sich die Leistungsbereitschaft rasch, die Schlafneigung nimmt weiter kontinuierlich zu und erreicht ihren Höhepunkt zum Zeitpunkt des Einschlafens.

Während des Schlafes sinken der homöostatische Druck und die Leistungsbereitschaft kontinuierlich ab, dennoch zeigen sich auch während des Schlafes Phasen

⁷⁵⁴ Cajochen (2007)

⁷⁵⁵ Roenneberg (2003a)

⁷⁵⁶ Moore (2004)

unterschiedlicher Aktiviertheit, die sich beispielsweise durch Änderungen der Hirntätigkeit oder der Körpertemperatur ausweisen. Eine günstige Phasenbeziehung zwischen dem circadianen Rhythmus und dem homöostatischen Druck liegt vor, wenn das Erwachen etwa drei Stunden nach dem Erreichen des endogenen Melatonin Serumspiegel Höchststands einsetzt.⁷⁵⁷

6.2.3.6.1. Subjektive und objektive Munterkeit

Die Quantifizierung der Aktiviertheit im Wachzustand erfolgt im Spannungsfeld zwischen der subjektiv empfundenen Munterkeit und objektiv messbaren, physiologischen Größen. Im Allgemeinen zeigen die Angaben zur subjektiv empfundenen Munterkeit beziehungsweise Schläfrigkeit bei gesunden Menschen eine hohe Korrelation mit objektiv ermittelten Daten. Zur Ermittlung der subjektiven Munterkeit werden zumeist Befragungsserien basierend auf standardisierten Evaluierungsbögen wie der Stanford Sleepiness Scale⁷⁵⁸ oder der Karolinska Sleepiness Scale⁷⁵⁹ durchgeführt. Zu den Methoden der objektiven Datenerfassung zur Beurteilung der Aktiviertheit im Wachzustand gehören beispielsweise psychomotorische Aufmerksamkeitstests auf Basis von Reaktionsgeschwindigkeiten. Weiters können Messungen der Herzfrequenz, der Hautleitfähigkeit, des Muskeltonus und der Augen- beziehungsweise der Augenlidbewegungen objektive Daten zur Aktiviertheit liefern. Darüber hinaus kann die Beurteilung der Gehirnaktivität durch Elektroenzephalografie, Magnetresonanztomografie und Positronenemissionstomografie objektive Informationen über die Aktiviertheit eines Menschen liefern.^{760,761}

Untersuchungen von möglichen Bezügen zwischen der subjektiven Munterkeit und der Lichtexposition ergaben die im Folgenden abgebildete Dosis-Wirkungs-Kurve der subjektiven Munterkeit (Diagramm 44) in Bezug zur Beleuchtungsstärke an der Hornhaut des Auges in lx. Dieser auf Basis subjektiver Daten ermittelten Kurve wird die Dosis-Wirkungs-Kurve des Auftretens zumindest einer langsamen Augenbewegung (Diagramm 44) pro 30 Sekundenintervall innerhalb der letzten 90 Minuten des Beobachtungszeitraums in Bezug zur Beleuchtungsstärke an der Hornhaut des Auges in lx gegenübergestellt, die somit auf objektiv ermittelten Daten basiert. Die offensichtliche Korrelation der beiden Ergebnisse untermauert die Relevanz der Dosis-Wirkungs-Kurve zur subjektiven Munterkeit. Darüber hinaus wurde auch eine parallele Messung der Hirntätigkeit mittels der Elektroenzephalografie erstellt, die diese Korrelation zusätzlich belegt.^{762, 763}

⁷⁵⁷ Cajochen (2007)

⁷⁵⁸ Hoddes (1973)

⁷⁵⁹ Åkerstedt (1990)

⁷⁶⁰ Hubalek (2007)

⁷⁶¹ Cajochen (2007)

⁷⁶² Vgl. Cajochen (2000)

⁷⁶³ Cajochen (2007)

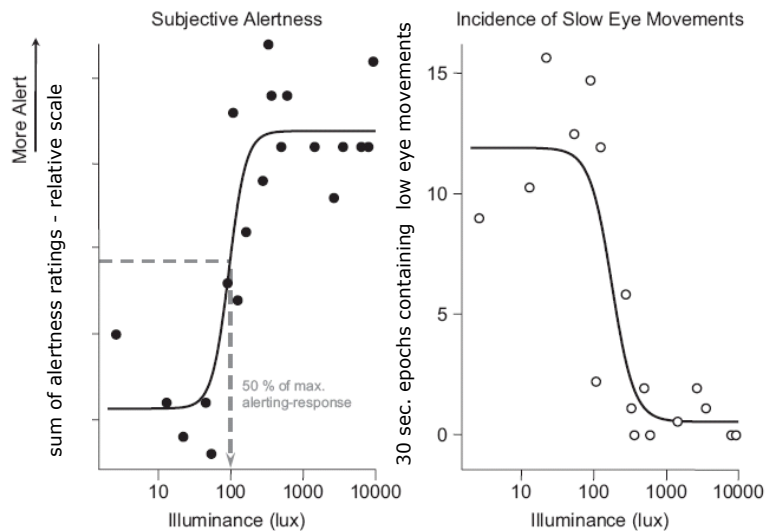


Diagramm 44: Vergleichende Darstellung der Dosis-Wirkungs-Kurve der subjektiven Munterkeit und des Auftretens langsamer Augenbewegungen in Bezug zur Hornhautbeleuchtungsstärke

Auch zur Ermittlung dieser Kurve waren die Versuchspersonen den gleichen Bedingungen ausgesetzt, wie bei der bereits beschriebenen Erstellung der Dosis-Wirkungs-Kurven zur Melatonin Suppression und zur Phasenverschiebung des endogenen rhythmischen Anstiegens und Absinkens des Melatonin Blutserumspiegels. So erfolgte eine Bestrahlung 6,5 Stunden lang mit „kalt weißem“ Licht während der frühen endogenen Nacht.

Beide Dosis-Wirkungs-Kurven zeigen, dass 50% der maximal empfundenen subjektiven Munterkeit beziehungsweise der gemessenen Aktivität der Augen bereits bei einer relativ niedrigen Beleuchtungsstärke von etwa 100 lx auftritt. Ab knapp unter 1.000 lx tritt eine Sättigung ein, ab der die empfundene subjektive Munterkeit durch die Erhöhung der Beleuchtungsstärke nicht mehr gesteigert werden kann. Ab einer Beleuchtungsstärke etwas über 1.000 lx treten keine langsamen Augenbewegungen mehr auf.⁷⁶⁴

Eine Wellenlängen bezogene Wirkungs-Kurve der Aktiviertheit durch Licht liegt derzeit nicht vor. Aktuelle Studien zeigen jedoch übereinstimmend eine höhere Wirksamkeit von kurzwelligem blauen Licht im Wellenlängenbereich zwischen 420 nm und 460 nm im Vergleich mit beispielsweise grünem Licht mit einer Wellenlänge von 550 nm oder mit rotem Licht mit einer Wellenlänge von 600 nm.^{765,766,767} Das legt die Vermutung nahe, dass auch die Aktiviertheit im Wachzustand von Vorgängen moduliert wird, die von retinalen mcGanglienzellen vermittelten Reizen ausgehen.⁷⁶⁸

Abschließend soll angemerkt werden, dass die Steigerung der subjektiven Munterkeit durch Licht überwiegend in Studien untersucht wurde, die während der endogenen Nacht

⁷⁶⁴ Cajochen (2000)

⁷⁶⁵ Cajochen (2005)

⁷⁶⁶ Revell (2006)

⁷⁶⁷ Vandewalle (2007)

⁷⁶⁸ Cajochen (2007)

durchgeführt wurden. Was den Schluss naheliegend erscheinen ließe, dass die Empfindung steigender subjektiver Munterkeit an die zunehmende Melatonin Suppression gekoppelt ist. Das wird durch aktuelle Beobachtungen widerlegt, die die unterschiedliche Wirksamkeit von Licht niedriger und höherer Beleuchtungsstärke auf die subjektive Munterkeit während des endogenen Tages, und damit während einer Phase minimaler Melatonin Serumskonzentration, nachweisen.⁷⁶⁹

6.2.3.6.2. Körpertemperatur

Zur Beurteilung von Veränderungen der Temperatur des menschlichen Körpers muss zwischen der Körperkerntemperatur und der Hauttemperatur unterschieden werden. Während die Körperkerntemperatur die Temperatur der Inneren Organe angibt, wird die Oberflächentemperatur des menschlichen Körpers als Hauttemperatur bezeichnet. Unter moderaten Umgebungstemperaturbedingungen wird die Körperkerntemperatur innerhalb der Schwankungsgrenzen von 36,8° und 37,2° Celsius konstant gehalten.⁷⁷⁰ Innerhalb dieser Schwankungsgrenzen unterliegt die Körperkerntemperatur einer circadianen Rhythmik⁷⁷¹ mit einem Maximum am Nachmittag etwa um 16:00 und einem Minimum in der Nacht um etwa 02:00. Die Hauttemperatur schwankt in größeren Bereichen und zeigt ein distal-proximales⁷⁷² Gefälle. Ist die Umgebungstemperatur beispielsweise deutlich kühler als die Körperkerntemperatur, so stellt sich ein Hauttemperaturgefälle derart ein, dass die Hautoberfläche an distalen Regionen wie Händen oder Füßen deutlich kühler ist als an proximalen Regionen wie der Stirn.

In einer Studie⁷⁷³ mit zehn Teilnehmern wurde die Wirkung von monochromatischem Licht der Wellenlängen 460 nm und 550 nm auf die Körperkerntemperatur und die Hauttemperatur verglichen (Diagramm 45). Das monochromatische Licht wurde zwischen 21:30 und 23:30, also am späten endogenen Abend verabreicht. Eine Kontrollgruppe verblieb ohne Licht.⁷⁷⁴

⁷⁶⁹ Phipps-Nelson (2003)

⁷⁷⁰ Van den Berg (2003)

⁷⁷¹ Cajochen (2007)

⁷⁷² „distal“ bedeutet relativ vom Körpermittelpunkt weiter entfernt, „ proximal“ relativ dem Körpermittelpunkt näher

⁷⁷³ Cajochen (2005)

⁷⁷⁴ Vgl. Diagramm bearbeitet: Cajochen (2005)

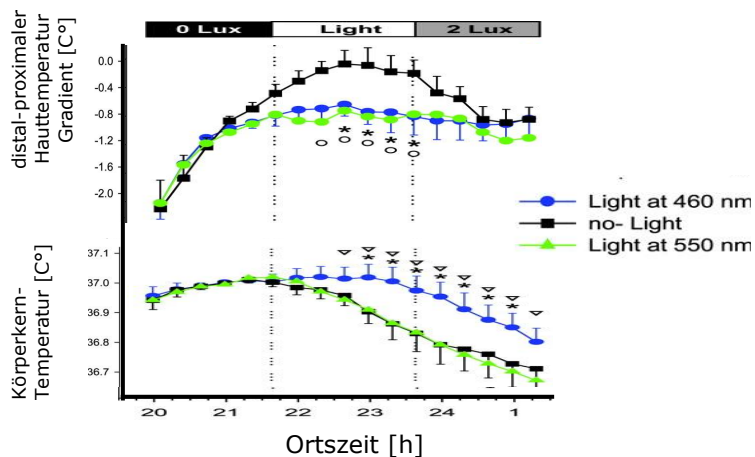


Diagramm 45: Wirkung von monochromatischem Licht der Wellenlängen 460 nm und 550 nm auf die Körperkerntemperatur [C°] und den distal-proximalen Hauttemperatur Gradient [C°]

Die Abbildung zeigt, dass die Körperkerntemperatur bei Dunkelheit entsprechend dem endogenen circadianen Temperaturverhalten am späten Abend fällt. Licht der Wellenlänge von 550 nm verändert diese Temperaturentwicklung nicht. Hingegen bewirkt eine Bestrahlung mit Licht der Wellenlänge von 460 nm, dass die Körperkerntemperatur annähernd konstant bleibt und am Ende der zwei Stunden um etwa zwei Zehntel über jener der beiden anderen Gruppen liegt.⁷⁷⁵

Die Veränderung der Hauttemperatur wird durch den distal-proximalen Hauttemperatur Gradient ausgedrückt, der die proximale und die distale Hauttemperatur zueinander in einen größen- und richtungsabhängigen Bezug setzt. Unter Bestrahlung sowohl mit Licht der Wellenlängen von 460 nm als auch 550 nm bleibt die proximale Hauttemperatur etwa zwei Zehntel Grad über jener der Kontrollgruppe. Die distale Hauttemperatur bleibt etwa drei Zehntel Grad unter jener der Dunkelgruppe. Das bedeutet, dass durch die Verabreichung von Licht unabhängig von seiner Wellenlänge die Differenz zwischen der proximalen und der distalen Hauttemperatur signifikant höher bleibt als bei der Kontrollgruppe.⁷⁷⁶

Es kann vermutet werden, dass die Regulierung der Körperkerntemperatur von Vorgängen moduliert wird, die von retinalen mcGanglienzellen vermittelten Reizen ausgehen. Die Hauttemperatur hingegen zeigt eine Lichtsensitivität, die an andere Mechanismen gebunden ist.^{777,778}

⁷⁷⁵ Cajochen (2005)

⁷⁷⁶ Cajochen (2005)

⁷⁷⁷ Cajochen (2005)

⁷⁷⁸ Es muss angemerkt werden, dass derzeit keine Studien mit vergleichbar differenzierter Auswertung gefunden werden konnten.

6.2.3.6.3. Herztätigkeit und Blutzirkulation

Im Rahmen der bereits erwähnten Studie⁷⁷⁹ zur Unterschiedlichkeit der Wirkungen von monochromatischem Licht der Wellenlängen 460 nm und 550 nm auf die Aktiviertheit wurde neben der Körpertemperatur auch die Frequenz des Herzschlages untersucht (Diagramm 46). Wie bereits beschrieben, wurde in dieser Studie monochromatisches Licht während des späten endogenen Abends zwischen 21:30 und 23:30 verabreicht, während eine Kontrollgruppe zu dieser Zeit ohne Licht verblieb.⁷⁸⁰

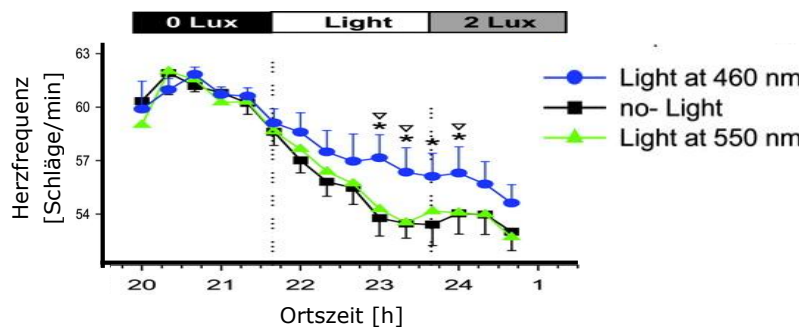


Diagramm 46: Wirkung von monochromatischem Licht der Wellenlängen 460 nm und 550 nm auf die Herzfrequenz [Schläge/min]

Entsprechend der sinkenden Leistungsbereitschaft am endogenen Abend reduziert sich auch die Herzfrequenz bei den im Dunkeln befindlichen Personen der Kontrollgruppe. Wie die Abbildung deutlich macht, wird diese Reduktion der Herzfrequenz von monochromatischem Licht der Wellenlänge 550 nm nicht beeinflusst. Die Bestrahlung mit Licht der Wellenlänge von 460 nm bewirkt hingegen ein verlangsamtes Absinken der Herzfrequenz, sodass nach zwei Stunden Bestrahlungsdauer die Herzfrequenz um etwa drei Schläge pro Minute über jener der beiden anderen Gruppen liegt.⁷⁸¹ Die aktivierende Wirkung von sichtbarem Licht kurzer Wellenlängen auf die Herzfrequenz wird auch in anderen Studien beobachtet⁷⁸², wobei auf weitere Aspekte wie beispielsweise die besondere Effektivität des Lichts hinsichtlich der Aktiviertheit am frühen Morgen eingegangen wird.⁷⁸³

Komplexe Wirkungen auf Herztätigkeit und Blutzirkulation zeigen sich auch im Rahmen des extraneuronalen serotonergen Systems durch den Neurotransmitter Serotonin. In Folge der Bindung von Serotonin an 5-HT_{2b} wird aus dem Endothel⁷⁸⁴ Stickstoffmonoxid freigesetzt, was zur Erweiterung der Blutgefäße führt. Eine ebensolche Erweiterung wird durch die Bindung von Serotonin an den Rezeptor 5-HT₇ hervorgerufen. Wird Serotonin

⁷⁷⁹ Cajochen (2005)

⁷⁸⁰ Vgl. Diagramm bearbeitet: Cajochen (2005)

⁷⁸¹ Cajochen (2005)

⁷⁸² Skene (2003)

⁷⁸³ Scheer (2004)

⁷⁸⁴ Das Endothel ist eine dünne Zellschicht, die das Innere der Blutgefäße bedeckt.

hingegen an 5-HT1b und 5-HT2a Rezeptoren gebunden, ruft das eine Gefäßverengung hervor. Wird Serotonin von den 5-HT4 Rezeptoren des Herzgewebes gebunden, führt das zu einer Erhöhung der Herzfrequenz.⁷⁸⁵ Wie bereits ausgeführt wurde, kann von einer gegenseitigen Beeinflussung des neuronalen und des extraneuronalen serotogenen Systems ausgegangen werden. Es ist aber ausdrücklich festzuhalten, dass derzeit keine Untersuchungen darüber vorliegen, ob die Lichtsensitivität des neuronalen serotogenen Systems zu einer indirekten Moderation des extraneuronalen serotogenen Systems durch Licht führt, oder ob das extraneuronale serotogene System auf andere Weise Einflüssen durch Licht unterliegt oder nicht.

6.2.3.6.4. Gehirnaktivität

Die Wirkungen von Licht auf die Aktivität des Gehirns abseits der Verarbeitung visueller Erregungsmuster ist nur in Grundzügen bekannt und aktuell Gegenstand weiterführender Forschung. Als Untersuchungsmethode stand zunächst die Elektroenzephalografie im Weiteren als EEG bezeichnet, zur Feststellung der Hirnaktivität auch im Zusammenhang mit Lichtexposition zur Verfügung. Mit Hilfe der EEG wird die elektrische Hirnaktivität summativ erfasst und in unterschiedlichen Wellenmustern dargestellt, die für bestimmte Aktivitätszustände typisch sind.

Im Rahmen einer Studie wurden 44 Teilnehmer während der endogenen Nacht unterschiedliche Abfolgen von Licht im sichtbaren Spektralbereich mit einer Beleuchtungsstärke von 50 lx beziehungsweise 5.000 lx ausgesetzt. Im mit „beta“ bezeichneten Wellenmuster mit einer Frequenz zwischen 14 und 30 Hertz, das normale Hirntätigkeit im Wachzustand oder auch im Traumschlaf abbildet, zeigte die EEG signifikante Aktivitätssteigerungen des Gehirns während der Verabreichung von Licht mit 5.000 lx.⁷⁸⁶

Eine vergleichbare Studie, bei der acht Teilnehmer während des endogenen Tages mit vollspektralem sichtbarem Licht mit einer Beleuchtungsstärke von 2.000 lx beziehungsweise von 150 lx bestrahlt wurden, zeigt einen Einfluss auf das mit „alpha“ bezeichnete Wellenmuster. Das alpha Wellenmuster mit einer Frequenz zwischen acht und dreizehn Hertz stellt sich bei Entspannung mit geschlossenen Augen ein. Unter den Lichtbedingungen mit niedriger Beleuchtungsstärke sank die Frequenz des alpha Wellenmusters signifikant rascher ab als unter der höheren Beleuchtungsstärke. Das bedeutet, dass die teilnehmenden Versuchspersonen unter der niedrigeren Beleuchtungsstärke von 150 lx dazu tendierten, in leichten Schlaf zu verfallen, sobald sie die Augen geschlossen hielten, während sich unter der Beleuchtungsstärke von 2.000 lx lediglich eine Entspannung im Wachzustand einstellte.⁷⁸⁷

⁷⁸⁵ Heinemann (2008)

⁷⁸⁶ Badia (1991)

⁷⁸⁷ Daurat (1993)

Fortgeschrittene Untersuchungsmethoden, wie die Positronenemissionstomografie ermöglichen eine Beobachtung der Blutflüsse im Gehirn und damit eine genaue Lokalisation von Arealen hoher Aktivität. Auf Basis von Studien,^{788,789} die derartige Untersuchungsmethoden anwenden, kann als gesichert angesehen werden, dass die aktivierende Wirkung, die von Licht bestimmter Intensität und Wellenlänge unabhängig von jeglicher visueller Information ausgeht, sich in einer erhöhten Tätigkeit des Hypothalamus widerspiegelt. Vom Hypothalamus wiederum gehen modulierende Wirkungen auf unterschiedlichste Regionen des Cortex, und damit den ihnen zugeordneten kognitiven Funktionen aus. Die über den Hypothalamus vermittelte höhere Aktivität der corticalen Hirnregionen hält nur während der Lichtexposition an und baut sich entsprechend dem spezifischen Zeitmuster der jeweiligen Region rasch wieder ab. Diese Zusammenhänge konnten sowohl unter Tageslichtbedingungen⁷⁹⁰ als auch während der Nacht durch Beobachtung der gesteigerten Durchblutung von corticalen Hirnregionen festgestellt werden.⁷⁹¹

Und schließlich wurde bereits beschrieben, dass ein geringer Prozentsatz von Axonen der retinalen mcGanglienzellen nicht dem retino-hypothalamischen Trakt sondern der Sehbahn folgen und so auch jene Hirnregionen von nicht visuellen Erregungsmustern erreicht werden, die dem visuellen System zugeordnet sind.⁷⁹² Darüber hinaus bestehen Verbindungen vom retino-hypothalamischen Trakt über den Locus caeruleus des Mittelhirns zum Rückenmark. Über das neuronale noradrenerge System wirkt die Aktivierung des Locus caeruleus wieder auf den Cortex zurück.⁷⁹³

6.2.3.7. Moderation des Zellstoffwechsels

Viele der im Folgenden beschriebenen indirekten Wirkungen des Lichts auf den Zellstoffwechsel basieren auf einer ausreichenden Melatoninversorgung. Diese Versorgung kann nur gewährleistet werden, wenn dem menschlichen Organismus eine exogene Tag-Nacht-Rhythmik mit ausgeprägten Hell- und Dunkelphasen sowie Licht entsprechender physiologisch wirksamer Spektralverteilung angeboten wird.

⁷⁸⁸ Vandewalle (2006)

⁷⁸⁹ Perrin (2004)

⁷⁹⁰ Vandewalle (2006)

⁷⁹¹ Perrin (2004)

⁷⁹² Cajochen (2007)

⁷⁹³ Saper (2005)

6.2.3.7.1. Antioxidative Wirkungen

Der Vorgang der Energiegewinnung innerhalb menschlicher Körperzellen basiert auf oxidativen Prozessen. Die biologische Oxidation ist ein dreiphasiger Prozess, der vorwiegend in, als Mitochondrien bezeichneten, Organellen stattfindet. Dabei werden mit der Nahrung zugeführte Stoffe wie Zucker,⁷⁹⁴ Fette und Amine zunächst in kleine Nährstoffmoleküle aufgespalten. Im anschließenden Zitronensäurezyklus erfolgt ein weiterer Abbau unter Freisetzung von Kohlendioxid und Wasserstoff. Dieser Wasserstoff wird an Nicotinsäureamid-Adenin-Dinukleotid gebunden und mit durch die Atmung aufgenommenem Sauerstoff zu Wasser oxidiert, wobei potenzielle chemische Energie freigesetzt wird.⁷⁹⁵

Obwohl Zellen in Körperregionen wie der Muskulatur oder dem Gehirn, in denen fallweise hoher Energiebedarf auftritt, gesteigerte Atmungsaktivität grundsätzlich bewältigen können, kommt es unter Belastungszuständen zunehmend zu unvollständigen oder fehlerhaften Atmungsabläufen. Dabei entstehen Moleküle und Atome, die Elektronen mit schwachen Bindungen aufweisen. Sie werden freie Radikale genannt. Gemeinsam ist den freien Radikalen ihre hohe Reaktivität. Kommt es in einer Zelle zur Bildung von mehr freien Radikalen als neutralisiert werden können, befindet sich diese Zelle in einem Stoffwechselzustand, der als oxidativer Stress bezeichnet wird. Das am häufigsten unter oxidativem Stress anfallende freie Radikal ist $O_2^{\cdot-}$, weniger oft entstehen H_2O_2 , $\cdot OH$ und andere wie $CO_3^{\cdot-}$, $\cdot NO$ oder $ONOO^-$. Freie Radikale reagieren unter anderem mit zelleigenen Lipiden, Proteinen und DNA-Strukturen.^{796,797}

Die Oxidation von Zellmembran bildenden Lipiden durch freie Radikale führt zu einer Veränderung der Membrandurchlässigkeit. So muss mehr Energie aufgewandt werden, um Membranpotentiale zu bilden und aufrecht zu erhalten. Die Transportleistung durch die Membran sinkt dadurch ebenso, wie die Fähigkeit zur Weiterleitung von Erregungspotentialen.^{798,799}

Die Proteine der Zellen sind aus langen Peptidketten aufgebaut. Freie Radikale können chemische Bindungen innerhalb dieser Peptidketten aufbrechen, was zu einer irreparablen Entfaltung der Ketten führt. Derart degeneriert, können die Proteine ihrer strukturgebenden Aufgabe innerhalb der Zelle nicht mehr nachkommen und müssen abgebaut werden. Fallen zu viele oxidierte Proteine an, wird die Zelle durch die nötigen Abbauprozesse überfordert und altert.⁸⁰⁰

⁷⁹⁴ Für den Einfachzucker Glukose beispielsweise lautet die Gesamtbilanz des oxidativen Energiegewinnungsprozesses: $C_6H_{12}O_6 + 6 O_2 + 6 H_2O \rightarrow 6 CO_2 + 12 H_2O + 38 ATP$. Die drei Phasen des Prozesses heißen: Glykolyse, Zitronensäurezyklus und Endoxidation

⁷⁹⁵ Schmidt (2007)

⁷⁹⁶ Schmidt (2007)

⁷⁹⁷ Srinivasan (2005)

⁷⁹⁸ Schmidt (2007)

⁷⁹⁹ Srinivasan (2005)

⁸⁰⁰ Srinivasan (2005)

Und schließlich schädigen die freien Radikale $O_2 \bullet^-$, H_2O_2 und $\bullet OH$ die DNA im Zellkern, indem sie Strangbrüche und Modifikationen von DNA-bildenden Basen hervorrufen. Dadurch wird die Replikation der DNA unterbunden oder es kommt zu Fehlpaarungen, die als Mutationen weiter repliziert werden. Die Anhäufung derartiger Mutationen trägt vorrangig zur Zellalterung und zur Entstehung von zellalterungsbedingter neurodegenerativer Krankheiten bei.⁸⁰¹

Unterschiedliche körpereigene Mechanismen dienen daher der Neutralisierung von freien Radikalen, beispielsweise die Bereitstellung von Stoffen, die bevorzugt freie Radikale binden, ohne dadurch geschädigt zu werden. Diese Stoffe werden als Antioxidantien bezeichnet.⁸⁰² Melatonin zeigt eine besonders hohe antioxidative Wirksamkeit auch im Vergleich mit anderen bekannten Antioxidantien wie Vitamin C und E.^{803,804} Diese speziell hohe Wirksamkeit des Melatonin basiert auf unterschiedlichen Mechanismen. So führt die Bindung von freien Radikalen an Melatonin nicht nur zu einer Neutralisierung der hoch oxidativen Stoffe, sondern es entstehen auch die Ausgangsstoffe für die Bildung von N¹-acetyl-N²-formyl-5-methoxykynuramin und N¹-acetyl-5-methoxykynuramin, die dem Schutz der Zelle dienen. Darüber hinaus aktiviert Melatonin antioxidative Enzyme wie Superoxid-Dismutase und hemmt gleichzeitig prooxidative Enzyme wie Stickstoffmonoxid-Synthase.^{805,806}

Die Effektivität von Melatonin in der Prävention und Fortschrittshemmung von altersbedingten neurodegenerativen Krankheiten wie der Alzheimer, der Parkinson oder der Chorea Huntington Krankheit ist daher Gegenstand aktueller Untersuchungen.^{807,808} So wurde festgestellt, dass die Gehirn-Rückenmarksflüssigkeit von Alzheimer Patienten eine deutlich niedrigere Melatoninkonzentration von durchschnittlich 55 pg/ml aufweist, als die von gleichaltrigen Menschen, die nicht an der Alzheimerkrankheit leiden mit 273 pg/ml.⁸⁰⁹ Wobei das Absinken des Melatonin Spiegels in der Gehirn-Rückenmarkflüssigkeit bereits im vorklinischen Stadium der Alzheimer Krankheit festgestellt werden kann.⁸¹⁰ Ausdrücklich soll an dieser Stelle festgehalten werden, dass die Ursache des Auftretens der Alzheimer Krankheit nach wie vor nicht geklärt ist und unterschiedliche Faktoren, wie eine erbliche Disposition, oxidativer Stress oder chronische Entzündungen in diesem Zusammenhang diskutiert werden. Erhöhter oxidativer Stress wurde auch als Begleiterscheinung beim Auftreten der Parkinson Krankheit festgestellt. So ist im Gehirn von Parkinson Patienten eine erhöhte Oxidation

⁸⁰¹ Srinivasan (2005)

⁸⁰² Schmidt (2007)

⁸⁰³ López-Burillo (2003)

⁸⁰⁴ Reiter (2004)

⁸⁰⁵ Hardeland (2005)

⁸⁰⁶ Srinivasan (2005)

⁸⁰⁷ Reiter (2003)

⁸⁰⁸ Matsubara (2003)

⁸⁰⁹ Liu (1999)

⁸¹⁰ Wu (2003)

von Zellmembran bildenden Lipiden durch freie Radikale festzustellen.^{811,812} Zur Wirksamkeit der Verabreichung von Melatonin bei neurodegenerativen Krankheiten liegen widersprüchliche Studien vor.^{813,814,815,816}

6.2.3.7.2. Lebenserwartung

Bei jeder Zellteilung verkürzen sich die an den Enden der Chromosomen befindlichen als Telomere bezeichneten DNA-Proteinstrukturen. In Zellen, die unter oxidativem Stress stehen, verläuft die Telomerenverkürzung rascher, was zu einer vorzeitigen Einstellung der Teilungsaktivität der Zelle führen kann. Derartig nicht mehr teilungsfähige Zellen befinden sich in einem Zustand, der Seneszenz genannt wird. Obwohl seneszente Zellen noch lange lebensfähig bleiben, trägt die Tatsache, dass sie sich nicht mehr teilen, zur Alterung von Geweben und des Organismus als Gesamtheit bei.⁸¹⁷ Ein effektiver Schutz vor oxidativem Stress erhöht daher die Lebenserwartung wie das folgende Diagramm (Diagramm 47) deutlich macht.^{818,819}

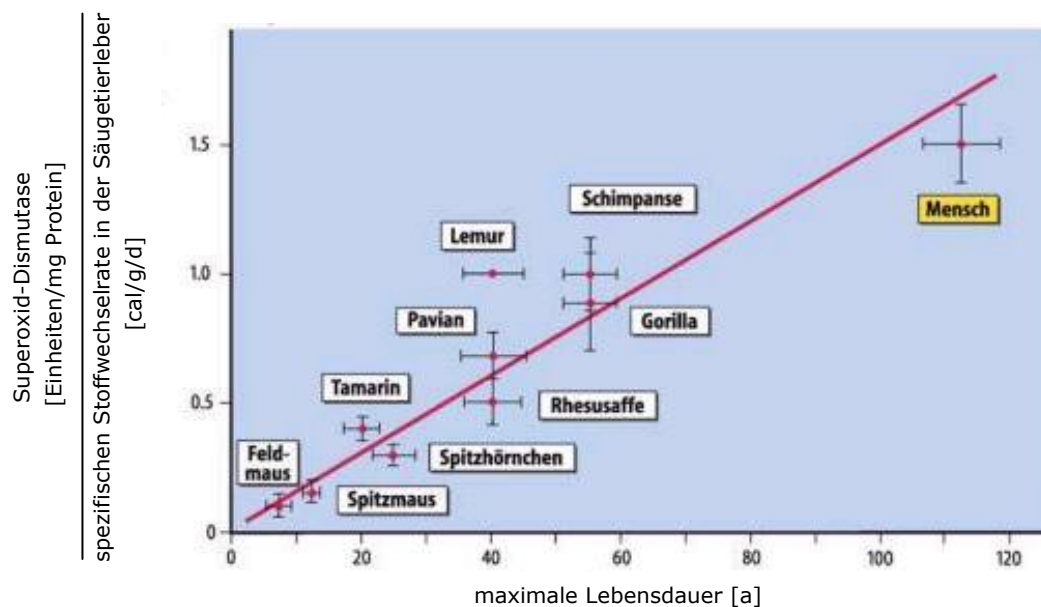


Diagramm 47: Verhältnis von Superoxid-Dismutase und der spezifischen Stoffwechselrate in der Säugetierleber

⁸¹¹ Olanow (1990)

⁸¹² Fahn (1992)

⁸¹³ Antolin (2002)

⁸¹⁴ Escamés (2004)

⁸¹⁵ Benitez-King (2004)

⁸¹⁶ Willis (2004)

⁸¹⁷ Schmidt (2007)

⁸¹⁸ Vgl. Schmidt (2007) modifiziert nach Cutler (1993)

⁸¹⁹ Cutler (1993)

Der oxidative Schutz des Menschen ist im Vergleich zu den anderen Säugetieren besonders hoch, was mit seiner langen Lebensdauer korreliert. Das der abgebildete Zusammenhang zwischen der Qualität des oxidativen Schutzes und der Lebensdauer, wie er zwischen unterschiedlichen Säugetierarten besteht, gleichartig auch auf die Individuen innerhalb einer Art übertragen werden kann, ist derzeit nicht belegbar.

6.2.3.7.3. Onkostatik

Es ist evident, dass von der Zirbeldrüse onkostatistische, das bedeutet das Wachstum von Tumorzellen hemmende, Wirkungen ausgehen. Beobachtet wurden diese onkostatistischen Effekte bei Tumorzellen des Brustkrebs, des Dickdarmkrebs von malignen Melanomen und von Leukämien. In diesem Zusammenhang wird die Beteiligung von Melatonin als in der Zirbeldrüse synthetisiertes Hormon an möglichen onkostatistischen Prozessen diskutiert.⁸²⁰ So belegen umfangreiche Studien, dass ein hoher Östrogenspiegel das Risiko an Brustkrebs zu erkranken, signifikant vergrößert.^{821,822} Melatonin hemmt die Synthese von Östrogenen.⁸²³

Mehrere Untersuchungen an Nachtschichtarbeiterinnen weisen aus, dass sich das Risiko an Brustkrebs zu erkranken, unter den Bedingungen der Nachtarbeit erhöht. Eine Studie an 7.035 Frauen zeigt eine Erhöhung des Brustkrebsrisikos nach mehr als sechs Jahren Nachtschicht um das 1,7 fache im Vergleich zu Tagarbeiterinnen.⁸²⁴ Hingegen zeigt eine Erhebung unter 78.562 Krankenschwestern mit mindestens drei Rotationsdiensten pro Monat in einem Beobachtungszeitraum von zehn Jahren eine geringere Risikoerhöhung um das 1,08 fache, und nach 30 Jahren auf das 1,36 fache.⁸²⁵ Eine weitere Studie unter 78.586 Frauen geht auf das erhöhte Risiko, unter den Bedingungen der Nachtschichtarbeit an Dickdarmkrebs zu erkranken, ein. Es wurde festgestellt, dass sich das Erkrankungsrisiko nach 15 Jahren mit zumindest drei Nachtschichten pro Monat auf das 1,35 fache erhöht.⁸²⁶ An dieser Stelle ist zu betonen, dass die Suppression von Melatonin durch das nächtliche Arbeiten unter Kunstlicht bei weitem nicht der einzige, die Gesundheit belastende Faktor der Nachtarbeit ist und direkte Ursache-Wirkungsbeziehungen daher unzulässig sind.

Schließlich werden dem Melatonin auf Grund seiner die Melaninproduktion hemmenden Wirkung onkostatistische Effekte auf maligne Melanome zugeschrieben.⁸²⁷

⁸²⁰ Schobersberger (2007)

⁸²¹ Chlebowski (2003)

⁸²² Anderson (2006)

⁸²³ Schobersberger (2007)

⁸²⁴ Hansen (2001)

⁸²⁵ Schernhammer (2001)

⁸²⁶ Schernhammer (2003)

⁸²⁷ Schobersberger (2007)

6.2.3.8. Psychophysiologische Wirkungen

Eine Vielzahl von Studien beleuchtet die Zusammenhänge der Wirkung von Licht im sichtbaren Spektralbereich und der Gestimmtheit des Menschen. Betrachtet werden dabei sowohl Strahlungsmangelsituationen als auch Phasen besonders intensiver Bestrahlung.

6.2.3.8.1. Saisonal affektive Depression

Die saisonal affektive Depression, im Folgenden als SAD⁸²⁸ bezeichnet, wurde als jahreszeitlich wiederkehrende Form der Depression erstmals 1984 beschrieben.⁸²⁹ Eine SAD ist im Wesentlichen durch vier Symptome charakterisiert. So zeigt die SAD wiederkehrende schwere Episoden von Depression beginnend im Herbst und endend im Frühjahr. Die SAD tritt an zumindest zwei aufeinander folgenden Jahren auf, wobei die Zeit zwischen Mai und August symptomfrei verläuft. Und schließlich treten im Jahresverlauf mehr Episoden saisonal abhängiger Depressionen auf als andere saisonunabhängige Formen von Depressionen.⁸³⁰

Neben den klassischen Symptomen für Depressionen wie Antriebslosigkeit, Kontaktscheue, schlechte Gestimmtheit und Konzentrationsstörungen zeigt die SAD auch begleitende depressionsuntypische, vegetative Symptome wie erhöhtes Schlafbedürfnis auf Grund mangelnder Schlafqualität⁸³¹, gesteigerten Appetit speziell auf Kohlenhydrate und in Folge Gewichtszunahme.⁸³²

In gemäßigten Klimazonen wird eine Prävalenz von 1-3% der erwachsenen Bevölkerung beobachtet,⁸³³ wobei Frauen 1,8 mal häufiger betroffen sind als Männer.⁸³⁴ Die subsyndromale Form der SAD, bei der die gleiche Symptomatik vorliegt, die Ausprägung aber nicht so schwerwiegend ist, dass von einer Depression gesprochen werden kann, weist eine Prävalenz von etwa 30% auf.⁸³⁵ Unter Kindern tritt die SAD selten auf.⁸³⁶

⁸²⁸ Die Bezeichnung „saisonal affektive Depression“ wurde dem Englischen „seasonal affective disorder“ derart nachempfunden, dass die Abkürzung SAD sowohl in der deutschen wie der englischen Literatur verwendet werden kann.

⁸²⁹ Rosenthal (1984)

⁸³⁰ Winkler (2006)

⁸³¹ Partonen (1998)

⁸³² Rosenthal (2004)

⁸³³ Magnusson (2003)

⁸³⁴ Lam (2002)

⁸³⁵ Kasper (1989)

⁸³⁶ Swedo (1995)

Als Instrument der Erkennung von SAD hat sich der Seasonal Pattern Assessment Questionnaire mit der Abkürzung SPAQ verbreitet.⁸³⁷ Der SPAQ weist tendenziell hohe Prävalenzen⁸³⁸ aus, etwa im Vergleich zu den Ergebnissen des Structured Interview Guide for the Hamilton Depression Rating–Seasonal Affective Disorder mit der Abkürzung SIGH–SAD oder der Seasonal Health Questionnaire mit der Abkürzung SHQ. Der SIGH–SAD und der SHQ differenzieren darüber hinaus auch zwischen SAD und subsyndromaler SAD.^{839,840}

Die pathophysiologischen Ursachen der SAD sind derzeit nicht erschöpfend geklärt. Zu beobachten ist, dass der neurogene Serotoninspiegel bei gesunden Personen einer circaannualen Rhythmik mit einem Minimum im Herbst und Winter unterliegt.⁸⁴¹ Durch diesen saisonalen Tiefstand an neurogenem Serotonin können Disregulationen im Bereich des synaptischen Spalts entstehen, die mit dem Auftreten der SAD in Zusammenhang gebracht werden.⁸⁴²

Bei einer Mehrzahl der SAD Patienten liegt darüber hinaus ein tagsüber erhöhter Melatonin Blutplasmaspiegel vor. Der Anstieg des Melatonin Blutplasmaspiegels nach Eintritt der Dämmerung ist verzögert. Das führt zur Diskussion der hypothetischen Annahme, dass die SAD als eine Störung der circadianen Rhythmik im Sinne einer permanenten nicht synchronisierbaren verzögerten Phasenlage zu verstehen ist.⁸⁴³ Die orale Verabreichung von Melatonin zeigt jedoch keinen Effekt auf die SAD. Die Melatoninversorgung wird daher nicht als kausal für das Auftreten der Krankheit angenommen.^{844,845}

Wie auch bei anderen Depressionen wird bei der SAD eine Beeinträchtigung der Physiologie des Katecholaminsystems vermutet. Zu den Katecholaminen zählen die Hormone und Neurotransmitter Dopamin, Adrenalin und Noradrenalin. Ausgangsstoff für die Biosynthese der Katecholamine ist, wie bei Melatonin, die Aminosäure Tyrosin. Die Katecholamine sind an der Regulation von Blutdruck und Herzfrequenz beteiligt.⁸⁴⁶

Eine saisonal reduzierte Empfindlichkeit der in der Retina vorliegenden Lichtrezeptoren wird auch als einer von mehreren Risikofaktoren für das Auftreten der SAD diskutiert.⁸⁴⁷ Und schließlich wurde über Studien in Familien nachgewiesen, dass eine genetische

⁸³⁷ Magnusson (1997)

⁸³⁸ Als Prävalenz wird der Prozentsatz an Erkrankten innerhalb einer untersuchten Gruppe bezeichnet.

⁸³⁹ Steinhausen (2008)

⁸⁴⁰ Miller (2005)

⁸⁴¹ Neumeister (2001)

⁸⁴² Magnusson (2003)

⁸⁴³ Magnusson (2003)

⁸⁴⁴ Wirz-Justice (1990)

⁸⁴⁵ Schobersberger (2007)

⁸⁴⁶ Miller (2005)

⁸⁴⁷ Patronen (2001)

Disposition für das Auftreten der SAD vorliegt, da 13% bis 17% der Verwandten ersten Grades von SAD Patienten ebenfalls von dieser Krankheit betroffen sind.^{848,849}

Obwohl die, bei der Behandlung der SAD angewendete, Lichttherapie beinahe ausschließlich auf der Verabreichung von Kunstlicht beruht, soll eine kurze Übersicht über die üblich verwendeten Dosierungen und Darreichungsformen gegeben werden. Die gängigste Behandlungsform basiert auf der Aufstellung einer hell leuchtenden Fläche derart, dass am Auge eine Intensität von 2.000 lx bis 10.000 lx erreicht wird. Die Fläche bleibt zwischen 30 Minuten und 120 Minuten erleuchtet, wobei sich der SAD Patient in einem Abstand von 0,5 Metern bis zu einem Meter vor der Abgabefläche aufhalten soll und angehalten wird, hin und wieder in das angebotene Licht zu blicken. Eine andere Verabreichungsform erfolgt über ein mobiles Leuchtmittel, das am Gürtel getragen werden kann und über ein Glasfibrerkabel das nötige Licht in die Gläser einer Brille einbringt. Auch eine morgendliche Simulation des Sonnenaufgangs durch künstliches Licht zeigt Behandlungserfolge. Der künstliche Sonnenaufgang wird dabei etwa eine Stunde vor dem Aufwachen begonnen, wobei eine Leuchte in der Nähe des Kopfes des SAD Patienten Licht kontinuierlich und langsam bis zu einer Intensität von 650 lx ansteigend abgibt. Schließlich zeigt auch ein täglich einstündiger Aufenthalt im Freien unter natürlichem Tageslicht signifikante Behandlungserfolge.^{850,851}

Im Rahmen einer Metastudie wurden 173 Studien zur Wirksamkeit der Lichttherapie evaluiert und schließlich 20 davon vergleichend analysiert. Das Ergebnis dieser Metastudie weist signifikante Behandlungserfolge der oben angeführten Therapieformen mit hellem Licht und auch mittels des künstlichen Sonnenaufgangs aus. Darüber hinaus zeigt die Anwendung des künstlichen Sonnenaufgangs nicht nur Erfolge bei der Behandlung der SAD, sondern auch bei nicht saisonaler Depression deren Symptome im Winter verstärkt auftreten.⁸⁵² In beiden Fällen lässt die Wirkung wenige Tage nach der Behandlung wieder nach, was bedeutet, dass die Therapie den ganzen Winter über angewendet werden muss.⁸⁵³

6.2.3.8.2. Circaanuale Suizidrate

Es konnte ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Suizidrate und der saisonalen wechselnden durchschnittlichen Anzahl an Sonnenscheinstunden pro Tag festgestellt werden. Die höchste Selbstmordrate wurde dabei im späten Frühjahr beobachtet, die niedrigste am Ende des Winters.^{854,855} Diese Korrelation wird im Jahresvergleich umso

⁸⁴⁸ Enoch (2001)

⁸⁴⁹ Schobersberger (2007)

⁸⁵⁰ Magnusson (2003)

⁸⁵¹ Golden (2005)

⁸⁵² Golden (2005)

⁸⁵³ Magnusson (2003)

⁸⁵⁴ Partonen (2004)

⁸⁵⁵ Lambert (2003)

deutlicher, je niedriger die absolute Anzahl der Selbstmorde im Jahr ist.⁸⁵⁶ Darüber hinaus wurde beobachtet, dass die saisonale Ausdifferenzierung der Suizidrate signifikanter wird, je unterschiedlicher die Jahreszeiten ausgeprägt sind.⁸⁵⁷

6.2.3.9. Photobiologische Wirkungen auf die Haut

Neben den Wirkungen der Strahlung im sichtbaren Spektralbereich des Lichtes auf das Auge wird mit der Photoisomerisierung von Bilirubin auch eine Wirkung auf die Haut beschrieben. Andere vom sichtbaren Licht ausgehende photobiologische Wirkungen auf die Haut, abgesehen von der Hauttemperatur, scheinen in der Literatur aktuell nicht explizit auf. Dennoch ist nicht auszuschließen, dass derartige Wirkungen vorliegen. So ist der bereits beschriebene Einfluss sichtbaren Lichts auf den Hauttemperatur Gradient noch nicht erschöpfend erklärt.

6.2.3.9.1. Photoisomerisierung von Bilirubin

Bilirubin entsteht beim Abbau der Hämgruppe des in den Erythrozyten vorliegenden roten Blutfarbstoffes Hämoglobin. Bei diesem Abbauprozess wird Hämoglobin zunächst von einer Makrophage aufgenommen und in die Hämgruppe und das Globin zerlegt. Anschließend erfolgt eine weitere Spaltung der Hämgruppe in ein Eisenion und Protoporphyrin, welches unter Kohlenmonoxidabgabe in Bilirubin übergeht. Das Globin wird in Aminosäuren aufgespalten. Bilirubin wird von der Makrophage an das Blut abgegeben und an das Eiweißmolekül Albumin gebunden, über die Blutzirkulation zur Leber zum weiteren Abbau transportiert. Bilirubin wird, bevor es die Leber erreicht, als unkonjugiert bezeichnet.⁸⁵⁸

In den ersten Lebenstagen von Neugeborenen kann der Abbau von Bilirubin in der Leber zumeist noch nicht in ausreichendem Umfang stattfinden. Einerseits ist die Lebensdauer der Erythrozyten von Neugeborenen verkürzt, was in einem erhöhten Anfall von Bilirubin resultiert, andererseits ist die Leber als abbauendes Organ zumeist noch nicht voll ausgereift. So entsteht ein Überschuss an unkonjugiertem Bilirubin, das in der Haut des Neugeborenen abgelagert wird. Die Haut verfärbt sich gelblich und man spricht von Neugeborenenengelbsucht.⁸⁵⁹

Übersteigt die Menge an konjugiertem Bilirubin den altersbezogenen festgelegten Grenzwert muss der Abbau therapeutisch unterstützt werden, um einem Durchtritt von Bilirubin durch die Bluthirnschranke vorzubeugen. Eine wirksame Therapieform ist die Bestrahlung mit Licht im kurzwelligen sichtbaren Spektralbereich mit der im Folgenden abgebildeten Wellenlängen spezifischen Sensitivität (Diagramm 48).⁸⁶⁰

⁸⁵⁶ Partonen (2004)

⁸⁵⁷ Chew (1995)

⁸⁵⁸ Scholz (2003)

⁸⁵⁹ Scholz (2003)

⁸⁶⁰ Vgl. Abbildung bearbeitet nach: DIN 5031-10 (2000)

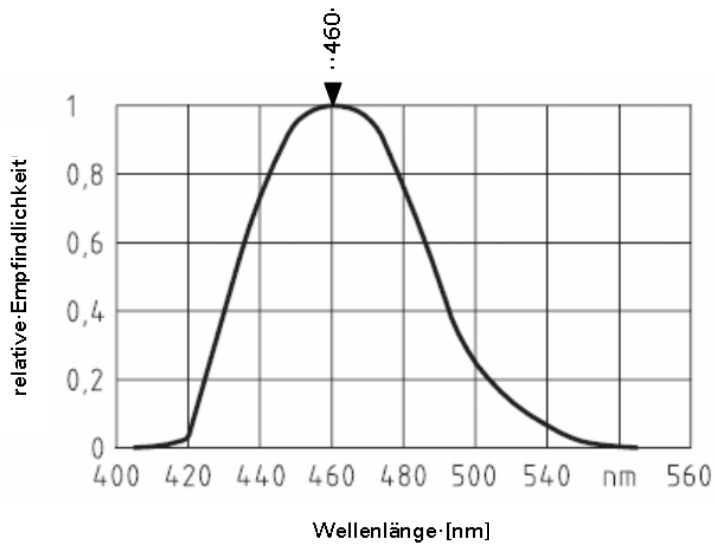


Diagramm 48: Wirkungs-Kurve $s(\lambda)_{bi}$ der Photoisomerisierung von Bilirubin in der Haut

Durch die Bestrahlung mit Licht im dargestellten Wellenlängenbereich wird Bilirubin sowohl photooxidiert als auch durch Photoisomerisation in seine wasserlösliche Strukturform Lumirubin übergeführt. Lumirubin kann mit dem Urin ausgeschieden werden. Eine photobiologisch therapeutische Wirksamkeit wird ab einer Bestrahlungsstärke von 0,05 Watt pro m^2 Haut erreicht. Die Augen des Neugeborenen sind vor der Strahlung zu schützen.⁸⁶¹

⁸⁶¹ DIN 5031-10 (2000)

6.3. Photobiologie im infraroten Spektralbereich

Zunächst ist festzuhalten, dass derzeit keine Wirkungs-Kurven für den infraroten Spektralbereich vorliegen, obwohl unterschiedliche photobiologische Reaktionen für diesen Wellenlängenbereich beobachtet wurden. Dem vergleichsweise geringeren wissenschaftlichen Interesse für die Photobiologie des infraroten Spektralbereiches liegt möglicherweise die Annahme zugrunde, dass von der langwelligen infraroten Strahlung und der niedrigen Energie ihres Photonenstroms keine chemisch modifizierenden Wirkungen ausgehen können.⁸⁶²

Mit dem Fehlen von Wirkungs-Kurven ist jedoch auch die Basis für die Beschreibung der Wechselwirkungen zwischen dem menschlichen Organismus und dem Tageslichtangebot im Sinne der vorliegenden Arbeit nicht möglich. Dennoch soll im Folgenden ein kurzer Überblick über die Photobiologie des infraroten Spektralbereiches gegeben werden, einerseits um die physiologische Bedeutung der infraroten Strahlung zu unterstreichen und andererseits um die Grundlage für weitere Untersuchungen von wirkungsrelevanten Strahlungsdosen im Innenraum zu schaffen.

Als infrarote Strahlung, im Folgenden mit IR-Strahlung abgekürzt, wird die nicht ionisierende Strahlung im Wellenlängenbereich zwischen dem sichtbaren Licht und dem Mikrowellenbereich⁸⁶³ bezeichnet. Die IR-Strahlung ist mit der ultravioletten und der sichtbaren Strahlung als dritter Strahlungsbereich auf Grund ihrer physikalischen Eigenschaften der optische Strahlung zuzurechnen.⁸⁶⁴ Die Unterteilung der infraroten Strahlung in die Teilspektren⁸⁶⁵ IR-A, IR-B und IR-C erfolgte auch auf Grund der in diesen Teilspektren auftretenden unterschiedlichen photobiologischen Wirkungen. Entsprechend der Deutschen Industrienorm umfaßt das IR-A Spektrum die Wellenlängen von 780 bis 1.400 nm und das IR-B Spektrum jene von 1.400 nm bis 3.000 nm.⁸⁶⁶ Die Teilspektren IR-A und IR-B gehören dem terrestrischen Spektrum des Sonnenlichts an und werden gemeinsam auch als nahes IR bezeichnet.⁸⁶⁷ Das IR-C Spektrum umfaßt den Wellenlängenbereich von 3.000 nm bis 1mm, es gehört nicht dem terrestrischen Spektrum an und wird unterteilt in die Teilspektren mittleres IR, das die Wellenlängen von 3.000 nm bis 50.000 nm umfaßt, und fernes IR, dem die Wellenlängen von 50.000 nm bis 1mm zugeordnet sind.⁸⁶⁸ In dem Bereich des mittleren IR fällt die Eigenstrahlung der Erdoberfläche und auch alle gängigen Heizgeräte.

⁸⁶² Meffert (2000)

⁸⁶³ Grundsätzlich grenzt die optische Strahlung am Ende ihres langwelligen Bereiches an jene Wellen an, die von hochfrequenten Feldern ausgehen. Auf Grund der häufigen technischen Anwendungen von Mikrowellen im kurzwelligen Bereich der hochfrequenten Felder, wurden diese als angrenzende Strahlung an das infrarote Licht genannt. Ebenso möglich wäre die Nennung von Radarwellen oder Radiowellen.

⁸⁶⁴ Peharda (2007)

⁸⁶⁵ Infrarot wird bei den Teilspektralbezeichnungen mit IR abgekürzt.

⁸⁶⁶ DIN 5031-7 (1984)

⁸⁶⁷ DIN 5031-7 (1984)

⁸⁶⁸ DIN 5031-7 (1984)

6.3.1. Rezeptororgane im infraroten Spektralbereich

Bis dato wurden physiologisch reizadäquate Reaktionen auf terrestrische IR-Strahlungseinwirkungen bei der Haut beobachtet. Dem Auge bietet die IR-Strahlung nach heutigem Wissensstand keine rezeptoradäquaten Reize, sodass sich die photobiologischen Wirkungen auf unterschiedliche Schädigungen beschränken.

6.3.1.1. Die menschliche Haut

Der strukturelle Aufbau des Organs Haut in den drei Schichten Epidermis, Dermis und Subcutis wurde bereits unter 6.1.1.1 umrissen. Bezugnehmend darauf wird im Folgenden die Rezeption von Reizen aus dem IR-Spektralbereich durch die spezifischen Organellen der Haut eingehender beschrieben.

Grundsätzlich sind die von der terrestrischen IR-Strahlung ausgehenden Reize für zwei unterschiedliche Rezeptoren adäquat. Von beiden Rezeptoren gehen Erregungspotentiale aus, die eine Temperaturempfindung hervorrufen und als Thermorezeptoren bezeichnet werden. Die Thermorezeptoren liegen in den zwei Ausprägungsformen Wärmerezeptor und Kälterezeptor vor, die entsprechend den jeweiligen Funktionszonen unterschiedlich in der Hautfläche verteilt sind.^{869,870} Auf den Handflächen befinden sich innerhalb eines cm² Haut ein bis fünf Kälterezeptoren und 0,4 Wärmerezeptoren. Die höchste Dichte an Thermorezeptoren mit über 13 Kälterezeptoren pro cm² Haut wird im Gesicht erreicht.^{871,872}

Die Thermorezeptoren werden von freien Nervenendigungen im Grenzbereich von Epidermis und Dermis gebildet. Die Kälterezeptoren liegen zu etwa einem Drittel als Endigungen von zahlreich verzweigten, dünnen marklosen Axonen und zu zwei Dritteln als Endigungen markhaltiger nicht verzweigter Axone vor. Sowohl die markhaltigen, wie die marklosen Kälterezeptoraxone reichen in die Epidermis hinein. Die Gesamtheit der Wärmerezeptoren besteht aus marklosen Axonen, deren rezeptive Endstrukturen geringfügig tiefer als die der Kälterezeptoren in der Dermis liegen. Die Enden der marklosen Axone durchdringen vielfach rezeptive Schwann-Zellen, die dann weiträumiger als die freien Nervenendigungen in die Epidermis hineinreichen.⁸⁷³

Die Wahrnehmung thermischer Reize, wie sie von der IR-Strahlung ausgehen, ist abhängig von der Geschwindigkeit des Temperaturwechsels und von der Größe der Hautfläche, auf die diese Reizveränderung einwirkt. So liegt die Wahrnehmungsschwelle umso niedriger, je rascher eine Temperaturveränderung erfolgt und je größer die derart gereizte Hautfläche ist.⁸⁷⁴ Innerhalb eines Grenzbereiches, der als Indifferenztemperatur

⁸⁶⁹ Schmidt (2007)

⁸⁷⁰ Klinke (2005)

⁸⁷¹ Schmidt (2007)

⁸⁷² Deetjen (2004)

⁸⁷³ Klinke (2005)

⁸⁷⁴ Klinke (2005)

bezeichnet wird, kann keine dauerhafte Warm- oder Kälteempfindung wahrgenommen werden. Unter normalen Umgebungsbedingungen liegt die Indifferenztemperatur der menschlichen Haut zwischen 31°C und 36°C. Eine schmerzhafte Hitzeempfindung stellt sich bei dieser Indifferenztemperatur ab 45°C, eine unangenehme Kälteempfindung ab 17°C ein.⁸⁷⁵

Die von den Thermorezeptoren abgehenden Erregungspotentiale zeigen je nach Reizstruktur zwei grundsätzlich unterschiedliche Muster. Bei konstanten oder sich langsam verändernden Temperaturen liegt ein statisches Temperaturempfinden vor, das durch regelmäßige Erregungspotentialmuster mit Frequenzen je nach Temperaturniveau charakterisiert ist wie das folgende Diagramm (Diagramm 49) zeigt.⁸⁷⁶

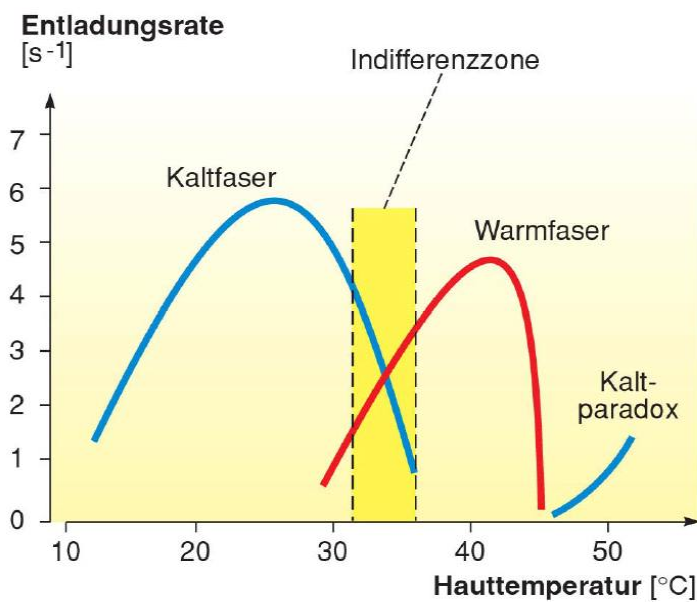


Diagramm 49: Charakteristik der Vermittlungsfrequenz von Erregungspotentialmuster durch Wärme- und Kälterezeptoren bei statischem Temperaturempfinden

Die Wärmerezeptoren zeigen unter statischem Temperaturempfinden einen kontinuierlichen Anstieg der Frequenz der vermittelten regelmäßigen Erregungspotentialmuster bei einer Hauttemperatur zwischen 30°C und 43°C. Über 43°C erfolgt ein rascher Frequenzabfall. Die Kälterezeptoren vermitteln ab etwa 35°C eine mit fallender Temperatur bis ca. 27°C kontinuierlich steigende Frequenz regelmäßiger Erregungspotentialmuster, darunter eine bis etwa 10°C rasch fallende Frequenz.^{877,878}

Ein dynamisches Temperaturempfinden liegt bei raschen Temperaturveränderungen vor, wobei sowohl die von den Kälte- wie den Wärmerezeptoren vermittelten Erregungspotentiale eine überschießende Erhöhung der Entladungsfrequenzen zeigen. Über das statische und das dynamische Temperaturempfinden hinaus zeigen einige

⁸⁷⁵ Schmidt (2007)

⁸⁷⁶ Deetjen (2004)

⁸⁷⁷ Schmidt (2007)

⁸⁷⁸ Deetjen (2004)

Kälterezeptoren noch ein Empfinden, für das ein als Kälteparadox bezeichnetes Entladungsmuster charakteristisch ist. Diese Kälterezeptoren entwickeln Erregungspotentiale bei rascher Erhitzung der Haut über 45°C.^{879,880}

Die von den Thermorezeptoren der Haut vermittelten Erregungspotentiale werden in die Hirnregion des Hypothalamus, der das Zentrum der Thermoregulation des warmblütigen Gesamtorganismus darstellt, als bestimmende peripheren Größen projiziert. Die zentralen Erregungspotentiale, die über die Körperkerntemperatur Auskunft geben, werden an den Hypothalamus vorwiegend von Thermorezeptoren des Rückenmarks vermittelt, wobei hier die Anzahl der Wärmerezeptoren deutlich über der der Kaltrezeptoren liegt.⁸⁸¹ Darüber hinaus befinden sich Thermorezeptoren auch in den Muskeln, den Gelenken, den Gefäßen und der Knochenhaut. Die endogenen Anpassungsvorgänge zur Thermoregulation des Organismus sind vielfältig und betreffen beispielsweise Veränderungen der Stoffwechselrate, aber auch den Umfang der Wärmeabgabe über die Haut. So wird etwa die Hautdurchblutung entsprechend angepasst oder die Aufrichtung der Körperbehaarung herbeigeführt.⁸⁸²

6.3.1.1.1. Eindringtiefe der infraroten Strahlung in die menschliche Haut

Grundsätzlich ist das Transmissionsvermögen der IR-Strahlung durch die Schichten der menschlichen Haut größer, als das der sichtbaren Strahlung oder der UV-Strahlung. Die wellenlängenabhängige Eindringtiefe der IR-Strahlung unterliegt individuellen und hautregionalen Schwankungen. Die Werte der folgenden Tabelle (Tabelle 16) gelten daher exemplarisch.^{883,884,885}

	IR-A bei 1.000 nm	IR-B bei 1.400 nm	IR-C zwischen 3.000 nm und 6.000 nm
Epidermis bis 0,1mm	35%	72%	100%
Dermis bis 2mm	48%	20%	
Subcutis bis 6mm	17%	8%	

Tabelle 16: Prozentanteile der auf die Hautoberfläche auftreffenden IR-Strahlung, die unterschiedlich tiefe Hautschichten erreichen

⁸⁷⁹ Schmidt (2007)

⁸⁸⁰ Klinke (2005)

⁸⁸¹ van den Berg (2003)

⁸⁸² van den Berg (2003)

⁸⁸³ Kanitakis (2002)

⁸⁸⁴ Schieke (2003)

⁸⁸⁵ Meffert (2000)

Die IR-A Strahlung wird zum überwiegenden Teil an den in der Dermis verlaufenden Blutgefäßen absorbiert und in Wärme umgewandelt. Über die Blutzirkulation wird diese Wärme im Körper verteilt. Die IR-B Strahlung wird zu mehr als zwei Drittel bereits in der Epidermis absorbiert. Es kommt daher zu keiner nennenswerten Erwärmung des zirkulierenden Blutes durch Strahlung in diesem Spektralbereich. Jedoch wird durch die IR-B Strahlung eine Erweiterung kleiner Blutgefäße und damit die Durchblutung der Dermis gefördert. Wie bereits beschrieben, liegt die IR-C Strahlung außerhalb des Spektralbereiches der terrestrischen Strahlung. IR-C Strahlung geht etwa von künstlichen Licht- oder auch von Wärmequellen aus. Die IR-C Strahlung wird in ihrer Gesamtheit von der Epidermis und dem Grenzbereich zur Dermis absorbiert.⁸⁸⁶

6.3.1.2. Das menschliche Auge

Wie bereits erwähnt ist derzeit keine von der IR-Strahlung ausgehender Reiz bekannt, der für die Rezeption am Auge adäquat ist. Beobachtet wurde hingegen ein häufiges Auftreten von Linsentrübung unter Angehörigen von stark Hitze exponierten Berufsgruppen.⁸⁸⁷ Daraus wurde gefolgert, dass starke Bestrahlung des Auges mit Strahlung des infraroten Spektralbereiches zur Ausbildung einer als Hitzestar bezeichneten Schädigung der Linse führt.⁸⁸⁸ Dabei ist jedoch zu beachten, dass durch IR-Strahlung, entsprechend der jeweiligen Wellenlängen, unterschiedliche Energieflüsse im Auge ausgelöst werden. So kann die langwellige sichtbare Strahlung und die IR-A Strahlung den dioptrischen Apparat weitgehend passieren, wodurch die Strahlungswirkung vorwiegend an der Retina erfolgt. Teile der IR-A Strahlung werden im Bereich der Iris absorbiert und dort in Wärme umgewandelt, die kontinuierlich in die umgebenden Medien abfließt. Selbst wenn der Grenzwert für die Entstehung einer wärmebedingten Linsentrübung im Wellenlängenbereich um 900 nm mit einer Bestrahlungsdosis von 277 J/cm² am Auge⁸⁸⁹ für den ungünstigen Fall einer weitgeöffneten Pupille, einer bereits vergilbten Linse und einer hohen Absorption an einer braun gefärbten Iris sehr niedrig angesetzt wird, ist vordringlich mit einer Schädigung der Retina, weniger mit einer krankhaften Veränderung der Linse zu rechnen.^{890,891}

Die IR-B Strahlung wird hingegen bereits an der äußeren Oberfläche der Hornhaut absorbiert und geht dort in Wärme über, die an die angrenzenden Medien abgegeben wird. Zeigen sich also hitzebedingte Linsentrübungen ohne dass gleichzeitig Beeinträchtigungen der Retina beobachtet werden, ist davon auszugehen, dass die schädigende Wirkung von der IR-B und IR-C Strahlung ausgeht, weniger aber von der sichtbaren und der IR-A Strahlung.⁸⁹²

⁸⁸⁶ Meffert (2000)

⁸⁸⁷ Okuno (1993)

⁸⁸⁸ Lateinische Bezeichnung: Katarakt

⁸⁸⁹ Im Originaltext liegt die Angabe in der Einheit [mW/cm²] vor. Die Umrechnung auf [J/cm²] erfolgte um eine einfachere Vergleichbarkeit mit Angaben, die aus anderen Quellen übernommen wurden, zu ermöglichen.

⁸⁹⁰ Kanski (2008)

⁸⁹¹ Okuno (1993)

⁸⁹² Okuno (1993)

6.3.2. Photoadaptive Wirkungen im infraroten Spektralbereich

Obwohl es bis dato nur wenige Untersuchungen betreffend die Photoadaptation der Haut durch IR-Strahlung gibt, liegen übereinstimmende Beobachtungen vor, die die Bedeutung der Strahlung innerhalb dieses Spektralbereiches für die Moderation des menschlichen Organismus unterstreichen.

6.3.2.1. Modulation von Absorption und Brechung

Mehrere Studien belegen, dass eine Erwärmung der menschlichen Haut durch Bestrahlung mit langwelligem sichtbaren Licht und Strahlung des IR-A Spektralbereiches ihre optische Eigenschaften verändert.^{893,894,895,896} So wurde gleichzeitig mit dem, durch eine Bestrahlung im Wellenlängenbereich von 550 nm bis 980 nm hervorgerufenen, Ansteigen der Hauttemperatur auch eine stetige stärker werdende Brechung der Strahlung bis zum Fünffachen des Ausgangswertes in der Epidermis und der Dermis beobachtet. Auch eine Zunahme der Absorption der Strahlung wurde mit steigender Hauttemperatur festgestellt. Die genauen Wirkmechanismen dieser beiden Phänomene sind noch nicht bekannt, wobei als Grund für die stärkere Brechung eher ein physikalischer Zusammenhang und für die Erhöhung der Absorption ein physiologischer Prozess angenommen wird. Klar ist, dass sowohl die stärkere Brechung als auch die erhöhte Absorption dazu führen, dass die Eindringtiefe der langwelligen sichtbaren beziehungsweise der IR-A Strahlung mit steigender Hauttemperatur reduziert wird.^{897,898,899} Die beschriebene photoadaptive Hautreaktion wird in der klinischen Medizin zur Diagnose von Diabetes verwendet, da die Haut von an Diabetes erkrankten Menschen frühzeitig strukturellen Veränderungen unterliegt, die die Photoadaptationsfähigkeit schwächen.⁹⁰⁰

6.3.3. Photophysiologische und Photopathologische Wirkungen im infraroten Spektralbereich

Wie eingangs beschrieben wurde bis dato davon ausgegangen, dass von der IR-Strahlung keine chemisch modifizierenden oder die Molekularstruktur verändernden Wirkungen ausgehen können.⁹⁰¹ Die IR-Strahlung verursacht lediglich eine Veränderung der Vibrationsgeschwindigkeit und der Rotationsmuster von Molekülen.⁹⁰² Das in den menschlichen Zellen vorliegende Chromophor, das mit Strahlung des infraroten Spektralbereiches in Wechselwirkung treten kann, ist Wasser. Absorptionsmaxima für IR-

⁸⁹³ Laufer (1998)

⁸⁹⁴ Khalil (2003)

⁸⁹⁵ Yeh (2003)

⁸⁹⁶ Skinner (1999)

⁸⁹⁷ Laufer (1998)

⁸⁹⁸ Khalil (2003)

⁸⁹⁹ Yeh (2003)

⁹⁰⁰ Yeh (2003)

⁹⁰¹ Meffert (2000)

⁹⁰² Schieke (2003)

Strahlung zeigt Wasser bei 940 nm, 1.180 nm und bei 1.380 nm. Erreicht die IR-Strahlung der entsprechenden Wellenlänge das in der Haut eingelagerte Wasser, verändert es den Schwingungszustand seiner Moleküle. Ob noch weitere Chromophore im menschlichen Organismus vorliegen, die mit der IR-Strahlung in Wechselwirkung treten, ist derzeit nicht geklärt.⁹⁰³

Ob und welche photobiologischen Wirkungen von dieser Schwingungszustandsveränderung der Wassermoleküle ausgehen, ist weitgehend unbekannt. Es können jedoch auch molekulare Reaktionen im Zusammenhang mit der IR-Strahlungsexposition der Haut nachgewiesen werden, die über eine Beeinflussung der Vibration und Rotation von Molekülen weit hinausgehen. Ob es sich dabei um direkt oder indirekt vermittelte Wirkungen oder Wechselwirkungen handelt, ist derzeit wenig bekannt. Ebenso können die Folgen dieser Wirkungen aktuell nicht erschöpfend erklärt oder in ihrer Bedeutung für den Gesamtorganismus bewertet werden.^{904,905}

Bestätigt werden konnten Wechselwirkungen zwischen der UV-Strahlung und der IR-Strahlung.⁹⁰⁶ So ist zu beobachten, dass das Gen Collagenase in einer zeit- und dosisabhängigen Beziehung durch die Bestrahlung im IR-A Spektralbereich vermehrt in der Haut aktiviert wird, das Aktivitätsniveau des endogenen Antagonist der Collagenase aber unverändert bleibt. Als Auslöser für diesen molekularen Prozess war bis dato nur das Einwirken von UV-Strahlung bekannt. Bemerkenswert ist, dass bereits bei einer IR-A Bestrahlungsdosis von 200 J/m² Haut, die Anzahl der aktiven Collagenase Genen bereits um das 2,5 fach höher ist als die Anzahl der Antagonisten. Diese Dosis wird in unseren Breiten an klaren Sommertagen innerhalb von zwei bis drei Stunden erreicht. Ein Ungleichgewicht zwischen aktiven Collagenase Genen und endogenen Collagenase Hemmern wird in Zusammenhang mit unterschiedlichen degenerativen Prozessen wie rheumatischen Erkrankungen, Tumorwachstum und Metastasierung, aber auch mit positiven Effekten wie einer verbesserten Wundheilung gebracht.⁹⁰⁷ Über diese Wirkung auf die Aktivierung von Genen hinaus, wurde auch ein von der IR-Strahlung ausgehender Einfluss auf die Vermittlung endogener Erregungspotentiale festgestellt.^{908,909}

6.3.3.1. Erythembildung

Wie bereits im Kapitel 6.1.3.1 beschrieben, wird eine als Erythem bezeichnete Hautrötung durch eine lokal stärkere Durchblutung hervorgerufen. Im infraroten Spektralbereich treten nach der Bestrahlung der Haut in Abhängigkeit von der angewandten Wellenlänge Erytheme unterschiedlicher Qualität auf.⁹¹⁰

⁹⁰³ Meffert (2000)

⁹⁰⁴ Meffert (2000)

⁹⁰⁵ Meffert (2008)

⁹⁰⁶ Schieke (2003)

⁹⁰⁷ Schieke (2003)

⁹⁰⁸ Schroeder (2008)

⁹⁰⁹ Schieke (2003)

⁹¹⁰ Schulungbaum (1994)

6.3.3.1.1. Erytheme der IR-A Strahlung

Nach einer nur wenige Minuten andauernden intensiven Verabreichung von IR-A Strahlung mit einer Bestrahlungsstärke von 3.000 W/m² erwärmt sich die Haut auf über 45°C und heftige Hitzeschmerzen treten auf. Noch während der Bestrahlung stellt sich eine homogene Rötung ein, die sich unmittelbar intensiv ausprägt und nach Beendigung der Applikation kontinuierlich abklingt bis sie nach etwa 40 Minuten wieder gänzlich verschwunden ist. Das IR-A Erythem greift nur geringfügig auf nicht bestrahlte Hautregionen über.⁹¹¹

6.3.3.1.2. Erytheme der IR-C Strahlung

Die Verabreichung von IR-C Strahlung mit einer moderaten Bestrahlungsstärke von 500 W/m² Haut führt rasch zu einer schwachen, vorerst gleichmäßigen und auf die Hautregion der Applikation begrenzte Rötung. Das Erythem klingt innerhalb von 30 Minuten wieder vollständig ab, wobei sich die Färbung ungleichmäßig rückbildet, sodass dendritisch geformte, dunkler gefärbte Strukturen erkennbar werden. Wird die Bestrahlungsstärke erhöht, rötet sich die Haut schneller und intensiver. Die für das IR-C Erythem typischen dendritischen Strukturen greifen auch auf nicht bestrahlte Hautregionen über und bleiben auch nach Stunden noch gut sichtbar.⁹¹²

6.3.3.2. Photokarzinogenität

Ein ähnliches Erscheinungsbild wie die IR-C Erytheme zeigt das Erythema ab igne. Es entsteht an Hautregionen, die regelmäßig starker Überwärmung an der Grenze zum Hitzeschmerz ausgesetzt sind. Das Erythem ab igne tritt als Summationseffekt nach Monaten bis Jahren ständig wiederkehrender IR-Bestrahlung auf und zeigt zunächst rote dendritische Verfärbungen der betroffenen Hautstellen, die später ins Bräunliche übergehen. Am Grund der irreversiblen Hautveränderung können sich Plattenepithelkarzinome bilden. Festzuhalten ist, dass diese Karzinome durch regelmäßige IR-Strahlung hervorgerufen werden, die in ihrer Intensität und Wellenlänge nicht vom terrestrischen Spektrum ausgehen, wie regionale Bezeichnungen dieser Krebsform wie „schottischer Kaminkrebs“ oder „irischer Torffeuer Krebs“ verdeutlichen.^{913,914}

6.3.3.3. Hautalterung

Auch im Zusammenhang mit unterschiedlichen Prozessen der strahlungsexpositionsbedingten Hautalterung wurden Wechselwirkungen zwischen der UV- und der IR-Strahlung beobachtet. So reduziert sich die Anzahl der durch UV-Bestrahlung teilungsunfähig gewordenen Zellen bei einem Sonnenbrand signifikant, wenn im Vorfeld eine Bestrahlung im infraroten Spektralbereich stattgefunden hat. Ebenso

⁹¹¹ Meffert (2008)

⁹¹² Meffert (2008)

⁹¹³ Meffert (2008)

⁹¹⁴ Schieke (2003)

reduziert eine Vorbehandlung der Haut mit IR-Strahlung die Anzahl der durch UV-Bestrahlung absterbenden Bindegewebszellen. Darüber hinaus entwickeln die Hautzellen durch eine IR-Bestrahlung einen verbesserten Schutz vor unter UV-Bestrahlung entstehenden Zellgiften.⁹¹⁵

Diskutiert wird ein durch IR-Strahlung hervorgerufener Anstieg von freien Radikalen in der Haut. So wird vermutet, dass durch die Absorption von IR-Strahlung in den Mitochondrien der Vorgang der Zellatmung gestört wird und so, wie bereits unter 6.2.3.7.1 beschrieben, das Auftreten von oxidativem Stress, sowie in weiterer Folge von beschleunigter Zell- und Gewebsalterung begünstigt wird. Bemerkenswert ist, dass eine Erhöhung der Anzahl der freien Radikale bereits bei einer IR-A Bestrahlung mit einer nur geringen Bestrahlungsdosis von 30 J/m² beobachtet wird.⁹¹⁶

6.3.3.4. Herzkreislaufsystem

Grundsätzlich führt die durch IR-Strahlung hervorgerufene Erwärmung der Haut zu einer stärkeren peripheren Durchblutung, was die Herztätigkeit anregt. Bei regelmäßiger Anregung der Herztätigkeit durch Wärmeanwendungen kommt es durch langfristige Adaptation zu einer Veränderung der vegetativen Regulation der Herzmuskulatur und damit zu einer Reduktion von Bluthochdruck. Ob sich dieser Effekt auch abseits einer präventiven oder therapeutischen Behandlung durch Erwärmung der Haut durch längeres Verweilen im Freien bei entsprechendem terrestrischen Strahlungsangebot einstellt, ist nicht bekannt.⁹¹⁷

6.3.3.5. Andere Wirkungen

Schließlich wird die IR-Strahlung in unterschiedlicher Darreichungsform zur Therapie verschiedener Krankheiten wie etwa Entzündungen, Autoimmunkrankheiten, Krebserkrankungen sowie zur Verbesserung der Wundheilung und zur Schmerztherapie eingesetzt.^{918,919,920,921} Ob Wirkungen, wie sie bei der IR-Strahlungstherapie beobachtet werden, auch beim Aufenthalt im Freien unter Einwirkung des terrestrischen IR-Spektrums auftreten, beziehungsweise welche Schwellenwerte erreicht werden müssen, ist nicht untersucht. Auch im Bereich der physiopsychologischen Wirkungen der IR-Strahlung unter Einbeziehung des thermischen Komforts besteht weiterer Forschungsbedarf.⁹²²

⁹¹⁵ Schieke (2003)

⁹¹⁶ Schroeder (2008)

⁹¹⁷ Meffert (2000)

⁹¹⁸ Meffert (1990)

⁹¹⁹ Kelleher (1999)

⁹²⁰ Dees (2002)

⁹²¹ Danno (2001)

⁹²² Hodder (2007)

6.4. Zusammenfassung Photobiologie des Menschen

In Kapitel 6 wurden die wichtigsten derzeit bekannten Wirkungen, die vom terrestrischen Strahlungsangebot im ultravioletten, im sichtbaren und im infraroten Spektralbereich auf den menschlichen Organismus ausgehen, beschrieben. An dieser Stelle sollen jene Wirkungen, die im Kontext mit dem Aufenthalt im Gebäudeinneren relevant sind nochmals zusammenfassend skizziert werden.

6.4.1. Skizze ausgewählter photobiologischer Wirkungen im ultravioletten Spektralbereich

Der ultraviolette Strahlungsbereich des terrestrischen Spektrums wird im Wellenlängenbereich von 280 nm bis 400 nm betrachtet.⁹²³ Von den für die Photobiologie wesentlichen Rezeptororganen Augen und Haut, kommt der Haut unter dem Blickwinkel der vorliegenden Arbeit vordringliche Bedeutung zu.

Die Haut reagiert auf die terrestrische Strahlung im ultravioletten Bereich auf unterschiedliche Weisen adaptiv. So bildet sich die oberste funktionale Schicht beschleunigt nach, wodurch es zu einer als Lichtschwiele bezeichneten Verdickung kommt.^{924,925} Weiters wird unter der Einwirkung von UV-Strahlung das in der Haut vorliegende Melanin chemisch verändert und räumlich feiner verteilt. Diese Prozesse werden unter dem Begriff Sofortpigmentierung zusammengefasst.⁹²⁶ Schließlich erfolgt unter UV-Bestrahlung die vermehrte Synthese des Pigments Melanin selbst. Man spricht dann von verzögerter Pigmentierung. Gemeinsam ist den beschriebenen adaptierenden Wirkungen, dass sie als Schutz vor Schädigungen interpretiert werden, die mit der Bestrahlung der Haut im ultravioletten Spektralbereich einhergehen.⁹²⁷

Sie Schädigungen der Haut durch die terrestrische Sonnenstrahlung werden unter dem Begriff der photopathologischen Wirkungen zusammengefasst. An dieser Stelle werden ausgewählte photopathologische Wirkungen für den ultravioletten Spektralbereich angeführt. So wird eine durch UV-Strahlung hervorgerufene Veränderung der molekularen Struktur der DNA-Stränge in den Kernbereichen der Zellen der Haut als Pyrimidin-Dimerisierung bezeichnet. Dabei verkleben die Doppelstränge der DNA derart miteinander, dass die Fähigkeit zur Replizierung verloren geht, wodurch Alterungsprozesse beschleunigt werden.⁹²⁸

Weiters führt UV-Bestrahlung zu einer lokal stärkeren Durchblutung der Haut, die zur Bildung einer Rötung führt, die als Erythem bezeichnet wird. Die Strahlungs-dosis, die

⁹²³ Es wird auf Grund des Absorptionsverhaltens der Erdatmosphäre nur Nahe ultraviolette Strahlung im Umfang der Wellenlängen von 200 nm bis 400 nm betrachtet und hier im speziellen die Wellenlängen über 280 nm. Ferne und extreme Ultraviolette Strahlung sind für den vorliegenden Text nicht relevant.

⁹²⁴ Fitzpatrick (1986)

⁹²⁵ Pearse (1987)

⁹²⁶ Ortonne (2003)

⁹²⁷ Fritsch (2004)

⁹²⁸ Buselmaier (2006)

notwendig ist, um ein Erythem hervorzurufen wird minimale erythemale Dosis genannt. Sie ist vom Hauttyp und dem Zustand der Haut eines Individuums abhängig und liegt beim in Mitteleuropa häufig auftretenden Hauttyp II, bei etwa 250 J/m². Es wird davon ausgegangen, dass die verstärkte Durchblutung dem Organ Haut einen erhöhten Stoffwechsel und damit die der Strahlungsbelastung entsprechende Versorgung sowie die Entsorgung von Abfallprodukten ermöglicht. Bei einer Dosis von etwa vier MED tritt Sonnenbrand⁹²⁹ auf.⁹³⁰

UV-Strahlung kann zu einer krankhaften Wucherung durch Vermehrung bösartiger Zellen in der Haut führen, die als Photokarzinome bezeichnet werden. Die drei am häufigsten auftretenden Photokarzinome sind das Basaliom, das Spinaliom und das maligne Melanom. Basaliome und Spinaliome entstehen durch Absorption von Photonen durch DNA-Strukturen in den Kernen unterschiedlicher Zellen der Haut.⁹³¹ So sind im Fall des Basalioms die Zellkerne embryonaler Haarkeime betroffen, Spinaliome hingegen bilden sich in oberflächennahe liegenden epidermalen Keratinozyten. Das maligne Melanom entsteht durch eine indirekt strahlungsbedingte Schädigung der DNA-Struktur von Melanin synthetisierenden Zellen, den Melanozyten.⁹³² Das Auftreten eines Photokarzinoms kann nicht mit konkret quantifizierbaren Strahlungsdosen in Zusammenhang gebracht werden. Es besteht aber ein Bezug zwischen der Auftrittshäufigkeit von Photokarzinomen und einem entsprechenden Expositionsumfang einerseits, sowie den Expositionsmustern andererseits. Wobei ein erhöhtes Risiko bei unregelmäßiger Exposition speziell für das maligne Melanom beobachtet wird, sowie ein erhöhtes Risiko bei langer Expositionsdauer speziell für das Spinaliom.⁹³³

Schließlich sind die photophysiologicalen Wirkungen anzuführen, die von der Bestrahlung der Haut im UV-Spektralbereich ausgehen. Dabei ist die Photosynthese von Vitamin D₃ mit ihrer vielfältigen Bedeutung für die unterschiedlichsten Abläufe im Gesamtorganismus Mensch von besonderer Wichtigkeit.

Die Photosynthese von Vitamin D₃ nimmt ihren Ausgang von einer Änderung der molekularen Bindungsstruktur eines Sterans, das als Stoffwechselprodukt der Verdauung in der menschlichen Haut vorliegt. Dieser Prozess kann ab einer Schwellenstrahlung von etwa 18mJ/cm² Haut ablaufen.⁹³⁴ Vitamin D₃ wird im Körper mehrfach umgesetzt und in der als Calcitriol bezeichneten Form in der Blutbahn zu unterschiedlichen Zielorganen und Zielzellen befördert.⁹³⁵

Zahlreiche medizinische Studien weisen auf eine weitverbreitete teils drastische Unterversorgung der europäischen Bevölkerung mit Vitamin D₃ hin. Es kommt in Folge zum epidemischen Auftreten von Mangelerscheinungen.⁹³⁶ Unter den klassischen

⁹²⁹ Der medizinische Begriff für Sonnenbrand ist Dermatitis solaris.

⁹³⁰ Taylor (1990)

⁹³¹ Davies (2002)

⁹³² Davies (2002)

⁹³³ Armstrong (2001)

⁹³⁴ Hollys (2005)

⁹³⁵ Pietschmann (2003)

⁹³⁶ Zittermann (2003)

Mangelercheinungen werden Fehlfunktionen im Kalzium- und Phosphatstoffwechsel des Menschen zusammengefasst. Sie liegen Krankheiten des Stoffwechsels von Knochen und Muskeln wie Rachitis und Osteomalazie, Myopathie sowie einem erhöhten Sturzrisiko bei von Osteoporose betroffenen Menschen zugrunde.^{937,938}

Nicht klassische Vitamin D₃ Mangelercheinungen sind vielfach Gegenstand aktueller Forschung, wobei deutlich wird, dass die Unterversorgung mit Vitamin D₃ Einfluss auf unterschiedliche Erkrankungen hat, die aus Sicht der Todesursachen Statistik von höchster Relevanz sind. So wurden Zusammenhänge zwischen dem Vitamin D₃ Status und der Auftrittshäufigkeit von Herzkreislauferkrankungen festgestellt.⁹³⁹ Weiters erhöht Vitamin D₃ Mangel nachweislich das Risiko des Auftretens unterschiedlicher Krebserkrankungen. Dazu zählen Prostatakrebs, Brustkrebs, Darmkrebs, Eierstockkrebs und Non-Hodking Lymphome.⁹⁴⁰ Zudem kommt Vitamin D₃ eine moderierende Funktion im Verlauf von Krebserkrankungen zu.⁹⁴¹

Vitamin D₃ spielt eine entscheidende Rolle bei der Ausdifferenzierung von Zellen im Rahmen angeborener wie erworbener Immunreaktionen.⁹⁴² Auch das Auftreten von Autoimmunkrankheiten steht in Zusammenhang mit der Vitamin D₃ Versorgung, speziell anzuführen sind Multiple Sklerose, Typ 1a Diabetes Mellitus, rheumatoide Arthritis und chronisch entzündliche Darmerkrankungen.⁹⁴³

6.4.2. Skizze ausgewählter photobiologischer Wirkungen im sichtbaren Spektralbereich

Angeführt werden für die Arbeit speziell relevante Wirkungen im Wellenlängenbereich des terrestrischen Solarstrahlungsangebots von 380 nm bis 780 nm, der das sichtbare Licht umfasst.

Im sichtbaren Spektralbereich stellt das Auge nach heutigem Wissenstand das Rezeptororgan mit zentraler Bedeutung dar, wobei auch Wirkungen auf die Haut, wie beispielsweise die Photoisomerisierung von Bilirubin, bekannt sind.⁹⁴⁴ Am Auge ist Grundsätzlich in visuelle und nicht visuelle Lichtwirkungen zu unterscheiden.

Das visuelle System des Menschen wird in die Bereiche Auge, Sehbahn und primäre Sehrinde unterteilt. Innerhalb dieses Systems werden visuelle Reize in körpereigene Erregungspotentiale und weiter in Erregungsmuster übergeführt, die die Grundlage einer kontinuierlichen visuellen Wahrnehmung des Umraumes bilden.⁹⁴⁵ Im menschlichen Auge liegen mit den Stäbchen und drei unterschiedlich ausgeprägten Zapfen insgesamt vier für

⁹³⁷ Holick (2004)

⁹³⁸ Behrman (2000)

⁹³⁹ Framingham heart Study (1948 laufend)

⁹⁴⁰ Krickler (2006)

⁹⁴¹ Tangpricha (2001)

⁹⁴² Pietschmann (2003)

⁹⁴³ Norval (2001)

⁹⁴⁴ DIN 5031-10 (2000)

⁹⁴⁵ Benninghof (2004)

visuelle Reize adäquate Rezeptoren vor. Sie weisen unterschiedliche spektrale Empfindlichkeiten auf und sind bei unterschiedlichen Lichtintensitäten aktiv.⁹⁴⁶

So basiert die visuelle Wahrnehmung bei geringen Beleuchtungsstärken, wie sie beispielsweise in einer klaren Nacht auftreten auf der Tätigkeit der Stäbchen. Man spricht von skotopischem Sehen.⁹⁴⁷ Bei einer Leuchtdichte über 3cd/m^2 sind hingegen die Zapfenrezeptoren in ihren drei Typen aktiv, wodurch die Wahrnehmung von Farben sowie das axial scharfe Sehen möglich wird. Man spricht von photopischem Sehen.⁹⁴⁸ Der Übergang von photopischem und skotopischem Sehen ist fließend. Solange sowohl Stäbchen als auch Zapfen aktiv sind spricht man von mesopischem Sehen.⁹⁴⁹

Die visuelle Wahrnehmung beruht auf der Bildung von Erregungspotentialmustern, die im gesamten visuellen System, ausgehend von den an den Rezeptoren im Auge eingehenden Lichtreizen, gebildet werden.⁹⁵⁰ Die Ausbildung dieser Muster ist komplex und dient der Strukturierung der empfangenen Reize etwa durch die Verstärkung von Kontrasten beispielsweise durch laterale Hemmungen.⁹⁵¹ Dabei werden an benachbarten Rezeptoren einlangende unterschiedliche Reize stärker wahrgenommen als gleichartige Reize.

Die Ausstattung des visuellen Systems mit rezeptiven Feldern ermöglicht neben vielem andern die Wahrnehmung von Ausrichtungen durch die unterschiedliche Sensibilität angrenzender Rezeptoren für idente Reize beziehungsweise Erregungspotentiale. Auch die Wahrnehmung von Farben beruht auf dem Vorhandensein rezeptiver Felder.⁹⁵² Schließlich ermöglichen Vielfache neuronale Verbindungen zwischen dem visuellen und dem motorischen System koordinierte Bewegungen speziell der Pupille, der Augen und des Kopfes als Grundlage einer kontinuierlich räumlich zeitlichen Wahrnehmung.⁹⁵³ Ausreichende Helligkeit und ausgewogene Spektralverteilung sind daher notwendig aber keineswegs hinreichende Bedingung zur Erreichung visueller Ergonomie.

Neben den Stäbchen und den Zapfen befinden sich mit den das Pigment Melanopsin enthaltenden Ganglienzellen auch Rezeptoren im Auge, von denen nicht visuelle Wirkungen hervorrufen werden.⁹⁵⁴ Das nichtvisuelle System umfasst den retinohypothalamischen Trakt und ist Gegenstand aktueller Forschung.⁹⁵⁵ So wurde beobachtet, dass durch Lichtreize an den nicht visuellen Rezeptoren des Auges,

⁹⁴⁶ Klinke (2005)

⁹⁴⁷ Kanski (2008)

⁹⁴⁸ Kanski (2008)

⁹⁴⁹ Schierz (2007)

⁹⁵⁰ Schmidt (2007)

⁹⁵¹ Reichardt (1962)

⁹⁵² Klinke (2005)

⁹⁵³ Ungerleider (1982)

⁹⁵⁴ Berson (2002)

⁹⁵⁵ Rea (2005)

Erregungsmuster an einen neuronalen Kern im Hypothalamus übermittelt werden, die wiederum die Synthese des Hormons Melatonin in der Zirbeldrüse unterdrücken. Man spricht von Melatonin Suppression durch Licht.^{956,957} Nachgewiesen wurde, dass durch die nicht visuellen Rezeptoren im Auge Lichtreize rezipiert werden, die die endogenen Rhythmen des Körpers an den exogenen Tagesrhythmus anpassen. Man bezeichnet diesen Vorgang der Synchronisation bei dem Melatonin eine zentrale Rolle spielt als Entrainment.⁹⁵⁸ Die Ausschüttung von Melatonin während der Dunkelheit ist für die Regeneration des menschlichen Organismus von besonderer Wichtigkeit, da Melatonin ein besonders wirksames Antioxidantium ist. Das bedeutet, Melatonin kann freie Radikale binden, die im Rahmen unvollständiger Zellatmungsprozesse entstanden sind und die unterschiedliche Schädigungen von Zellorganellen und DNA-Strukturen hervorrufen.⁹⁵⁹

Über die nicht visuellen Rezeptoren im Auge wird nachweislich auch die subjektive Munterkeit und die objektive Aktiviertheit im Wachzustand, etwa die Körpertemperatur, die Herztätigkeit oder die Hirnaktivität, möglicherweise auch die Quantität und Qualität des Schlafes, beeinflusst.⁹⁶⁰

Weiters werden auch Zusammenhänge zwischen dem Angebot an Licht im sichtbaren Spektralbereich und der Gestimmtheit des Menschen beobachtet. So tritt in den Monaten mit geringem Tageslichtangebot vermehrt eine spezielle Form der Depression auf, die als saisonal affektive Depression bezeichnet wird und neben der klassischen Symptomatik einer Depression auch mit vegetativen Störungen wie ungezügelm Appetit und gesteigertem Schlafbedürfnis einhergeht.⁹⁶¹ Vermutet wird ein Zusammenhang zwischen dem Auftreten der saisonalen affektiven Depression und dem Absinken der Konzentration des Neurotransmitters Serotonin in den synaptischen Spalten von Neuronen im Gehirn.⁹⁶²

6.4.3. Skizze ausgewählter photobiologischer Wirkungen im infraroten Spektralbereich

Das terrestrische Spektrum umfasst den Wellenlängenbereich der IR-Strahlung zwischen 780 nm und 3000 nm.⁹⁶³ Da der Photonenstrom der vergleichsweise langwelligen IR-Strahlung nur niedrige Energie aufweist, gehen von dieser Strahlung keine chemischen Modifikationen im menschlichen Organismus aus, sondern lediglich molekulare Schwingungszustandsveränderungen, vorwiegend von Wassermolekülen.⁹⁶⁴ Das zentrale Rezeptororgan für den infraroten Spektralbereich ist die Haut, in deren mittleren Schichten Blut zirkuliert und in deren tiefen Schichten Wasser in großen Mengen eingelagert ist. Auf Grund der Langwelligkeit der IR-Strahlung werden sämtlicher dieser Schichten in relevantem Ausmaß erreicht.⁹⁶⁵

⁹⁵⁶ Brainard (2001)

⁹⁵⁷ Thapan (2001)

⁹⁵⁸ Roenneberg (1997)

⁹⁵⁹ Schmidt (2007)

⁹⁶⁰ Cajochen (2007)

⁹⁶¹ Rosenthal (1984)

⁹⁶² Praschak-Rieder (2008)

⁹⁶³ DIN 5031-7 (1984)

⁹⁶⁴ Meffert (2000)

⁹⁶⁵ Schieke (2003)

Von der IR-Strahlung und der langwelligen Strahlung im sichtbaren Spektralbereich gehen adaptive Wirkungen auf die menschliche Haut aus. So wird durch entsprechende Strahlungsexposition der Haut eine Erwärmung hervorgerufen von der eine Veränderung der Absorptionseigenschaften und des Lichtbrechungsverhaltens derselben ausgeht. Diese Veränderungen reduzieren wiederum die Eindringtiefe auftreffender Strahlung.⁹⁶⁶ Darüber hinaus werden Wechselwirkungen zwischen der Strahlung des UV-Spektralbereiches und des IR-Spektralbereiches dahingehend beobachtet, dass die degenerativen Wirkungen der UV-Strahlung durch vorangegangene IR-Bestrahlung reduziert werden.⁹⁶⁷

Eine photophysiologische Wirkung der Strahlung im IR-Spektralbereich besteht in der Aktivierung des Gens Collagenase, das bei der Wundheilung eine Rolle spielt, aber auch im Zusammenhang mit degenerativen Prozessen wie rheumatischen Erkrankungen steht.⁹⁶⁸

Ebenfalls wird durch die Bestrahlung im infraroten Spektralbereich die Bildung von, je nach Wellenlänge unterschiedlich ausgeprägten Erythemen beobachtet.⁹⁶⁹ Darüber hinaus dürfte durch IR-Strahlung der oxidative Stress der Hautzellen erhöht werden.⁹⁷⁰

⁹⁶⁶ Yeh (2003)

⁹⁶⁷ Meffert (2000)

⁹⁶⁸ Schieke (2003)

⁹⁶⁹ Schulungbaum (1994)

⁹⁷⁰ Schroeder (2008)

6.4.4. Auswahl geeigneter Wirkungs-Kurven für die weitere Bearbeitung

Für einige der beschriebenen Wirkungen liegen Wirkungs-Kurven vor, welche die Intensität einer spezifischen photobiologischen Reaktion in Bezug zur Wellenlänge des Lichts setzen. Im folgenden Diagramm sind ausgewählte Wirkungs-Kurven entsprechend Wellenlängen bezogen abgebildet (Diagramm 50).⁹⁷¹

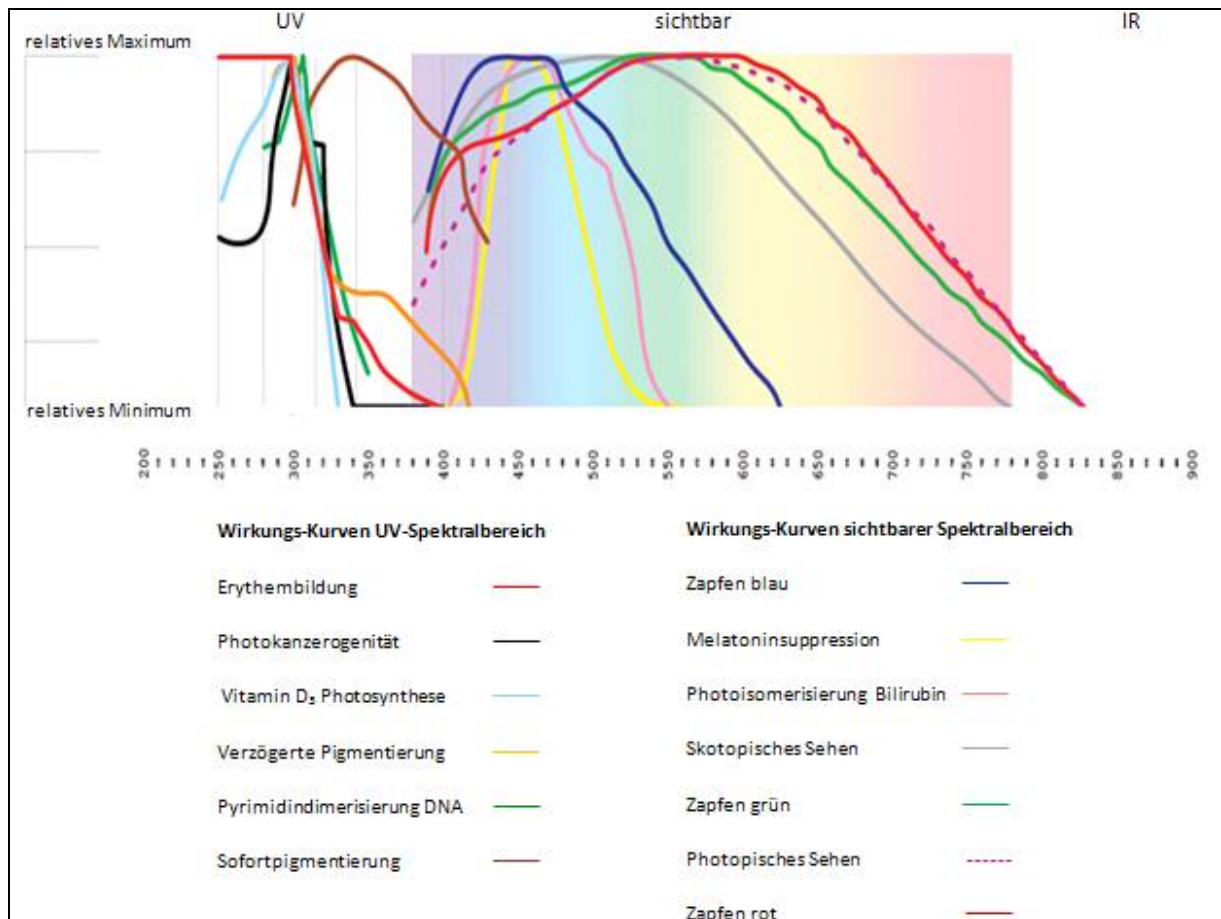


Diagramm 50: Ausgewählte photobiologische Wirkungs-Kurven des Menschen

Diese Wirkungs-Kurven können im Sinne der vorliegenden Arbeit mit dem Wellenlängen bezogenen terrestrischen Sahlungsangebot und der spektralen Durchlässigkeit unterschiedlicher Funktionsglasscheiben gefaltet werden. Für diese Faltungen werden ausgehend von den in Kapitel 6 beschriebenen photophysiologischen und photopathologischen Wirkungen jene Wirkungs-Kurven ausgewählt, die von hoher allgemeiner Relevanz sind und für die Dosis-Wirkungsbeziehungen beziehungsweise Schwellwerte zur Erreichung einer Wirksamkeit definiert sind.

⁹⁷¹ Hammer R., In der Abbildung wurden die Wirkungs-Kurven entsprechend der in Kapitel 6 angeführten Werte in einem spektralen Band überlagert. Die grafische Aufbereitung erfolgte durch Radinger G.

Entsprechend werden aus dem Spektralbereich der UV-Strahlung die Wirkungs-Kurve zur Erythembildung und die Wirkungs-Kurve zur Vitamin D₃ Photosynthese ausgewählt. Für die Erythembildung ist eine Hauttyp bezogene Minimaldosis definiert. Da das Auftreten eines Erythems nach Verabreichung dieser individuellen minimalen erthemalen Dosis zwar keine unmittelbaren Schädigungen hervorruft, vom Betroffenen aber als Schwelle zum Auftreten einer potentiellen photopathologischen Gefährdung wahrgenommen und verstanden werden kann, erscheint die Auswertung der Wirkungs-Kurve zur Erythembildung zur Ermittlung objektiver Aussagen im Sinne der weiteren Arbeit als besonders geeignet. Für das Einsetzen der Vitamin D₃ Photosynthese liegen mehrfach belegte Schwellenwerte vergleichbarer Größenordnung vor. Auf Grund der vielfältigen Bedeutung des Vitamin D₃ für die Gewährleistung unterschiedlicher humanphysiologischer Abläufe wird die Wirkungs-Kurve zur Vitamin D₃ Photosynthese im Rahmen der folgenden Faltungen ausgewertet.

Aus dem sichtbaren Spektralbereich werden die Wirkungs-Kurven zum photopischen Sehen und die Wirkungs-Kurve zur Melatonin Suppression zur weiteren Bearbeitung ausgewählt. Wie bereits im Kapitel 6.2.2 erläutert, stellen die Qualitäten Helligkeit und spektrale Ausgewogenheit die Grundlage zur Erreichung visueller Ergonomie dar. Eine eingehende Auseinandersetzung mit dieser visuellen Ergonomie ist im Rahmen dieser Arbeit nicht vorgesehen. Entsprechend stellen die Werte der V- λ Kurve, die aus einer Mittelung hervorgehen und nicht die Reaktivität eines spezifischen Chromophors abbilden, eine geeignete Annäherung an die generelle Helligkeitsempfindlichkeit des menschlichen Auges unter den Bedingungen des photopischen Sehens im Sinne der vorliegenden Arbeit dar.

Die derzeit bekannten nicht visuellen Wirkungen im sichtbaren Spektralbereich gehen auf die Reaktivität des Chromophors Melanopsin zurück. Für die weiterführende Auswertung steht die Wirkungs-Kurve zur Melatonin Suppression als mittelbare photophysiologische Reaktion zur Verfügung. Dieser Wirkungs-Kurve sind die drei unterschiedlichen Dosis-Wirkungs-Kurven zur circadianen Phasenverschiebung, zur subjektiven Munterkeit und zur Suppression des Melatonins selbst zugeordnet. Entsprechend der Phasen besonderer Empfindlichkeit innerhalb der endogenen circadianen Rhythmik des Menschen, werden die erreichbaren Strahlungsdosen, für die circadiane Phasenverschiebung fünf Stunden vor und fünf Stunden nach 12:00 Ortszeit ermittelt.

Auf Wirkungen im infraroten Spektralbereich und auch auf vermutete Wechselwirkungen kann auf Grund des Fehlens von entsprechenden Wirkungs-Kurven nicht eingegangen werden. Das macht die Dringlichkeit weiterführender Forschung auf diesem Gebiet der Photobiologie deutlich.

C. HAUPTTEIL

7. Potentialstudie „Photophysiologie im Innenraum“

Um die unter 2.1. angeführte Hypothese zum ursächlichen Zusammenhang epidemisch auftretender Lichtmangelerscheinungen und dem lang andauernden Aufenthalt hinter Verglasungen zu überprüfen, wird die folgende Frage aufgeworfen.

7.1. Fragestellung

Welche quantitative und qualitative physiologische Wirksamkeit kommt jenen Spektralanteilen des Tageslichtes zu, die nach dem Durchgang durch eine technische Funktionsglasscheibe den Innenraum erreichen? Davon ausgehend wird untersucht, ob die derart vorliegende Tageslichtversorgung geeignet ist, die Gesundheit des Menschen zu erhalten, gegebenenfalls zu fördern beziehungsweise, ob sie Mängel oder Schädigungen verursacht.

7.2. Methodik

Die Bearbeitung der Fragestellung wird methodisch im Rahmen einer, in mehrere Arbeitsschritte untergliederte, Potentialstudie durchgeführt. Zunächst werden Referenzbedingungen in Bezug auf den konkreten Ort der Untersuchung und aussagekräftige Auswertungszeitpunkte festgelegt. Entsprechend der, durch den Untersuchungsort und den Auswertungszeitpunkt definierten Sonnengeometrie wird die jeweilige Ausrichtung der Messflächen bestimmt.

Als Ausgangsbasis für die Ermittlung des Sonnenstrahlungsangebotes nach dem Durchgang durch technische Funktionsglasscheiben ist zunächst die spektrale Bestrahlungsintensität der extraterrestrischen Strahlung aus relevanten Quellen auszuwählen und für die vorliegende Arbeit festzuschreiben. Im Anschluss wird aus dem Strahlungsdurchgang der extraterrestrischen Strahlung durch die Erdatmosphäre, die Spektralverteilung und Bestrahlungsstärke der terrestrischen Strahlung ermittelt. Nun wird der Strahlungsdurchgang der so determinierten terrestrischen Strahlung durch ausgewählte technische Funktionsglasscheiben abgebildet und derart das Sonnenstrahlungsangebot in einem modellhaft vereinfachten Innenraum eruiert.

Schließlich wird das Sonnenstrahlungsangebot im Innenraum mit vordringlich relevanten und durch die aktuelle medizinische Literatur definierten Wirkungs-Kurven gefaltet und so das vorliegende Wirkpotential nach dem Lichtdurchtritt durch eine Funktionsglasscheibe ermittelt. Das Wirkpotential im Innenraum und im Außenraum wird zu den definierten Referenzzeitpunkten verglichen und aus der medizinischen Fachliteratur gesichert

vorliegenden Grenzwerten und Schwellwerten beziehungsweise wirksamen Dosen zum Vergleich gegenübergestellt.⁹⁷²

7.2.1. Referenzzeitpunkte

Im Einklang mit dem Prinzip der Potentialstudie wird festgelegt, sämtliche Berechnungen unter der Randbedingung des wolkenlosen Himmels durchzuführen. Als Referenzzeitpunkte im Jahr werden der jeweils 15. Tag in den Monaten März, Juni, September und Dezember festgelegt. Als Referenzzeitpunkt im Tagesgang wird 12:00 mittags festgelegt. Ausgehend von der Tageszeit abhängigen photophysiologischen Sensitivität des Menschen werden ergänzend auch die Zeitpunkte 07:00 und 17:00 untersucht.

7.2.2. Geografischer Referenzstandort

In Hinsicht auf die Verfügbarkeit von Klimadaten, den Bestand und die Zugänglichkeit möglicher Referenzobjekte sowie das Vorliegen von rechtsverbindlichen Regelwerken, wurde Wien als Referenzort ausgewählt. Konkret wird folglich für alle Untersuchungen die geografische Position von Wien mit 48° nördlicher Breite und 15° östlicher Länge und eine Seehöhe von 202 m beschrieben.⁹⁷³

7.2.3. Extraterrestrische Sonnenstrahlung

Die extraterrestrische Sonnenstrahlung bildet die physikalische Grundlage aller nachfolgenden Berechnungen. In der gegenständlichen Arbeit wird auf die spektrale extraterrestrische Sonnenstrahlung nach Christian A. Gueymard zurückgegriffen.⁹⁷⁴ Das nämliche Spektrum extraterrestrischer Sonnenstrahlung deckt den Wellenlängenbereich von 0,5 nm bis 1.000 µm ab und integriert zu einer Solarkonstante von 1.366,1 W/m².

Jahreszeitliche Schwankungen der extraterrestrischen Bestrahlungsstärke aufgrund des veränderlichen Abstands der Erde von der Sonne werden berücksichtigt. Darüber hinausgehende periodische Schwankungen der Bestrahlungsintensität und der Spektralverteilung, hervorgerufen durch unterschiedliche Sonnentätigkeit, werden vernachlässigt. In Abstimmung mit den Anforderungen der Zielsetzung, dem vorliegenden Datenmaterial und den zur Verfügung stehenden Rechenkapazitäten zur Datenverarbeitung wird der Wellenlängenbereich von 280 nm bis 400 nm in 5 nm Schritten, der über 400 nm bis 1.000 nm in 10 nm Schritten und der über 1.000 nm bis 2.400 nm in 50 nm Schritten aufgelöst dargestellt.

⁹⁷² In den zugeordneten Grundlagenkapiteln 4 und 5 wurden spezielle Aspekte der hier skizzierten Methodik bereits erläutert und begründet.

⁹⁷³ Die Abrundung der geografischen Länge auf 15° wurde vorgenommen zur Vermeidung von softwarebedingten Schwierigkeiten im Zusammenhang mit der in den Zeitzonen festgelegten Zeit und der tatsächlichen Ortszeit.

⁹⁷⁴ Gueymard Christian: User's manual of SMARTS 2.9.5, (2006)
<http://www.nrel.gov/rredc/smarts/> (01.01.2009)

7.2.4. Strahlungsdurchgang durch die Atmosphäre

Die Extinktion der Sonnenstrahlung bei ihrem Durchgang durch die Erdatmosphäre wird unter Verwendung eines parametrisierten Modells zur Abbildung komplexer strahlungsphysikalischer Vorgänge spektral nachvollzogen. Eine detaillierte Beschreibung der physikalischen Modellbildung liegt in Kapitel 4.3 vor. Wie schon mehrfach erwähnt, wird die Atmosphäre im Sinne der Potentialstudie stets als wolkenlos angenommen.

7.2.5. Terrestrische Sonnenstrahlung

Durch spektrale Faltung der extraterrestrischen Sonnenstrahlung mit dem Strahlungsdurchgang durch die Atmosphäre wird die terrestrische solare Bestrahlungsstärke in ihrer spektralen Verteilung zu den Referenzzeitpunkten auf senkrechte, nach dem Sonnenazimut orientierte Messflächen ermittelt.⁹⁷⁵ Die Faltung wird vorgenommen für einen Spektralbereich von 280 nm bis 2.400 nm. Die Ergebnisse werden wie bereits erwähnt in Schritten von 5 nm bis 50 nm ausgeworfen und können sowohl als momentane Bestrahlungsstärke oder, unter der Annahme näherungsweise gleichbleibender Strahlungsbedingungen, auch als stündlich eingestrahlte Energiemenge interpretiert werden.

Weiters wird auch die langjährige stündliche und tägliche Globalstrahlungssumme zu den Referenzzeitpunkten auf die vertikal sonnennachgeführt orientierte Messfläche ermittelt. Sie wird bei der Beurteilung und Interpretation der Ergebnisse als Bezugsgröße herangezogen.

7.2.6. Strahlungsdurchgang durch technische Funktionsglasscheiben

Es werden drei für die aktuelle Baupraxis exemplarische technische Funktionsglasscheiben sowie eine Referenzglasscheibe ausgewählt und in der Charakteristik ihres jeweiligen Strahlungsdurchgangs mathematisch beschrieben und definiert. Derart dargestellt werden eine Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung, eine Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung und eine Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung. Als Referenzglasscheibe für Vergleichszwecke wird die unbeschichtete Einscheiben-Ver Glasung untersucht.

Abgebildet wird jeweils der spektrale Reflexions-, Transmissions- und Absorptionsgrad, wobei auch die Abhängigkeit dieser Größen vom Einstrahlwinkel auf die Glasoberfläche berücksichtigt wird.

7.2.7. Bestrahlungsstärke hinter den Funktionsverglasungen

Durch die spektrale Faltung der Außenbestrahlungsstärke mit dem Transmissionsgrad der Referenzglasscheibe wird die Bestrahlungsstärke unmittelbar hinter dem jeweiligen Funktionsglas ermittelt.

Zu Vergleichszwecken wird mittels Tageslichtsimulation auch der Abfall der Bestrahlungsstärke bei analogen Strahlungsbedingungen mit zunehmender Entfernung

⁹⁷⁵ Mit der vertikalen Orientierung wird die Physiologie des aufrecht stehenden Menschen abgebildet. Mit der einachsigen Nachführung nach dem Sonnenazimut wird der Zielsetzung der Ermittlung des unter realistischen Bedingungen maximal vorliegenden Potentials entsprochen.

von der Glasscheibe untersucht. Dafür wird, bezugnehmend auf die im Umfang der vorgelegten Arbeit in Kapitel 8 enthaltenen zweiten Potentialstudie, ein Modellinnenraum mit einer Breite von 4,6 m und einer Raumhöhe von 2,5 m angenommen, der eine durchgesteckte Wohneinheit mit zwei voll verglasten Fassadenflächen repräsentiert, zugrunde gelegt.

7.2.8. Photophysiologische Wirkungs-Kurven

Von den in Kapitel 6 beschriebenen photophysiologischen und photopathologischen Wirkungen der terrestrischen Solarstrahlung werden jene Wirkungs-Kurven ausgewählt, die von hoher allgemeiner Relevanz sind und für die Dosis-Wirkungsbeziehungen oder Schwell- beziehungsweise Grenzwerte zur Erreichung einer Wirksamkeit, definiert sind. Unter den genannten Gesichtspunkten wurden daher die folgenden photophysiologischen Wirkungen und die dazu vorliegenden Wirkungs-Kurven ausgewählt.

Im Spektralbereich der UV-Strahlung die Wirkungs-Kurve zur Erythembildung und die Wirkungs-Kurve zur Pre-Vitamin D₃ Photosynthese. Beide Wirkungen sind von hoher Relevanz und machen in ihrer Gegensätzlichkeit – die Erythembildung als Reaktion auf Belastung und die Pre-Vitamin D₃ Photosynthese als für die Aufrechterhaltung zentraler physiologischer Abläufe unabdingbare Hormonproduktion – die Bedeutung einer differenzierten Auseinandersetzung mit dem Thema der physiologisch determinierten Solarstrahlungsversorgung in Innenräumen deutlich. Für die Erythembildung ist mit der minimalen erythemalen Dosis eine Hauttyp bezogene Minimaldosis definiert. Für das Einsetzen der Pre-Vitamin D₃ Photosynthese liegt ein mehrfach belegter Schwellwert vor.

Aus dem sichtbaren Spektralbereich werden die Wirkungs-Kurven zur Helligkeitsempfindung unter den Bedingungen des photopischen Sehens und die Wirkungs-Kurve zur Melatonin Suppression zur weiteren Bearbeitung ausgewählt. Jene der photopischen Helligkeitsempfindung, weil die Qualitäten Helligkeit und spektrale Ausgewogenheit die Grundlage zur Erreichung visueller Ergonomie darstellen und damit eine Behandlung in der gegenständlichen Arbeit rechtfertigen, auch wenn der Bezug zur Gesundheit des Menschen nur mittelbar vorliegt. Eine weiterführende Auseinandersetzung mit der visuellen Ergonomie ist nicht Gegenstand dieser Arbeit. Die Wirkung der Melatonin Suppression wurde ausgewählt, weil sie die derzeit einzige nicht visuelle Wirkung im sichtbaren Spektralbereich darstellt, die mittelbar aber doch eindeutig auf die Reaktivität des Chromophors Melanopsin in den mcGanglienzellen der Retina zurückgeht. Der Wirkungs-Kurve der Melatonin Suppression sind die drei unterschiedlichen Dosis-Wirkungs-Kurven zur circadianen Phasenverschiebung, zur subjektiven Munterkeit und zur Suppression des Melatonins selbst zugeordnet. Entsprechend den Phasen besonderer Empfindlichkeit innerhalb der endogenen circadianen Rhythmik des Menschen, werden die erreichbaren Strahlungsdosen fünf Stunden vor und fünf Stunden nach 12:00 Ortszeit ermittelt.

7.2.9. Photobiologische Wirkpotentiale

Aus der spektralen Bestrahlungsstärke unmittelbar hinter den Funktionsglasscheiben wird durch spektrale Faltung mit den genannten vier Wirkungs-Kurven die photobiologisch wirksame Bestrahlungsstärke beziehungsweise, im Fall des photopischen Helligkeitsempfindens, die Beleuchtungsstärke ermittelt. Wie bereits die terrestrische Bestrahlungsstärke und die Bestrahlungsstärke hinter den Funktionsglasscheiben liegen auch die photobiologisch wirksamen Bestrahlungsstärken als momentane Leistungsdichten vor, die darüber hinaus auch als stündliche Energiemengen und somit als Strahlungsdosen dargestellt werden können. Sie werden im Rahmen dieser Arbeit als photobiologische Wirkpotentiale bezeichnet.

Diese Wirkpotentiale stellen unter den beschriebenen Randbedingungen das mögliche Maximalangebot photobiologisch wirksamer Sonnenstrahlung im modellhaften Innenraum dar. Vor diesem Hintergrund müssen die ermittelten Werte auch als Ergebnisse verstanden und interpretiert werden, die unter real üblichen Bedingungen deutlich unterschritten werden. In diesem Sinn werden zwei mindernde Effekte innerhalb dieser Arbeit diskutiert. Erstens die Verhältnismäßigkeit zwischen der terrestrischen Bestrahlungsstärke zum Referenzzeitpunkt mit definitionsgemäß klarem Himmel und jener zum selben Zeitpunkt im langjährigen Mittel und somit unter Einbezug des statistischen Bewölkungsanteils. Zweitens die Verhältnismäßigkeit der Beleuchtungsstärke unmittelbar hinter der Verglasung zu jener in der Raumtiefe, unter der Annahme einer modellhafter Raumgeometrie sowie Oberflächenqualität.⁹⁷⁶

7.2.10. Auswertung

Schließlich werden die Ergebnisse der vier untersuchten photobiologischen Wirkpotentiale – photopischer Helligkeitseindruck, Erythembildung, Pre-Vitamin D₃ Photosynthese und Melatonin Suppression – sowohl numerisch als auch grafisch dargestellt. Zu Vergleichszwecken wird als Referenzgröße vor der photobiologischen Bewertung in gleicher Weise auch die Bestrahlungsstärke dargestellt. Die Ergebnisse sind gegliedert nach erstens den photobiologischen Wirkpotentialen, nach zweitens dem Datum innerhalb des Jahres und nach drittens der Uhrzeit innerhalb des Referenztages.

Am Beginn jedes Kapitels zu einer der photobiologischen Wirkungen werden die über das Spektrum integrierten Wirkpotentiale für alle Referenzzeitpunkte und hinter den drei gewählten technischen Funktionsglasscheiben sowie der Referenzglasscheibe in einer gemeinsamen Tabelle numerisch dargestellt. Zusammengefasst für jeweils ein Datum werden diese Wirkpotentiale darüber hinaus in Säulendiagrammen abgebildet, die einen direkten Vergleich des Wirkpotentials im Außenraum mit jenen hinter den unterschiedlichen Glasscheiben ermöglichen. Gegebenenfalls sind in diesen

⁹⁷⁶ Unter der vereinfachenden Annahme spektral gleich verteilter Reflexionseigenschaften von Raumboflächen kann das Verhältnis der Beleuchtungsstärke zwischen der unmittelbar hinter dem Glas und den in der Raumtiefe angeordneten Messflächen auch auf die physiologischen Wirkpotentiale angewandt werden.

Säulendiagrammen auch die relevanten photobiologischen Schwellwerte beziehungsweise wirksamen Dosen eingetragen.

Schließlich wird in Diagrammen das jeweilige Wirkpotential über der Wellenlänge spektralverteilt dargestellt, wobei für den jeweiligen Referenzzeitpunkt in einem Diagramm stets die Ergebnisse hinter den drei unterschiedenen Funktionsglasscheiben, der Referenzglasscheibe sowie zum Vergleich auch jene im Außenraum gemeinsam dargestellt werden.

7.3. Auswertung Bestrahlungsstärke

Die Bestrahlungsstärke an sich repräsentiert kein photophysiologische Wirkung. Als rein strahlungsphysikalische Größe kann der Bestrahlungsstärke demnach auch keine Wirkungs-Kurve und keine Schwell- und Grenzwerte oder eine wirksame Dosis zugeordnet werden. Die Bestrahlungsstärke wird jedoch als physikalische Bezugsgröße an dieser Stelle ausgewertet und dargestellt.

7.3.1. Ergebnisse

Alle untersuchten Glasscheiben weisen eine hohe Durchlässigkeit in jenen Spektralbereichen auf, in denen das Sonnenlicht sein Intensitätsmaximum hat. Demzufolge ist die Bestrahlungsstärke hinter den Verglasungen im Bereich des sichtbaren Lichts relativ hoch. Sie sinkt jedoch hinter den Glasscheiben mit Beschichtungen im Bereich der infraroten Strahlung rasch und signifikant ab.

Bezogen auf die Außenbestrahlungsstärke beträgt die Bestrahlungsstärke hinter dem unbeschichteten Einscheibenglas etwa 76%, hinter der Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung etwa 43%, hinter der Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung etwa 31% und hinter der Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung etwa 19%. Diese Werte decken sich erwartungsgemäß und notwendigerweise mit den winkelabhängigen Transmissionsgraden der jeweiligen Glasscheiben. Abweichungen zwischen den Ergebnissen zu unterschiedlichen Referenzzeitpunkten sind in der genannten Winkelabhängigkeit des Transmissionsgrades und in der unterschiedlichen spektralen Zusammensetzung der terrestrischen Sonnenstrahlung begründet.

Bemerkenswert ist allenfalls die signifikante Intransparenz des Sonnenschutzglases oberhalb einer Wellenlänge von etwa 1.000 nm, was aber funktional unabdingbar ist, nachdem das Abschirmen von Sonnenstrahlung im Infrarotbereich das zentrale Ziel von Sonnenschutzverglasungen darstellt.

7.3.1.1. Tabellarische Übersicht

In der folgenden Tabelle (Tabelle 17) sind die Bestrahlungsstärken in W/m^2 zu den zehn Referenzzeitpunkten am 15. März um 07:00, um 12:00 und um 17:00, am 15. Juni um 07:00, um 12:00 und um 17:00, am 15. September um 07:00, um 12:00 und um 17:00,

sowie am 15. Dezember⁹⁷⁷ um 12:00 in Absolutwerten auf eine senkrechte, nach dem Sonnenazimut orientierte Messfläche zusammengefasst.

In der ersten Ergebnisspalte sind die Bestrahlungsstärken außen, also unmittelbar vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheibe angegeben. In den nachfolgenden Ergebnisspalten sind die ermittelten Bestrahlungsstärken unmittelbar nach dem Durchgang durch eine unbeschichtete Einscheiben-Verglasung, eine Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung, eine Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung und eine Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung angeführt.

	außen W/m ²	hinter clear float W/m ²	hinter 2-WSG W/m ²	hinter 3-WSG W/m ²	hinter 2-SSG W/m ²
März, 07:00	357	273	142	98	55
März, 12:00	749	577	341	247	157
März, 17:00	357	273	142	98	55
Juni, 07:00	697	542	328	240	150
Juni, 12:00	523	342	179	110	85
Juni, 17:00	697	542	328	240	150
September, 07:00	520	404	231	166	98
September, 12:00	726	555	331	237	155
September, 17:00	520	404	231	166	98
Dezember, 12:00	713	557	325	238	143

Tabelle 17: Bestrahlungsstärken zu den Referenzzeitpunkten

In der anschließend angeführten Tabelle (Tabelle 18) sind die ermittelten Bestrahlungsstärken aus Tabelle 17 als Relativwerte in % angegeben, wobei als Bezugsgrößen die Bestrahlungsstärken zu den jeweiligen Referenzzeitpunkten außen vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheibe mit 100% angegeben werden. Die letzte Zeile der Tabelle führt die Bestrahlungsstärke unmittelbar nach dem Durchgang durch die jeweilige Funktionsglasscheibe als Mittelwert der in den Zeilen oberhalb ausgeworfenen Relativwerte der Bestrahlungsstärke an.

	außen %	hinter clear float %	hinter 2-WSG %	hinter 3-WSG %	hinter 2-SSG %
März, 07:00	100%	77%	40%	27%	15%
März, 12:00	100%	77%	46%	33%	21%
März, 17:00	100%	77%	40%	27%	15%
Juni, 07:00	100%	78%	47%	34%	22%
Juni, 12:00	100%	65%	34%	21%	16%
Juni, 17:00	100%	78%	47%	34%	22%
September, 07:00	100%	78%	44%	32%	19%
September, 12:00	100%	76%	46%	33%	21%
September, 17:00	100%	78%	44%	32%	19%
Dezember, 12:00	100%	78%	46%	33%	20%
Mittelwert	100%	76%	43%	31%	19%

Tabelle 18: Bestrahlungsstärken zu den Referenzzeitpunkten relativ zu außen

⁹⁷⁷ Zu den aus photophysiologischer Sicht relevanten Tageszeitpunkten um etwa 07:00 morgens und um etwa 17:00 nachmittags ist die Sonne noch nicht aufgegangen beziehungsweise bereits untergegangen. Diese beiden Tageszeitpunkte sind daher als Referenzzeitpunkte im Sinne der vorliegenden Arbeit irrelevant.

7.3.1.2. Grafische Darstellung – März

Das folgende Säulendiagramm (Diagramm 51) zeigt die Bestrahlungsstärken in W/m^2 auf eine senkrechte, nach dem Sonnenazimut orientierte Messfläche zu den Referenzzeitpunkten 07:00, 12:00 und 17:00 am 15. März, wobei die erste Säule die Bestrahlungsstärke außen, unmittelbar vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheibe abbildet. Die jeweils vier anschließenden Säulen zeigen die ermittelten Bestrahlungsstärken unmittelbar nach dem Durchgang durch eine unbeschichtete Einscheiben-Verglasung, eine Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung, eine Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung und eine Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung.

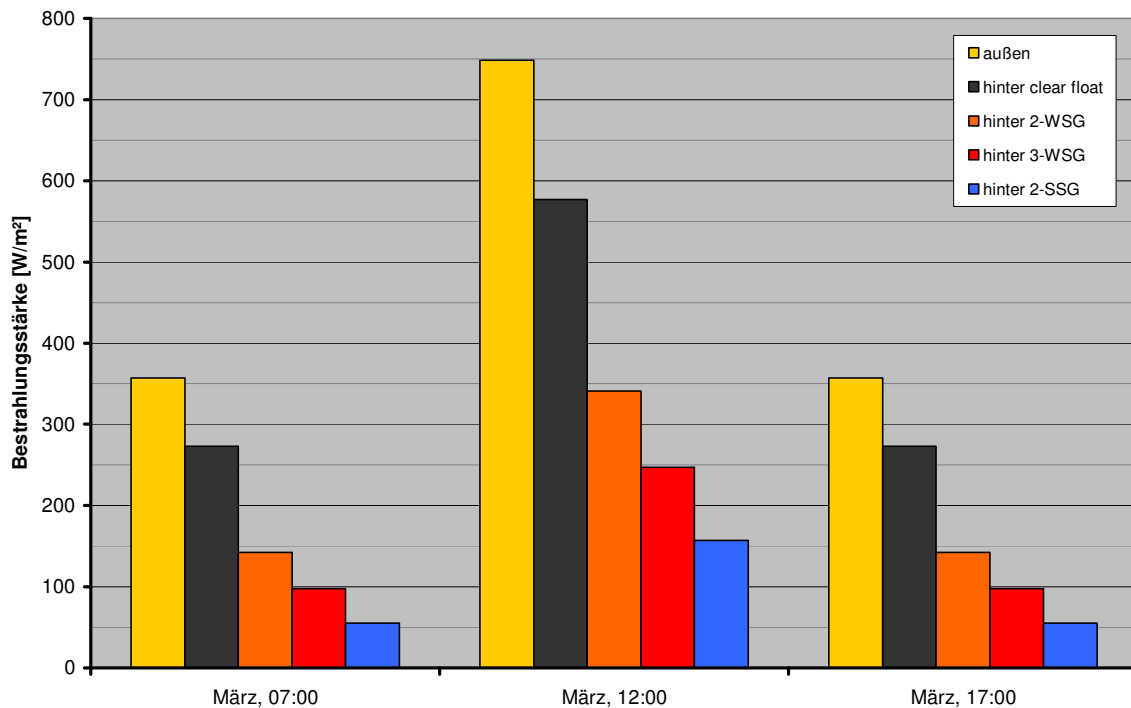


Diagramm 51: Bestrahlungsstärke zu den Referenzzeitpunkten des 15. März

Die drei nachfolgenden Liniendiagramme (Diagramm 52, Diagramm 53, Diagramm 54) zeigen die spektral verteilten Bestrahlungsstärken in $\text{W}/(\text{m}^2\text{nm})$ auf eine vertikal sonnennachgeführte Messfläche zu den Referenzzeitpunkten 07:00, 12:00 und 17:00 am 15. März. Wobei die Linie der Bestrahlungsstärke außen jene Werte angibt, die unmittelbar vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheiben ermittelt wurden. Die weiteren vier abgebildeten Linien stellen die Bestrahlungsstärken unmittelbar nach dem Durchgang durch eine unbeschichtete Einscheiben-Verglasung, eine Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung, eine Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung und eine Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung dar.

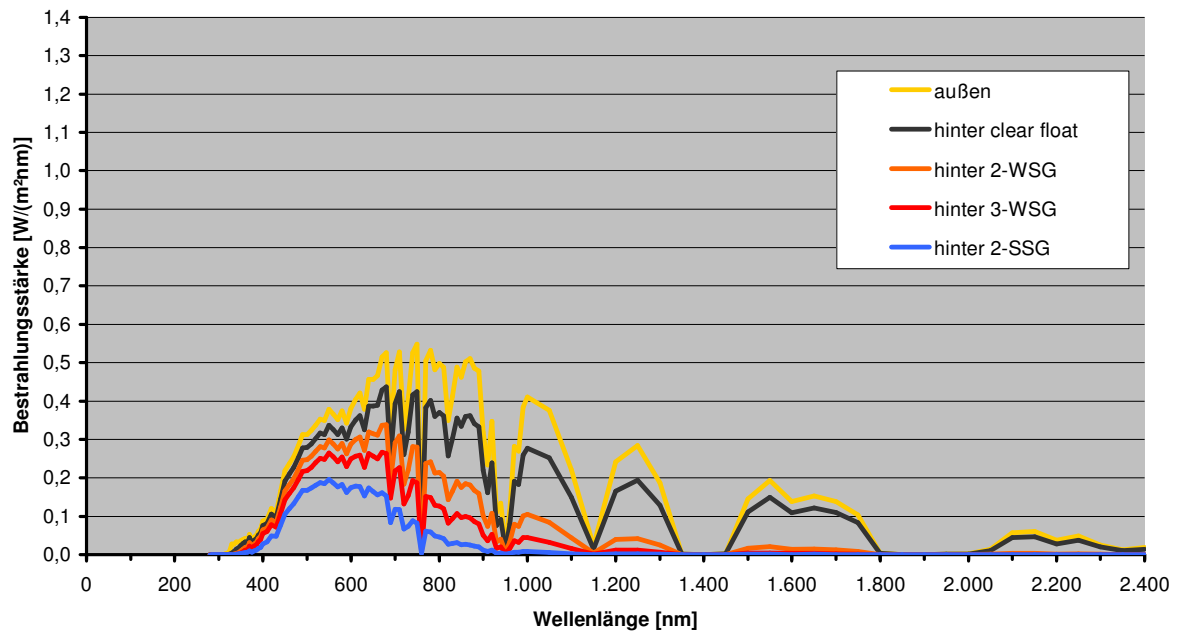


Diagramm 52: Spektrale Bestrahlungsstärke am 15. März um 07:00

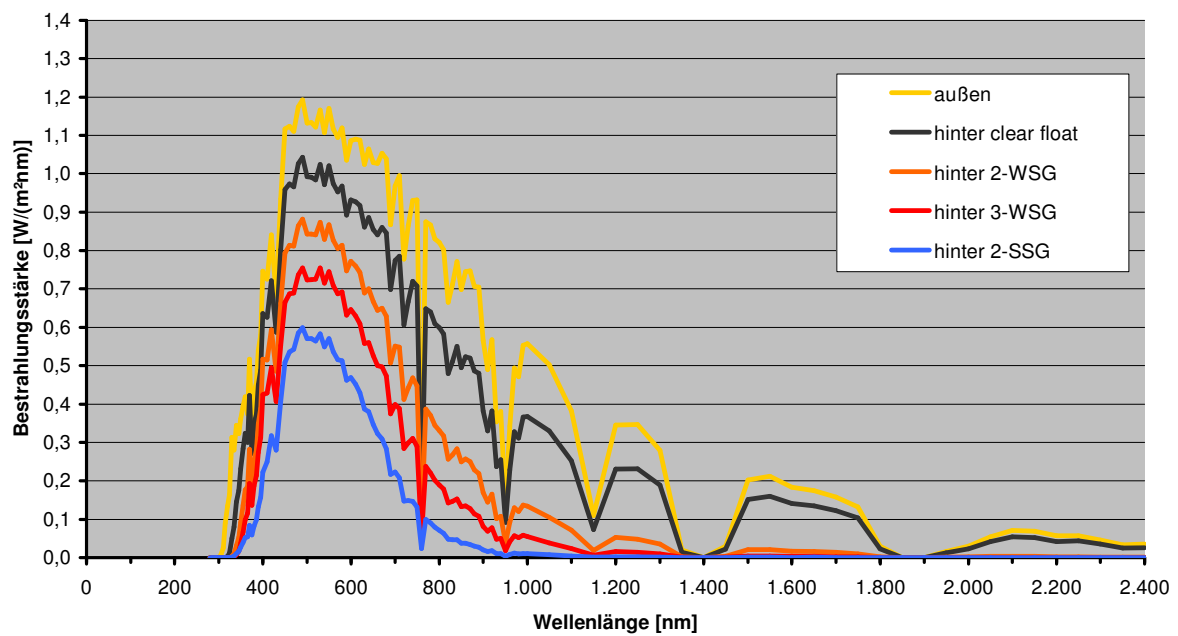


Diagramm 53: Spektrale Bestrahlungsstärke am 15. März um 12:00

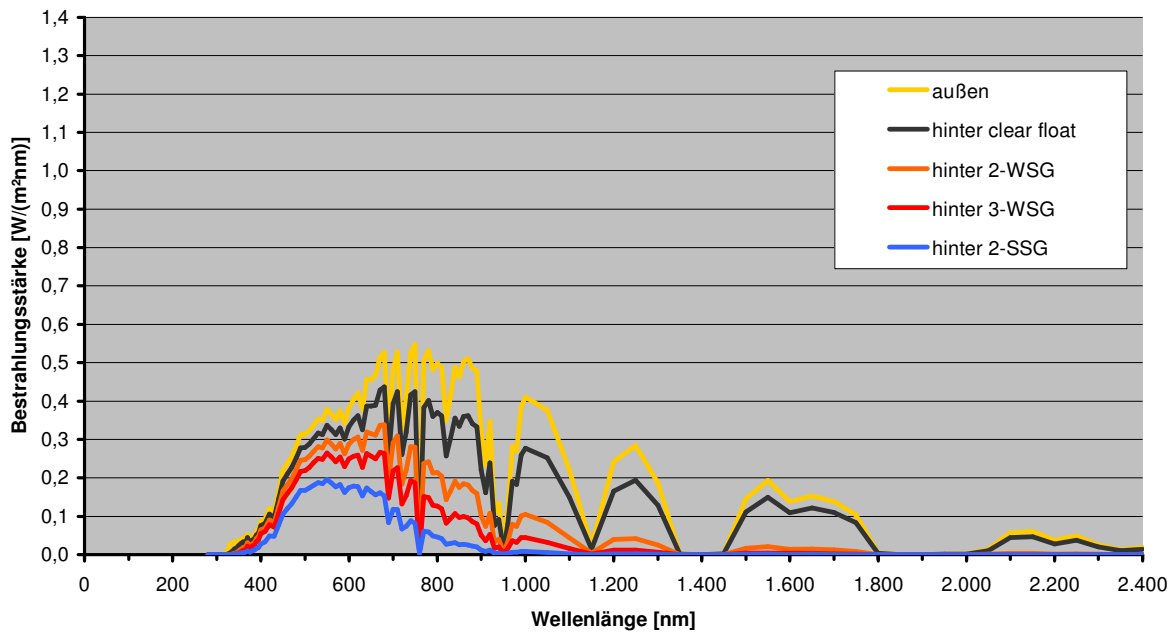


Diagramm 54: Spektrale Bestrahlungsstärke am 15. März um 17:00

7.3.1.3. Grafische Darstellung – Juni

Das Säulendiagramm (Diagramm 55) im Anschluss zeigt die Bestrahlungsstärken in W/m^2 auf eine senkrechte, nach dem Sonnenazimut orientierte Messfläche zu den Referenzzeitpunkten 07:00, 12:00 und 17:00 am 15. Juni. Die erste Säule bildet die Bestrahlungsstärke außen, unmittelbar vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheibe ab. Die jeweils vier anschließenden Säulen zeigen die ermittelten Bestrahlungsstärken unmittelbar nach dem Durchgang durch eine unbeschichtete Einscheiben-Verglasung, eine Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung, eine Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung und eine Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung.

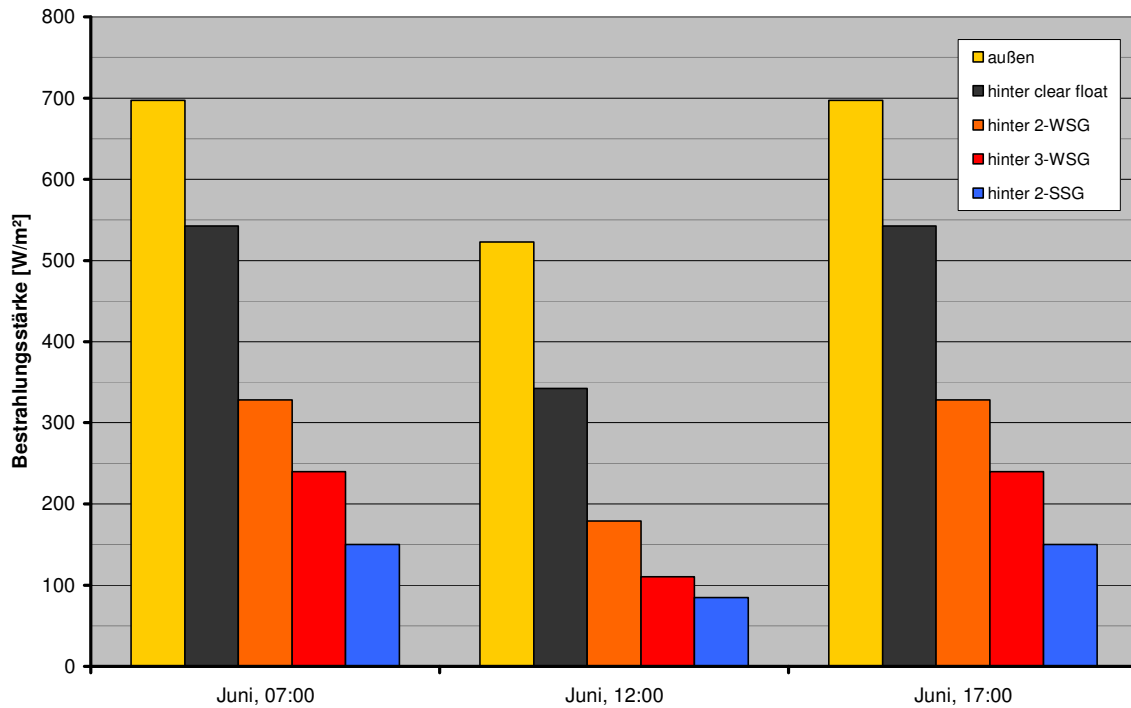


Diagramm 55: Bestrahlungsstärke zu den Referenzzeitpunkten des 15. Juni

Die drei nachfolgend abgebildeten Liniendiagramme (Diagramm 56, Diagramm 57, Diagramm 58) zeigen die spektral verteilten Bestrahlungsstärken in $W/(m^2nm)$ auf eine vertikal sonnennachgeführte Messfläche zu den Referenzzeitpunkten 07:00, 12:00 und 17:00 am 15. Juni. Die Linie der Bestrahlungsstärke außen gibt jene Werte an, die unmittelbar vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheiben ermittelt wurden. Die weiteren vier abgebildeten Linien stellen die Bestrahlungsstärken unmittelbar nach dem Durchgang durch eine unbeschichtete Einscheiben-Verglasung, eine Zweischeiden-Wärmeschutzverglasung, eine Dreischeiden-Wärmeschutzverglasung und eine Zweischeiden-Sonnenschutzverglasung dar.

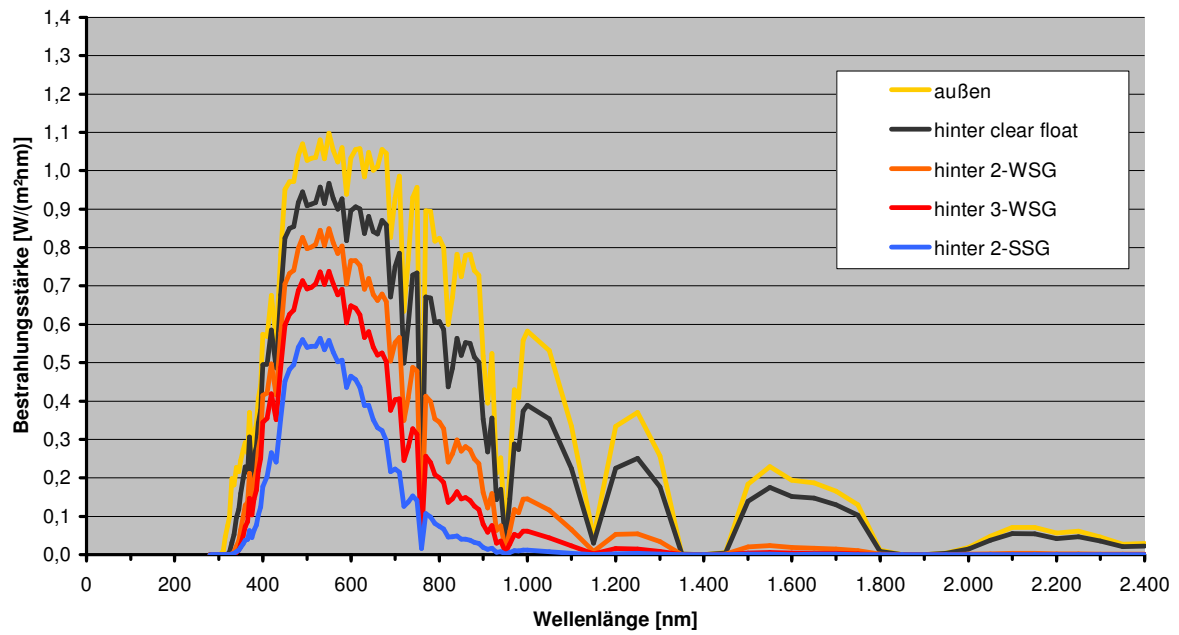


Diagramm 56: Spektrale Bestrahlungsstärke am 15. Juni um 07:00

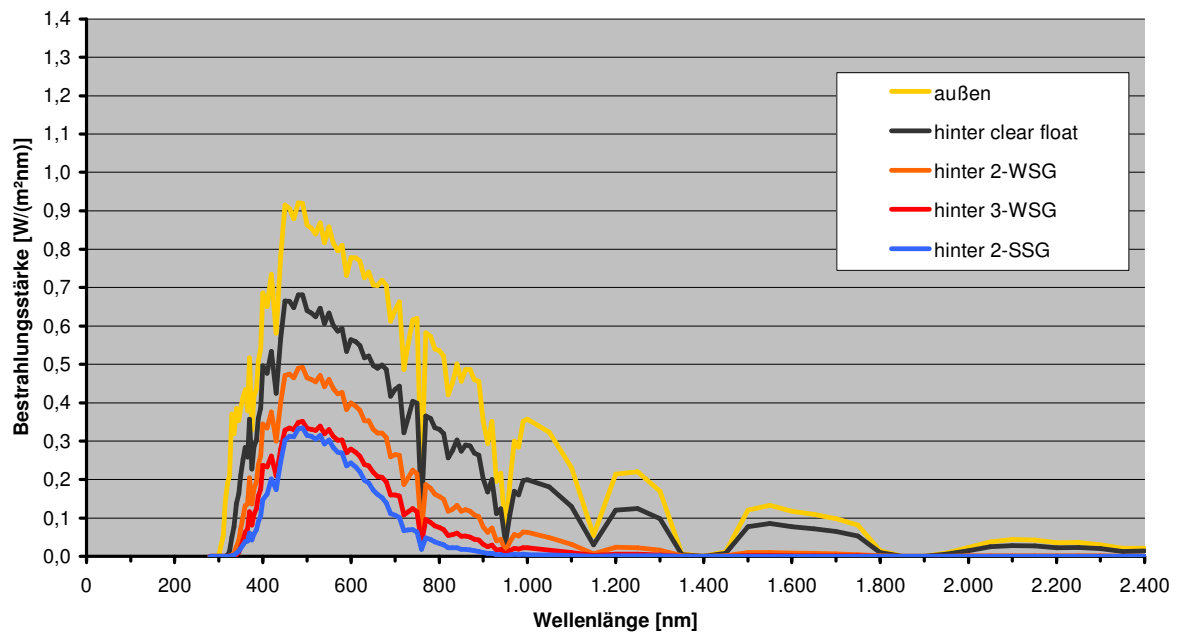


Diagramm 57: Spektrale Bestrahlungsstärke am 15. Juni um 12:00

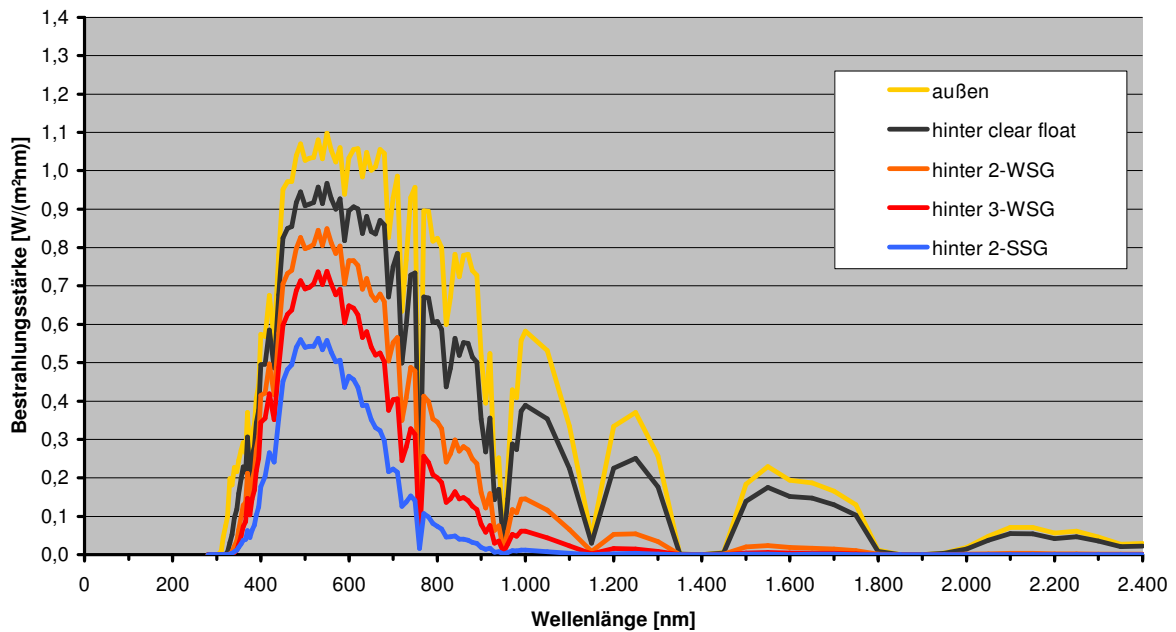


Diagramm 58: Spektrale Bestrahlungsstärke am 15. Juni um 17:00

7.3.1.4. Grafische Darstellung – September

Das folgende Säulendiagramm (Diagramm 59) zeigt die Bestrahlungsstärken in W/m^2 auf eine senkrechte, nach dem Sonnenazimut orientierte Messfläche zu den Referenzzeitpunkten 07:00, 12:00 und 17:00 am 15. September, wobei die erste Säule die Bestrahlungsstärke außen, unmittelbar vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheibe abbildet. Die jeweils vier anschließenden Säulen zeigen die ermittelten Bestrahlungsstärken unmittelbar nach dem Durchgang durch eine unbeschichtete Einscheiben-Verglasung, eine Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung, eine Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung und eine Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung.

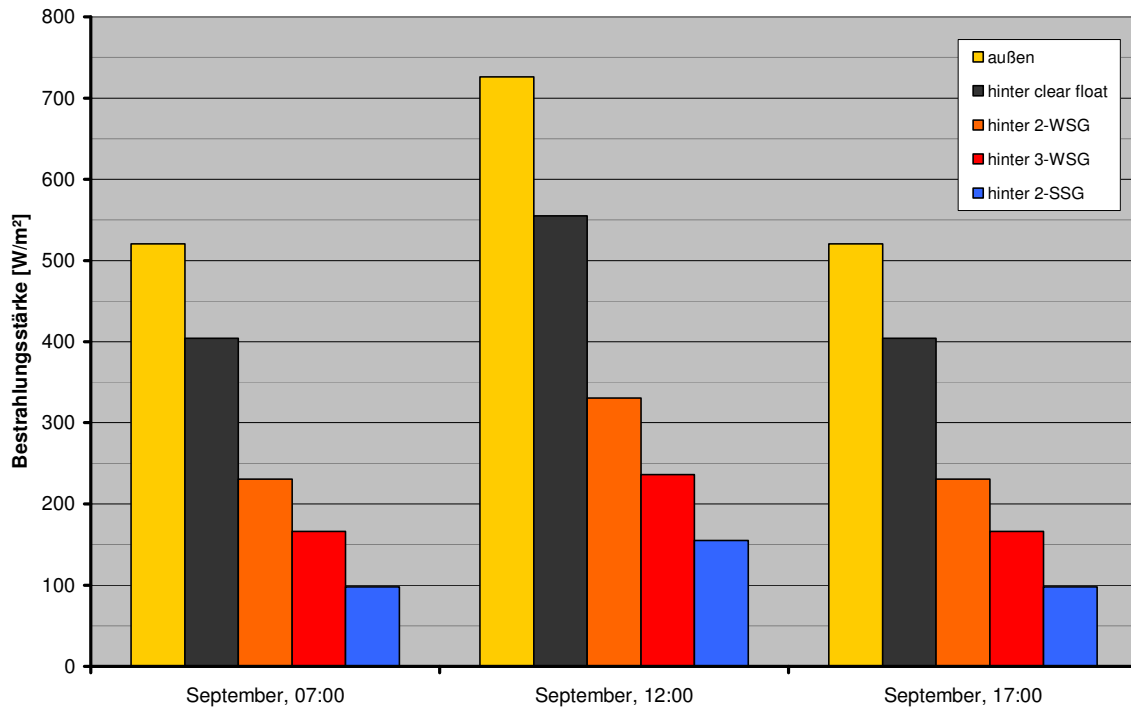


Diagramm 59: Bestrahlungsstärke zu den Referenzzeitpunkten des 15. September

Die drei nachfolgend abgebildeten Liniendiagramme (Diagramm 60, Diagramm 61, Diagramm 62) zeigen die spektral verteilten Bestrahlungsstärken in $\text{W}/(\text{m}^2\text{nm})$ auf eine vertikal sonnennachgeführte Messfläche zu den Referenzzeitpunkten 07:00, 12:00 und 17:00 am 15. September. Die Linie der Bestrahlungsstärke außen gibt jene Werte an, die unmittelbar vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheiben ermittelt wurden. Die weiteren vier abgebildeten Linien stellen die Bestrahlungsstärken unmittelbar nach dem Durchgang durch eine unbeschichtete Einscheiben-Verglasung, eine Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung, eine Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung und eine Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung dar.

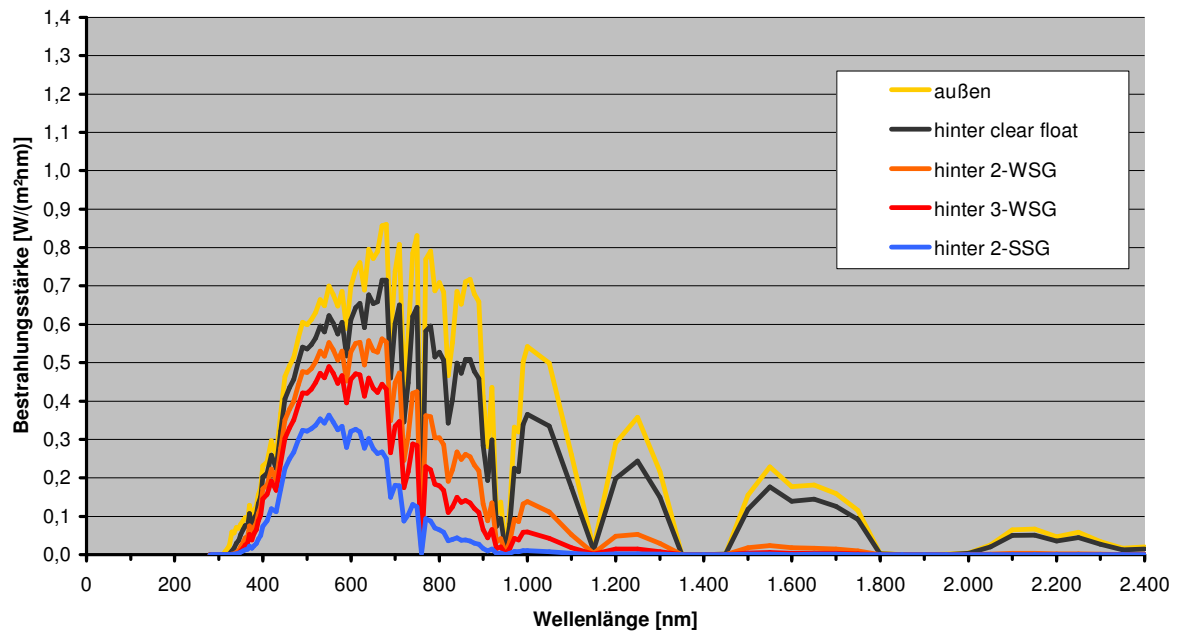


Diagramm 60: Spektrale Bestrahlungsstärke am 15. September um 07:00

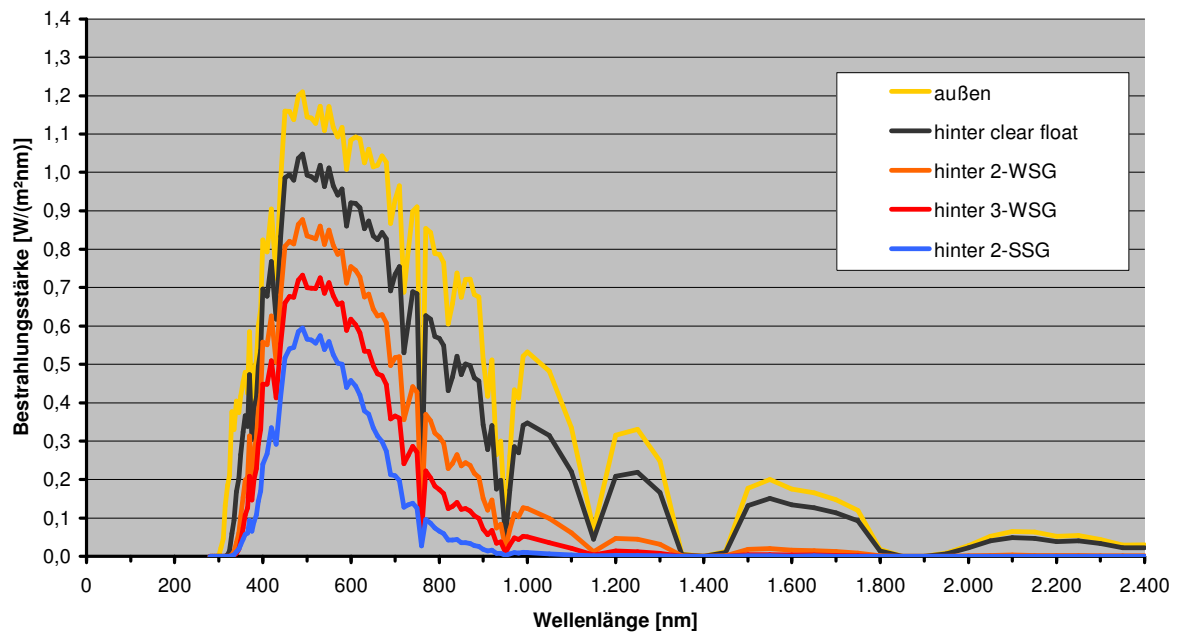


Diagramm 61: Spektrale Bestrahlungsstärke am 15. September um 12:00

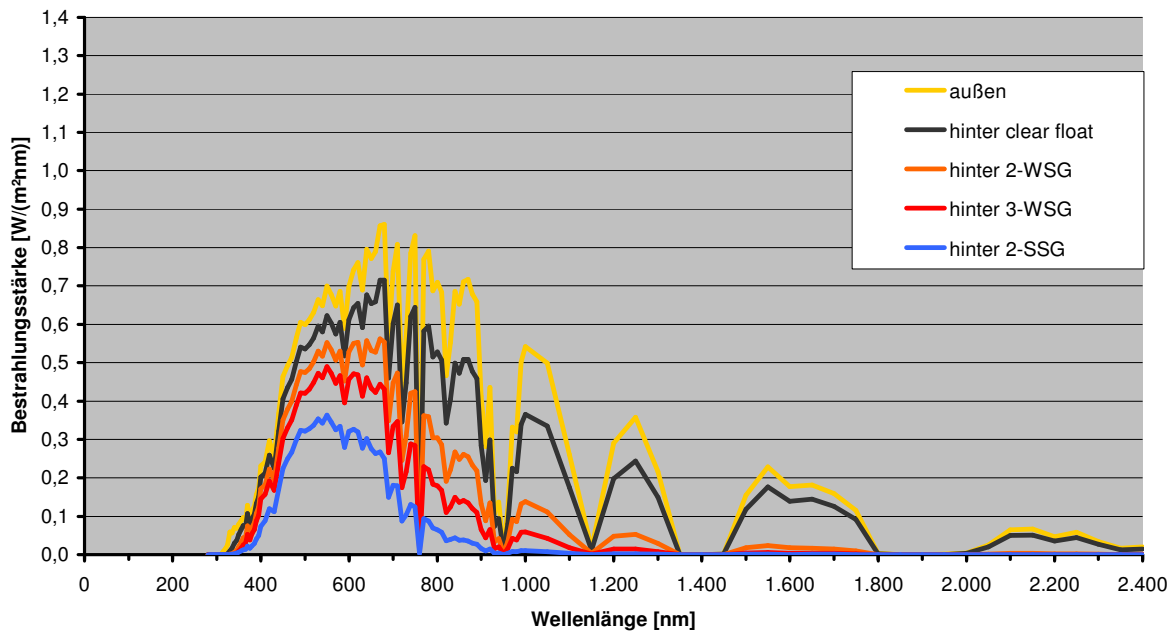


Diagramm 62: Spektrale Bestrahlungsstärke am 15. September um 17:00

7.3.1.5. Grafische Darstellung – Dezember

Schließlich gibt das Säulendiagramm (Diagramm 63) im Anschluss die Bestrahlungsstärken in W/m^2 auf eine senkrechte, nach dem Sonnenazimut orientierte Messfläche zum Referenzzeitpunkt 12:00 am 15. Dezember an. Die erste Säule bildet die Bestrahlungsstärke außen, unmittelbar vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheibe ab. Die vier anschließenden Säulen zeigen die ermittelten Bestrahlungsstärken unmittelbar nach dem Durchgang durch eine unbeschichtete Einscheiben-Verglasung, eine Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung, eine Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung und eine Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung.

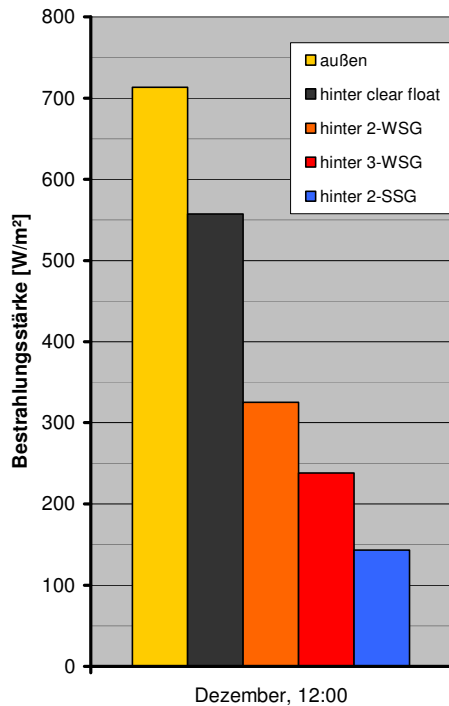


Diagramm 63: Bestrahlungsstärke zu den Referenzzeitpunkten des 15. Dezember

Das folgende abschließende Liniendiagramm (Diagramm 64) zu den spektral verteilten Bestrahlungsstärken in $W/(m^2nm)$ zeigt die auf eine vertikal sonnennachgeführte Messfläche zum Referenzzeitpunkt 12:00 am 15. Dezember ermittelten Werte. Wobei die Linie der Bestrahlungsstärke außen, jene Werte abbildet, die unmittelbar vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheibe errechnet wurden. Die weiteren vier abgebildeten Linien stellen die Bestrahlungsstärken unmittelbar nach dem Durchgang durch eine unbeschichtete Einscheiben-Verglasung, eine Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung, eine Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung sowie die Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung dar.

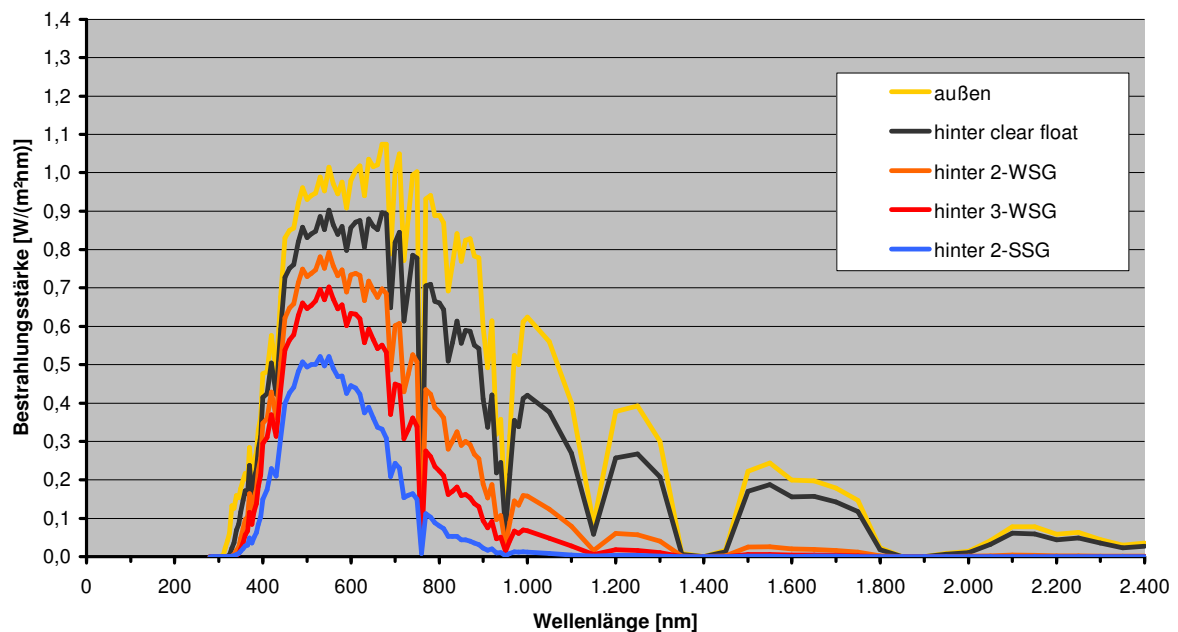


Diagramm 64: Spektrale Bestrahlungsstärke am 15. Dezember um 12:00

7.4. Auswertung photopischer Helligkeitseindruck

7.4.1. Wirkpotential

Das photophysiologische Wirkpotential der Beleuchtungsstärke ist der durch visuelle Rezeption hervorgerufene Helligkeitseindruck, der eine direkte Folge der Beleuchtungsstärke ist. In den nachfolgenden Auswertungen wird stets die Beleuchtungsstärke in der Einheit lx beziehungsweise damit identisch lm/m^2 , bezogen auf die vertikale Messebene, ermittelt.

7.4.2. Wirkungs-Kurve

Als Wirkungs-Kurve zur Ermittlung der Beleuchtungsstärke wurde die spektrale Bestrahlungsstärke hinter den Verglasungen gefaltet mit der $v(\lambda)$ -Kurve für photopisches Sehen, mit ihrem Maximum der Empfindlichkeit bei 555 nm und der festgelegten Empfindlichkeit für monochromatisches Licht dieser Wellenlänge in der Größe der photometrischen Konstante von $683 \text{ lm}/\text{W}$.⁹⁷⁸

⁹⁷⁸ DIN 5031-3 (1982)

7.4.3. Ergebnisse

Aufgrund der werkstoffimmanenten Eigenschaft der hohen Transparenz im Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichts sind erwartungsgemäß die Beleuchtungsstärken unter den Referenzbedingungen signifikant hoch.

Relativ zur Außenbeleuchtungsstärke beträgt die Beleuchtungsstärke hinter dem unbeschichteten Einscheibenglas etwa 86%, hinter der Zweischeiden-Wärmeschutzverglasung etwa 73%, hinter der Dreischeiden-Wärmeschutzverglasung etwa 63% und hinter der Zweischeiden-Sonnenschutzverglasung etwa 47%.

Die Werte liegen durchwegs einige Prozentpunkte unter den visuellen Transmissionsgraden der jeweiligen Verglasungstypen, worin sich das Absinken des Transmissionsgrades mit dem Einfallswinkel der Strahlung zur Flächennormalen der Verglasung abbildet.

7.4.3.1. Tabellarische Übersicht

In der folgenden Tabelle (Tabelle 19) sind die Beleuchtungsstärken in lx zu den zehn Referenzzeitpunkten am 15. März um 07:00, um 12:00 und um 17:00, am 15. Juni um 07:00, um 12:00 und um 17:00, am 15. September um 07:00, um 12:00 und um 17:00, sowie am 15. Dezember⁹⁷⁹ um 12:00 auf eine senkrechte, nach dem Sonnenazimut orientierte Messfläche zusammengefasst.

In der ersten Ergebnisspalte sind die Beleuchtungsstärken außen, also unmittelbar vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheibe angegeben. In den nachfolgenden Ergebnisspalten sind die ermittelten Beleuchtungsstärken unmittelbar nach dem Durchgang durch eine unbeschichtete Einscheiben-Verglasung, eine Zweischeiden-Wärmeschutzverglasung, eine Dreischeiden-Wärmeschutzverglasung und eine Zweischeiden-Sonnenschutzverglasung zum unmittelbaren Vergleich in Absolutwerten angeführt.

	außen lx	hinter clear float lx	hinter 2-WSG lx	hinter 3-WSG lx	hinter 2-SSG lx
März, 07:00	26.297	23.228	20.322	17.812	12.930
März, 12:00	81.093	70.297	59.105	50.242	37.824
März, 17:00	26.297	23.228	20.322	17.812	12.930
Juni, 07:00	75.765	66.334	57.542	49.481	36.790
Juni, 12:00	59.364	43.597	31.320	22.252	20.069
Juni, 17:00	75.765	66.334	57.542	49.481	36.790
September, 07:00	48.434	42.796	37.459	32.846	23.866
September, 12:00	81.165	69.645	57.905	48.084	37.066
September, 17:00	48.436	42.798	37.460	32.847	23.867
Dezember, 12:00	70.443	62.277	54.005	47.387	34.485

Tabelle 19: Beleuchtungsstärken zu den Referenzzeitpunkten

⁹⁷⁹ Zu den aus photophysiologicalischer Sicht relevanten Tageszeitpunkten um etwa 07:00 morgens und um etwa 17:00 nachmittags ist die Sonne noch nicht aufgegangen beziehungsweise bereits untergegangen. Diese beiden Tageszeitpunkte sind daher als Referenzzeitpunkte im Sinne der vorliegenden Arbeit irrelevant.

In der anschließend abgebildeten Tabelle (Tabelle 20) sind die ermittelten Beleuchtungsstärken aus Tabelle 19 als Relativwerte in % angegeben, wobei als Bezugsgrößen die Beleuchtungsstärken zu den jeweiligen Referenzzeitpunkten außen vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheibe mit 100% angegeben werden. Die letzte Zeile der Tabelle führt die Beleuchtungsstärken unmittelbar nach dem Durchgang durch die jeweilige Funktionsglasscheibe als Mittelwert der in den Zeilen oberhalb ausgeworfenen Relativwerte der Beleuchtungsstärke an.

	außen %	hinter clear float %	hinter 2-WSG %	hinter 3-WSG %	hinter 2-SSG %
März, 07:00	100%	88%	77%	68%	49%
März, 12:00	100%	87%	73%	62%	47%
März, 17:00	100%	88%	77%	68%	49%
Juni, 07:00	100%	88%	76%	65%	49%
Juni, 12:00	100%	73%	53%	37%	34%
Juni, 17:00	100%	88%	76%	65%	49%
September, 07:00	100%	88%	77%	68%	49%
September, 12:00	100%	86%	71%	59%	46%
September, 17:00	100%	88%	77%	68%	49%
Dezember, 12:00	100%	88%	77%	67%	49%
	100%	86%	73%	63%	47%

Tabelle 20: Beleuchtungsstärken zu den Referenzzeitpunkten relativ zu außen

7.4.3.2. Grafische Darstellung – März

Das folgende Säulendiagramm (Diagramm 65) zeigt die stündlichen Beleuchtungsstärken in lx auf eine senkrechte, nach dem Sonnenazimut orientierte Messfläche zu den Referenzzeitpunkten 07:00, 12:00 und 17:00 am 15. März, wobei die erste Säule die Beleuchtungsstärken außen, unmittelbar vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheibe abbildet. Die jeweils vier anschließenden Säulen zeigen die ermittelten Beleuchtungsstärken unmittelbar nach dem Durchgang durch eine unbeschichtete Einscheiben-Verglasung, eine Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung, eine Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung und eine Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung.

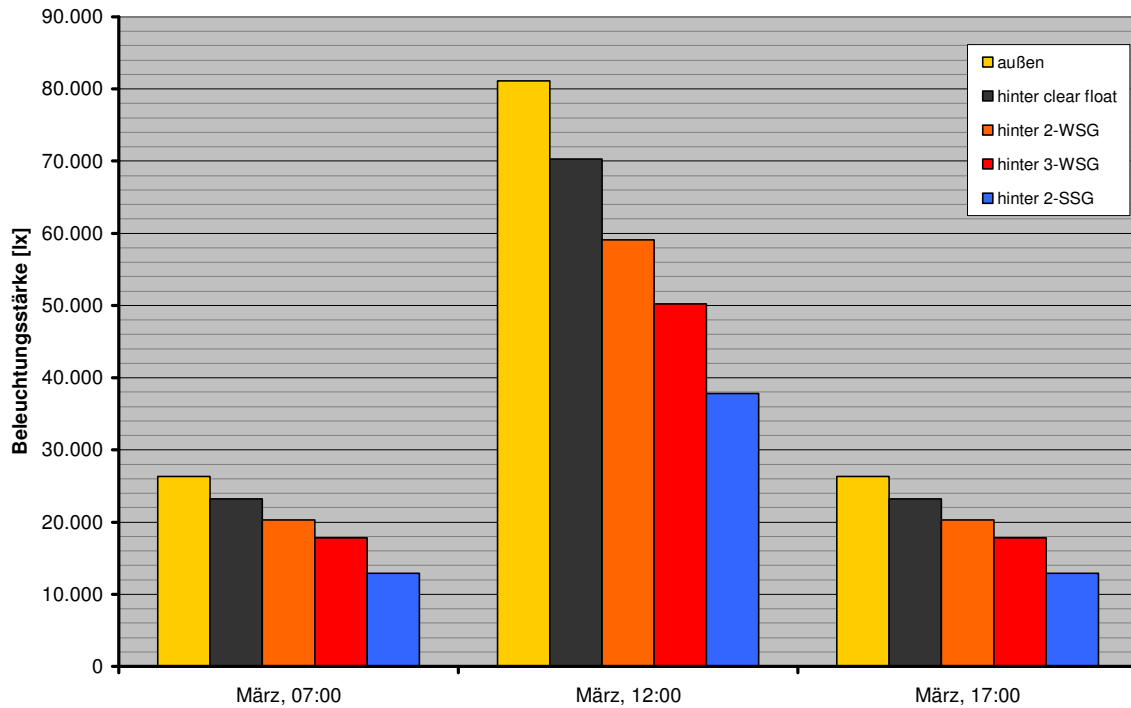


Diagramm 65: Beleuchtungsstärke zu den Referenzzeitpunkten des 15. März

Die drei nachfolgenden Liniendiagramme (Diagramm 66, Diagramm 67, Diagramm 68) zeigen die spektral verteilten Beleuchtungsstärken in lx/nm auf eine vertikal sonnennachgeführte Messfläche zu den Referenzzeitpunkten 07:00, 12:00 und 17:00 am 15. März. Die Linie der Beleuchtungsstärke außen gibt, jene Werte an, die unmittelbar vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheiben ermittelt wurden. Die weiteren vier abgebildeten Linien stellen die Beleuchtungsstärken unmittelbar nach dem Durchgang durch eine unbeschichtete Einscheiben-Verglasung, eine Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung, eine Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung sowie eine Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung dar.

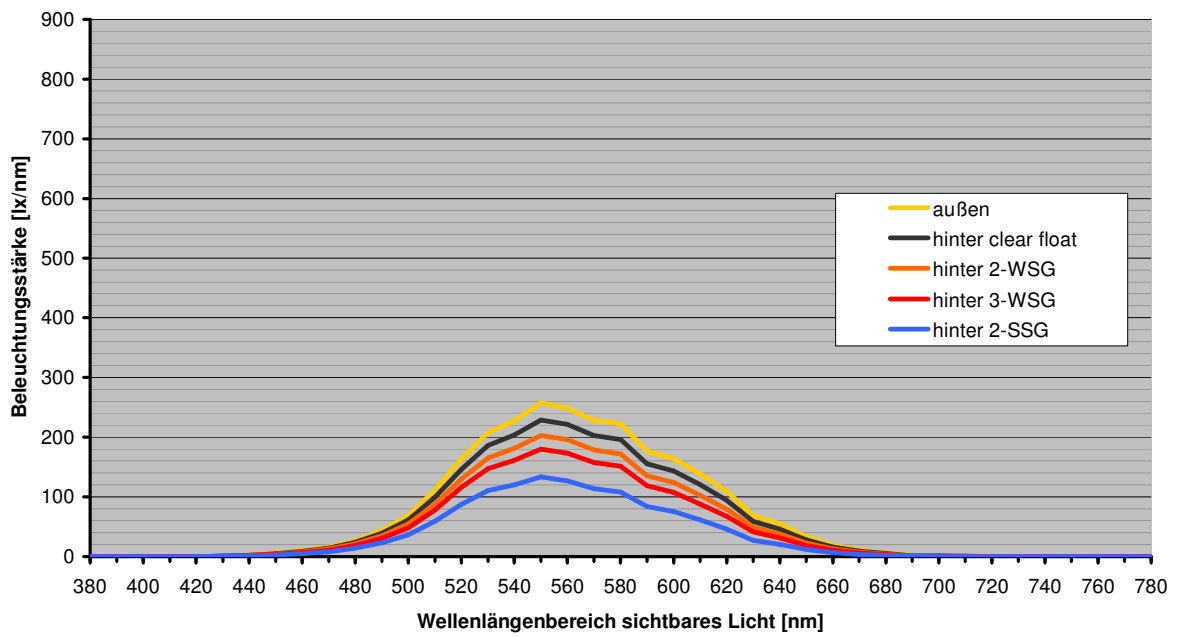


Diagramm 66: Spektrale Beleuchtungsstärke am 15. März um 07:00

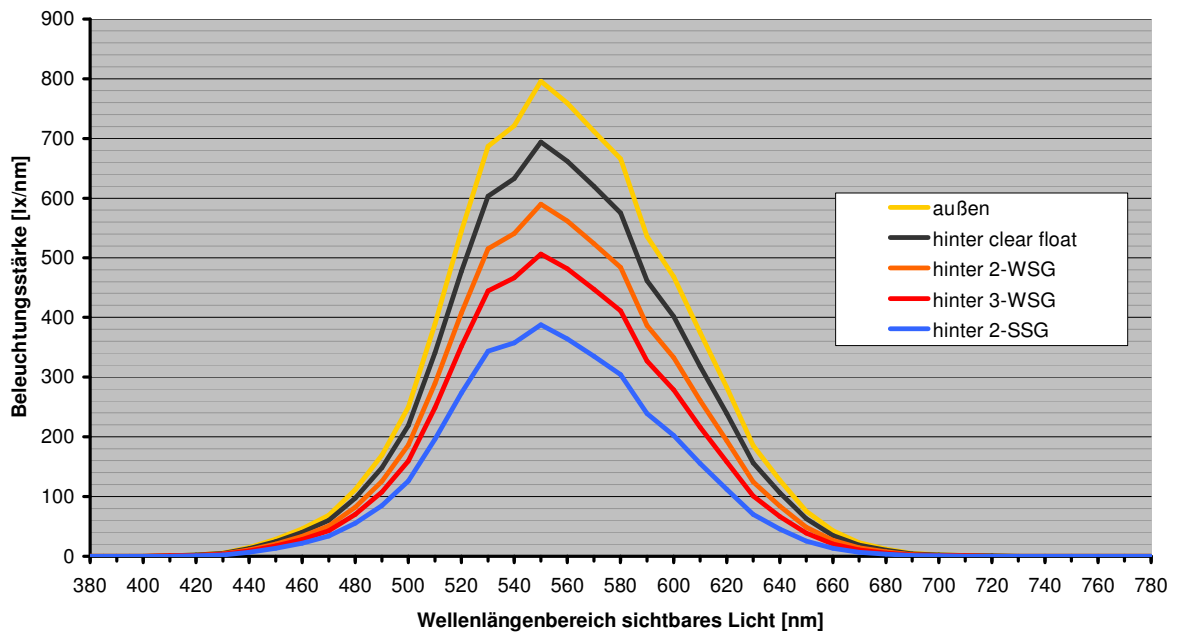


Diagramm 67: Spektrale Beleuchtungsstärke am 15. März um 12:00

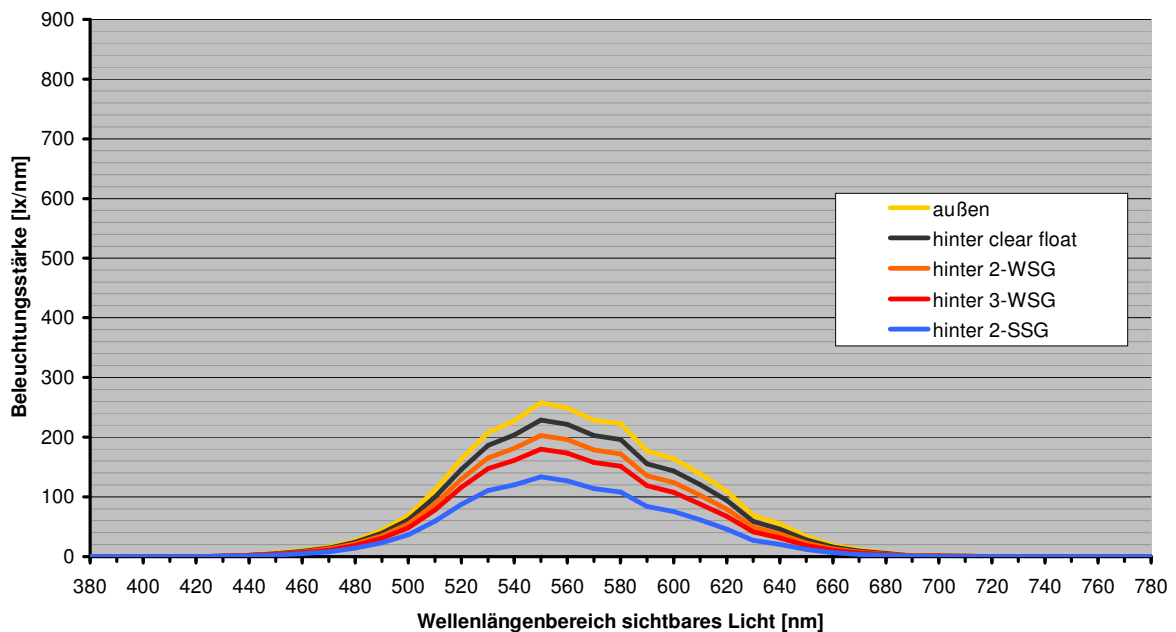


Diagramm 68: Spektrale Beleuchtungsstärken am 15. März um 17:00

7.4.3.3. Grafische Darstellung – Juni

Das Säulendiagramm (Diagramm 69) im Anschluss zeigt die Beleuchtungsstärken in lx auf eine senkrechte, nach dem Sonnenazimut orientierte Messfläche zu den Referenzzeitpunkten 07:00, 12:00 und 17:00 am 15. Juni. Die erste Säule bildet die Beleuchtungsstärken außen, unmittelbar vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheibe ab. Die jeweils vier anschließenden Säulen zeigen die ermittelten Beleuchtungsstärken unmittelbar nach dem Durchgang durch eine unbeschichtete Einscheiben-Verglasung, eine Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung, eine Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung und eine Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung.

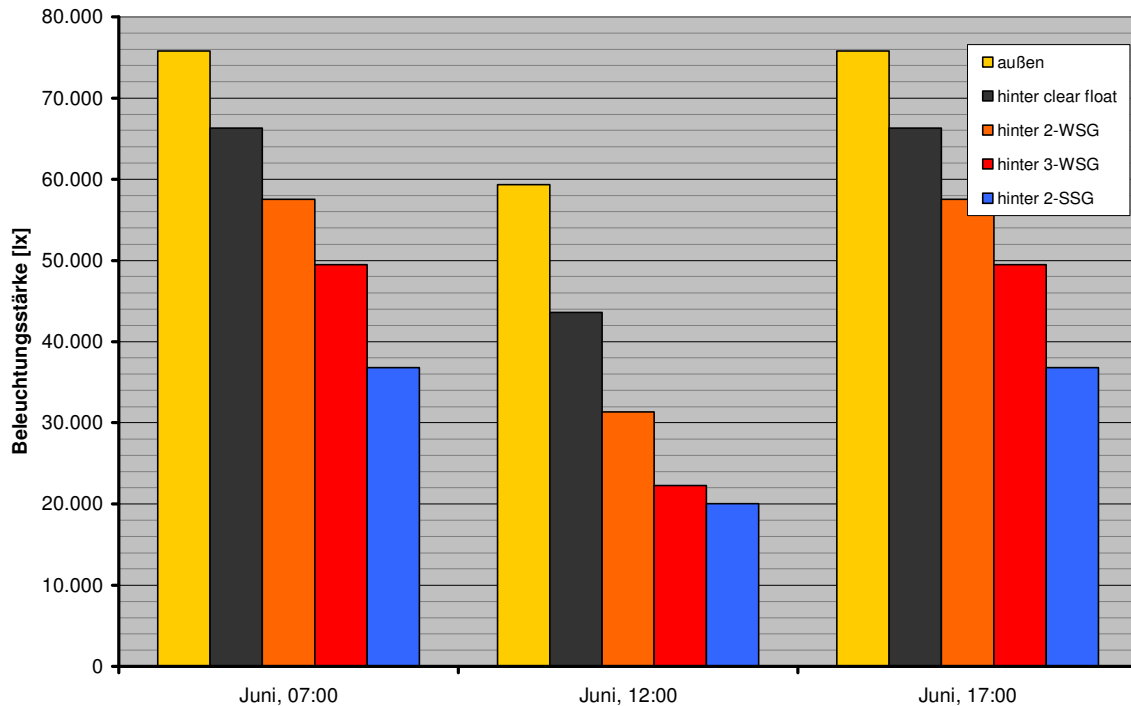


Diagramm 69: Beleuchtungsstärke zu den Referenzzeitpunkten des 15. Juni

Die drei nachfolgend abgebildeten Liniendiagramme (Diagramm 70, Diagramm 71, Diagramm 72) zeigen die spektral verteilten Beleuchtungsstärken in lx/nm auf eine vertikal sonnennachgeführte Messfläche zu den Referenzzeitpunkten 07:00, 12:00 und 17:00 am 15. Juni. Die Linie der Beleuchtungsstärke außen gibt jene Werte an, die unmittelbar vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheiben ermittelt wurden. Die weiteren vier abgebildeten Linien stellen die Beleuchtungsstärken unmittelbar nach dem Durchgang durch eine unbeschichtete Einscheiben-Verglasung, eine Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung, eine Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung und eine Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung dar.

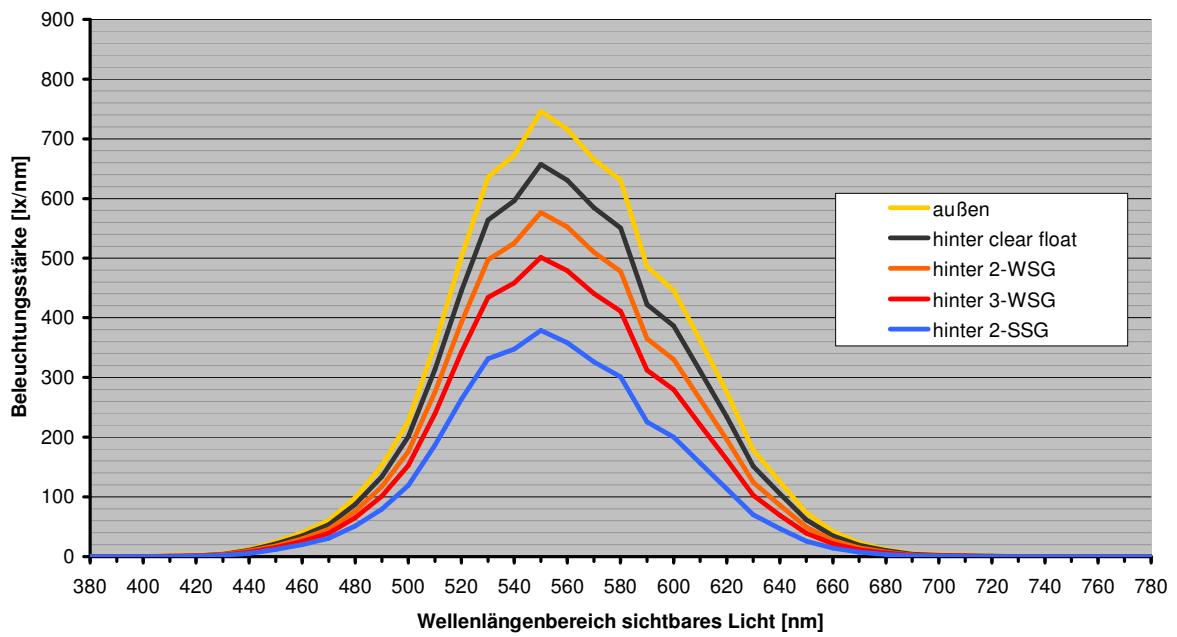


Diagramm 70: Spektrale Beleuchtungsstärke am 15. Juni um 07:00

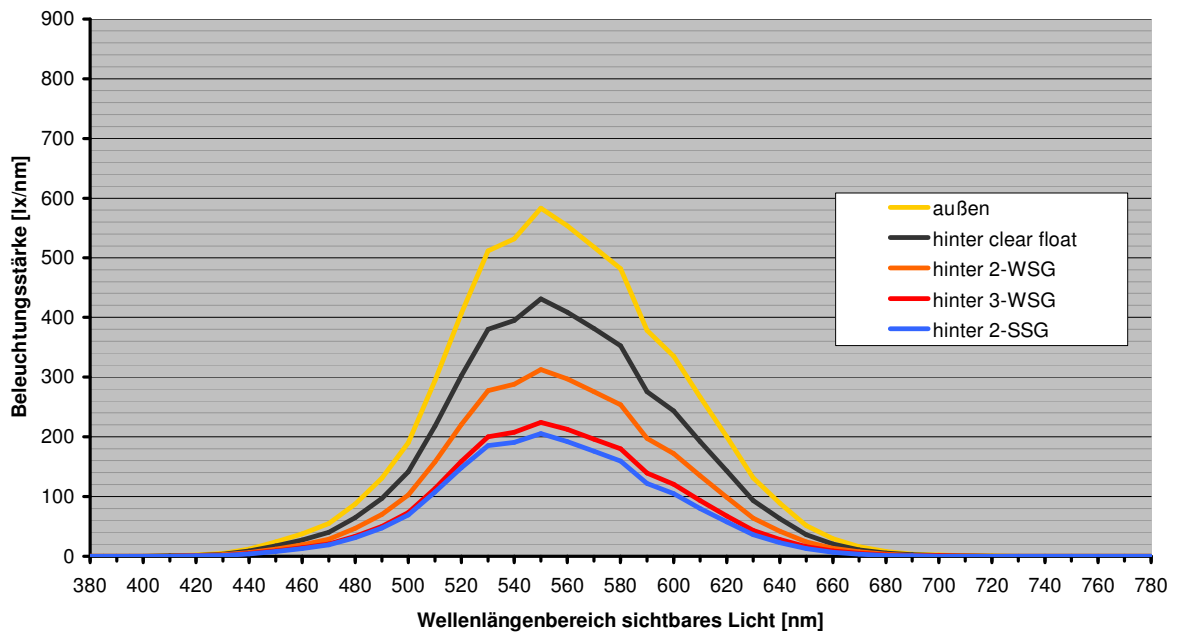


Diagramm 71: Spektrale Beleuchtungsstärke am 15. Juni um 12:00

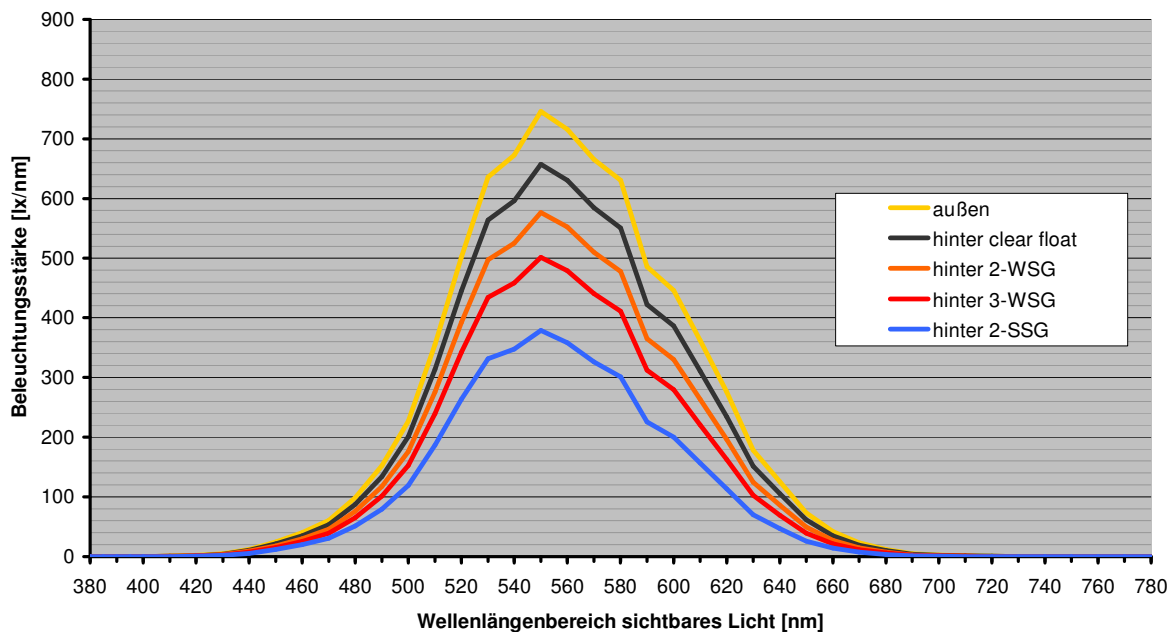


Diagramm 72: Spektrale Beleuchtungsstärke am 15. Juni um 17:00

7.4.3.4. Grafische Darstellung – September

Das Säulendiagramm (Diagramm 73) im Anschluss zeigt die Beleuchtungsstärken in Ix auf eine senkrechte, nach dem Sonnenazimut orientierte Messfläche zu den Referenzzeitpunkten 07:00, 12:00 und 17:00 am 15. September. Die erste Säule bildet die Beleuchtungsstärke außen, unmittelbar vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheibe ab. Die jeweils vier anschließenden Säulen zeigen die ermittelten Beleuchtungsstärken unmittelbar nach dem Durchgang durch eine unbeschichtete Einscheiben-Verglasung, eine Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung, eine Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung sowie eine Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung.

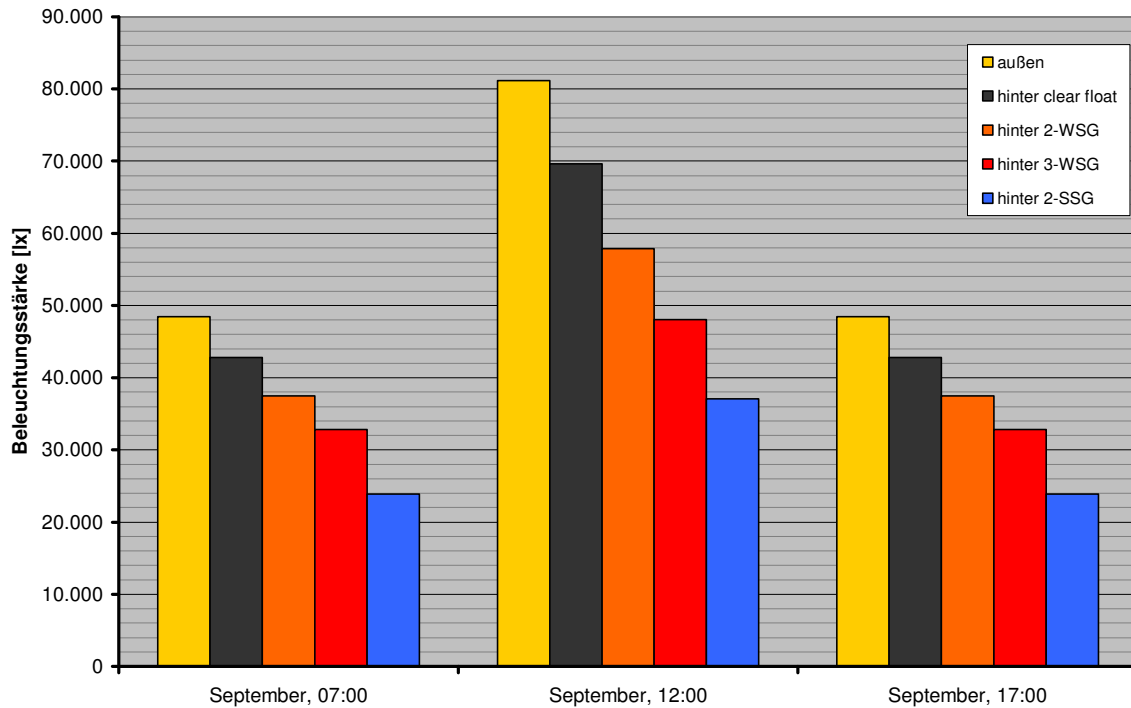


Diagramm 73: Beleuchtungsstärke zu den Referenzzeitpunkten des 15. September

Die drei nachfolgend abgebildeten Liniendiagramme (Diagramm 74, Diagramm 75, Diagramm 76) zeigen die spektral verteilten Beleuchtungsstärken in lx/nm auf eine vertikal sonnennachgeführte Messfläche zu den Referenzzeitpunkten 07:00, 12:00 und 17:00 am 15. September. Die Linie der Beleuchtungsstärke außen gibt jene Werte an, die unmittelbar vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheiben ermittelt wurden. Die weiteren vier abgebildeten Linien stellen die Beleuchtungsstärken unmittelbar nach dem Durchgang durch eine unbeschichtete Einscheiben-Verglasung, eine Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung, eine Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung und eine Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung dar.

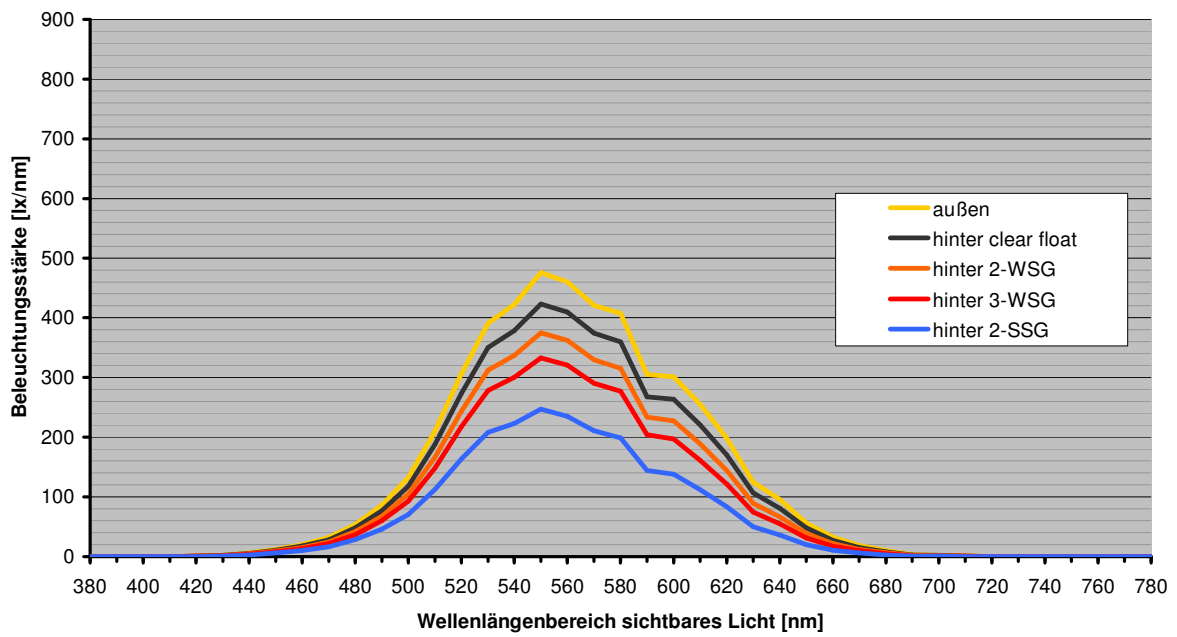


Diagramm 74: Spektrale Beleuchtungsstärke am 15. September um 07:00

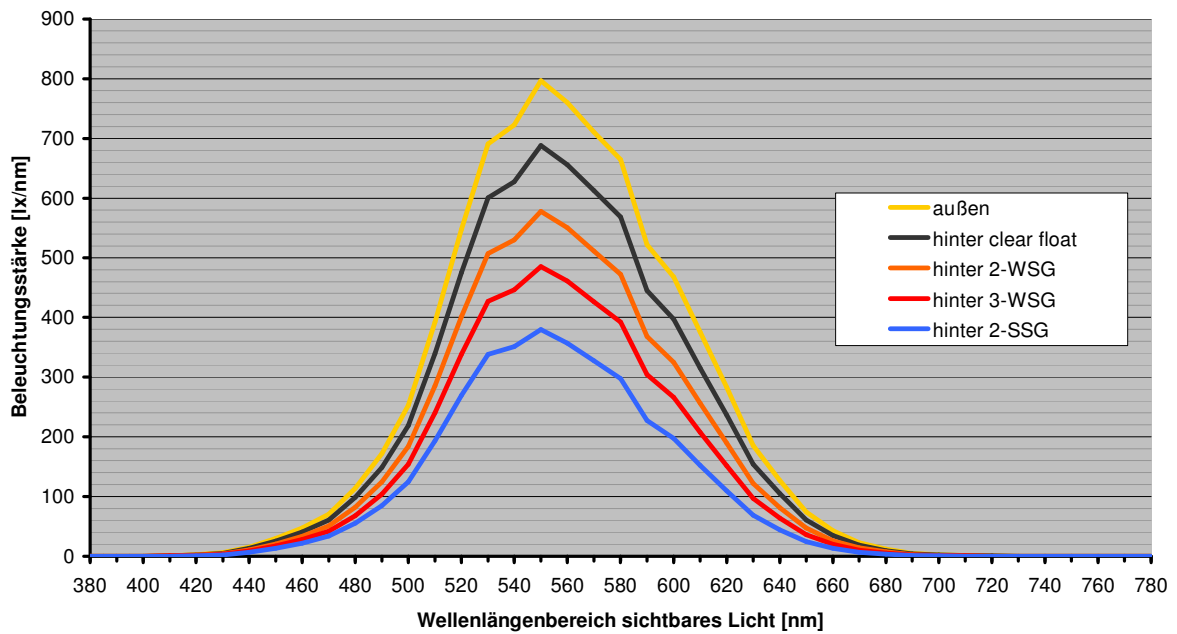


Diagramm 75: Spektrale Beleuchtungsstärke am 15. September um 12:00

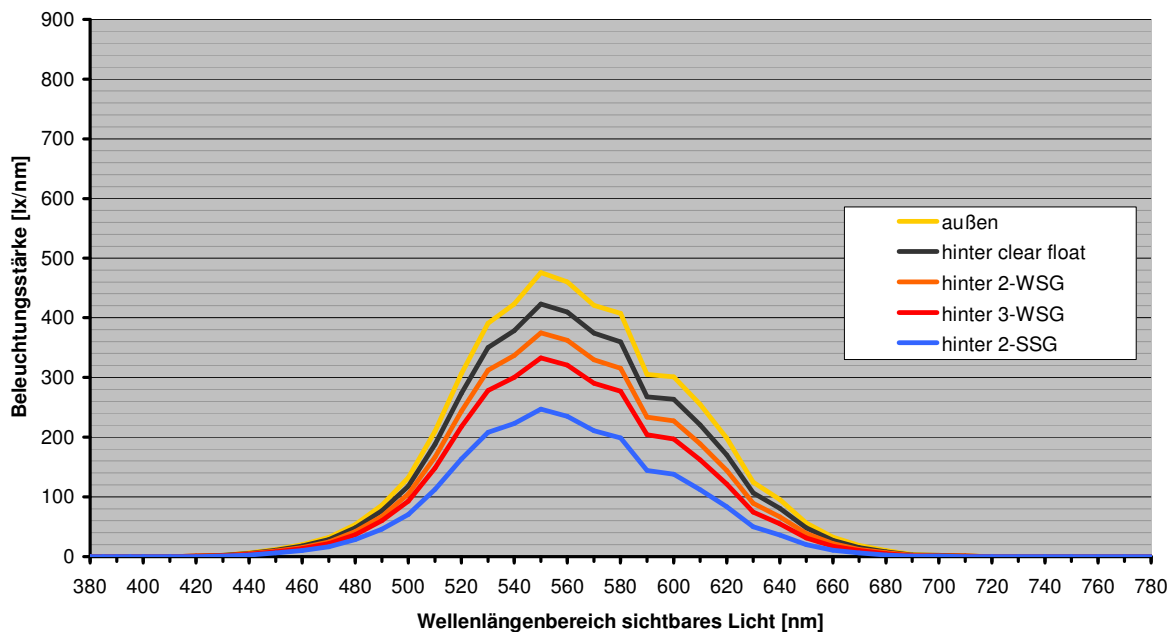


Diagramm 76: Spektrale Beleuchtungsstärke am 15. September um 17:00

7.4.3.5. Grafische Darstellung – Dezember

Und schließlich gibt das Säulendiagramm (Diagramm 77) im Anschluss die Beleuchtungsstärke in lx auf eine senkrechte, nach dem Sonnenazimut orientierte Messfläche zum Referenzzeitpunkt 12:00 am 15. Dezember an. Die erste Säule bildet die Beleuchtungsstärke außen, unmittelbar vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheibe ab. Die vier anschließenden Säulen zeigen die ermittelten Beleuchtungsstärken unmittelbar nach dem Durchgang durch eine unbeschichtete Einscheiben-Verglasung, eine Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung, eine Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung und eine Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung.

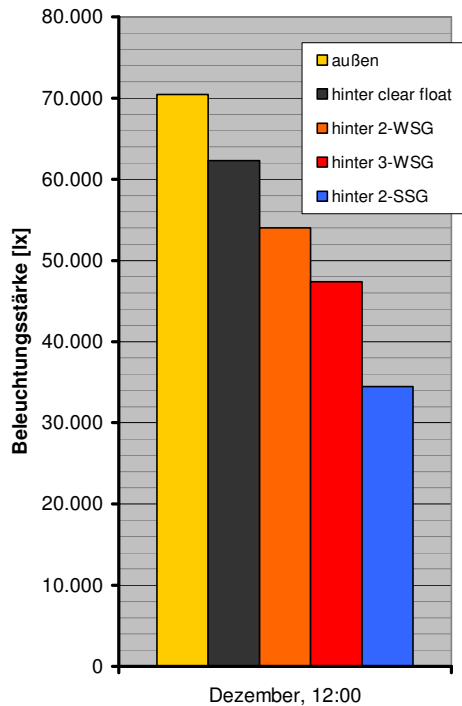


Diagramm 77: Beleuchtungsstärke zu den Referenzzeitpunkten des 15. Dezember

Das folgende abschließende Liniendiagramme (Diagramm 78) zur spektral verteilten Beleuchtungsstärke zeigt die auf eine vertikal sonnennachgeführte Messfläche zum Referenzzeitpunkt 12:00 15. Dezember ermittelten Werte in lx/nm. Wobei die Linie der Beleuchtungsstärke außen, jene Werte abbildet, die unmittelbar vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheibe errechnet wurden. Die weiteren vier abgebildeten Linien stellen die Beleuchtungsstärken unmittelbar nach dem Durchgang durch eine unbeschichtete Einscheiben-Vergrasung, eine Zweischeiden-Wärmeschutzverglasung, eine Dreischeiden-Wärmeschutzverglasung und eine Zweischeiden-Sonnenschutzverglasung dar.

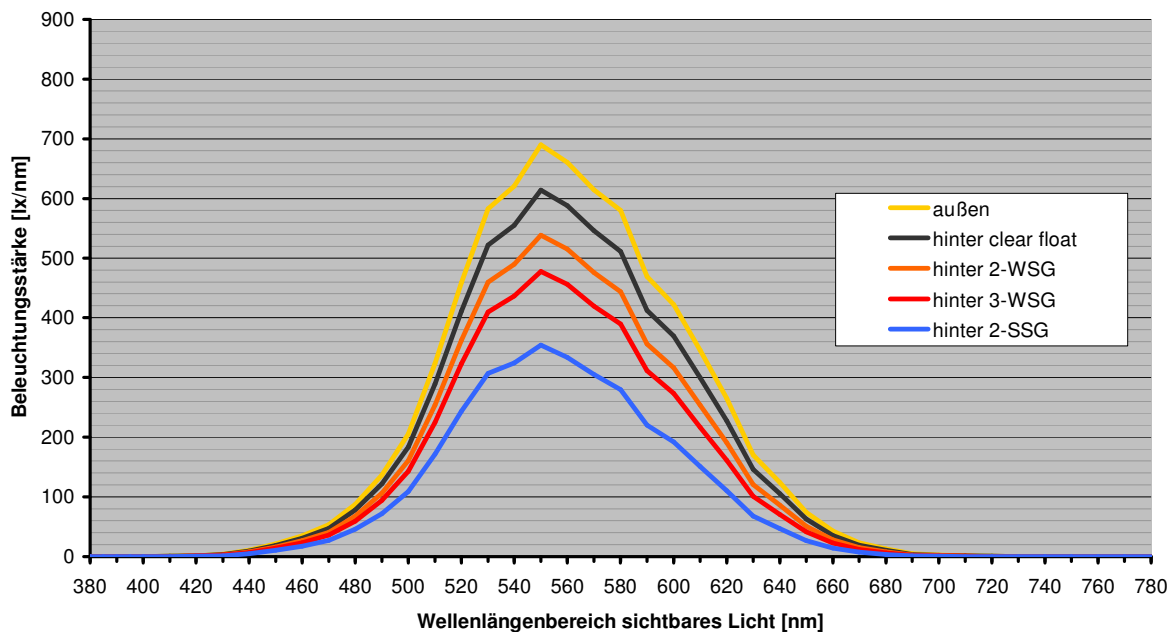


Diagramm 78: Spektrale Beleuchtungsstärke am 15. Dezember um 12:00

7.5. Auswertung Erythembildung

7.5.1. Wirkpotential

Als Erythem wird eine mit bloßem Auge erkennbare Hautrötung bezeichnet. Die Entstehung von Erythemen unter Einwirkung von Sonnenstrahlung wird unter 6.1.3.1. beschrieben.

Die Erythembildung ist proportional zur Strahlungsdosis und nicht zur Strahlungsintensität. Als Wirkpotential wird demnach die erythemale Dosis als die physiologisch bewertete Strahlungsdosis in J pro m² exponierter Hautoberfläche angegeben. In den nachfolgenden Säulendiagrammen wird diese als stündliche Strahlungsdosis ausgewiesen. In den Liniendiagrammen wird aber in Konsistenz mit den Diagrammen zu allen anderen Wirkpotentialen die Darstellung der photophysologisch, in diesem Fall erythemal, bewerteten Strahlungsdichte in W/m² beibehalten.

7.5.2. Wirkungs-Kurve

Für die Erythembildung im ultravioletten Spektralbereich liegt eine anerkannte Wirkungs-Kurve vor.⁹⁸⁰ Sie ist beschrieben ab einer Wellenlänge von 250 nm und ist charakterisiert durch ein plateauförmiges Maximum der Empfindlichkeit für ansteigende Wellenlängen bis 295 nm gefolgt von einem steilen Abfall mit steigender Wellenlänge. So beträgt die

⁹⁸⁰ CIE (1993)

erythemale Empfindlichkeit an der Grenze zum Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichts bereits weniger als ein Promille ihres Maximums.

7.5.3. Schwell- und Grenzwerte

Für die Erythembildung im ultravioletten Spektralbereich existiert ein Subjekt bezogener Schwellwert, die minimale Erythemdosis, abgekürzt mit MED. Sie ist definiert als jene minimale Strahlendosis in mJ/cm^2 oder J/m^2 , die ein scharf abgrenzbares, gerade noch erkennbares Erythem mit einer Mindestfläche von 1 cm^2 hervorruft.⁹⁸¹ Die Empfindlichkeit gegenüber UV-Strahlung und damit die MED sind stark vom Individuum abhängig, wobei Individuengruppen mit ähnlicher Empfindlichkeit zu Hauttypen zusammengefasst werden. Um eine quantitative Abschätzung möglich zu machen, wurde für den Hauttyp II eine standardisierte gewichtete MED von $250 \text{ J}/\text{m}^2$ festgelegt.⁹⁸² Diese standardisierte MED dient einer grundlegenden Risikoeinschätzung und wurde in der gegenständlichen Arbeit als Schwellwert herangezogen. Eine Applikation von etwa 4 MED führt beim Hauttyp II zur Ausbildung von Sonnenbrand⁹⁸³ ohne Blasenbildung.⁹⁸⁴

Weiters wurde durch die CIE⁹⁸⁵ eine Standard Erythemdosis mit der Abkürzung SED definiert und mit einer gewichteten flächenbezogenen Strahlungsenergie von $100 \text{ J}/\text{m}^2$ festgesetzt.^{986,987} Detailliertere Angaben dazu liegen in Kapitel 6.1.3. vor.

7.5.4. Ergebnisse

Unter den angenommenen Randbedingungen kommt es im Außenraum zur Mittagszeit des 15. Juni und 15. September mit $370 \text{ J}/\text{m}^2$ beziehungsweise $325 \text{ J}/\text{m}^2$ bereits in weniger als einer Stunde zur Überschreitung der MED, in der Mittagsstunde des März wird mit $190 \text{ J}/\text{m}^2$ ein Wert von etwa einer $\frac{3}{4}$ MED erreicht.

Hinter einer Funktionsglasscheibe sinkt aufgrund derer stark eingeschränkten Durchlässigkeit für ultraviolette Strahlung die erreichbare erythemale Dosis drastisch ab. Relativ zu jener im Außenraum beträgt sie hinter dem unbeschichteten Einscheibenglas etwa 26%, hinter der Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung etwa 13%, hinter der Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung etwa 8% und hinter der Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung etwa 4%.

Hinter technischen Funktionsgläsern ist demnach die Gefahr der Erythembildung aber auch die Chance auf eine Adaption der Haut verschwindend gering. Das insbesondere

⁹⁸¹ Lowe (1990)

⁹⁸² Deutsche Strahlenschutzkommission (2001)

⁹⁸³ Der medizinische Begriff für Sonnenbrand ist Dermatitis solaris.

⁹⁸⁴ Taylor (1990)

⁹⁸⁵ Commission Internationale de l'Éclairage, deutschen Bezeichnung: Internationale Beleuchtungskommission

⁹⁸⁶ CIE (1987)

⁹⁸⁷ CIE (1993)

auch vor dem Hintergrund, dass die langjährige, die Bewölkung berücksichtigende, Strahlungssumme während der Mittagsstunde der Referenztage nur rund die Hälfte der Strahlungssumme zur Mittagsstunde des wolkenlos angenommenen Referenzzeitpunkts beträgt und umgekehrt die Stundensummen der Sonneneinstrahlung unter den wolkenlosen Referenzbedingungen bereits etwa $\frac{1}{5}$ bis $\frac{1}{3}$ der langjährig innerhalb des gesamten Tages auftretenden Sonneneinstrahlung betragen. Im langjährigen Mittel, unter Berücksichtigung des statistischen Bewölkungsgrades, wird demnach an keinem der untersuchten Tage und hinter keiner der untersuchten Verglasungen der Schwellwert einer MED erreicht oder überschritten.

7.5.4.1. Tabellarische Übersicht

In der folgenden Tabelle (Tabelle 21) sind die stündlichen erythemalen Dosen in J/m^2 zu den zehn Referenzzeitpunkten am 15. März um 07:00, um 12:00 und um 17:00, am 15. Juni um 07:00, um 12:00 und um 17:00, am 15. September um 07:00, um 12:00 und um 17:00, sowie am 15. Dezember⁹⁸⁸ um 12:00 auf eine senkrechte, nach dem Sonnenazimut orientierte Messfläche zusammengefasst.

In der ersten Ergebnisspalte sind die stündlichen erythemalen Dosen außen, also unmittelbar vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheibe angegeben. In den nachfolgenden Ergebnisspalten sind die ermittelten stündlichen erythemalen Dosen unmittelbar nach dem Durchgang durch eine unbeschichtete Einscheiben-Verglasung, eine Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung, eine Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung und eine Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung zum unmittelbaren Vergleich in Absolutwerten angeführt.

	außen J/m^2	hinter clear float J/m^2	hinter 2-WSG J/m^2	hinter 3-WSG J/m^2	hinter 2-SSG J/m^2
März, 07:00	8	3	2	1	1
März, 12:00	190	31	15	10	5
März, 17:00	8	3	2	1	1
Juni, 07:00	96	22	11	7	4
Juni, 12:00	370	33	16	10	5
Juni, 17:00	96	22	11	7	4
September, 07:00	21	7	4	2	1
September, 12:00	325	36	18	11	6
September, 17:00	21	7	4	2	1
Dezember, 12:00	54	16	8	5	3

Tabelle 21: Stündliche erythemale Dosis zu den Referenzzeitpunkten

⁹⁸⁸ Zu den aus photophysiologicalischer Sicht relevanten Tageszeitpunkten um etwa 07:00 morgens und um etwa 17:00 nachmittags ist die Sonne noch nicht aufgegangen beziehungsweise bereits untergegangen. Diese beiden Tageszeitpunkte sind daher als Referenzzeitpunkte im Sinne der vorliegenden Arbeit irrelevant.

In der anschließend abgebildeten Tabelle (Tabelle 22) sind die ermittelten stündlichen erythemalen Dosen aus Tabelle 22 als Relativwerte in % angegeben, wobei als Bezugsgrößen die stündlichen erythemalen Dosen zu den jeweiligen Referenzzeitpunkten außen vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheibe mit 100% angegeben werden. Die letzte Zeile der Tabelle führt die stündlichen erythemalen Dosen unmittelbar nach dem Durchgang durch die jeweilige Funktionsglasscheibe als Mittelwert der in den Zeilen oberhalb ausgeworfenen Relativwerte der stündlichen erythemalen Dosis an.

	außen %	hinter clear float %	hinter 2-WSG %	hinter 3-WSG %	hinter 2-SSG %
März, 07:00	100%	40%	21%	13%	7%
März, 12:00	100%	16%	8%	5%	3%
März, 17:00	100%	40%	21%	13%	7%
Juni, 07:00	100%	22%	11%	7%	4%
Juni, 12:00	100%	9%	4%	3%	1%
Juni, 17:00	100%	22%	11%	7%	4%
September, 07:00	100%	34%	18%	11%	6%
September, 12:00	100%	11%	5%	3%	2%
September, 17:00	100%	34%	18%	11%	6%
Dezember, 12:00	100%	29%	15%	10%	5%
Mittelwert	100%	26%	13%	8%	4%

Tabelle 22: Stündliche erythemale Dosis zu den Referenzzeitpunkten relativ zu außen

7.5.4.2. Grafische Darstellung – März

Das folgende Säulendiagramm (Diagramm 79) zeigt die stündlichen erythemalen Dosen in J/m^2 auf eine senkrechte, nach dem Sonnenazimut orientierte Messfläche zu den Referenzzeitpunkten 07:00, 12:00 und 17:00 am 15. März, wobei die erste Säule die stündliche erythemale Dosis außen, unmittelbar vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheibe abbildet. Die jeweils vier anschließenden Säulen zeigen die ermittelten stündlichen erythemalen Dosen unmittelbar nach dem Durchgang durch eine unbeschichtete Einscheiben-Verglasung, eine Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung, eine Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung und eine Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung.

Mit einer strichlierten, horizontalen Linie gekennzeichnet ist der in Kapitel 7.5.3. erläuterte Grenzwert der minimalen Erythemdosis MED von $250 \text{ J}/\text{m}^2$.

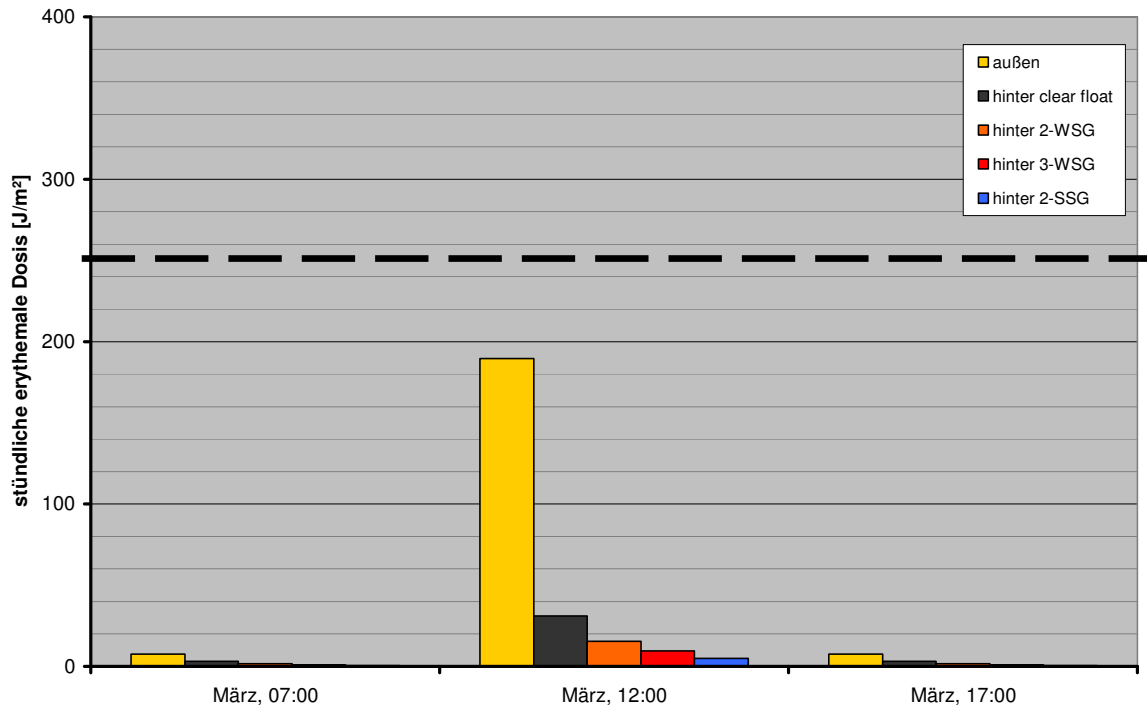


Diagramm 79: Stündliche erythemale Dosis zu den Referenzzeitpunkten des 15. März

Die drei nachfolgenden Liniendiagramme (Diagramm 80, Diagramm 81, Diagramm 82) zeigen die spektral verteilten erythemalen Strahlungsdichten auf eine vertikal sonnennachgeführte Messfläche in $W/(m^2nm)$ zu den Referenzzeitpunkten 07:00, 12:00 und 17:00 am 15. März. Wobei die Linie der spektral verteilten erythemalen Strahlungsdichte außen, jene Werte angibt, die unmittelbar vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheiben ermittelt wurden. Die weiteren vier abgebildeten Linien stellen die spektral verteilten erythemalen Strahlungsdichten unmittelbar nach dem Durchgang durch eine unbeschichtete Einscheiben-Verglasung, eine Zweischeiden-Wärmeschutzverglasung, eine Dreischeiden-Wärmeschutzverglasung und eine Zweischeiden-Sonnenschutzverglasung dar.

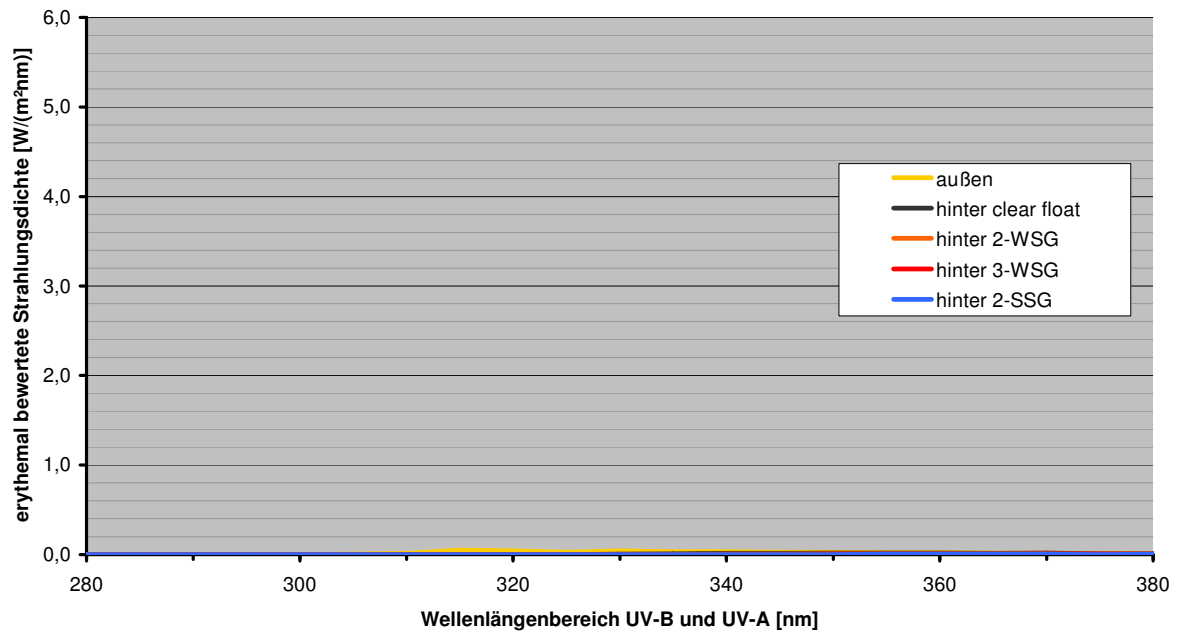


Diagramm 80: Spektrale erythemal bewertete Strahlungsdichte am 15. März um 07:00

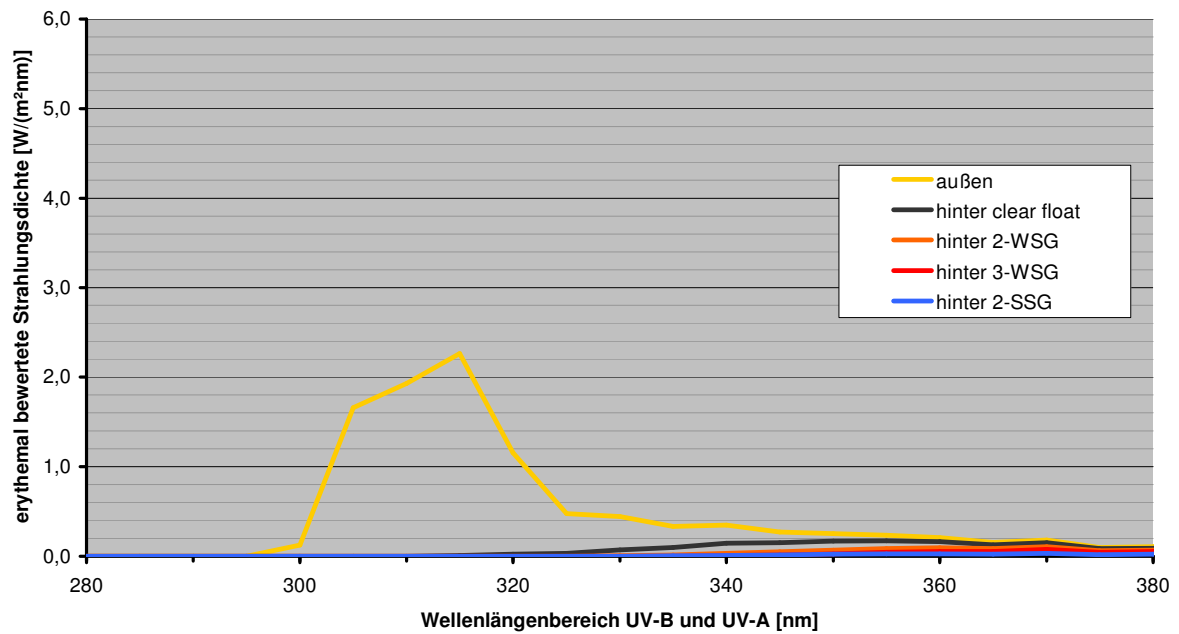


Diagramm 81: Spektrale erythemal bewertete Strahlungsdichte am 15. März um 12:00

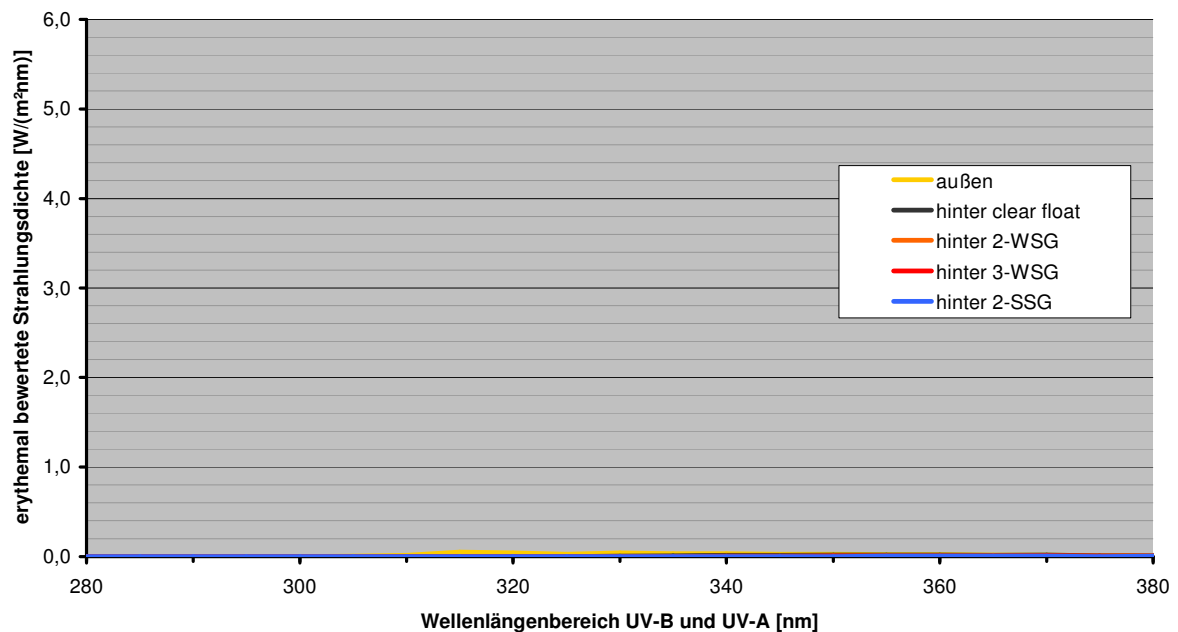


Diagramm 82: Spektrale erythemal bewertete Strahlungsdichte am 15. März um 17:00

7.5.4.3. Grafische Darstellung – Juni

Das Säulendiagramm (Diagramm 83) im Anschluss zeigt die stündlichen erythemalen Strahlungsdosen in J/m^2 auf eine senkrechte, nach dem Sonnenazimut orientierte Messfläche zu den Referenzzeitpunkten 07:00, 12:00 und 17:00 am 15. Juni. Die erste Säule bildet die stündliche erythemale Strahlungsdosis außen, unmittelbar vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheibe ab. Die jeweils vier anschließenden Säulen zeigen die ermittelten stündlichen erythemalen Strahlungsdosen unmittelbar nach dem Durchgang durch eine unbeschichtete Einscheiben-Verglasung, eine Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung, einer Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung und eine Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung.

Mit einer strichlierten, horizontalen Linie gekennzeichnet ist der in Kapitel 7.5.3. erläuterte Grenzwert der minimalen Erythemdosis MED von $250 J/m^2$.

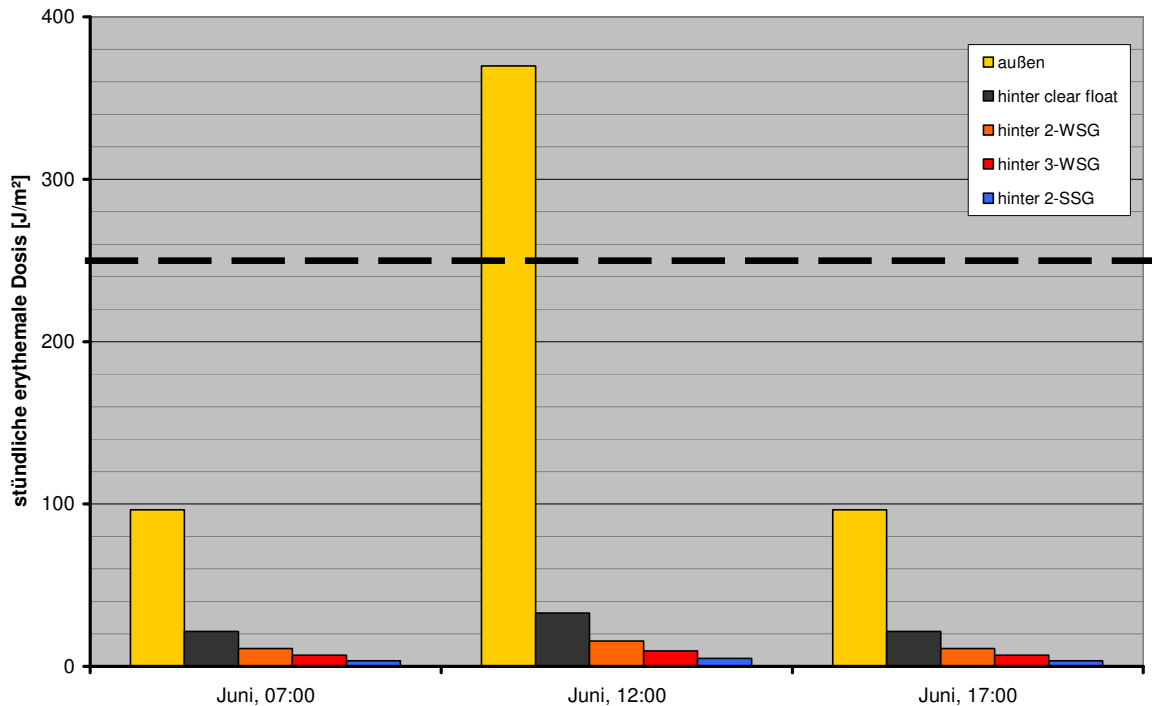


Diagramm 83: Stündliche erythemale Dosis zu den Referenzzeitpunkten des 15. Juni

Die drei nachfolgenden Liniendiagramme (Diagramm 84, Diagramm 85, Diagramm 86) zeigen die spektral verteilten erythemalen Strahlungsdichten auf eine vertikal sonnennachgeführte Messfläche in $W/(m^2nm)$ zu den Referenzzeitpunkten 07:00, 12:00 und 17:00 am 15. Juni. Wobei die Linie der spektral verteilten erythemalen Strahlungsdichte außen, jene Werte angibt, die unmittelbar vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheiben ermittelt wurden. Die weiteren vier abgebildeten Linien bilden die spektral verteilten erythemalen Strahlungsdichten unmittelbar nach dem Durchgang durch eine unbeschichtete Einscheiben-Verglasung, eine Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung, eine Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung und eine Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung ab.

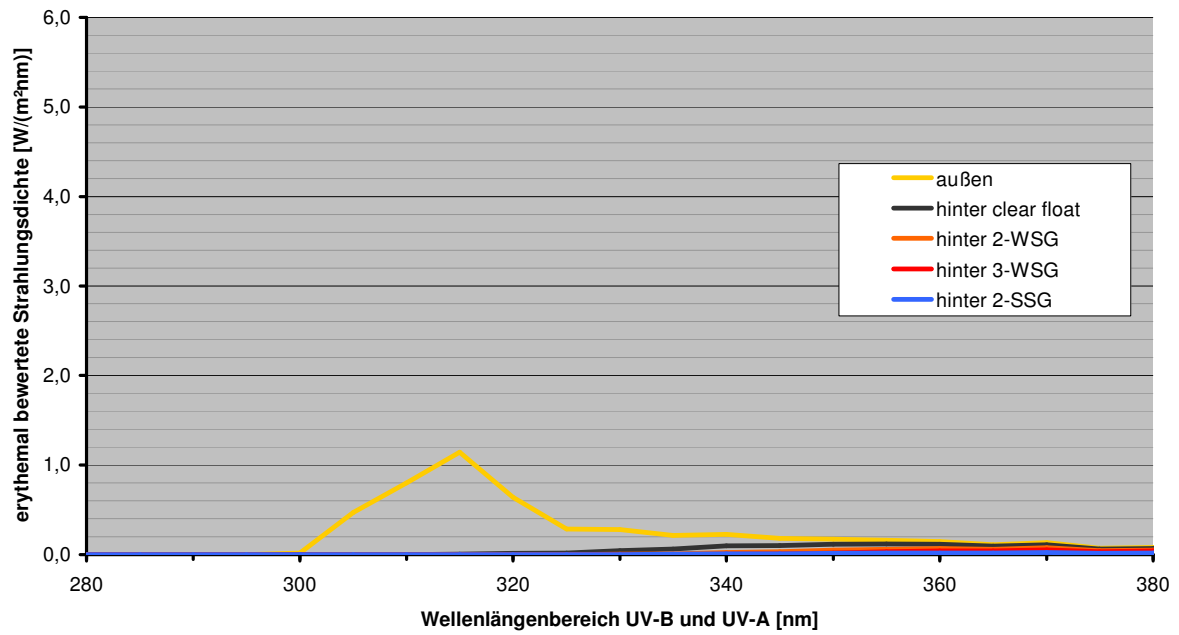


Diagramm 84: Spektrale erythemal bewertete Strahlungsdichte am 15. Juni um 07:00

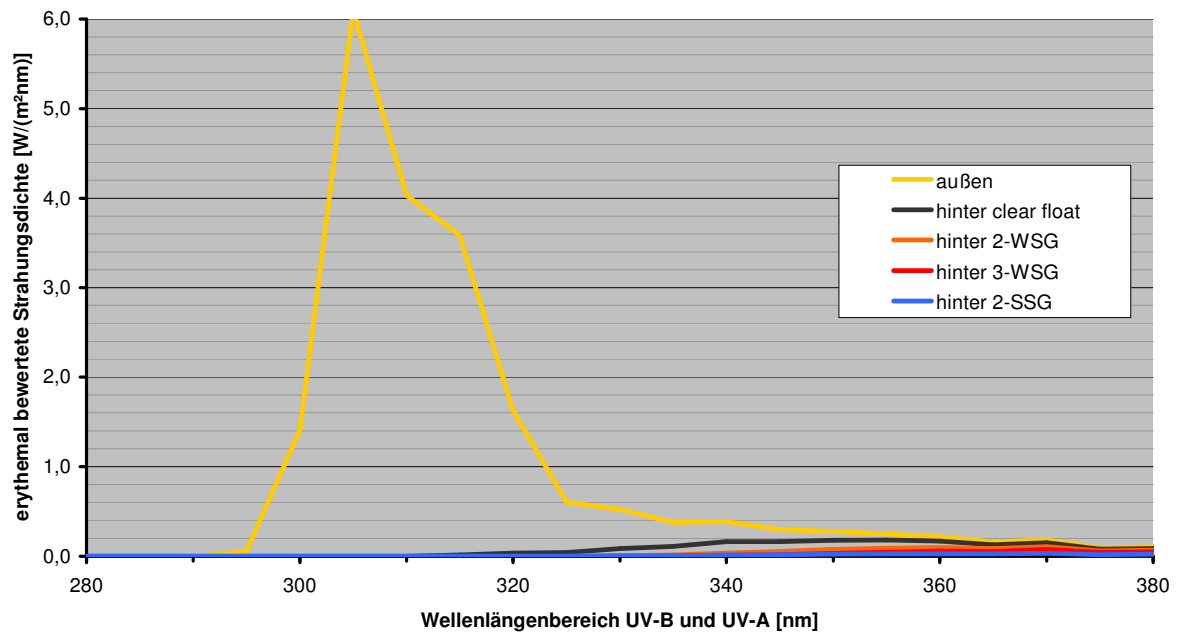


Diagramm 85: Spektrale erythemal bewertete Strahlungsdichte am 15. Juni um 12:00

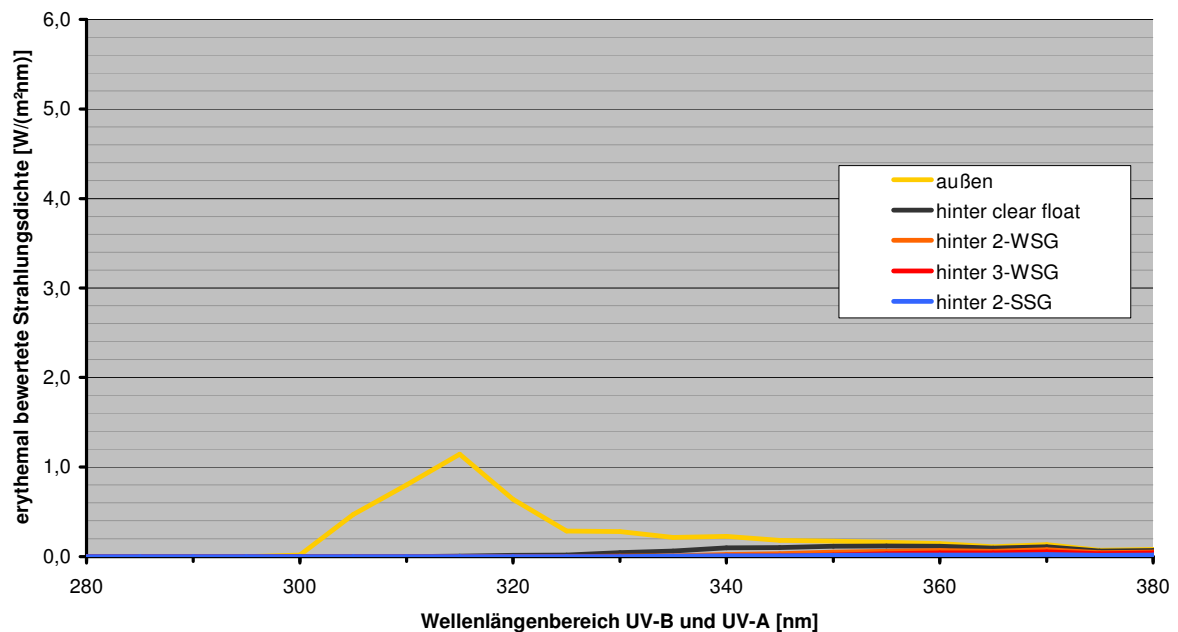


Diagramm 86: Spektrale erythemal bewertete Strahlungsdichte am 15. Juni um 17:00

7.5.4.4. Grafische Darstellung – September

Das Säulendiagramm (Diagramm 87) im Anschluss zeigt die stündlichen erythemalen Strahlungsdosen in J/m^2 auf eine senkrechte, nach dem Sonnenazimut orientierte Messfläche zu den Referenzzeitpunkten 07:00, 12:00 und 17:00 am 15. September. Die erste Säule bildet die stündliche erythemale Strahlungsdosis außen, unmittelbar vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheibe ab. Die jeweils vier anschließenden Säulen zeigen die ermittelten stündlichen erythemalen Strahlungsdosen unmittelbar nach dem Durchgang durch eine unbeschichtete Einscheiben-Verglasung, eine Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung, eine Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung und eine Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung.

Mit einer strichlierten, horizontalen Linie gekennzeichnet ist der in Kapitel 7.5.3. erläuterte Grenzwert der minimalen Erythemdosis MED von $250 J/m^2$.

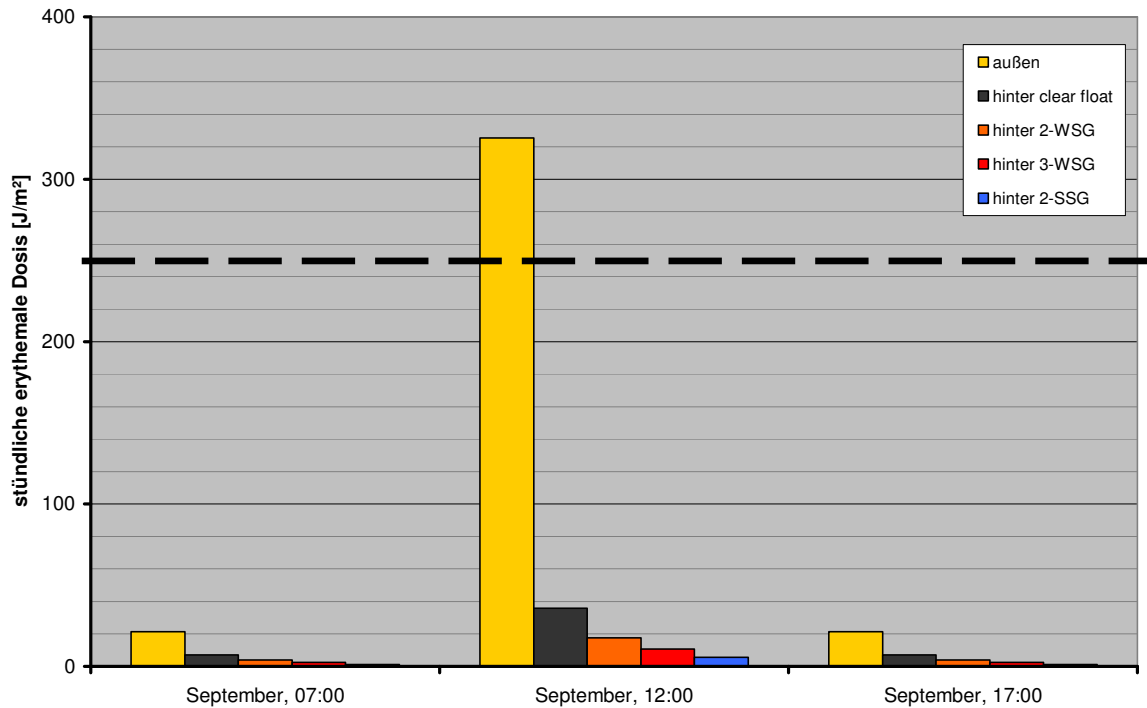


Diagramm 87: Stündliche erythemale Dosis zu den Referenzzeitpunkten des 15. September

Die drei nachfolgenden Liniendiagramme (Diagramm 88, Diagramm 89, Diagramm 90) zeigen die spektral verteilten erythemal bewerteten Strahlungsdichten auf eine vertikal sonnennachgeführte Messfläche in $W/(m^2nm)$ zu den Referenzzeitpunkten 07:00, 12:00 und 17:00 am 15. September. Wobei die Linie der spektral verteilten erythemal bewerteten Strahlungsdichte außen, jene Werte angibt, die unmittelbar vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheiben ermittelt wurden. Die weiteren vier abgebildeten Linien zeigen die spektral verteilten erythemal bewerteten Strahlungsdichten unmittelbar nach dem Durchgang durch eine unbeschichtete Einscheiben-Verglasung, eine Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung, eine Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung sowie eine Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung.

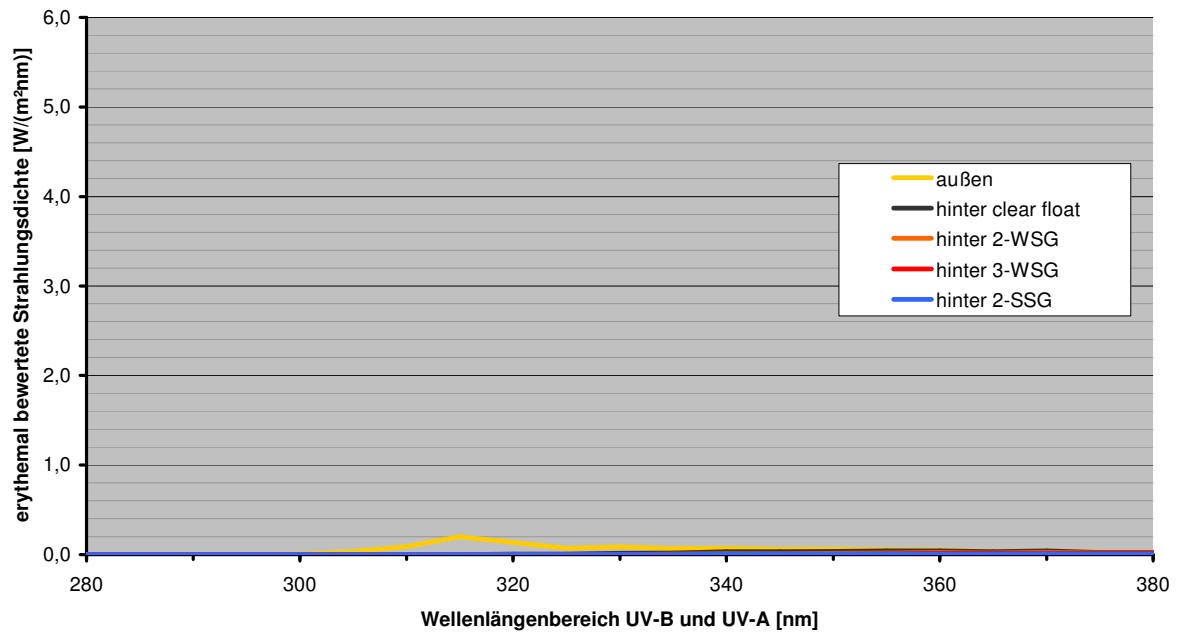


Diagramm 88: Spektrale erythemal bewertete Strahlungsdichte am 15. September um 07:00

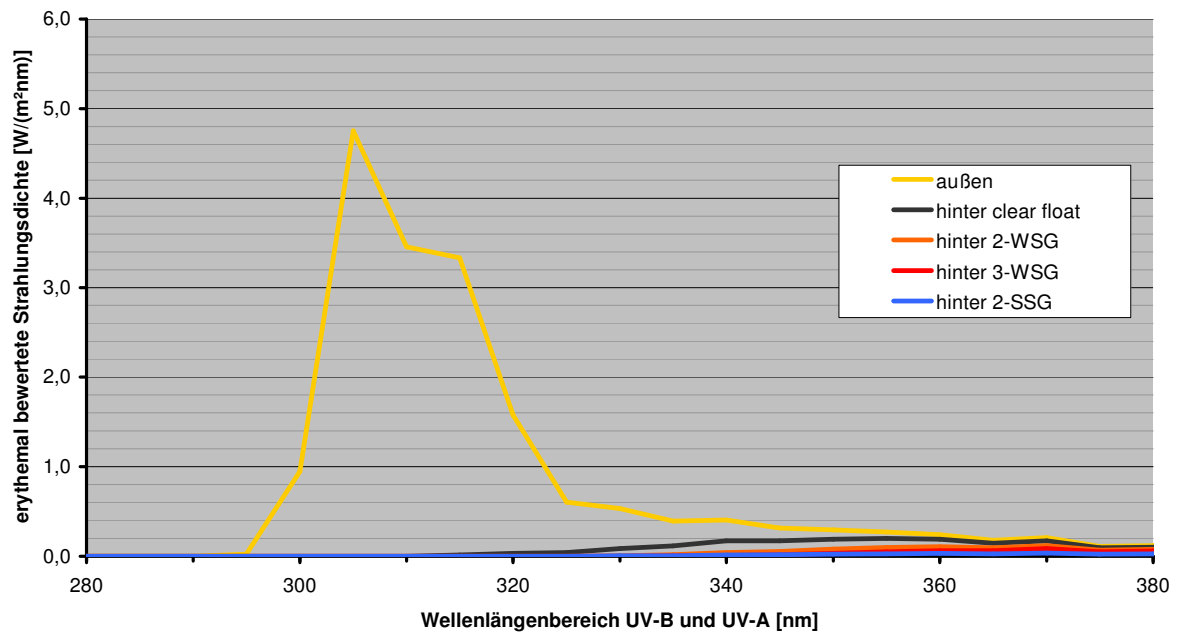


Diagramm 89: Spektrale erythemal bewertete Strahlungsdichte am 15. September um 12:00

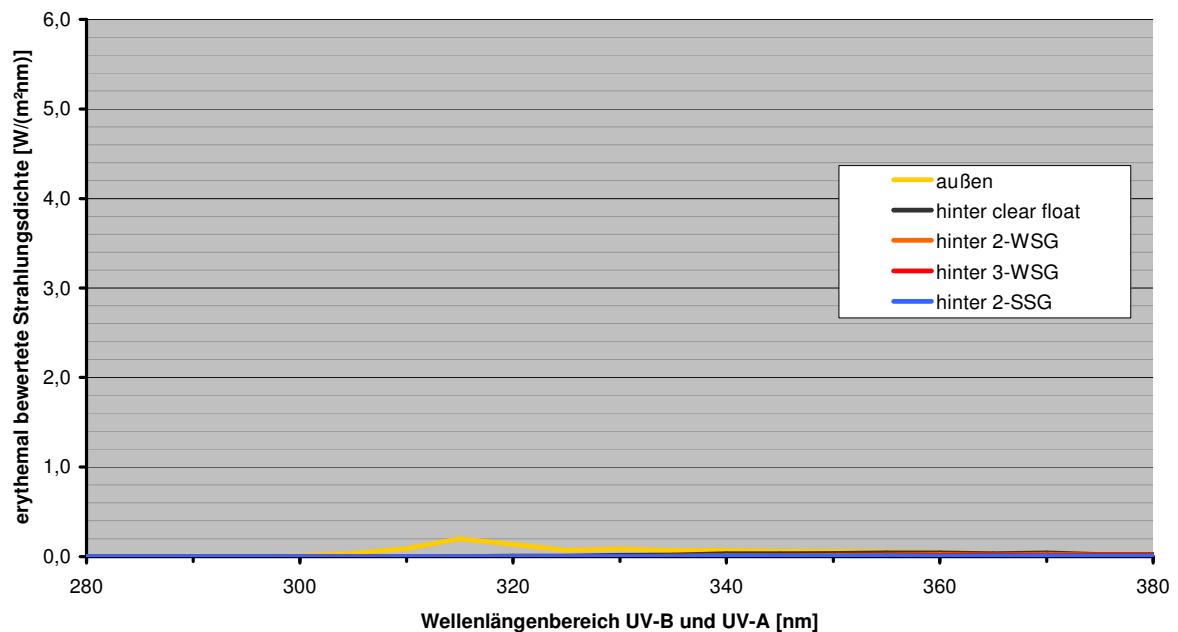


Diagramm 90: Spektrale erythemal bewertete Strahlungsdichte am 15. September um 17:00

7.5.4.5. Grafische Darstellung – Dezember

Schließlich gibt das Säulendiagramm (Diagramm 91) im Anschluss die stündliche erythemale Strahlungsdosis in J/m^2 auf eine senkrechte, nach dem Sonnenazimut orientierte Messfläche zum Referenzzeitpunkt 12:00 am 15. Dezember an. Die erste Säule bildet die stündliche erythemale Strahlungsdosis außen, unmittelbar vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheibe ab. Die vier anschließenden Säulen zeigen die stündlichen erythemalen Strahlungsdosen unmittelbar nach dem Durchgang durch eine unbeschichtete Einscheiben-Verglasung, eine Zweisheiben-Wärmeschutzverglasung, eine Dreisheiben-Wärmeschutzverglasung und eine Zweisheiben-Sonnenschutzverglasung.

Mit einer strichlierten, horizontalen Linie gekennzeichnet ist der in Kapitel 7.5.3. erläuterte Grenzwert der minimalen Erythemdosis MED von $250 J/m^2$.

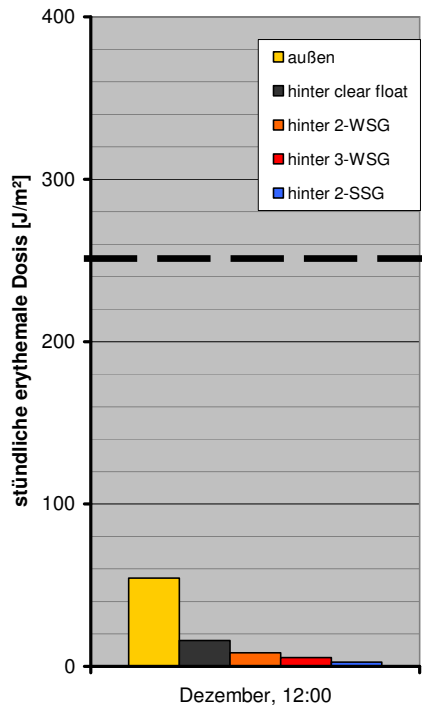


Diagramm 91: Stündliche erythemale Dosen zu den Referenzzeitpunkten des 15. Dezember

Das folgende abschließende Liniendiagramm (Diagramm 92) zur spektral verteilten erythemalen Strahlungsdichte in $W/(m^2nm)$ zeigt die auf eine vertikal sonnennachgeführte Messfläche zum Referenzzeitpunkt 12:00 15. Dezember ermittelten Werte. Wobei die Linie der spektral verteilten erythemalen Strahlungsdichte außen, jene Werte abbildet, die unmittelbar vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheibe errechnet wurden. Die weiteren vier abgebildeten Linien stellen spektral verteilten erythemalen Strahlungsdichten unmittelbar nach dem Durchgang durch eine unbeschichtete Einscheiben-Verglasung, eine Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung, eine Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung und eine Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung dar.

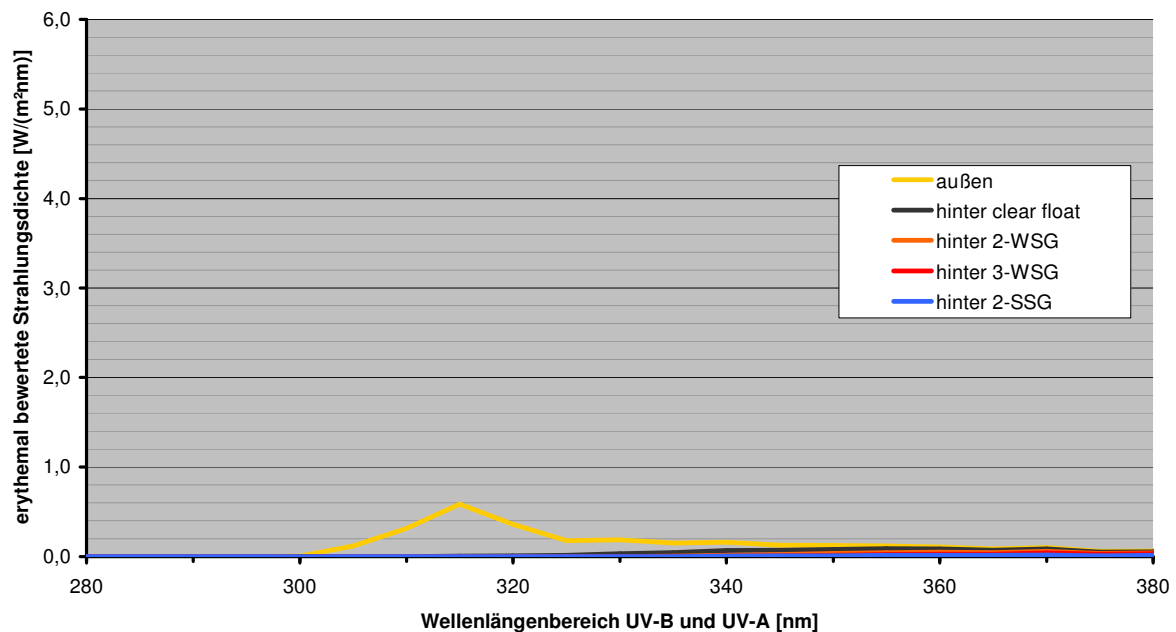


Diagramm 92: Spektrale erythemal bewertete Strahlungsdichte am 15. Dezember um 12:00

7.6. Auswertung Pre-Vitamin D₃ Photosynthese

7.6.1. Wirkpotential

Aufgrund der zentralen Bedeutung des Vitamin D₃ für die Gewährleistung unterschiedlicher humanphysiologischer Abläufe wird in der gegenständlichen Arbeit die Pre-Vitamin D₃ Photosynthese hinter technischen Funktionsgläsern untersucht. Details zur Bedeutung von Vitamin D₃ und der Pre-Vitamin D₃ Photosynthese sind in Kapitel 6.1.4 beschrieben.

Wirkpotential zur Beschreibung der Pre-Vitamin D₃ Photosynthese ist die Pre-Vitamin D₃ bewertete Strahlungs-dosis in der Einheit mJ pro cm² exponierter Hautoberfläche. Analog der Auswertung der Erythem-bildung werden auch die Diagramme der Pre-Vitamin D₃ Photosynthese über der Wellenlänge als flächenbezogene Strahlungsleistung dargestellt, in der Einheit von W/(m²nm).

7.6.2. Wirkungs-Kurve

Für die Pre-Vitamin D₃ Photosynthese existiert eine Wirkungs-Kurve, mit einem Empfindlichkeitsmaximum bei einer Wellenlänge von 295 nm und einem steilen Abfall gegen Null im Wellenlängenbereich bis 330 nm und demnach bereits im Spektralbereich des UV-A Strahlung.⁹⁸⁹

⁹⁸⁹ CIE (2006)

7.6.3. Schwell- und Grenzwerte

Für das Einsetzen der Vitamin D₃ Photosynthese liegt ein Schwellwert in Form einer minimal erforderlichen, physiologisch bewerteten Strahlungsdosis vor. In Anwendung der diesbezüglichen Fachliteratur wird dieser Schwellwert in der gegenständlichen Arbeit mit 18 mJ/cm² angenommen.^{990,991,992}

7.6.4. Ergebnisse

Bereits unbeschichtetes Floatglas ist für Strahlung in den zur Pre-Vitamin D₃ Photosynthese erforderlichen Wellenlängenbereichen praktisch intransparent. Es ist demnach nachdrücklich festzuhalten, dass hinter Gläsern kein in irgendeiner Weise relevantes Wirkpotential zur Pre-Vitamin D₃ Photosynthese vorliegt. Diese Tatsache gilt sowohl für unbeschichtetes als auch für beschichtetes Glas, wie die folgenden Tabellen und Diagramme belegen.

Im Außenraum wird die Schwelle der Pre-Vitamin D₃ Photosynthese von 18 mJ/cm² während der Mittagsstunden etwa des Referenztages im Juni binnen einer viertel Stunde erreicht, im September binnen einer halben Stunde, im März binnen knapp einer dreiviertel Stunde. Bemerkenswert ist, dass während der wolkenlos angenommenen Mittagsstunde des Dezembers nur 4 mJ/cm² und somit nur weniger als ein Viertel des Schwellwertes erreicht werden. Was wiederum vor dem Hintergrund an Bedeutung gewinnt, als im Dezember die statistische Tagessumme der Bestrahlungsstärke nur um ca. 15% über der Stundensumme bei wolkenlosen Referenzbedingungen liegt.

Dieser Zusammenhang ist insofern bemerkenswert, als die Bestrahlungsstärke auf die vertikale Messfläche zur Mittagsstunde des Referenztages im Dezember sogar über jener im Juni liegt. Durch den längeren Weg der Sonnenstrahlung durch die Atmosphäre kommt es aber zu einer überproportionalen Extinktion der kurzwelligen Strahlungsanteile und somit zu einer weitgehenden Wirkungslosigkeit der Wintersonne für die Pre-Vitamin D₃ Photosynthese.

Es kann also festgehalten werden, dass unter wolkenlosen Situationen des Sommerhalbjahres im Außenraum bereits Sonnenexpositionen von einer viertel Stunde aufwärts zum Start der Pre-Vitamin D₃ Photosynthese ausreichend sind, während im Winterhalbjahr Strahlungssituationen die Regel sind, in denen der erforderliche Schwellwert selbst im Außenraum innerhalb des ganzen Tages nicht erreicht werden kann.

⁹⁹⁰ Hollys (2005)

⁹⁹¹ Andere Quellen geben eine etwas höhere Schwellenbestrahlung von 200 J/m² als erforderlich an. Fisch (2000).

⁹⁹² Fisch (2000)

7.6.4.1. Tabellarische Übersicht

In der folgenden Tabelle (Tabelle 23) sind die stündlichen Pre-Vitamin D₃ bewerteten Dosen in mJ/cm² zu den zehn Referenzzeitpunkten am 15. März um 07:00, um 12:00 und um 17:00, am 15. Juni um 07:00, um 12:00 und um 17:00, am 15. September um 07:00, um 12:00 und um 17:00, sowie am 15. Dezember⁹⁹³ um 12:00 auf eine senkrechte, nach dem Sonnenazimut orientierte Messfläche zusammengefasst.

In der ersten Ergebnisspalte sind die stündlichen Pre-Vitamin D₃ bewerteten Dosen außen, also unmittelbar vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheibe angegeben. In den nachfolgenden Ergebnisspalten sind die ermittelten stündlichen Pre-Vitamin D₃ bewerteten Dosen unmittelbar nach dem Durchgang durch eine unbeschichtete Einscheiben-Verglasung, eine Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung, eine Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung und eine Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung angeführt.

	außen mJ/cm ²	hinter clear float mJ/cm ²	hinter 2-WSG mJ/cm ²	hinter 3-WSG mJ/cm ²	hinter 2-SSG mJ/cm ²
März, 07:00	0	0	0	0	0
März, 12:00	26	0	0	0	0
März, 17:00	0	0	0	0	0
Juni, 07:00	10	0	0	0	0
Juni, 12:00	67	0	0	0	0
Juni, 17:00	10	0	0	0	0
September, 07:00	1	0	0	0	0
September, 12:00	55	0	0	0	0
September, 17:00	1	0	0	0	0
Dezember, 12:00	4	0	0	0	0

Tabelle 23: Stündliche Pre-Vitamin D₃ bewertete Strahlungsdosis zu den Referenzzeitpunkten

In der anschließend abgebildeten Tabelle (Tabelle 24) sind die ermittelten stündlichen Pre-Vitamin D₃ bewerteten Strahlungsdosen aus Tabelle 23 als Relativwerte in % angegeben, wobei als Bezugsgrößen die stündlichen Pre-Vitamin D₃ bewerteten Strahlungsdosen zu den jeweiligen Referenzzeitpunkten außen vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheibe mit 100% angegeben werden. Die letzte Zeile der Tabelle führt die stündlichen Pre-Vitamin D₃ bewerteten Strahlungsdosen unmittelbar nach dem Durchgang durch die jeweilige Funktionsglasscheibe als Mittelwert der in den Zeilen oberhalb ausgeworfenen Relativwerte der stündlichen Pre-Vitamin D₃ bewerteten Strahlungsdosis an.

	außen %	hinter clear float %	hinter 2-WSG %	hinter 3-WSG %	hinter 2-SSG %
März, 07:00	100%	1%	0%	0%	0%
März, 12:00	100%	0%	0%	0%	0%
März, 17:00	100%	1%	0%	0%	0%
Juni, 07:00	100%	0%	0%	0%	0%
Juni, 12:00	100%	0%	0%	0%	0%
Juni, 17:00	100%	0%	0%	0%	0%
September, 07:00	100%	1%	0%	0%	0%
September, 12:00	100%	0%	0%	0%	0%
September, 17:00	100%	1%	0%	0%	0%
Dezember, 12:00	100%	0%	0%	0%	0%
Mittelwert	100%	0%	0%	0%	0%

Tabelle 24: Stündliche Pre-Vitamin D₃ bewertete Strahlungsdosis zu den Referenzzeitpunkten relativ zu außen

⁹⁹³ Zu den aus photophysiologischer Sicht relevanten Tageszeitpunkten um etwa 07:00 morgens und um etwa 17:00 nachmittags ist die Sonne noch nicht aufgegangen beziehungsweise bereits untergegangen. Diese beiden Tageszeitpunkte sind daher als Referenzzeitpunkte im Sinne der vorliegenden Arbeit irrelevant.

7.6.4.2. Grafische Darstellung – März

Das Säulendiagramm (Diagramm 93) im Anschluss zeigt die stündlichen Pre-Vitamin D₃ bewerteten Strahlungsdosen in mJ/cm² auf eine senkrechte, nach dem Sonnenazimut orientierte Messfläche zu den Referenzzeitpunkten 07:00, 12:00 und 17:00 am 15. März. Die erste Säule bildet die stündliche Pre-Vitamin D₃ bewertete Strahlungsdosis außen, unmittelbar vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheibe ab. Die jeweils vier anschließenden Säulen zeigen die ermittelten stündlichen Pre-Vitamin D₃ bewerteten Strahlungsdosen unmittelbar nach dem Durchgang durch eine unbeschichtete Einscheiben-Verglasung, eine Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung, eine Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung und eine Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung.

Mit einer strichlierten, horizontalen Linie gekennzeichnet ist der in Kapitel 7.6.3. erläuterte Schwellwert 18 mJ/cm² für das Einsetzen der Vitamin D₃ Photosynthese.

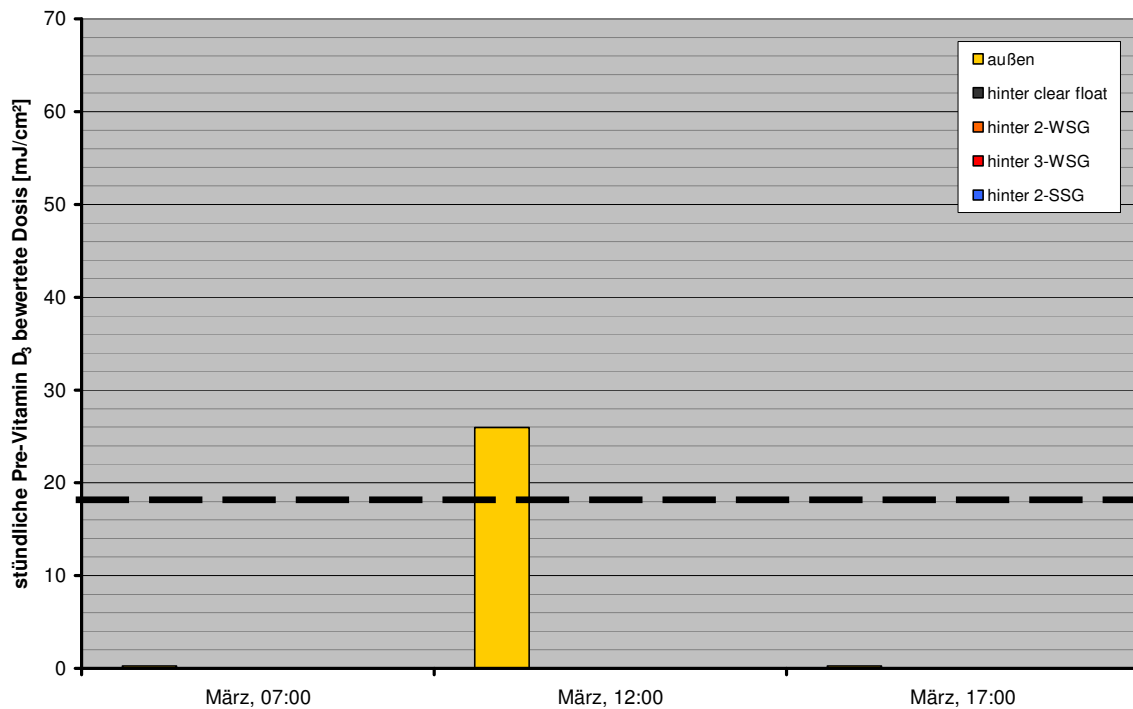


Diagramm 93: Stündliche Pre-Vitamin D₃ bewertete Dosen zu den Referenzzeitpunkten des 15. März

Die drei im Folgenden abgebildeten Liniendiagramme (Diagramm 94, Diagramm 95, Diagramm 96) zeigen die spektral verteilte Pre-Vitamin D₃ bewerteten Strahlungsdichten auf eine vertikal sonnennachgeführte Messfläche in W/(m²nm) zu den Referenzzeitpunkten 07:00, 12:00 und 17:00 am 15. März. Wobei die Linie der spektral verteilten Pre-Vitamin D₃ bewerteten Strahlungsdichte außen, jene Werte angibt, die unmittelbar vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheiben ermittelt wurden. Die weiteren vier abgebildeten Linien stellen die spektral verteilten Pre-Vitamin D₃ bewerteten Strahlungsdichten unmittelbar nach dem Durchgang durch eine unbeschichtete Einscheiben-Verglasung, eine Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung, eine Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung und eine Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung dar.

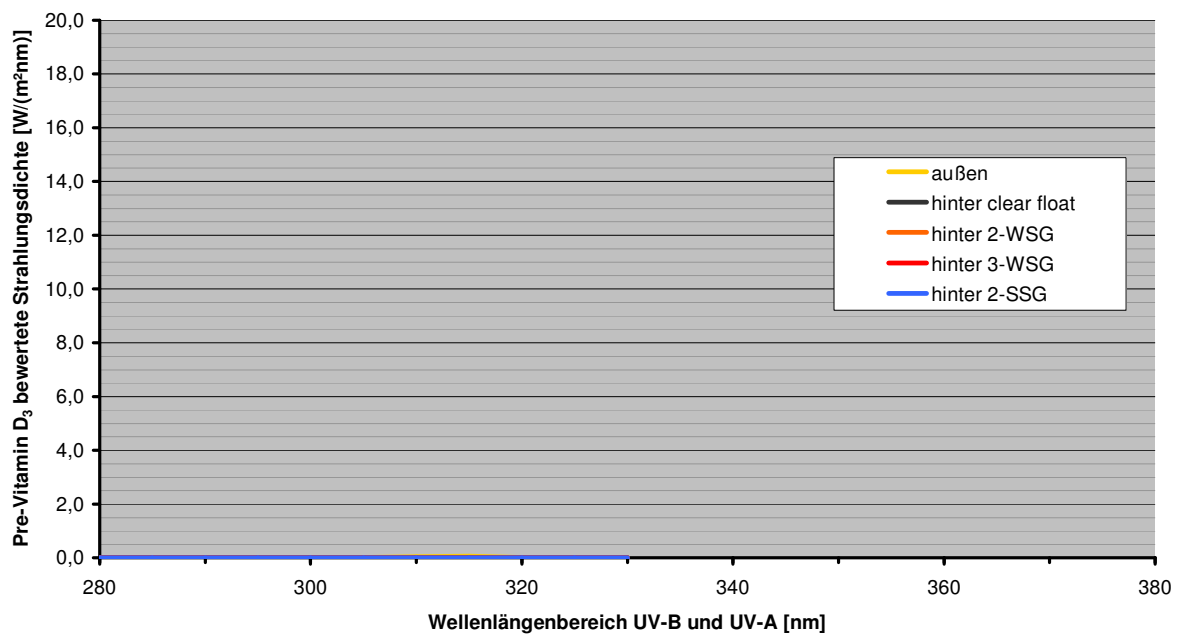


Diagramm 94: Spektrale Pre-Vitamin D₃ bewertete Strahlungsdichte am 15. März, 07:00

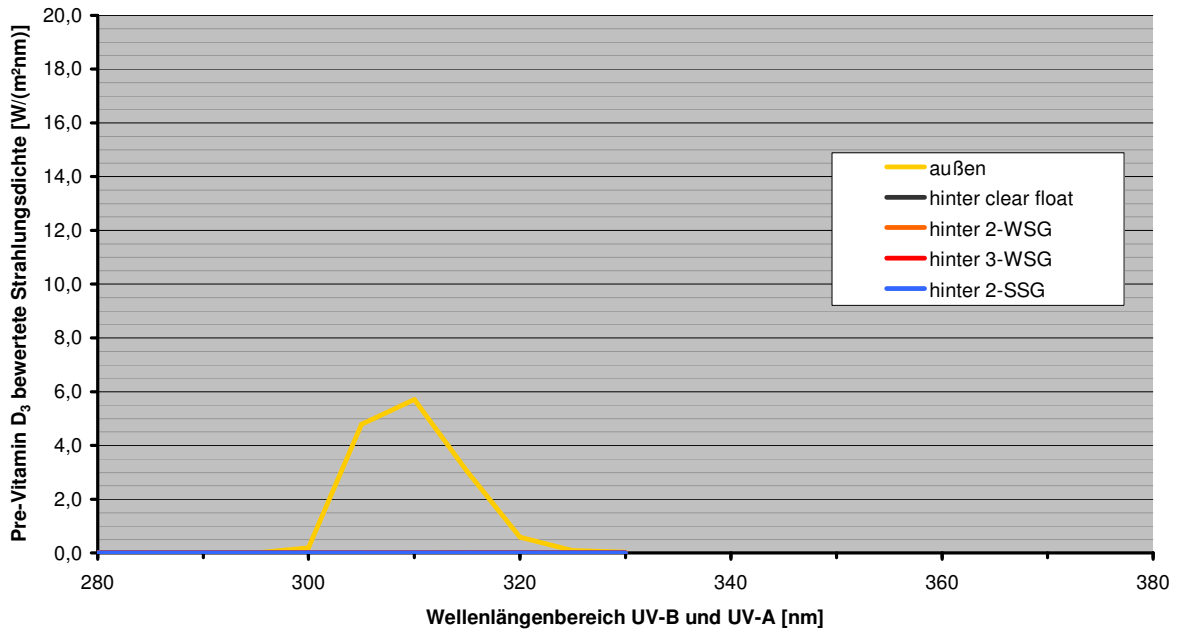


Diagramm 95: Spektrale Pre-Vitamin D₃ bewertete Strahlungsdichte am 15. März, 12:00

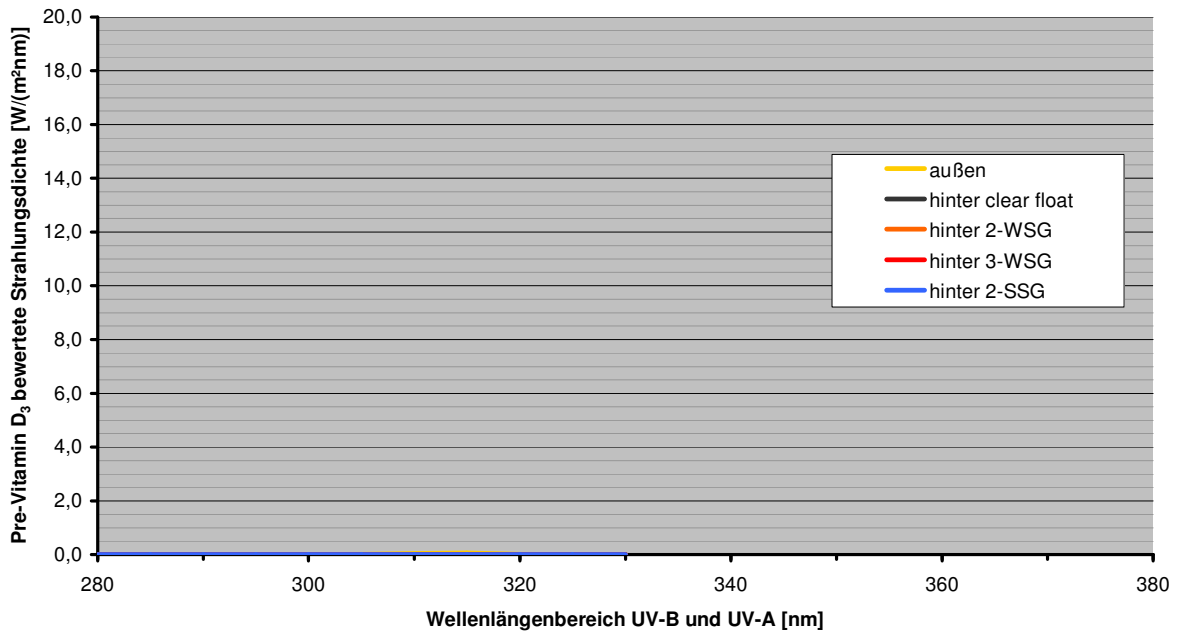


Diagramm 96: Spektrale Pre-Vitamin D₃ bewertete Strahlungsdichte am 15. März, 17:00

7.6.4.3. Grafische Darstellung – Juni

Das folgende Säulendiagramm (Diagramm 97) zeigt die stündlichen Pre-Vitamin D₃ bewerteten Strahlungsdosen in mJ/cm² auf eine senkrechte, nach dem Sonnenazimut orientierte Messfläche zu den Referenzzeitpunkten 07:00, 12:00 und 17:00 am 15. Juni. Die erste Säule zeigen die stündliche Pre-Vitamin D₃ bewertete Strahlungsdosis außen, unmittelbar vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheibe ab. Die jeweils vier anschließenden Säulen stellen die ermittelten stündlichen Pre-Vitamin D₃ bewerteten Strahlungsdosen unmittelbar nach dem Durchgang durch eine unbeschichtete Einscheiben-Verglasung, eine Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung, eine Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung und eine Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung ab.

Mit einer strichlierten, horizontalen Linie gekennzeichnet ist der in Kapitel 7.6.3. erläuterte Schwellwert 18 mJ/cm² für das Einsetzen der Vitamin D₃ Photosynthese.

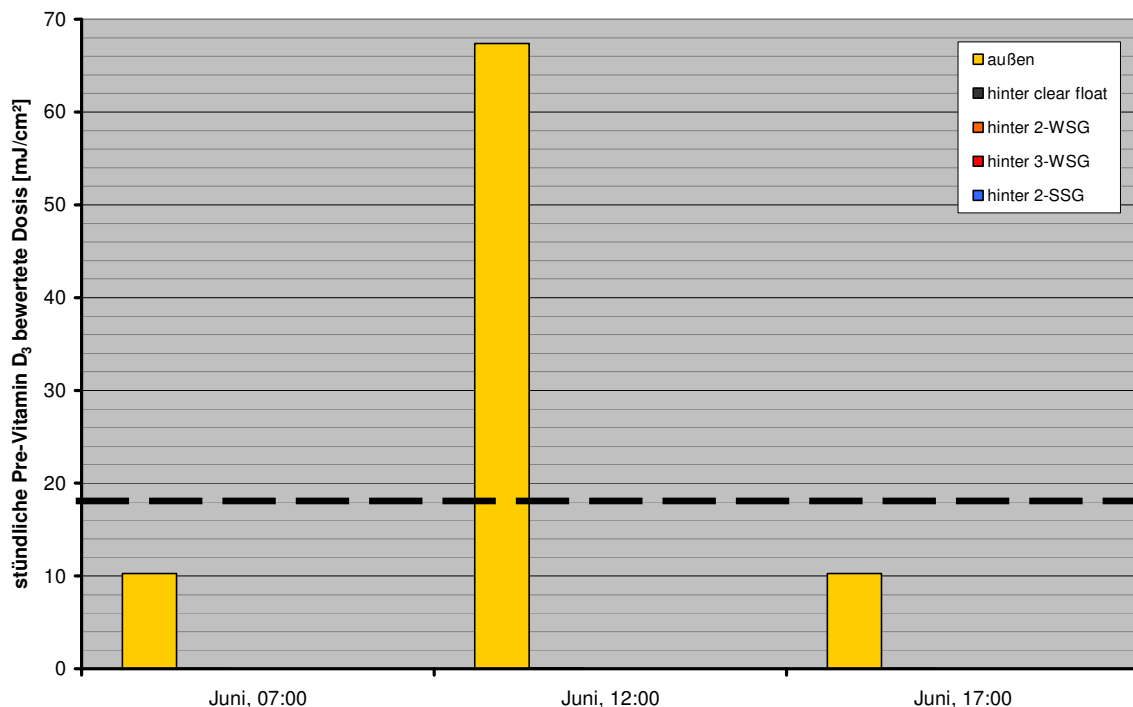


Diagramm 97: Stündliche Pre-Vitamin D₃ bewertete Dosis zu den Referenzzeitpunkten des 15. Juni

Die drei nachfolgenden Liniendiagramme (Diagramm 98, Diagramm 99, Diagramm 100) zeigen die spektral verteilte Pre-Vitamin D₃ bewerteten Strahlungsdichten auf eine vertikal sonnennachgeführte Messfläche in W/(m²nm) zu den Referenzzeitpunkten 07:00, 12:00 und 17:00 am 15. Juni. Wobei die Linie der spektral verteilten Pre-Vitamin D₃ bewerteten Strahlungsdichte außen, jene Werte angibt, die unmittelbar vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheiben ermittelt wurden. Die weiteren vier abgebildeten Linien bilden die spektral verteilten Pre-Vitamin D₃ bewerteten Strahlungsdichten unmittelbar nach dem Durchgang durch eine unbeschichtete Einscheiben-Verglasung, eine Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung, eine Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung und eine Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung ab.

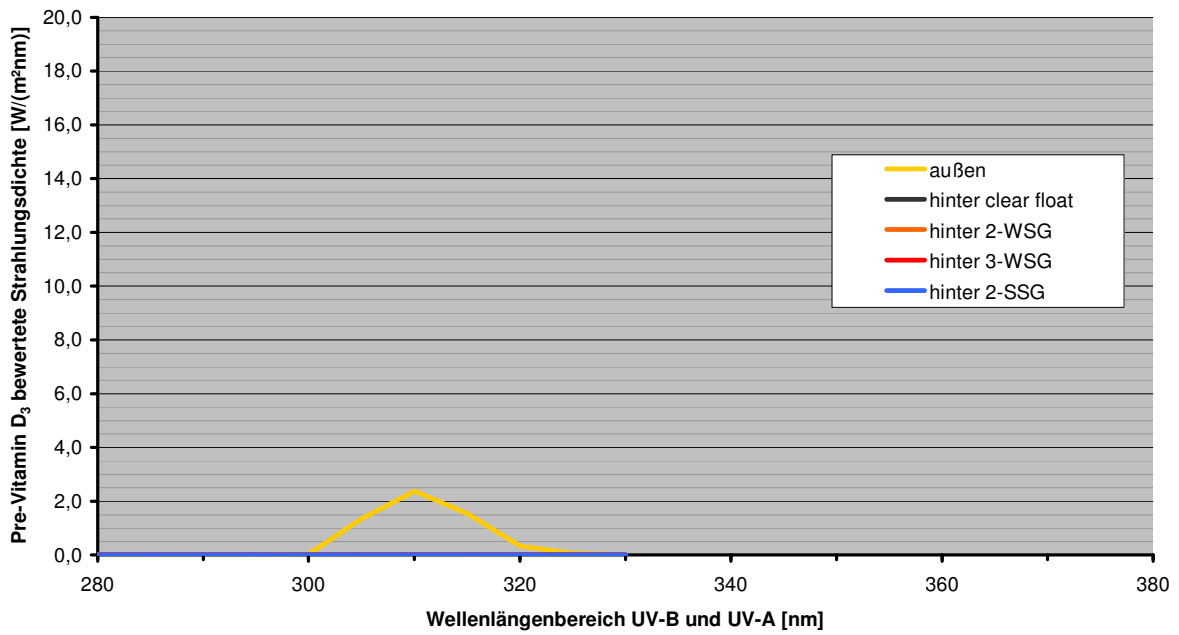


Diagramm 98: Spektrale Pre-Vitamin D₃ bewertete Strahlungsdichte am 15. Juni, 07:00

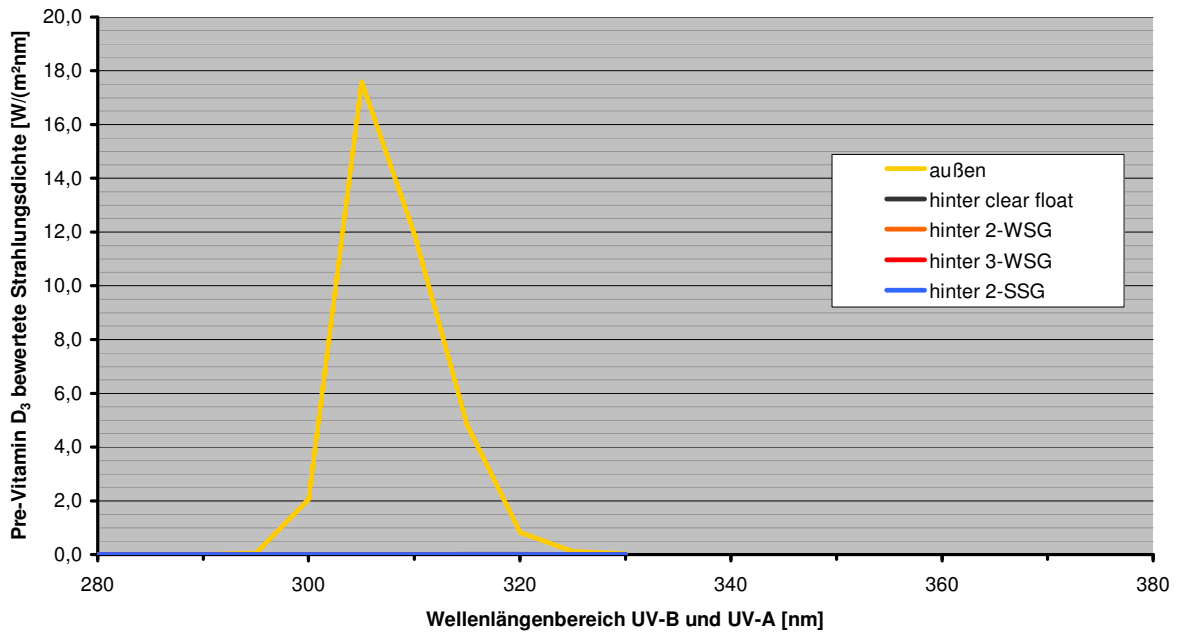


Diagramm 99: Spektrale Pre-Vitamin D₃ bewertete Strahlungsdichte am 15. Juni, 12:00

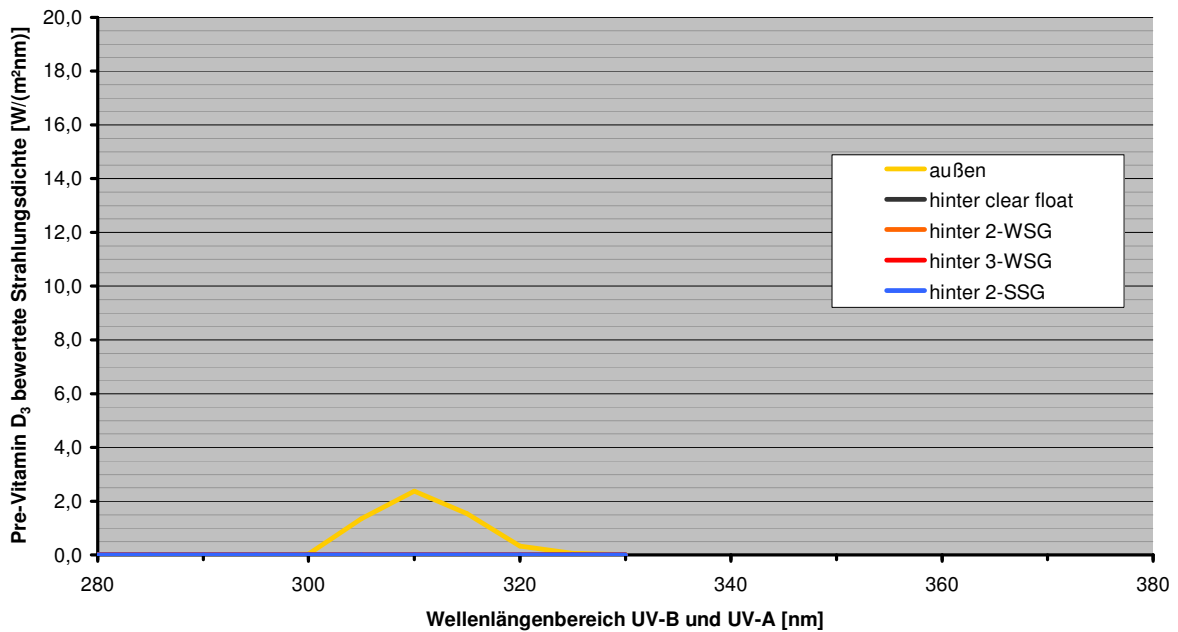


Diagramm 100: Spektrale Pre-Vitamin D₃ bewertete Strahlungsdichte am 15. Juni, 17:00

7.6.4.4. Grafische Darstellung – September

Das folgende Säulendiagramm (Diagramm 101) bildet die stündlichen Pre-Vitamin D₃ bewerteten Strahlungsdosen in mJ/cm² auf eine senkrechte, nach dem Sonnenazimut orientierte Messfläche zu den Referenzzeitpunkten 07:00, 12:00 und 17:00 am 15. September ab. Die erste Säule stellt die stündliche Pre-Vitamin D₃ bewertete Strahlungsdosis außen, unmittelbar vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheibe dar. Die jeweils vier anschließenden Säulen zeigen die ermittelten stündlichen Pre-Vitamin D₃ bewerteten Strahlungsdosen unmittelbar nach dem Durchgang durch eine unbeschichtete Einscheiben-Verglasung, eine Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung, eine Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung und eine Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung.

Mit einer strichlierten, horizontalen Linie gekennzeichnet ist der in Kapitel 7.6.3. erläuterte Schwellwert 18 mJ/cm² für das Einsetzen der Vitamin D₃ Photosynthese.

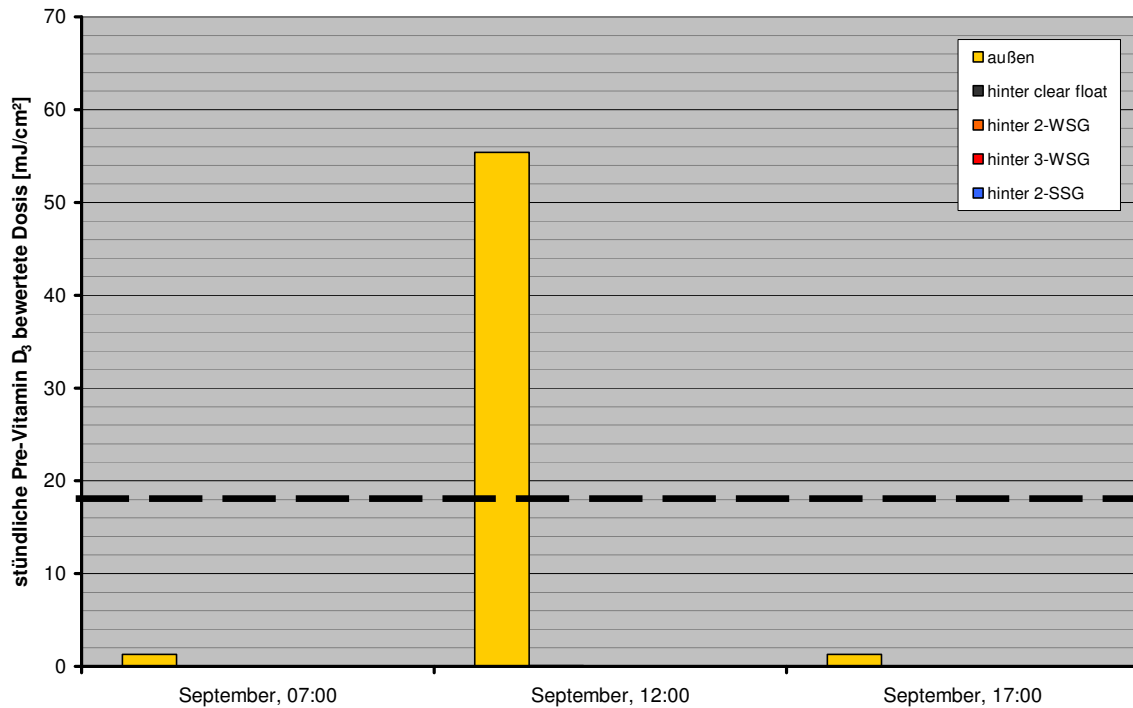


Diagramm 101: Stündliche Pre-Vitamin D₃ bewertete Dosis zu den Referenzzeitpunkten des 15. September

Die drei im Anschluss abgebildeten Liniendiagramme (Diagramm 102, Diagramm 103, Diagramm 104) zeigen die spektral verteilte Pre-Vitamin D₃ bewertete Strahlungsdichte auf eine vertikal sonnennachgeführte Messfläche in W/(m²nm) zu den Referenzzeitpunkten 07:00, 12:00 und 17:00 am 15. September. Wobei die Linie der spektral verteilten Pre-Vitamin D₃ bewerteten Strahlungsdichte außen, jene Werte angibt, die unmittelbar vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheiben ermittelt wurden. Die weiteren vier abgebildeten Linien stellen die spektral verteilten Pre-Vitamin D₃ bewerteten Strahlungsdichten unmittelbar nach dem Durchgang durch eine unbeschichtete Einscheiben-Verglasung, eine Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung, eine Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung und eine Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung dar.

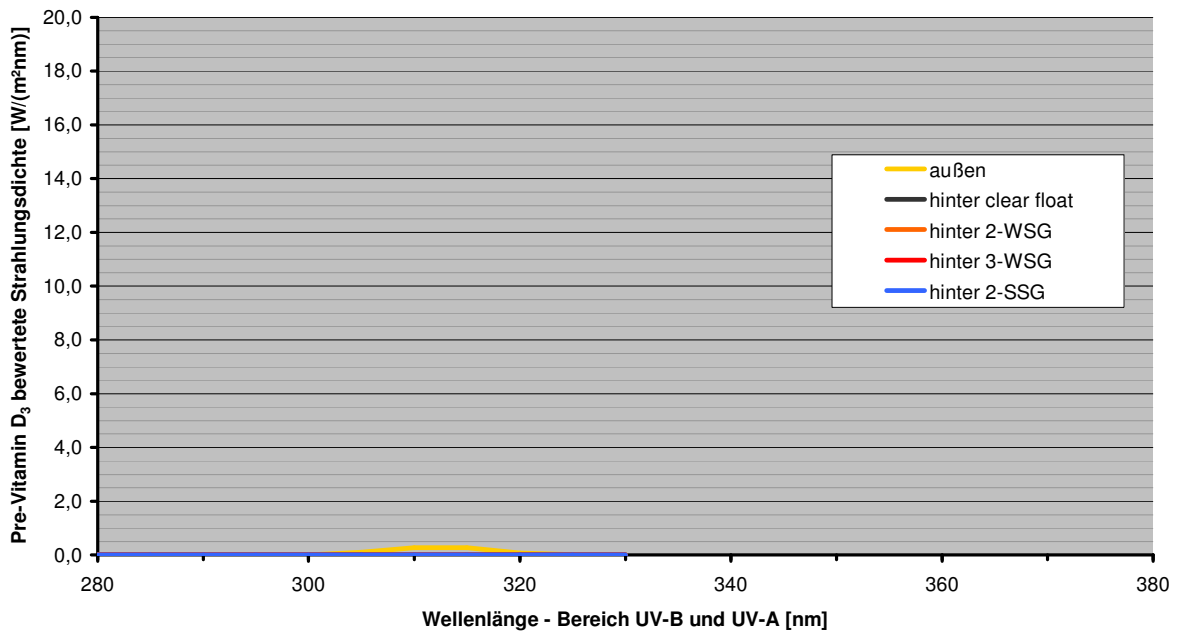


Diagramm 102: Spektrale Pre-Vitamin D₃ bewertete Strahlungsdichte am 15. September, 07:00

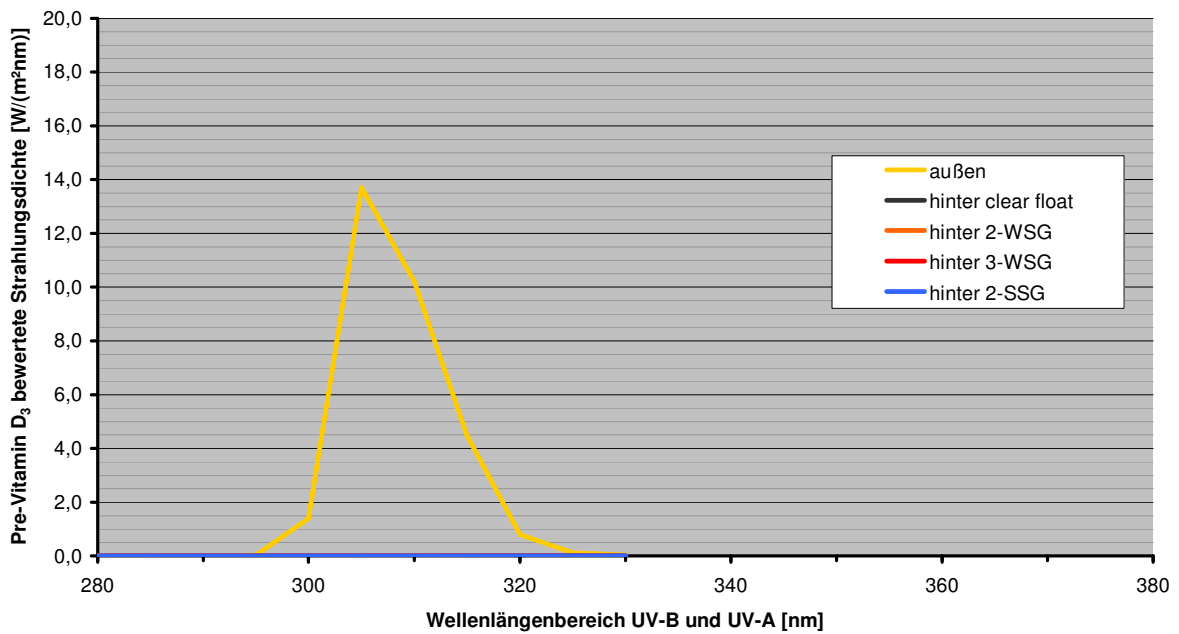


Diagramm 103: Spektrale Pre-Vitamin D₃ bewertete Strahlungsdichte am 15. September, 12:00

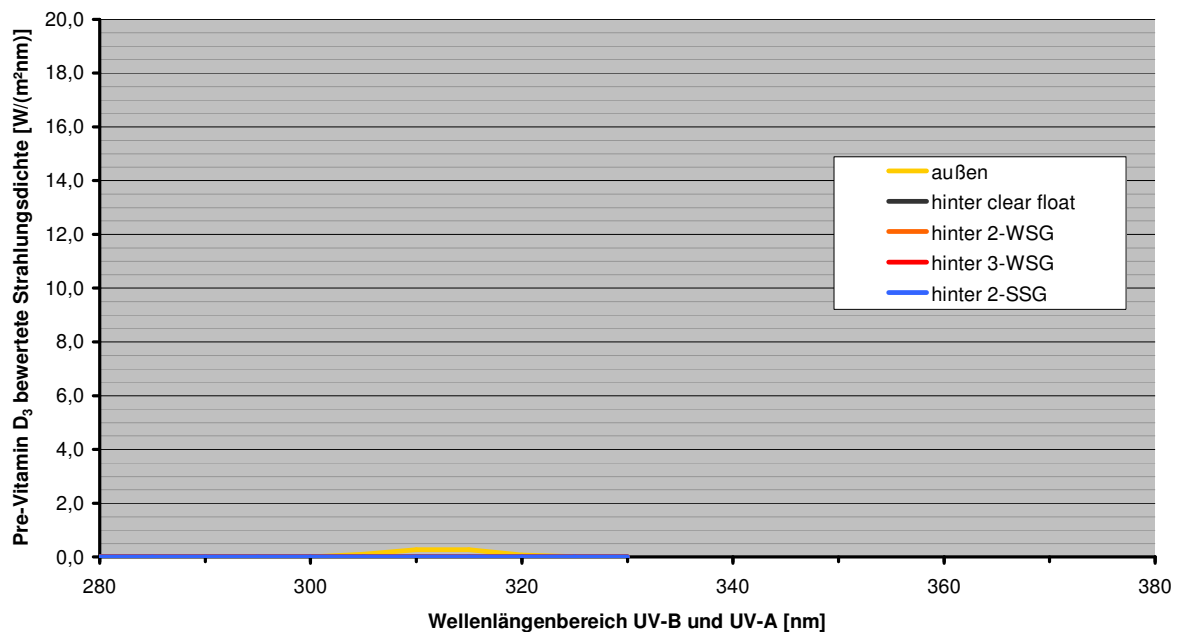


Diagramm 104: Spektrale Pre-Vitamin D₃ bewertete Strahlungsdichte am 15. September, 17:00

7.6.4.5. Grafische Darstellung – Dezember

Und schließlich gibt das Säulendiagramm (Diagramm 105) im Anschluss die stündlichen Pre-Vitamin D₃ bewerteten Strahlungsdosen in mJ/cm² auf eine senkrechte, nach dem Sonnenazimut orientierte Messfläche zum Referenzzeitpunkt 12:00 am 15. Dezember an. Die erste Säule bildet die stündliche Pre-Vitamin D₃ bewertete Strahlungsdosis außen, unmittelbar vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheibe ab. Die vier anschließenden Säulen zeigen die stündlichen Pre-Vitamin D₃ bewerteten Strahlungsdosen unmittelbar nach dem Durchgang durch eine unbeschichtete Einscheiben-Verglasung, eine Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung, eine Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung und eine Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung.

Mit einer strichlierten, horizontalen Linie gekennzeichnet ist der in Kapitel 7.6.3. erläuterte Schwellwert 18 mJ/cm² für das Einsetzen der Vitamin D₃ Photosynthese.

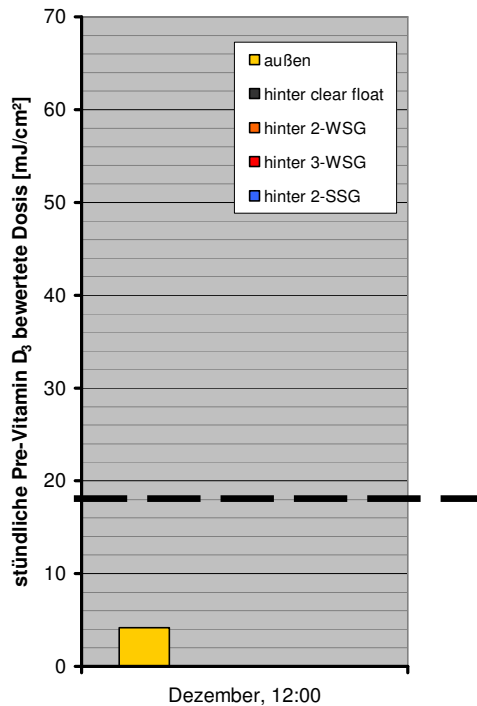


Diagramm 105: Stündliche Pre-Vitamin D₃ bewertete Dosis zu den Referenzzeitpunkten des 15. Dezember

Das abschließende Liniendiagramm (Diagramm 106) zur spektral verteilten Pre-Vitamin D₃ bewerteten Strahlungsdichte in $W/(m^2nm)$ zeigt die auf eine vertikal sonnennachgeführte Messfläche zum Referenzzeitpunkt 12:00 15. Dezember ermittelten Werte. Wobei die Linie der Pre-Vitamin D₃ bewerteten Strahlungsdichte außen, jene Werte abbildet, die unmittelbar vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheibe errechnet wurden. Die weiteren vier abgebildeten Linien geben die spektral verteilten Pre-Vitamin D₃ bewerteten Strahlungsdichten unmittelbar nach dem Durchgang durch eine unbeschichtete Einscheiben-Vergrasung, eine Zweischeiben-Wärmeschutzvergrasung, eine Dreischeiben-Wärmeschutzvergrasung und eine Zweischeiben-Sonnenschutzvergrasung an.

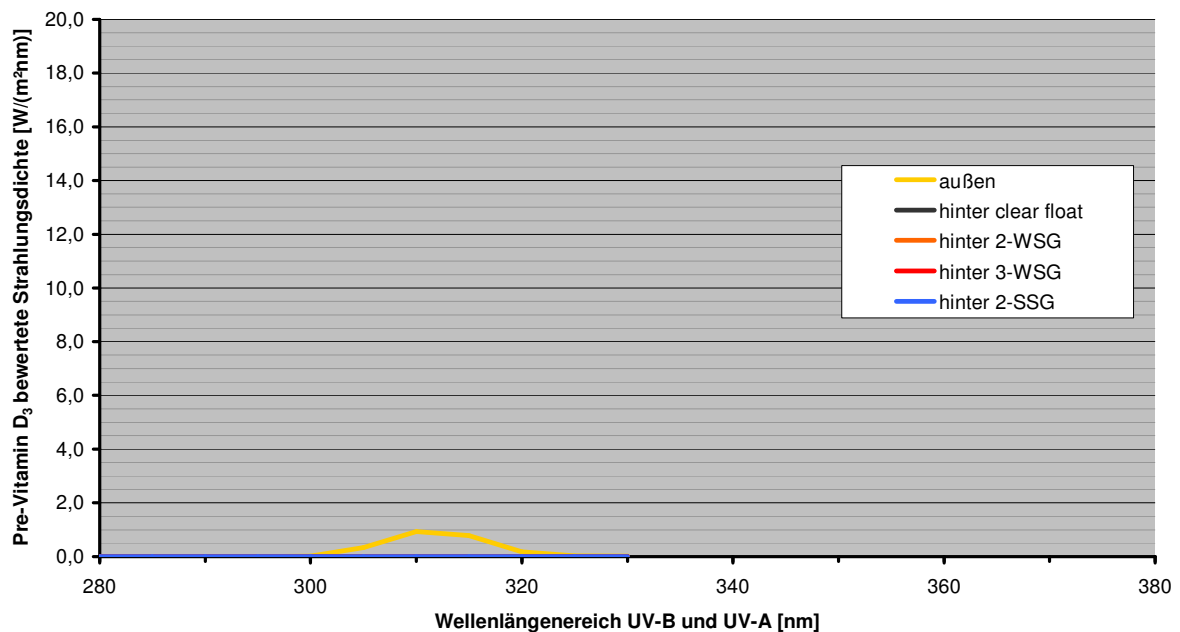


Diagramm 106: Spektrale Pre-Vitamin D₃ bewertete Strahlungsdichte am 15. Dezember, 12:00

7.7. Melatonin Suppression

7.7.1. Wirkpotential

Als Wirkzusammenhang im sichtbaren Spektralbereich wird die Melatonin Suppression als mittelbare nicht visuelle photophysiologische Reaktion ausgewählt. Sie steht in einem reproduzierbaren, komplexen Zusammenhang mit der circadianen Rhythmik und der subjektiven Munterkeit. Details dazu sind in Kapitel 6.2.3 angeführt.

Das Wirkpotential der Melatonin Suppression wird korrekt als Melatonin Suppression bewertete Strahlungsdichte auf die Netzhaut beschrieben und mit dem Formelzeichen I_c bezeichnet.⁹⁹⁴

7.7.2. Wirkungs-Kurve

Für die Melatonin Suppression liegt, aufbauend auf früheren Forschungsergebnissen,^{995,996} mit der circadianen Wirkungsfunktion $c(\lambda)$ eine anerkannte

⁹⁹⁴ Es wird darauf hingewiesen, dass dieses Wirkpotential in der medizinischen Fachliteratur auch bisweilen fälschlich als circadian gewichtete Strahlungsdichte bezeichnet wird. Diese Bezeichnung ist irreführend und sachlich falsch, da die Veränderung der circadianen Rhythmik zwar eine der biologischen Wirkungen ist, die mit der Melatonin Suppression in einem nachgewiesenen Zusammenhang stehen, aber keinesfalls mit dieser ident ist.

⁹⁹⁵ Brainard (2001)

⁹⁹⁶ Thapan (2001)

Wirkungs-Kurve vor, welche die relative Melatonin Suppression über der Wellenlänge mit einem Maximum bei 450 nm beschreibt.⁹⁹⁷ Sie wurde den gegenständlichen Analysen zugrunde gelegt.

7.7.3. Schwell- und Grenzwerte

In der Fachliteratur werden für die physiologische Wirksamkeit der Melatonin Suppression bewerteten Strahlungsdichte auf die Netzhaut mit hinreichend genauer Übereinstimmung mehrere empirisch ermittelte Dosis-Wirkungs-Kurven angegeben. Gemeinsam ist diesen Dosis-Wirkungs-Kurven, dass sie einen charakteristischen Schwellwert und einen charakteristischen Maximalwert der wirksamen Melatonin Suppression bewerteten Strahlungsdichte ausweisen. Bei Strahlungsdichten unter dem Schwellwert kann keine Wirkung nachgewiesen werden. Bei Strahlungsdichten über dem Maximalwert hingegen kann keine weitere Verstärkung der Wirkung durch fortschreitende Erhöhung der Strahlungsdichte mehr hervorgerufen werden.⁹⁹⁸

Die Obergrenze der Melatonin Suppression an sich als auch jene der Steigerung subjektiver Munterkeit wird bei 1.000 lx kaltweißen Lichts oder 0,8 W/m² Melatonin Suppression bewerteter Strahlungsdichte erreicht. Die 50% Schwelle wird in beiden Wirkungskategorien bereits bei 100 lx oder 0,1 W/m² erreicht.^{999,1000,1001,1002}

Die Obergrenze der Verschiebung der circadianen Rhythmik wird bei 9.100 lx kaltweißen Lichts oder 7,2 W/m² Melatonin Suppression bewerteter Strahlungsdichte erreicht. Die 50% Schwelle liegt hier ebenfalls bei 100 lx oder 0,1 W/m².^{1003,1004}

7.7.4. Ergebnisse

Entsprechend der Phasen besonderer Empfindlichkeit innerhalb der endogenen circadianen Rhythmik des Menschen, werden die erreichbaren Strahlungsdosen, für die circadiane Phasenverschiebung fünf Stunden vor und fünf Stunden nach 12:00 Ortszeit ermittelt.

⁹⁹⁷ Gall (2004)

⁹⁹⁸ Hinzuweisen ist darauf, dass die genannten Schwell- und Grenzwerte empirisch bei einer sechs und sechseinhalbstündigen Bestrahlungsdauer ermittelt wurden.

⁹⁹⁹ Zeitzer (2000)

¹⁰⁰⁰ Cajochen (2007)

¹⁰⁰¹ Die Dokumentation der Umrechnungen von der Beleuchtungsstärke kaltweißen Kunstlichts auf die circadiane Strahlungsdichte von siehe Anhang.

¹⁰⁰² Von Brainard wurde 2001 darüber hinaus unter monochromatischem Licht von 470 nm ein Grenzwert von $I_c = 0,42 \text{ W/m}^2$ ermittelt, der aber in der gegenständlichen Arbeit keine Berücksichtigung findet, da er den bekannten Effekt des sub-additiven Verhaltens nicht abbildet. Siehe dazu auch Kapitel 6.2.3.3.

¹⁰⁰³ Zeitzer (2000)

¹⁰⁰⁴ Umrechnungen von der Beleuchtungsstärke von 9.100 lx auf die circadiane Strahlungsdichte von 0,8 W/m², siehe Anhang 18.

Aus den Berechnungen ergibt sich eine vergleichsweise moderate Verminderung der Melatonin Suppression bewerteten Strahlungsdichte hinter Glas im Vergleich zur jener im Außenraum. Nach dem Strahlungsdurchgang durch die Funktionsgläser beträgt demnach die Melatonin Suppression bewertete Strahlungsdichte relativ zu jener im Außenraum noch minimal 48% hinter dem Zweischeiben-Sonnenschutzglas und maximal 87% hinter dem unbeschichteten Einscheibenglas.

In allen untersuchten Fällen liegen die absoluten Werte der Melatonin Suppression bewerteten Strahlungsdichte hinter Glas deutlich über selbst dem höchsten der zuvor angegebenen Grenzwerte. Eine physiologisch wirksame Beeinflussung der circadianen Rhythmik durch Tageslicht ist demnach hinter den untersuchten technischen Funktionsgläsern ebenso gegeben wie eine physiologisch wirksame Beeinflussung der subjektiven Munterkeit. Hinsichtlich der Melatonin Suppression lassen die vorliegenden Ergebnisse eine Sorge vor dem Eintreten physiologischer Finsternis als unbegründet erscheinen.

Umgekehrt ist aber angesichts der niedrigen Schwellwerte eine Beeinflussung der circadianen Rhythmik und der subjektiven Munterkeit durch Kunstlicht hochgradig gegeben und verdient jedenfalls Beachtung. So führt eine nicht ausreichend dunkle Schlafumgebung zu unerwünschten und auf Dauer gesundheitsgefährdenden Beeinflussungen des menschlichen Organismus. Dieses Faktum verdient besondere Aufmerksamkeit, weil die Reduktion der Melatonin suppressierenden Tageslichtstrahlung durch den Aufenthalt in Innenräumen und der Mangel an Dunkelheit in der Nacht gemeinsam dazu beitragen, dass die natürliche Abfolge von Hell und Dunkel an Deutlichkeit verliert.

7.7.4.1. Tabellarische Übersicht

In der folgenden Tabelle (Tabelle 25) sind die Melatonin Suppression gewichteten Strahlungsdichten in W/m^2 zu den zehn Referenzzeitpunkten am 15. März um 07:00, um 12:00 und um 17:00, am 15. Juni um 07:00, um 12:00 und um 17:00, am 15. September um 07:00, um 12:00 und um 17:00, sowie am 15. Dezember¹⁰⁰⁵ um 12:00 auf eine senkrechte, nach dem Sonnenazimut orientierte Messfläche zusammengefasst.

In der ersten Ergebnisspalte sind die Melatonin Suppression gewichteten Strahlungsdichten außen, also unmittelbar vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheibe angegeben. In den nachfolgenden Ergebnisspalten sind die Melatonin Suppression gewichteten Strahlungsdichten unmittelbar nach dem Durchgang durch eine unbeschichtete Einscheiben-Verglasung, eine Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung, eine Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung und eine Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung zum unmittelbaren Vergleich in Absolutwerten angeführt.

¹⁰⁰⁵ Zu den aus photophysiologischer Sicht relevanten Tageszeitpunkten um etwa 07:00 morgens und um etwa 17:00 nachmittags ist die Sonne noch nicht aufgegangen beziehungsweise bereits untergegangen. Diese beiden Tageszeitpunkte sind daher als Referenzzeitpunkte im Sinne der vorliegenden Arbeit irrelevant.

	außen W/m ²	hinter clear float W/m ²	hinter 2-WSG W/m ²	hinter 3-WSG W/m ²	hinter 2-SSG W/m ²
März, 07:00	22	20	17	15	11
März, 12:00	97	84	71	60	46
März, 17:00	22	20	17	15	11
Juni, 07:00	85	74	64	55	42
Juni, 12:00	77	57	41	29	26
Juni, 17:00	85	74	64	55	42
September, 07:00	45	40	35	31	23
September, 12:00	100	86	71	59	46
September, 17:00	45	40	35	31	23
Dezember, 12:00	75	67	58	51	37

Tabelle 25: Melatonin Suppression bewertete Strahlungsdichte

In der anschließend abgebildeten Tabelle (Tabelle 26) sind die ermittelten Melatonin Suppression bewerteten Strahlungsdichten aus Tabelle 25 als Relativwerte in % angegeben, wobei als Bezugsgrößen die Melatonin Suppression bewerteten Strahlungsdichten zu den jeweiligen Referenzzeitpunkten außen vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheibe mit 100% angegeben werden. Die letzte Zeile der Tabelle führt die Melatonin Suppression bewerteten Strahlungsdichten unmittelbar nach dem Durchgang durch die jeweilige Funktionsglasscheibe als Mittelwert der in den Zeilen oberhalb ausgeworfenen Relativwerte der Melatonin Suppression bewerteten Strahlungsdichten an.

	außen %	hinter clear float %	hinter 2-WSG %	hinter 3-WSG %	hinter 2-SSG %
März, 07:00	100%	89%	78%	68%	51%
März, 12:00	100%	87%	73%	62%	47%
März, 17:00	100%	89%	78%	68%	51%
Juni, 07:00	100%	88%	76%	65%	49%
Juni, 12:00	100%	74%	53%	37%	34%
Juni, 17:00	100%	88%	76%	65%	49%
September, 07:00	100%	89%	78%	68%	51%
September, 12:00	100%	86%	71%	59%	46%
September, 17:00	100%	89%	78%	68%	51%
Dezember, 12:00	100%	89%	77%	67%	50%
Mittelwert	100%	87%	74%	63%	48%

Tabelle 26: Melatonin Suppression bewertete Strahlungsdichte relativ zu außen

7.7.4.2. Grafische Darstellung – März

Das Säulendiagramm (Diagramm 107) im Anschluss zeigt die Melatonin Suppression bewerteten Strahlungsdichten in W/m² auf eine senkrechte, nach dem Sonnenazimut orientierte Messfläche zu den Referenzzeitpunkten 07:00, 12:00 und 17:00 am 15. März. Die erste Säule bildet die Melatonin Suppression bewertete Strahlungsdichte außen, unmittelbar vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheibe ab. Die jeweils vier anschließenden Säulen zeigen die ermittelten Melatonin Suppression bewerteten Strahlungsdichten unmittelbar nach dem Durchgang durch eine unbeschichtete Einscheiben-Verglasung, eine Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung, eine Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung und eine Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung.

Mit einer strichlierten, horizontalen Linie gekennzeichnet ist die in Kapitel 7.6.5.3. erläuterte Obergrenze der Verschiebung der circadianen Rhythmik bei 7,2 W/m² Melatonin Suppression bewerteter Strahlungsdichte.

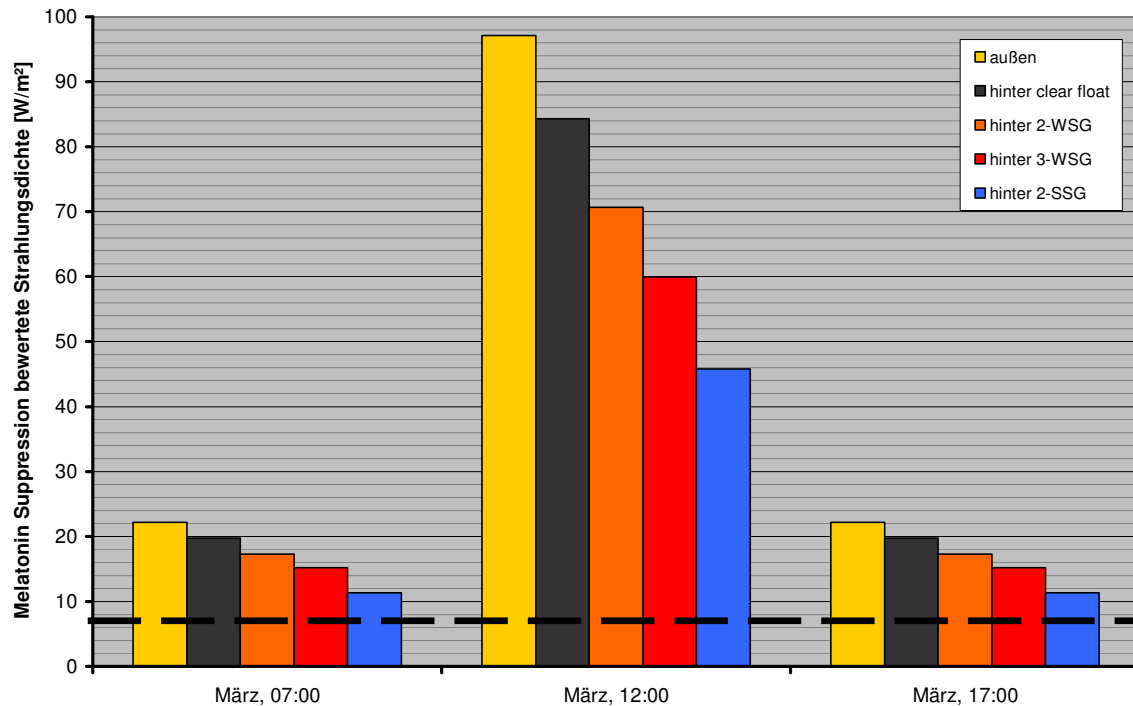


Diagramm 107: Melatonin Suppression bewertete Strahlungsdichte zu den Referenzzeitpunkten des 15. März

Die drei nachfolgenden Liniendiagramme (Diagramm 108, Diagramm 109, Diagramm 110) zeigen die spektral verteilten Melatonin Suppression bewerteten Strahlungsdichten in $W/(m^2nm)$ auf eine vertikal sonnennachgeführte Messfläche zu den Referenzzeitpunkten 07:00, 12:00 und 17:00 am 15. März. Wobei die Linie der spektral verteilten Melatonin Suppression bewerteten Strahlungsdichte außen, jene Werte angibt, die unmittelbar vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheiben ermittelt wurden. Die weiteren vier abgebildeten Linien stellen die spektral verteilte Melatonin Suppression bewerteten Strahlungsdichten unmittelbar nach dem Durchgang durch eine unbeschichtete Einscheiben-Verglasung, eine Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung, eine Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung und eine Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung dar.

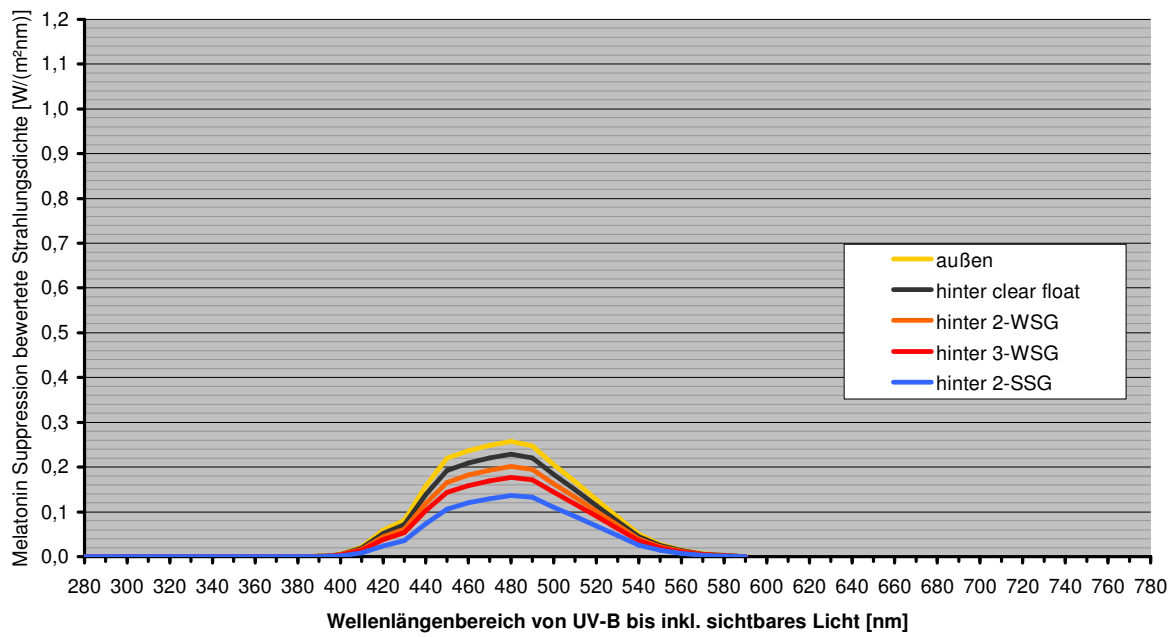


Diagramm 108: Spektrale Melatonin Suppression bewertete Strahlungsdichte am 15. März, 07:00

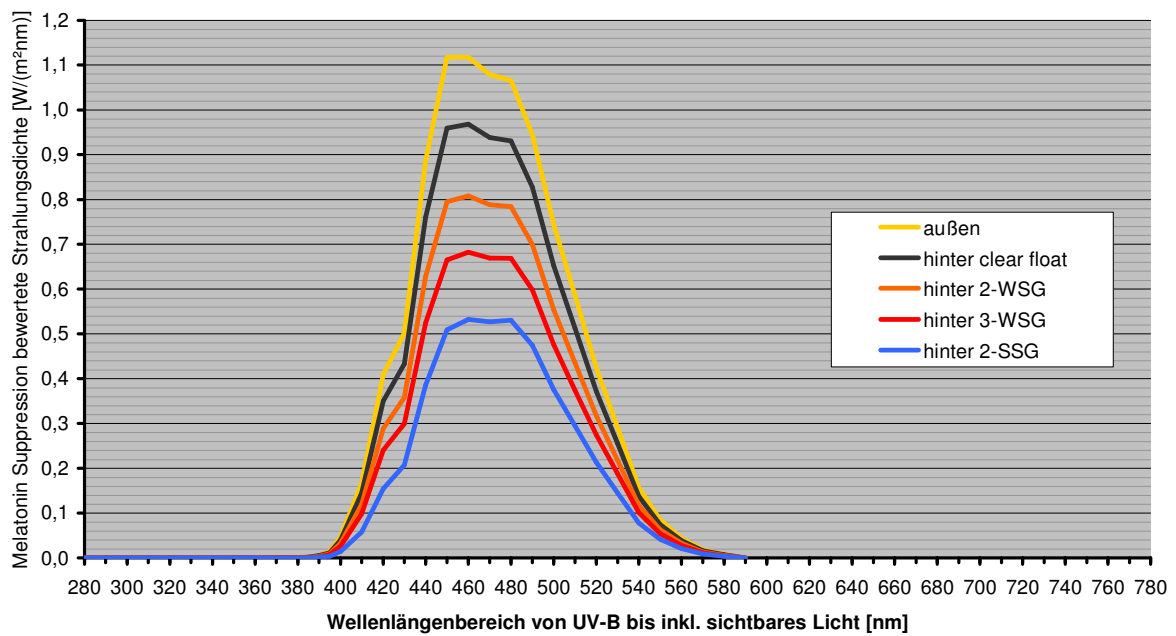


Diagramm 109: Spektrale Melatonin Suppression bewertete Strahlungsdichte am 15. März, 12:00

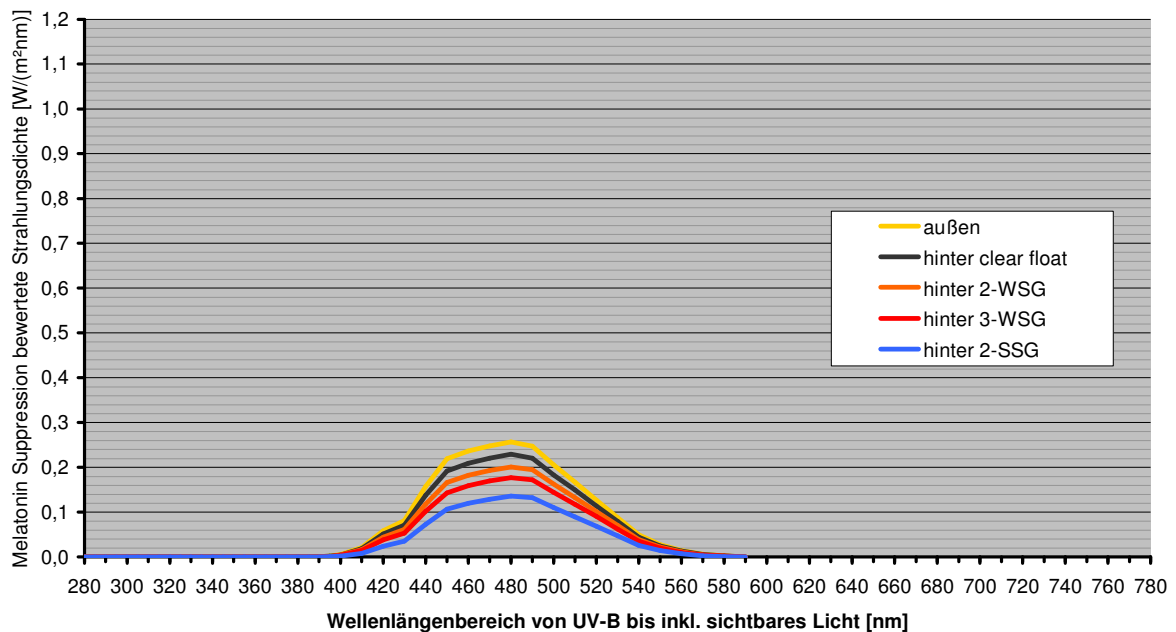


Diagramm 110: Spektrale Melatonin Suppression bewertete Strahlungsdichte am 15. März, 17:00

7.7.4.3. Grafische Darstellung – Juni

Das Säulendiagramm (Diagramm 111) im Anschluss zeigt die Melatonin Suppression bewerteten Strahlungsdichten in W/m^2 auf eine senkrechte, nach dem Sonnenazimut orientierte Messfläche zu den Referenzzeitpunkten 07:00, 12:00 und 17:00 am 15. Juni. Die erste Säule bildet die Melatonin Suppression bewertete Strahlungsdichte außen, unmittelbar vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheibe ab. Die jeweils vier anschließenden Säulen zeigen die ermittelten Melatonin Suppression bewerteten Strahlungsdichten unmittelbar nach dem Durchgang durch eine unbeschichtete Einscheiben-Verglasung, eine Zweisheiben-Wärmeschutzverglasung, eine Dreisheiben-Wärmeschutzverglasung und eine Zweisheiben-Sonnenschutzverglasung.

Mit einer strichlierten, horizontalen Linie gekennzeichnet ist die in Kapitel 7.7.3. erläuterte Obergrenze der Verschiebung der circadianen Rhythmik bei $7,2 W/m^2$ Melatonin Suppression bewerteter Strahlungsdichte.

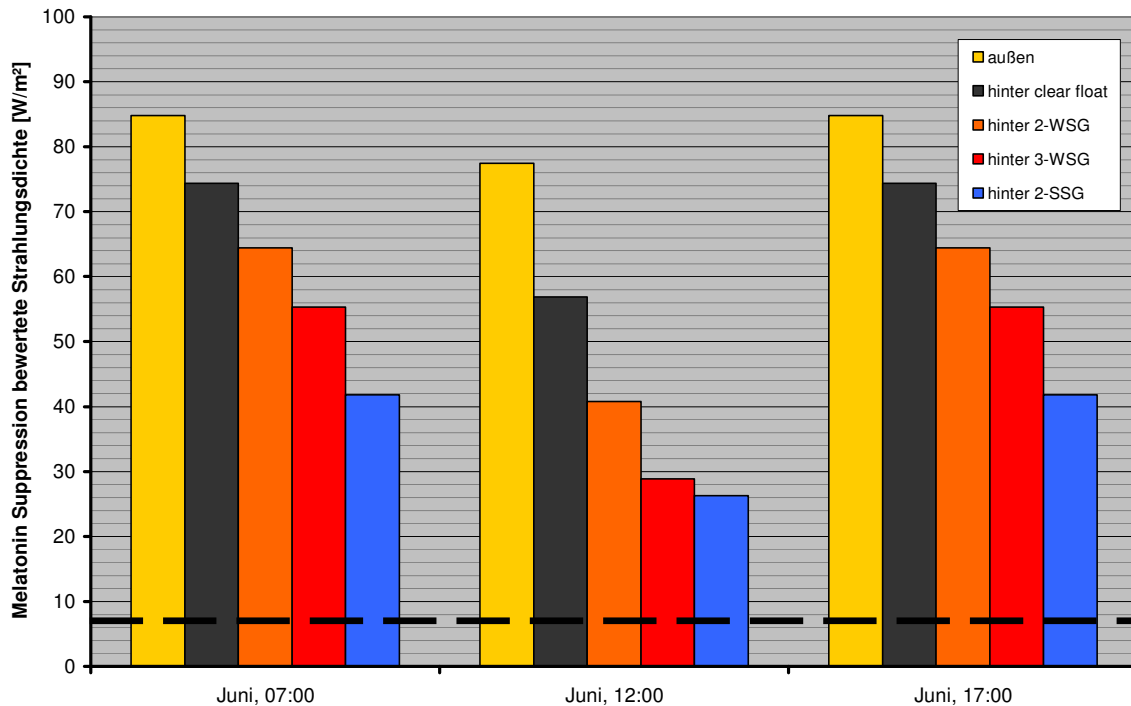


Diagramm 111: Melatonin Suppression bewertete Strahlungsdichten zu den Referenzzeitpunkten des 15. Juni

Die drei im Anschluss abgebildeten Liniendiagramme (Diagramm 112, Diagramm 113, Diagramm 114) zeigen die spektral verteilten Melatonin Suppression bewerteten Strahlungsdichten in $W/(m^2nm)$ auf eine vertikal sonnennachgeführte Messfläche zu den Referenzzeitpunkten 07:00, 12:00 und 17:00 am 15. Juni. Wobei die Linie der spektral verteilten Melatonin Suppression bewerteten Strahlungsdichte außen, jene Werte angibt, die unmittelbar vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheiben ermittelt wurden. Die weiteren vier abgebildeten Linien geben die spektral verteilte Melatonin Suppression bewerteten Strahlungsdichten unmittelbar nach dem Durchgang durch eine unbeschichtete Einscheiben-Verdglasung, eine Zweischeiben-Wärmeschutzverdglasung, eine Dreischeiben-Wärmeschutzverdglasung und eine Zweischeiben-Sonnenschutzverdglasung an.

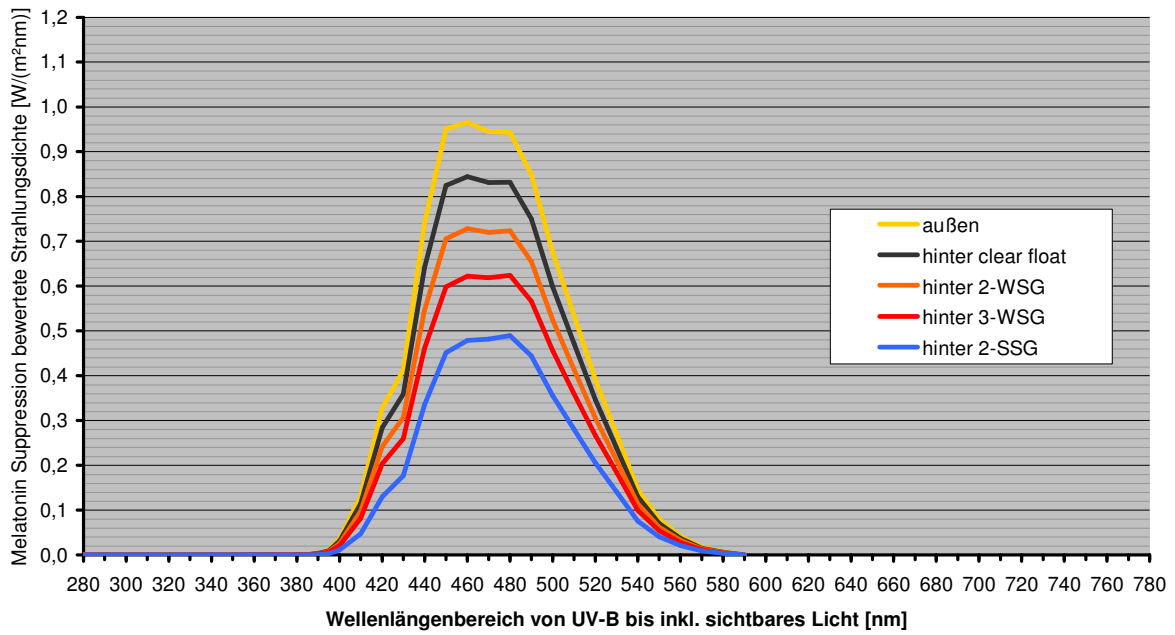


Diagramm 112: Spektrale Melatonin Suppression bewertete Strahlungsdichte am 15. Juni, 07:00

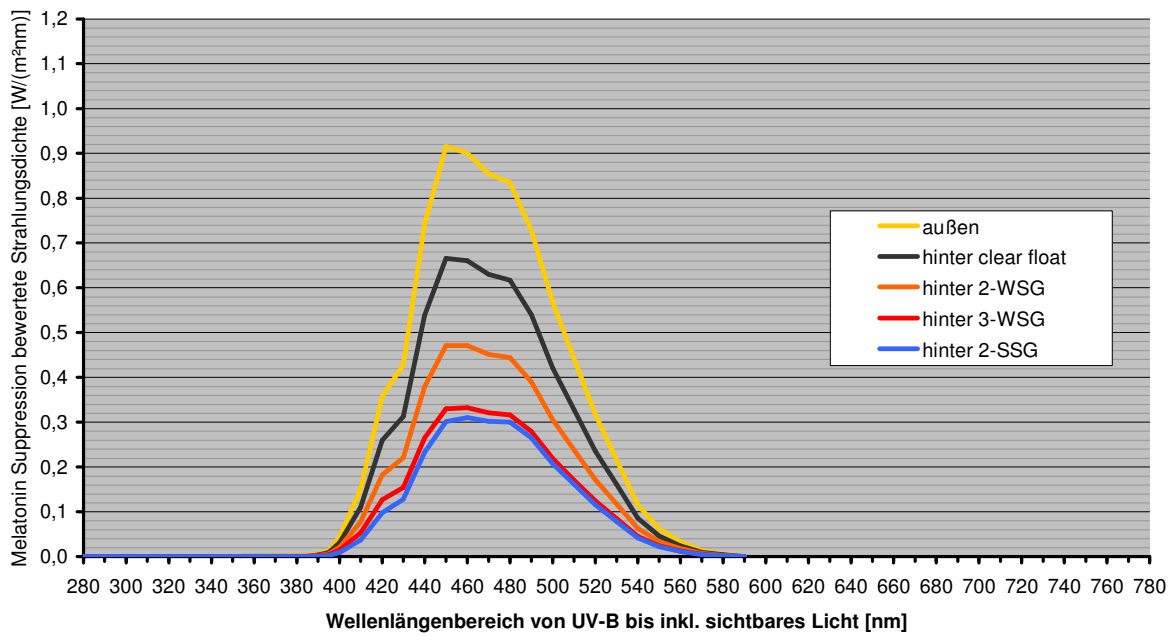


Diagramm 113: Spektrale Melatonin Suppression bewertete Strahlungsdichten am 15. Juni, 12:00

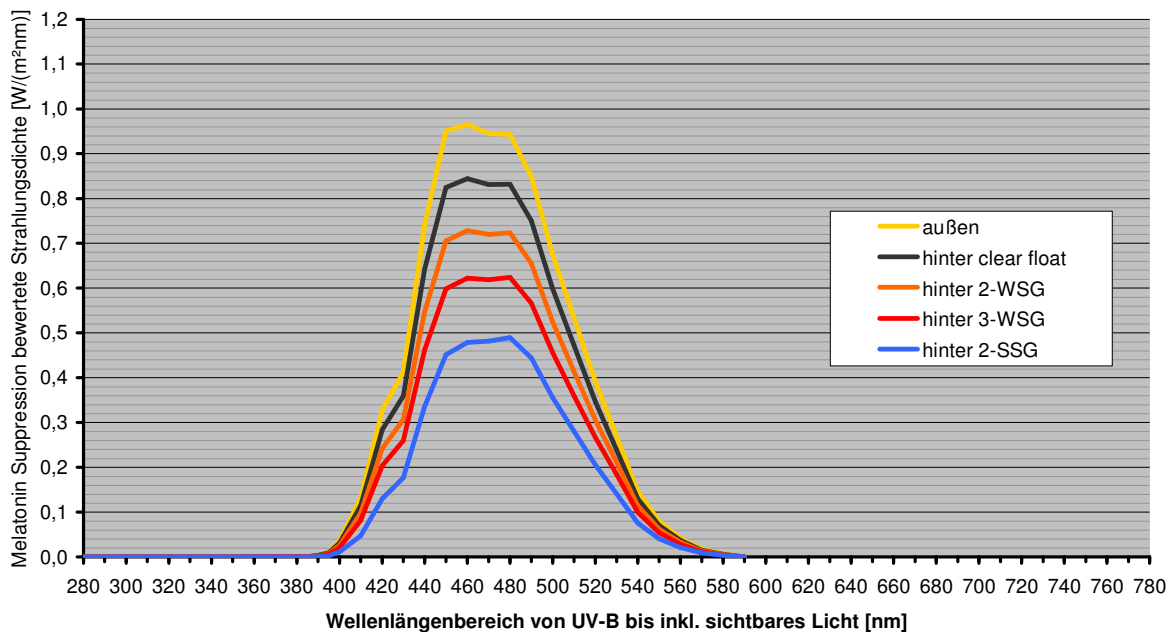


Diagramm 114: Spektrale Melatonin Suppression bewertete Strahlungsdichten am 15. Juni, 17:00

7.7.4.4. Grafische Darstellung – September

Das Säulendiagramm (Diagramm 115) im Anschluss zeigt die Melatonin Suppression bewerteten Strahlungsdichten auf in W/m^2 auf eine senkrechte, nach dem Sonnenazimut orientierte Messfläche zu den Referenzzeitpunkten 07:00, 12:00 und 17:00 am 15. September. Die erste Säule bildet die Melatonin Suppression bewertete Strahlungsdichte außen, unmittelbar vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheibe ab. Die jeweils vier anschließenden Säulen zeigen die ermittelten Melatonin Suppression bewerteten Strahlungsdichten unmittelbar nach dem Durchgang durch eine unbeschichtete Einscheiben-Verglasung, eine Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung, eine Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung und eine Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung.

Mit einer strichlierten, horizontalen Linie gekennzeichnet ist die in Kapitel 7.7.3. erläuterte Obergrenze der Verschiebung der circadianen Rhythmik bei $7,2 W/m^2$ Melatonin Suppression bewerteter Strahlungsdichte.

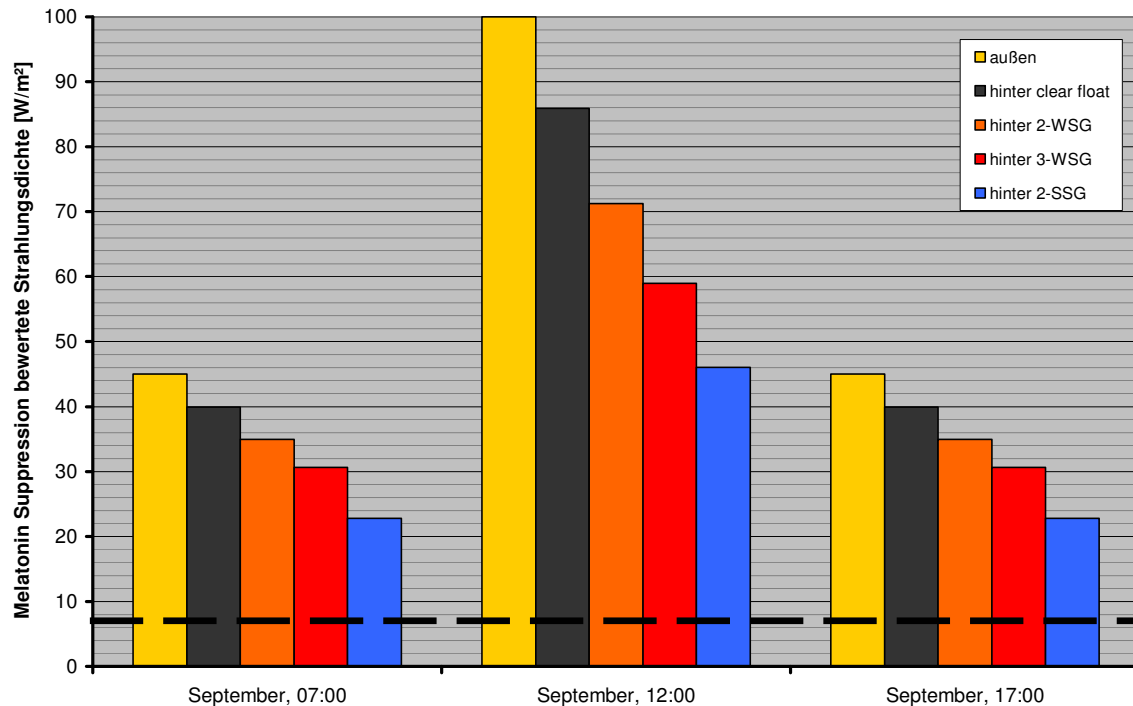


Diagramm 115: Melatonin Suppression bewertete Strahlungsdichten zu den Referenzzeitpunkten des 15. Sept

Die drei anschließend abgebildeten Liniendiagramme (Diagramm 116, Diagramm 117, Diagramm 118) zeigen die spektral verteilten Melatonin Suppression bewerteten Strahlungsdichten in $W/(m^2nm)$ auf eine vertikal sonnennachgeführte Messfläche zu den Referenzzeitpunkten 07:00, 12:00 und 17:00 am 15. September. Wobei die Linie der spektral verteilten Melatonin Suppression bewerteten Strahlungsdichte außen, jene Werte angibt, die unmittelbar vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheiben ermittelt wurden. Die weiteren vier abgebildeten Linien stellen die spektral verteilte Melatonin Suppression bewerteten Strahlungsdichten unmittelbar nach dem Durchgang durch eine unbeschichtete Einscheiben-Verglasung, eine Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung, eine Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung und eine Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung dar.

spektrale Melatoninunterdrückung bei vertikaler, sonnennachgeführter Messfläche

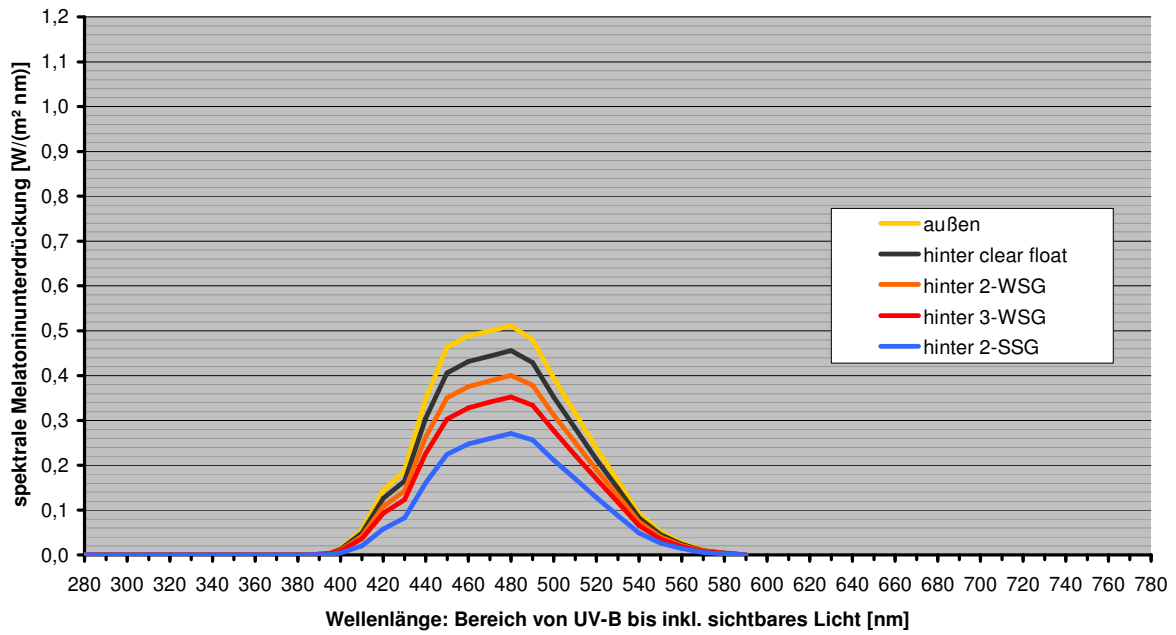


Diagramm 116: Spektrale Melatonin Suppression bewertete Strahlungsdichten am 15. September, 07:00

spektrale Melatoninunterdrückung bei vertikaler, sonnennachgeführter Messfläche

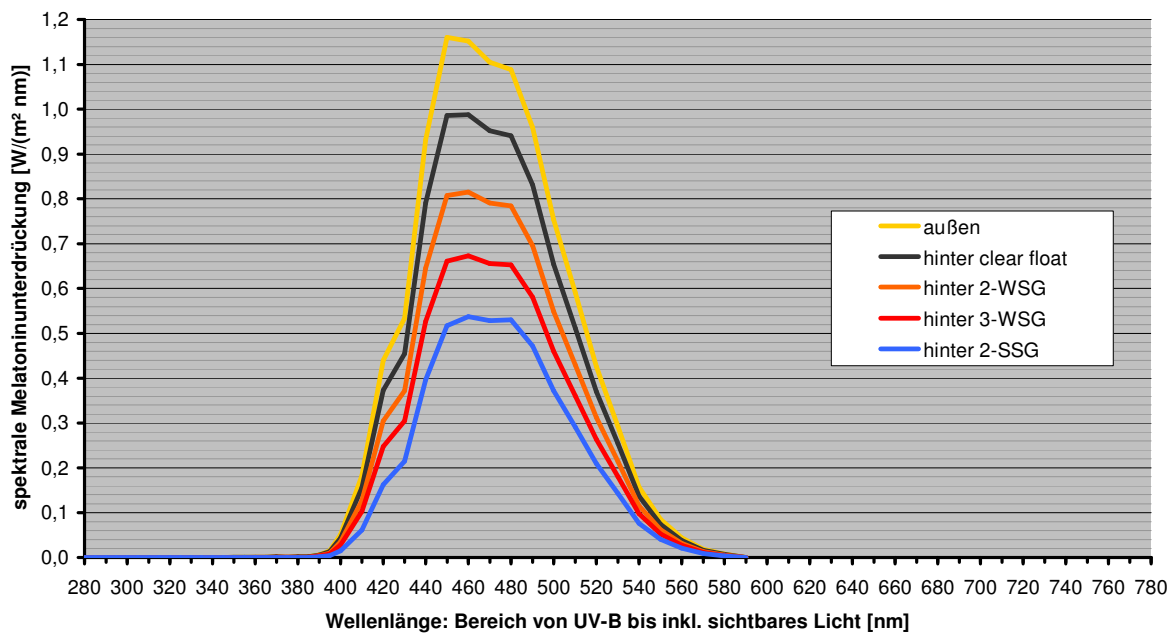


Diagramm 117: Spektrale Melatonin Suppression bewertete Strahlungsdichten am 15. September, 12:00

spektrale Melatoninunterdrückung bei vertikaler, sonnennachgeführter Messfläche

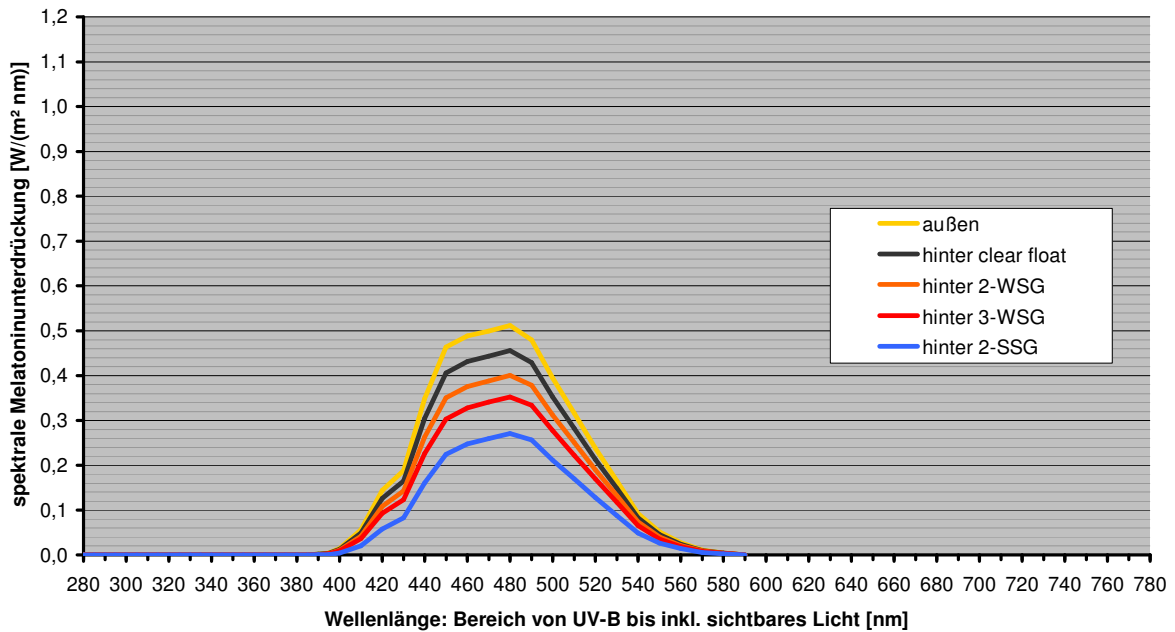


Diagramm 118: Spektrale Melatonin Suppression bewertete Strahlungsdichten am 15. September, 17:00

7.7.4.5. Grafische Darstellung – Dezember

Das Säulendiagramm (Diagramm 119) im Anschluss zeigt die Melatonin Suppression bewertete Strahlungsdichte auf in W/m^2 auf eine senkrechte, nach dem Sonnenazimut orientierte Messfläche zum Referenzzeitpunkt 12:00 am 15. Dezember. Die erste Säule bildet die Melatonin Suppression bewertete Strahlungsdichte außen, unmittelbar vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheibe ab. Die vier anschließenden Säulen zeigen die ermittelten Melatonin Suppression bewerteten Strahlungsdichten unmittelbar nach dem Durchgang durch eine unbeschichtete Einscheiben-Verglasung, eine Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung, eine Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung und eine Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung.

Mit einer strichlierten, horizontalen Linie gekennzeichnet ist die in Kapitel 7.7.3. erläuterte Obergrenze der Verschiebung der circadianen Rhythmik bei $7,2 W/m^2$ Melatonin Suppression bewerteter Strahlungsdichte.

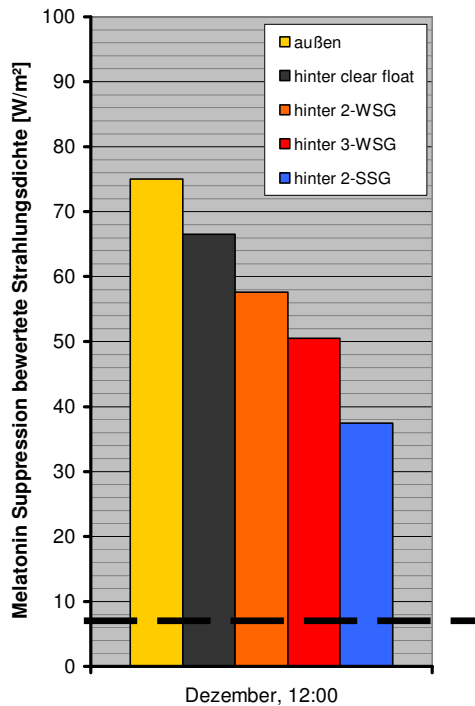


Diagramm 119: Melatonin Suppression bewertete Strahlungsdichten zu den Referenzzeitpunkten des 15. Dez

Das folgende abschließende Liniendiagramm (Diagramm 120) zur spektral verteilten Melatonin Suppression bewerteten Strahlungsdichte zeigt die auf eine vertikal sonnennachgeführte Messfläche zum Referenzzeitpunkt 12:00 15. Dezember ermittelten Werte in $W/(m^2nm)$. Wobei die Linie der spektral verteilten Melatonin Suppression bewerteten Strahlungsdichte außen, jene Werte abbildet, die unmittelbar vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheibe errechnet wurden. Die weiteren vier abgebildeten Linien stellen die spektral verteilte Melatonin Suppression bewerteten Strahlungsdichten dar, unmittelbar nach dem Durchgang durch eine unbeschichtete Einscheiben-Verglasung, eine Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung, eine Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung und eine Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung.

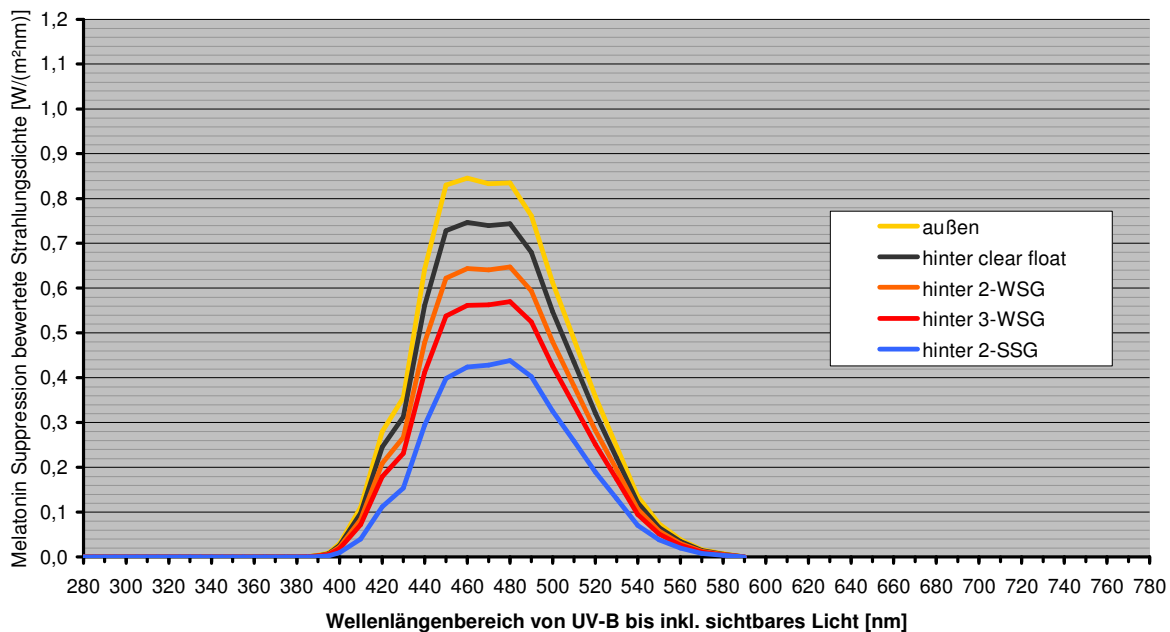


Diagramm 120: Spektrale Melatonin Suppression bewertete Strahlungsdichten am 15. Dezember, 12:00

7.8. Bezug der Ergebnisse zu realitätsnahen Bedingungen

In der voran stehenden Potentialstudie wurde unter bewusst idealisiert festgelegten Rahmenbedingungen das mögliche Maximalangebot photobiologisch wirksamer Sonnenstrahlung im modellhaften Innenraum errechnet. Die Rahmenbedingungen wurden im Sinn einer konstruktivistischen Herangehensweise so gewählt, um prinzipielle Zusammenhänge möglichst frei von relativierenden Einflüssen herausarbeiten zu können.

Gleichzeitig ist es notwendig, aus den Ergebnissen der Potentialstudie geeignete Schlüsse zu ziehen. Dazu ist es erforderlich, die typologischen Erkenntnisse in Bezug zu realen Rahmenbedingungen zu setzen. An dieser Stelle werden daher zwei Zusammenhänge erörtert, die bei der angemessene Überleitung der Ergebnisse in reale Anwendungssituationen beachtet werden müssen:

Erstens die Verhältnismäßigkeit zwischen der terrestrischen Bestrahlungsstärke zum Referenzzeitpunkt mit definitionsgemäß klarem Himmel und jener zum selben Zeitpunkt im langjährigen Mittel und somit unter Einbezug des statistischen Bewölkungsanteils. Zweitens die Verhältnismäßigkeit der Beleuchtungsstärke unmittelbar hinter der

Glasscheibe zu jener in der Raumtiefe, unter der Annahme modellhafter Raumgeometrien und Oberflächenqualitäten.¹⁰⁰⁶

7.8.1. Vergleich mit langjährigen Bestrahlungssummen

Wie bereits mehrfach dargelegt, wurden die terrestrischen Strahlungsverhältnisse stets für den unbewölkten, klaren Himmel errechnet. Es bietet sich daher an, die so errechneten Strahlungsverhältnisse in Bezug zu setzen zu den dokumentierten, im langjährigen Mittel real auftretenden. Die Ergebnisse dieser Vergleichsrechnung werden im Folgenden dargestellt.

Verglichen wurde die stündliche flächenbezogene Bestrahlungsmenge auf die vertikale, zum Sonnenazimut orientierte Fläche unter wolkenlosem Himmel mit erstens stündlichen flächenbezogenen Bestrahlungsmenge und mit zweitens der im langjährigen Mittel auftretenden täglichen flächenbezogenen Bestrahlungssumme auf dieselbe, feststehende Fläche. Die folgenden Tabellen (Tabelle 27) dokumentieren die Ergebnisse dieser Vergleichsrechnung für alle zehn Referenzzeitpunkte.¹⁰⁰⁷

07:00	Wh/m ² März	Wh/m ² Juni	Wh/m ² Sept	
Azimut der Flächennormale	103	84	99	
Stundensumme Referenz unbewölkt	357	697	520	
Stundensumme langjährig bewölkt	46	216	84	
Tagessumme langjährig bewölkt	1.615	2.658	1.846	

12:00	Wh/m ² März	Wh/m ² Juni	Wh/m ² Sept	Wh/m ² Dez
Azimut der Flächennormale	180	180	180	180
Stundensumme Referenz unbewölkt	749	523	726	713
Stundensumme langjährig bewölkt	373	351	390	244
Tagessumme langjährig bewölkt	2.304	2.754	2.551	1.094

17:00	Wh/m ² März	Wh/m ² Juni	Wh/m ² Sept	
Azimut der Flächennormale	257	276	261	
Stundensumme Referenz unbewölkt	357	697	520	
Stundensumme langjährig bewölkt	46	216	84	
Tagessumme langjährig bewölkt	1.618	2.659	1.843	

Tabelle 27: Strahlungssummen unter Referenzbedingungen und im langjährigen Mittel

¹⁰⁰⁶ Unter der vereinfachenden Annahme spektral gleich verteilter Reflexionseigenschaften von Raumboflächen kann das Verhältnis der Beleuchtungsstärke zwischen der unmittelbar hinter dem Glas und den in der Raumtiefe angeordneten Messflächen auch auf die (anderen) physiologischen Wirkpotentiale angewandt werden.

¹⁰⁰⁷ Die langjährigen Globalstrahlungssummen wurden errechnet unter Anwendung des Formelsatzes nach Kreč (1995) und Errechnung von Trübungsfaktoren nach Linke und Reitz aus langjährigen Klimadaten des Österreichischen Klimadatenkatalogs nach Heindl (1984).

Denselben Zusammenhang veranschaulichen die folgenden Säulendiagramme (Diagramm 121, Diagramm 122, Diagramm 123). Dargestellt ist für jeden Referenzzeitpunkt, bestehend aus Datum und Uhrzeit, eine Säulengruppe, gebildet aus der Stundensumme der Globalstrahlung bei klarem Himmel, der Stundensumme der Globalstrahlung bei langjährig charakteristischer Bewölkung und der Tagessumme der Globalstrahlung bei ebenfalls langjährig charakteristischer Bewölkung.

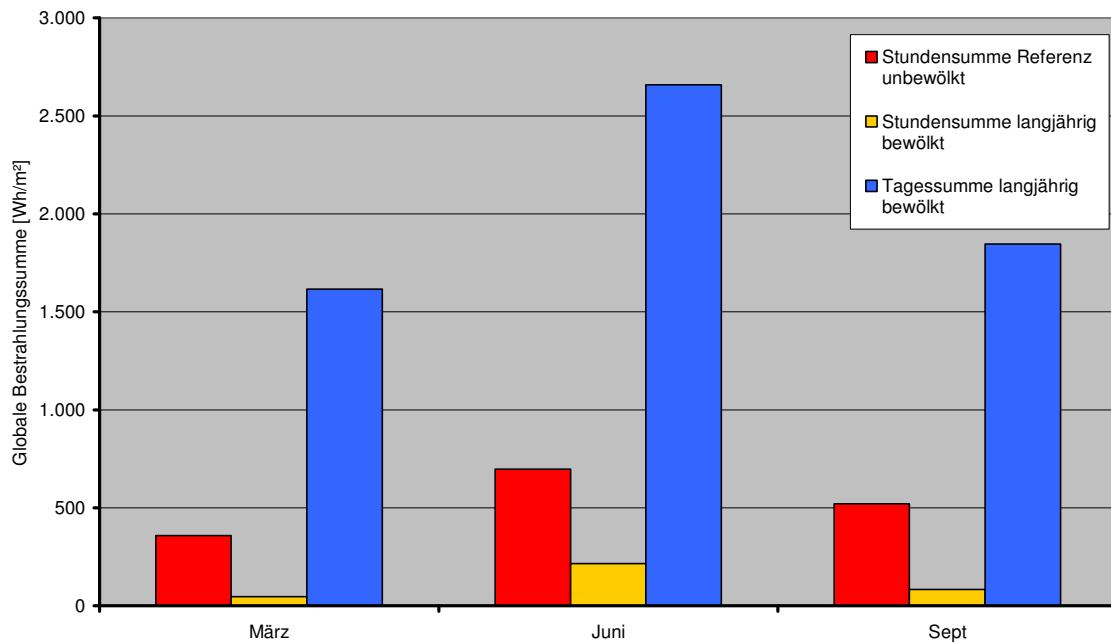


Diagramm 121: Strahlungssummen unter Referenzbedingungen und im langjährigen Mittel, 07:00

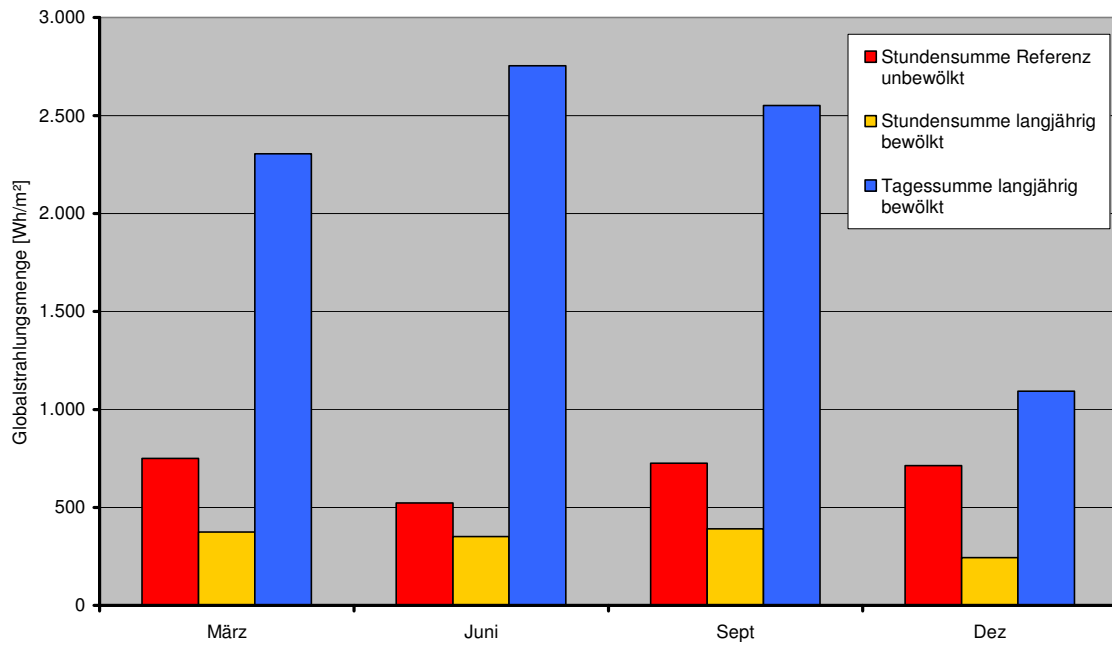


Diagramm 122: Strahlungssummen unter Referenzbedingungen und im langjährigen Mittel, 12:00

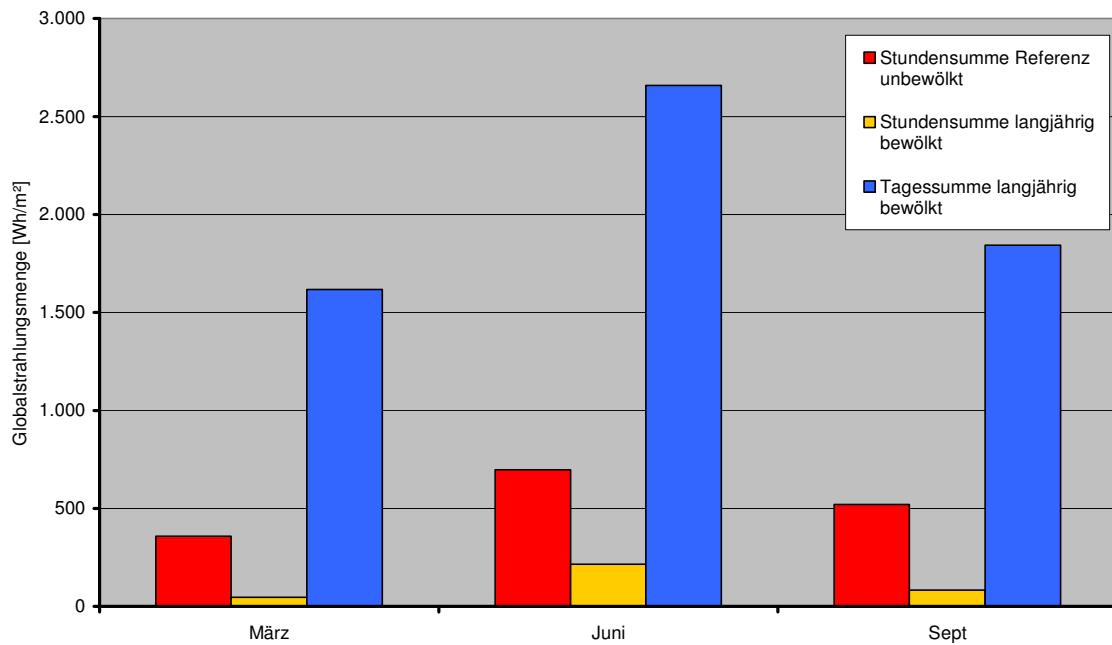


Diagramm 123: Strahlungssummen unter Referenzbedingungen und im langjährigen Mittel, 12:00

Es zeigt sich demnach, dass die stündlichen Strahlungsmengen während der Mittagsstunden unter wolkenlosen Referenzbedingungen von den stündlichen Strahlungsmengen im langjährigen Mittel um 25% bis 75% unterschritten werden, mit geringster Unterschreitung im Sommer und mit größter Unterschreitung im Winter.

Es zeigt sich weiters, dass die stündlichen Strahlungsmengen während der Mittagsstunden unter wolkenlosen Referenzbedingungen bereits 20% bis 65% der langjährigen täglichen Strahlungsmengen auf dieselben, vertikal südorientierten Messebenen betragen, mit den kleineren Werten im Sommer und den größeren im Winter.

7.8.2. Verlauf der Strahlungsintensität in der Raumtiefe

Ein weiterer Bezug kann hergestellt werden zwischen den unmittelbar hinter den technischen Funktionsgläsern auftretenden Wirkpotentialen und jenen in einem realistischen Abstand in Hinsicht auf den üblichen Aufenthaltsbereich eines Nutzers von der Glasscheibe. Auch zu dieser Frage werden Vergleichsrechnungen angestellt.

Untersucht wird mittels Tageslichtsimulation die Verringerung der Beleuchtungsstärke auf eine Messebene unmittelbar hinter der Glasscheibe zu sechs weiteren, jeweils in 1,50 m Abstand raumseitig angeordneten Messebenen (Abbildung 39).¹⁰⁰⁸ Das Raummodell wird exemplarisch als einseitig voll verglast, quaderförmiger von 4,60 m Breite, 2,50 m Höhe und 11,25 m Tiefe gestaltet. Es entspricht somit weitgehend jenem aus der Bearbeitung der zweiten Hypothese. Die Berechnungsdokumentation ist im Anhang in Kapitel 17 angeführt.

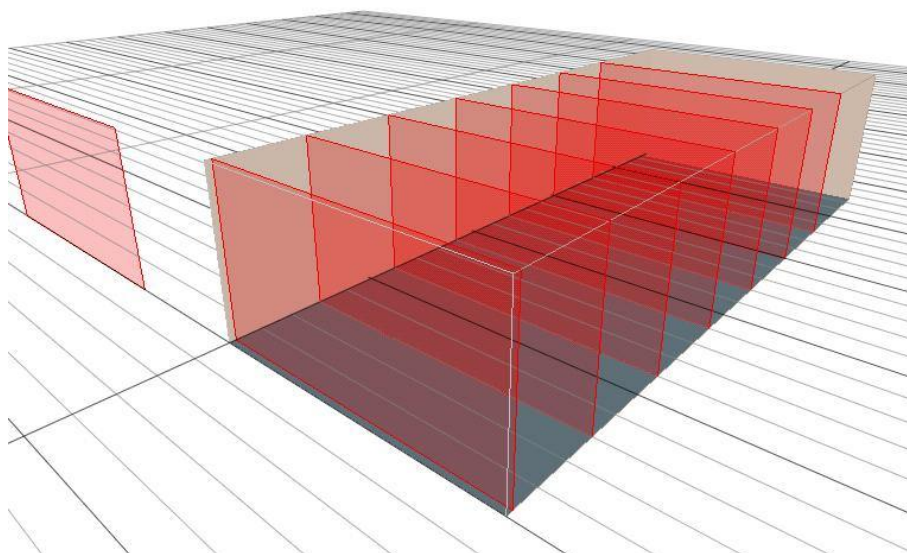


Abbildung 39: Geometrisches Modell zur Tageslichtberechnung in der Raumtiefe

¹⁰⁰⁸ RELUX Professional Version 2007-7.1, RELUX Informatik AG 1998-2007, Basel, Bezugsquelle aus dem Internet <http://www.relux.ch> (21.07.2008)

Berechnungen werden durchgeführt sowohl für den klaren Himmel zur Mittagsstunde eines 21. März, als auch für den bedeckten Himmel. Nachfolgend dargestellt (Diagramm 124) sind die Verläufe der Bestrahlungsstärke auf jeweils die Mittelpunkte der südorientierten vertikalen Messebenen.

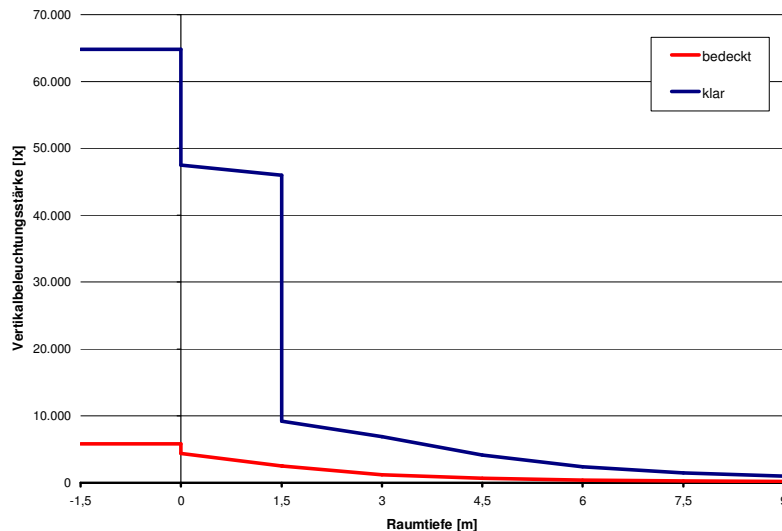


Diagramm 124: Verlauf der Vertikalbeleuchtungsstärke in der Raumtiefe

Die blaue Kurve zeigt den Verlauf der Bestrahlungsstärke bei klarem Himmel, die rote Linie bei bedecktem Himmel. Wobei die Ergebnisse der Vergleichsrechnung differenziert betrachtet werden müssen. So verringert sich die Strahlungsintensität innerhalb des direkten Sonnenlichts mit zunehmender Raumtiefe nur geringfügig. Wird der Betrachtungspunkt aus dem Lichtstrahl heraus verschoben, vermindert sich die Strahlungsintensität jedoch schlagartig und nimmt mit der Raumtiefe erwartungsgemäß weiter ab. Bei bedecktem Himmel ist das Ausgangsniveau der Bestrahlungsstärke erwartungsgemäß deutlich niedriger. Im Rauminneren sinkt die Bestrahlungsstärke kontinuierlich.

Es kann also festgehalten werden, dass die errechneten Werte der photophysiologicalen Wirkpotentiale in guter Näherung ihre Gültigkeit behalten, sofern die Messebene oder der betroffene Mensch im Wortsinn im direkten Sonnenlicht steht. Die Entfernung von der Glasscheibe ist dabei von sekundärer Bedeutung. Außerhalb des direkten Sonnenlichts sind strahlungstechnische und in erster Näherung auch photophysiologicalhe Intensitäten um etwa einen Faktor drei niedriger und klingen mit der Raumtiefe weiter ab.

7.9. Zusammenfassung

Ausgehend von den in Kapitel 6 dargestellten medizinischen Zusammenhängen und den in Kapitel 7 ermittelten und erläuterten Daten kann die unter 2.1. formulierte Hypothese, dass ein ursächlicher Zusammenhang zwischen der Evidenz des epidemischen Auftretens von Lichtmangelercheinungen und dem lang andauernden Aufenthalt hinter Glasscheiben im Inneren von Gebäuden im Allgemeinen besteht, klar verifiziert werden.

Darüber hinaus kann festgestellt werden, dass das photobiologisch wirksame Tageslichtangebot hinter thermisch optimierten Funktionsglasscheiben geringer ist als hinter einer unbeschichteten Einscheiben-Verglasung. Jedoch ist das spektrale Strahlungsangebot zumindest in Bezug auf die derzeit bekannten und hier untersuchten photobiologischen Wirkungen entweder derartig unerschwellig beziehungsweise überschwellig, dass die, durch die verschiedenen Transmissionseigenschaften der untersuchten Gläser hervorgerufenen Angebotsunterschiede vergleichsweise zu gering sind, um die grundlegenden photobiologischen Tendenzen nennenswert zu beeinflussen.

So kann klar gezeigt werden, dass alle untersuchten Glasscheiben nahezu intransparent für jene Spektralanteile der UV-Strahlung sind, die dem Ablauf der Photosynthese von Pre-Vitamin D₃ zugrunde liegen. An dieser Stelle ist zu bemerken, dass das Tageslichtangebot am gewählten Standort Wien während der Wintermonate selbst im Außenraum für den Ablauf der Pre-Vitamin D₃ Synthese nicht ausreicht, und eine adäquate Versorgung mit solarer Strahlung in den verbleibenden Monaten daher umso wichtiger ist.

Ebenfalls in nur sehr geringem Ausmaß können jene Spektralanteile der UV-Strahlung durch sämtliche der untersuchten Glasscheiben dringen, die zur Bildung eines UV-Erythems führen. Entsprechend kann auch davon ausgegangen werden, dass sowohl photopathologische aber auch photoadaptive Wirkungen in diesem Spektralbereich hinter Glasscheiben weitgehend ausbleiben. Es ist darauf hinzuweisen, dass aktuelle medizinische Forschungsergebnisse daraufhin deuten, dass nicht oder ungenügend adaptierte Haut, bei plötzlicher Strahlungseinwirkung für Schädigungen besonders anfällig ist.

Im Gegensatz zum ultravioletten Strahlungsbereich sind alle untersuchten Glasscheiben im sichtbaren Spektralbereich derart transparent, dass die, für die photophysiologischen Wirkungen relevanten Schwellwerte jedenfalls erreicht werden. Das gilt auch für alle derzeit bekannten nichtvisuellen Wirkungen im Zusammenhang mit der Suppression von Melatonin. Bemerkenswert muss allerdings, dass die Deutlichkeit des natürlichen Helldunkel-Rhythmus einerseits durch das geringere Tageslichtangebot hinter den angeführten Glasscheiben und andererseits durch die Verwendung von Kunstlicht mit entsprechenden Spektralanteilen während der Nacht, erheblich reduziert wird.

Schließlich ist festzuhalten, dass die Beleuchtungsstärke im Innenraum durch den Einsatz technischer Funktionsglasscheiben deutlich, im Fall der Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung um mehr als die Hälfte, im Vergleich zum Außenraum reduziert

wird. Dieser Effekt ist visuell deutlich wahrnehmbar und führt zum vermehrten Einsatz von Kunstlicht als Tageslichtergänzung.

Die Ergebnisse der Potentialstudien können mit angemessener Umsicht umgelegt werden auf reale Situationen, wenn deren Rahmenbedingungen in Bezug gesetzt werden zu jenen der Potentialstudie. Zwei derartige Bezüge, nämlich der des Vorhandenseins von Bewölkung und der des Aufenthalts in größerer Tiefe des Innenraumes werden in der gegenständlichen Arbeit hergestellt und dokumentiert.

8. Potentialstudie „Licht und thermische Optimierung“

Die im Kapitel 2.2 formulierte Hypothese über das Vorliegen eines Zielkonflikts zwischen der Optimierung der Tageslichtversorgung und der Optimierung des tageslichtinduzierten thermischen Verhaltens eines Innenraumes in Bezug auf die Ausrichtung der, diesem Innenraum zugeordneten transparenten vertikalen Flächen, wird in der anschließenden Potentialstudie diskutiert.

8.1. Fragestellung

Welchen Einfluss nimmt die Ausrichtung eines Gebäudes zur Sonnenbahn an einem bestimmten Standort auf das sommerliche wie winterliche Innenraumklima beziehungsweise auf das Tageslichtangebot im Gebäudeinneren?

Um diese Frage wissenschaftlich haltbar und aussagekräftig beantworten zu können ist zunächst zu klären, welcher Gebäudetyp in welcher Ausführungsqualität als Untersuchungsobjekt herangezogen werden kann. Und weiters, welche Parameter geeignet sind, den Einfluss der Ausrichtung zur Sonnenbahn auf das Innenraumklima und das Tageslichtangebot im Gebäudeinneren sinnfällig zu beschreiben.

8.2. Methodik

8.2.1. Wissenschaftlicher Ansatz

Für die Arbeit wurde als wissenschaftliche Herangehensweise der konstruktivistische Ansatz gewählt, um sich der Komplexität des tageslichtinduzierten thermischen Verhaltens sowie der Tageslichtversorgung eines Gebäudes systematisch annähern zu können.

Dem konstruktivistischen Ansatz des Erkenntnisgewinns durch Annäherung eines Modells an die Realität wird gegenüber einem analytischen Ansatz der Vorzug gegeben, da zweiterer die Gefahr von Fehleinschätzungen beziehungsweise Fehlinterpretationen birgt, weil komplexe Zusammenhänge nach bekannten und vereinfachenden Mustern beurteilt werden könnten.¹⁰⁰⁹

Als der eigentlichen Fragenbehandlung vorzuordnender Ausgangspunkt ist daher ein modellhaftes Gebäude zu entwickeln, das den strengen Anforderungen an strukturelle Klarheit und Eindeutigkeit im Sinne des methodischen Konstruktivismus¹⁰¹⁰ genügt.¹⁰¹¹

¹⁰⁰⁹ Poser (2004)

¹⁰¹⁰ Damit steht der methodische Konstruktivismus der Erlanger Schule nach Wilhelm Kamlah und Paul Lorenz im Gegensatz zum wahrnehmungsbiologisch basierten radikalen Konstruktivismus nach Ernst von Glaserfeld.

¹⁰¹¹ Mittelstraß (2004)

Am so entwickelten Modell wird im Sinne der Aussagekraft der Ergebnisse eine vergleichende Potentialstudie durchgeführt. Das bedeutet, dass die Eigenschaften der Einzelemente des konstruierten Modells so zu definieren sind, dass das zur Verfügung stehende Potential, im Fall der vorliegenden Studie das Angebot an Tageslicht, vollumfänglich genutzt wird.

Derart wird die jeweilige Ausrichtung zur einzigen Einflussgröße auf das thermische Verhalten und die Tageslichtversorgung des modellhaften Gebäudes. Dieses thermische Verhalten und die Tageslichtversorgung werden in drei charakteristischen Parametern beschrieben, die schließlich eine vergleichende Betrachtung erlauben.

Als geeignete Parameter zur Charakterisierung des thermischen Verhaltens wurden der Heizwärmebedarf und der Kühlbedarf identifiziert. Für eine hinreichende Beschreibung der Tageslichtversorgung kann kein geeigneter vordefinierter Parameter aufgefunden werden. Daher wird ein derartiger Parameter mit dem Durchlichtungsfaktor, mit der Abkürzung LPF für das Englische Light Penetration Factor, im Rahmen der vorliegenden Studie neu eingeführt und angewandt.

8.2.2. Annäherung an einen modellhaften Gebäudetyp

Ausgehend von der Idee, dass die einzig entscheidende Einflussgröße im Rahmen der vergleichenden Potentialstudie die Ausrichtung eines Gebäudes zur Sonnenbahn sein soll, wurden Gebäudetypen gesucht, deren Nutzungseinheiten eine klar definierte Orientierung aufweisen. Besonders gut erfüllen diesen Anspruch parallel liegende Wohneinheiten innerhalb langgestreckter Gebäude, die durchgesteckt mit einer äußeren Erschließung oder zweihüftig an einem Mittelgang organisiert vorliegen können. Durchgesteckte Wohneinheiten mit vorgelagerter Erschließung erlauben je nachdem, ob die Wand zwischen Erschließungselement und Wohneinheit transparent oder opak ausgebildet ist, eine Belichtung von zwei gegenüberliegenden Seiten oder lediglich von einer Seite. Bei einer zweihüftigen Grundrissorganisation besteht diese Möglichkeit nicht. Daher wird der Gebäudetyp des Laubenganghauses aktueller Prägung, mit zumeist straßenseitig vorgelagerter Erschließung, der Definition des Gebäudemodells für die vergleichende Potentialstudie zugrunde gelegt und wird dasselbe Gebäudevolumen mit nur einseitiger Belichtung vergleichend untersucht.

Um einen Kontext zwischen der in Kapitel 7 durchgeführten Potentialstudie „Photophysiology im Innenraum“ und der Potentialstudie „Licht und Thermische Optimierung“ herzustellen und eine Integration der Studienergebnisse zu vereinfachen, wurde auf denselben Standort referenziert. Wie bereits ausgeführt, erscheint Wien in Hinsicht auf die Verfügbarkeit von Klimadaten, die Zugänglichkeit und den Bestand an möglichen Referenzobjekten und das Vorliegen von rechtsverbindlichen Regelwerken als Referenzort besonders geeignet.

8.2.2.1. Das Wiener Laubenganghaus

Im Folgenden wird das Wiener Laubenganghaus als Gebäudetyp beschrieben, um so jene Elemente zu identifizieren, die für die Definition des konstruktivistischen Modells bestimmend sind.

8.2.2.1.1. Der Laubengang als historisches Element Wiener Baukultur

Höfe mit umlaufenden Galerien oder Arkaden, abgeleitet aus antiken europäischen und arabischen Traditionen, sind in vielen Städten im Alpenraum anzutreffen. Bemerkenswert ist, dass Adel, Geistlichkeit und Bürgertum eigene Interpretationen des Typus ausbilden:

- > Der Adel die Galerie, die sich im Übergang von Burg zu Schloss, vom äußeren Erschließungsgang zur beidseitig beleuchteten Wandelhalle verselbständigt.
- > Das Bürgertum die Arkade beziehungsweise die Loggia als besonderen Ort für den Handel.
- > Der geistliche Stand den Kreuzgang für die Kontemplation und die zusammenfassende Erschließung des Klosters.¹⁰¹²

Seit josephinischer Zeit ab etwa 1760 unterliegt das Wiener Wohnhaus einer eindeutig verfolgbaren Tendenz innerhalb der gesamten Gestaltgebung im Bauen, die zum mehrgeschossigen Großbau tendiert. Die Ausformung des Laubengangtyps steht in enger Verbindung mit der Entwicklung des Wohnhauses auf engem Raum.

¹⁰¹² Geist (1987)

Dem großvolumigen städtischen Haustypen steht allerdings noch lange der aus der bäuerlichen Bautradition erwachsene Pawlatschenhof¹⁰¹³ gegenüber, der sich sowohl bei Häusern des späten 18. Jahrhunderts wie auch noch zu Beginn des 19. Jahrhunderts vor allem in den Vorstädten findet (Abbildung 40).¹⁰¹⁴

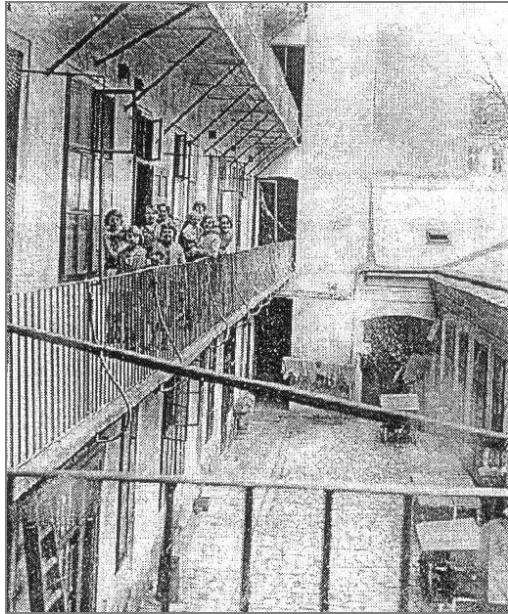


Abbildung 40: Hof des Hauses Apollogasse 3, A 1070 Wien im Jahr 1928

Für die Grundrisslösung ist es entscheidend, dass man zunächst noch mit gassenseitigen Trakten das Auslangen findet, die hofseitig häufig mit Pawlatschen erschlossen sind. Durch die Bevölkerungszunahme und die dadurch bedingte wachsende Wohnraumnot, wird der Druck die Höfe zu verbauen immer stärker.¹⁰¹⁵ Aus Gründen der räumlichen und finanziellen Effizienz wird es Ziel, möglichst viele Wohnungen an ein Treppenhaus als vertikale Erschließung anzubinden. Die horizontale Verteilung erfolgt über hofseitige Laubengänge.

Die möglichst lukrative Ausnutzung des teuren Bodens durch zahlreiche, dicht gefügte Mietwohneinheiten führt aber auch zu einer Zurückdrängung des Familiaritätsprinzips. Mietwohnungen, Arbeitsstätten und die Wohnung der Besitzerfamilien sind nun nebeneinander in einem Gebäude untergebracht. Selbst Palais unterliegen dieser Entwicklung. Die Repräsentationsbauten stehen nur mehr in seltenen Fällen einer Familie zur Verfügung. Der Adel logiert in einer repräsentativen Etagenwohnung, während das übrige Haus vermietet wird. Am Ende dieser Entwicklung steht das Zinshaus, das für den anonymen Mieter als Spekulationsobjekt von Unternehmern errichtet wird.

¹⁰¹³ Tschechisch: pawlač, Deutsch: der Söller, der Balkon

¹⁰¹⁴ Brodner (1997)

¹⁰¹⁵ Wagner-Rieger (1970)

Typologisch erfährt das Pawlatschenhaus der Vorstädte eine Weiterentwicklung. Die Ausgestaltung der um den Hof gelegenen Trakte gewinnt immer mehr an Bedeutung. Der Flur führt nun direkt vom Eingangstor in den Hof. Die hier seitlich gelegene Treppe verbindet in jedem Stockwerk hofseitig frei vorragende Gänge, welche den Zugang zu den einzelnen Wohnungen gewährleisten. Der Typus wird in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts in der Innenstadt so abgewandelt, dass die Gänge nicht mehr als offene Pawlatschen in den Hof vorragen, sondern verglast und in die Hofwand verlegt werden (Abbildung 41).¹⁰¹⁶

Schließlich wird die Erschließung völlig in das Volumen des Wohngebäudes integriert, sodass einhüftig erschlossene Gangwohnungen entstehen. Die Fensterverbindung zwischen Wohnung und Erschließungsgang wird dabei beibehalten.¹⁰¹⁷



Abbildung 41: Haus Anne Gasse 5, A-1010 Wien im Jahr 2007

8.2.2.1.2. Das Laubenganghaus im zeitgenössischen Wiener Wohnbau

Etwa ab dem letzten Jahrzehnt des 20. Jahrhunderts, findet eine Neuformulierung des Laubenganges im Geschosswohnungsbau statt. Auf Basis erhöhter Materialqualität und -verfügbarkeit entstehen hoch- beziehungsweise vollverglaste Erschließungszonen, die ein den Wohnungen vorgelagertes, nun eigenständiges Volumen bilden. Der grundlegende Unterschied zu den historischen Typen ist der Wechsel in der Anordnung der Volumen. Das Erschließungselement wird nicht mehr hofseitig angefügt, sondern straßenseitig vor die Wohneinheiten gefügt (Abbildung 42, Abbildung 43, Abbildung 44, Abbildung 45).^{1018,}

¹⁰¹⁶ Wagner-Rieger (1970)

¹⁰¹⁷ Abbildung 41: Stitz J.

¹⁰¹⁸ Abbildung 42 bis Abbildung 45: Stitz J.



Abbildung 42: Laubengangwohnhaus, über Eck, Brünnerstraße 26-32, Wien 23, H. Richter, 1991

Abbildung 43: Laubengangwohnhaus, Innenansicht Laubengang, Brünnerstraße 26-32, Wien 23, H. Richter, 1991



Abbildung 44: Laubengangwohnhaus, Südfassade, Speisinger Straße 50-52, Wien 13, M. Praschl, A. Praschl Goodarzi, 1999

Abbildung 45: Laubengangwohnhaus, Innenansicht Laubengang, Speisinger Straße 50-52, Wien 13, M. Praschl, A. Praschl Goodarzi, 1999

Der Laubengang übernimmt damit die Funktion der Fassade ohne jedoch alle Qualitätsanforderungen erfüllen zu müssen, die an eine wohnungsbegrenzende Außenwand gestellt werden. Damit werden unterschiedlichste Ausdetaillierungen möglich, die der architektonischen Gestaltung von Vollglasfassaden neue Impulse geben (Abbildung 46, Abbildung 47, Abbildung 48, Abbildung 49).¹⁰¹⁹

¹⁰¹⁹ Abbildung 46 bis Abbildung 49: Stitz J.



Abbildung 46: Laubengangwohnhaus, Innenansicht Laubengang, Breitenfurter Straße 114, Wien 12, H. Wimmer, 2002

Abbildung 47: Laubengangwohnhaus, über Eck, Breitenfurter Straße 114, Wien 12, H. Wimmer, 2002



Abbildung 48: Laubengangwohnhaus, Rosensteingasse 104-106, Wien 17, L. Dunjl, 2004

Abbildung 49: Laubengangwohnhaus, Innenansicht Laubengang, Rosensteingasse 104-106, Wien 17, L. Dunjl, 2004

Hinsichtlich der Wohnqualität werden mit der Anwendung von hochtransparenten und dennoch geschlossenen neuen Formen des Laubengangs die unterschiedlichsten Erwartungen verknüpft. Zunächst verspricht der Laubengang Schutz vor an verkehrsreichen Straßen verstärkt auftretenden Belastungen durch Lärm, Staub und Wind. Die großen Glasflächen erinnern darüber hinaus aber auch an Wintergärten, die Sonnenlicht zur Wärmegewinnung nutzen, viel Licht ungehindert in den Innenraum lassen und attraktive Aufenthaltszonen darstellen.¹⁰²⁰

Der Typus der Laubengangwohnung bietet grundsätzlich die Möglichkeit der doppelseitigen Belichtung. Aus vielerlei Gründen wird in der Praxis diese Möglichkeit nur sehr eingeschränkt genutzt. Fenster von der Wohnung gegen den Laubengang stehen in Konkurrenz zu Anforderungen des Schutzes gegen Einsicht, sowie bisweilen Anforderungen des Schallschutzes und des Brandschutzes.

Wohl wissend um diese praktischen Herausforderungen stellt sich die gegenständliche Arbeit der Frage nach den Möglichkeiten, also den Potentialen dieses Haustyps, differenziert nach der Wohnungsorientierung.

8.3. Modelldefinition

8.3.1. Grundsätzliche Festlegungen zur Geometrie des Modells

Das Basismodell ist eine, durch extreme Abstraktion des Bautypus Laubenganghaus abgeleitete Konstruktion, die allen spezifischen Randbedingungen eines definierten, realen Ortes unterliegt.

Die Abstraktion stellt sicher, dass jede subjektbezogene Eigenschaft, die für die gestellte wissenschaftliche Frage von Relevanz ist, durch eine strukturelle Eigenschaft ersetzt wird. Wesentlich dabei ist auch, dass die gewählten strukturellen Werte Extreme darstellen, damit die Komplexität des Basismodells so gering wie möglich bleibt. Das vereinfacht das Auffinden und Definieren von Ursache-Wirkungszusammenhängen bei der Untersuchung von Aufbaumodellen.

So wird beispielsweise ein Wandbauteil mit bauphysikalischen Eigenschaften, etwa einem U-Wert, entsprechend den Mindestanforderungen der für den Ort gültigen Norm belegt. Dem Wandbauteil wird aber kein Material als solches zugewiesen, da der mindest geforderte U-Wert durch unterschiedlichste Materialien und Materialkombinationen realisiert werden kann, deren sonstigen bauphysikalischen Eigenschaften gänzlich von einander abweichen. Für die Fragestellung zunächst nicht relevante Eigenschaften werden mit neutralen Werten belegt. Beispielsweise ist die Konstruktionsdicke sämtlicher Bauteile des Basismodells mit Null festgelegt.¹⁰²¹

¹⁰²⁰ Ebner (2007)

¹⁰²¹ Abweichungen von diesen konstruktivistischen Festlegungen erweisen sich in der Anwendung von bauphysikalischer Software bisweilen als erforderlich. Auf sie wird im Anlassfall hingewiesen.

Um die, für die Fragestellung relevanten optischen und thermischen Qualitäten eindeutig auszuweisen, werden jene Extremwerte angenommen, die im Rahmen der am Ort gültigen Normen gerade noch zulässig sind.

So geht das Basismodell beispielsweise von maximal erlaubten Raumtiefen bei Belichtungsöffnungen maximaler Größe oder von Mindest-U-Werten der jeweiligen Bauteile aus. Wesentlich für die Wahl der Extremwerte ist, dass sie eindeutig und sinnvoll in Hinsicht auf die Baubarkeit eines realen Hauses sind.

8.3.1.1. Morphologie

- > Das Basismodell der Laubengangeinheit wird aus zwei eigenständigen, unterschiedlich dimensionierten Raumeinheiten gebildet, die zueinander in einer eindeutigen räumlichen Zuordnung stehen.
- > Die Raumeinheit mit der signifikant größeren Längsausdehnung wird in weiterer Folge als *Laubengang* bezeichnet, die zweite Einheit als *Wohnung*.
- > Begrenzt werden die Raumeinheiten *Laubengang* und *Wohnung* mit durchgehenden ebenen Flächen, die sich im Raum ausschließlich in horizontale oder vertikale Richtung ausdehnen.
- > Das Basismodell seinerseits ist Teil des Gebäudes, welches aus vertikaler und horizontaler Multiplikation des Basismodells entsteht. Dieses solcherart definierte Gebäude wird in weiterer Folge als *übergeordnete Raumstruktur* bezeichnet.
- > Es werden, wieder innerhalb der Denkschule des Konstruktivismus, zwei Ausformungen des Basismodells definiert:
Das *Basismodell GGG* (Glas-Glas-Glas) mit sämtlichen Fassadenelementen vollflächig verglast. Das gilt somit für die Fassade der Wohnung direkt gegen außen wie für die Fassade der Wohnung gegen den Laubengang als auch für die Fassade des Laubengangs gegen außen.¹⁰²²
Das *Basismodell GWG* (Glas-Wand-Glas) behält die Vollverglasung der äußeren Fassaden bei, ändert aber die Trennwand der Wohnung gegen den Laubengang zu vollständig opak.¹⁰²³
- > Sämtliche sonstige Begrenzungsflächen des Basismodells sind vollflächig lichtundurchlässig. Das gilt somit alle Wände und Decken der Wohnung gegen benachbarte Wohnungen sowie für die Decken des Laubengangs.
- > Einander schneidende Elemente stehen zueinander immer orthogonal.
- > Decken, Wände und Fassaden sind im Basismodell zweidimensionale Ebenen und weisen keine Dicke auf.

¹⁰²² Die Annahme der Vollverglasung gegen den Laubengang wurde als typologischer Grenzfall im Sinne des gerade noch Möglichen angenommen, obwohl einsichtig ist, dass diese Lösung auf Grund anderwärtiger funktionaler Anforderungen praktisch unmöglich sein dürfte.

¹⁰²³ Beide Basismodelle bilden somit hinsichtlich der Lichtdurchlässigkeit der Trennwand der Wohnung gegen den Laubengang die beiden möglichen Extremwerte ab, innerhalb derer sich die gebaute Realität bewegt.

8.3.1.2. Bezeichnung der Basismodelle

Nachfolgend wird das Basismodell in seinen Abmessungen definiert. Neben der Ausformung (GGG oder GWG) ist ein Basismodell gekennzeichnet durch die Breite und die Tiefe der Wohnung. In der folgenden Potentialanalyse ist auch die Orientierung der Flächennormalen der Laubengangfassade von Relevanz.

Vor diesem Hintergrund wird zur eindeutigen Bezeichnung der Basismodelle die folgende Codierung eingeführt:

Typ	Bezeichnet eine eindeutige Konstellation des Basismodells mit seiner Ausformung, seiner Breite, Tiefe, und Orientierung. Abkürzung „T“.
Ausformung	Bezeichnet eine der beiden Konstellationen GGG oder GWG.
Breite	Bezeichnet die Breite der Wohnung im jeweiligen Basismodell. Abkürzung „B“, ergänzt durch den Zahlenwert in cm.
Tiefe	Bezeichnet die Tiefe der Wohnung im jeweiligen Basismodell. Abkürzung „T“, ergänzt durch den Zahlenwert in cm.
Ausrichtung	Bezeichnet die Orientierung des Normalvektors auf die Laubengangfassade. Abkürzung „A“, ergänzt durch den Zahlenwert als Drehung von der Südrichtung im Uhrzeigersinn.

Es bedeutet z.B.: T_GGG_B460_T2850_A0

T	Typ
GGG	Glas-Glas-Glas
B460	Breite 460 cm
T2850	Länge, im Sinne von Tiefe, 2.850 cm
A0	Orientierung der Laubengangfassade nach Süden

8.3.1.3. Abmessungen des Basismodells

8.3.1.3.1. Höhe

Die lichten Raumhöhen des Basismodells werden unter Heranziehung der Bestimmungen der Wiener Bauordnung festgelegt.

Die Mindestanforderungen an die lichten Raumhöhe der Wohnung des Basismodells werden im IX. Abschnitt der Bauordnung für Wien: „Vorschriften, die vornehmlich dem Schutz der Gesundheit dienen; Geschossbezeichnung; Aufenthaltsräume, lichte Höhe und Lage“ wie folgt definiert:

„§ 87. (5) Die lichte Höhe von Aufenthaltsräumen muss [!] mindestens 2,50 m betragen. Wird diese Höhe nicht an allen Stellen des Raumes erreicht, muss [!] der Luftraum dennoch mindestens dasselbe Ausmaß haben wie bei einer waagrechten Decke mit 2,50 m Höhe.“¹⁰²⁴

¹⁰²⁴ Bauordnung für Wien, 2007, aus dem Internet: <http://www.wien.gv.at/recht/landesrecht-wien/rechtvorschriften/html/b0200000.htm> (04.07.2007)

Die Bestimmungen im X. Abschnitt der Bauordnung für Wien „Vorschriften, die hauptsächlich die Konstruktion betreffen“ definieren ein Element, das wie der Laubengang des Basismodells, der Erschließung von Wohnungen dient, als *notwendige Verbindung*. Festgelegt sind hier ebenfalls die Mindestanforderungen an die lichte Raumhöhe von notwendigen Verbindungen.

„§ 106. (1) Jede Wohnung (...) muss [!] unmittelbar (...) von den öffentlichen Verkehrsflächen sicher erreichbar sein. Verbindungswege, die der unmittelbaren Erreichbarkeit einer Wohnung (...) von den öffentlichen Verkehrsflächen dienen, sind notwendige Verbindungswege.“¹⁰²⁵

„§ 106. (3) Die notwendigen Verbindungswege müssen (...) eine lichte Höhe von mindestens 2,10 m haben; ...“¹⁰²⁶

Auf Grund der strukturellen Anforderung einer horizontalen Durchgängigkeit der Geschosdecken im Basismodell wird die geringere gesetzlich geforderte lichte Höhe des Laubengangs von 2,10 m jener der Wohnung mit 2,50 m angeglichen und wird die lichte Geschosshöhe des Basismodells mit 2,50 m definiert.

8.3.1.3.2. Tiefe

Auch die Tiefen des Basismodells werden unter Heranziehung der Bestimmungen der Wiener Bauordnung festgelegt.

Es wird dabei die Geschosstiefe t aus drei Teiltiefen zusammengesetzt.

- > Teiltiefe t_D - Direkt besonnener Wohnungsteil
- > Teiltiefe t_I - Indirekt besonnener Wohnungsteil
- > Teiltiefe t_L - Laubengang

Die Gesamttiefe t des Geschosses ermittelt sich durch Addition der drei Teiltiefen, und t_D , t_I und t_L .

Unter Heranziehung der nachfolgend erläuterten Bestimmungen der Wiener Bauordnung ergibt sich im Basismodell GGG eine maximal zulässige Tiefe der Wohnung von 28,5 m und eine minimale Tiefe des Laubengangs von 1,2 m und somit eine Gesamttiefe des Basismodells von 29,7 m.¹⁰²⁷

¹⁰²⁵ Bauordnung für Wien, 2007, aus dem Internet: <http://www.wien.gv.at/recht/landesrecht-wien/rechtvorschriften/html/b0200000.htm> (04.07.2007)

¹⁰²⁶ Bauordnung für Wien, 2007, aus dem Internet: <http://www.wien.gv.at/recht/landesrecht-wien/rechtvorschriften/html/b0200000.htm> (04.07.2007)

¹⁰²⁷ Eine Wohnung gegenwärtigen Standards umfasst jedenfalls Räume wie Bad und WC, die keine Aufenthaltsräume sind. Für diese Räume wird die Belichtung mit Tageslicht nicht vorgeschrieben. Es wäre daher denkbar, für diese Räume eine zusätzliche vierte Teiltiefe für einen nicht oder nur indirekt durch die Aufenthaltsräume belichteten Bereich einzuführen. Zur Definition dieser vierten Teiltiefe liegen keine Angaben in der Bauordnung für Wien vor. Aus methodischer Sicht kann auf die Einführung einer vierten Tiefe unter folgenden Voraussetzungen verzichtet werden. Das Einfügen weiterer Räume, die durch die Aufenthaltsräume indirekt belichtet sind, ist jederzeit möglich, wenn die Lichtqualitäten an der, über die Bauordnung für Wien klar festlegbaren, Grenzlinie zwischen dem direkt belichteten

Im Basismodell GWG ergibt sich eine maximal zulässige Tiefe der Wohnung von 13,5 m bei einer gleichbleibenden minimalen Tiefe des Laubengangs von 1,2 m und somit eine Gesamttiefe des Basismodells von 14,7 m.

Detaillierte Herleitung und Begründung siehe nachfolgend.

8.3.1.3.2.1. Teiltiefe t_D - Direkt besonnener Wohnungsteil

Bestimmungen betreffend die zulässige Tiefe von Räumen, die auf das Basismodell angewendet werden können, finden sich im IX. Abschnitt der Bauordnung für Wien: „Vorschriften, die vornehmlich dem Schutz der Gesundheit dienen - Geschossbezeichnung; Aufenthaltsräume, lichte Höhe und Lage“.

„§ 88. (1) Aufenthaltsräume müssen grundsätzlich natürlich belichtet sein (...).

§ 88. (2) Fenster, die zur Belichtung von Aufenthaltsräumen erforderlich sind (Hauptfenster), müssen ins Freie münden. (...) Die Gesamtfläche der Hauptfenster muss, in der Architekturlichte gemessen, mindestens ein Zehntel der Fußbodenfläche des zugehörigen Raumes betragen. Dieses Maß vergrößert sich bei Raumtiefen von mehr als 5 m um je 10vH für jeden vollen Meter Mehrtiefe. ...¹⁰²⁸

„§ 87. (3) Als Aufenthaltsräume gelten Wohnräume, Büroräume, sonstige Arbeitsräume und Küchen.“¹⁰²⁹

Da für das Basismodell einerseits eine lichte Raumhöhe des Geschosses von 2,5 m festgelegt wurde und andererseits die Fassade als vollflächig verglast definiert ist, kann durch Anwendung der Bauordnung die höchstzulässige Raumtiefe ermittelt werden. Es gilt dabei der Zusammenhang (Formel 29):

$$h \cdot b = t_D \cdot b \cdot \frac{t_D + 5}{100} \quad \text{für alle } t_D \geq 5 \text{ m}$$

h ... lichte Geschosshöhe

b ... Raumbreite

t_D ... Tiefe des direkt belichteten Wohnungsteils

Formel 29: Baurechtlich maximal zulässige Wohnungstiefen des direkt belichteten Wohnungsteils

Löst man diese Gleichung mit $h = 2,50$ m nach t_D auf, ergibt sich für die Tiefe des direkt belichteten Wohnungsteils ein Wert von 13,50 m.

Im Basismodell GWG mit vollständig opaker Trennwand der Wohnung gegen den Laubengang ist mit t_D bereits die zulässige Wohnungstiefe definiert.

und dem indirekt belichteten Wohnungsteil das sinnvoll erscheinen lassen. Das Einfügen einer Zone ohne Verbindung zum Tageslicht ist jederzeit möglich, für die Betrachtung von Tageslichtqualitäten aber ohne jede Relevanz.

¹⁰²⁸ Bauordnung für Wien, 2007, aus dem Internet: <http://www.wien.gv.at/recht/landesrecht-wien/rechtvorschriften/html/b0200000.htm> (04.07.2007)

¹⁰²⁹ Bauordnung für Wien, 2007, aus dem Internet: <http://www.wien.gv.at/recht/landesrecht-wien/rechtvorschriften/html/b0200000.htm> (04.07.2007)

8.3.1.3.2.2. Teiltiefe t_i - Indirekt besonnener Wohnungsteil

Der oben bereits zitierte § 88 legt weiters fest, unter welchen Bedingungen Hauptfenster gegen verglaste Balkone und Loggien grenzen dürfen:

„§ 88 (3) Verglaste Balkone und Loggien sind vor Hauptfenstern nur zulässig, wenn ihre verglaste Fläche mindestens drei Zehntel und die Architekturlichte der Hauptfenster mindestens ein Sechstel der Fußbodenfläche des zugehörigen Raumes beträgt.“¹⁰³⁰

Diese Bestimmung für verglaste Balkone und Loggien findet in der Auslegungspraxis der Baubehörde auch Anwendung auf das Erschließungselement Laubengang.¹⁰³¹

Da im Basismodell sowohl der Laubengang, als auch die Wand zwischen Wohnung und Laubengang als vollflächig verglast definiert sind, werden die Anforderungen der Bauordnung im Sinne des § 88 (3) betreffend die Größe der verglasten Fläche beziehungsweise die Abmessungen der Architekturlichte erfüllt. Die höchstzulässige Raumtiefe für Aufenthaltsräume im indirekt belichteten Wohnungsteil kann daher über den folgenden Zusammenhang (Formel 30) festgelegt werden:

$$h \cdot b = t_i \cdot b \cdot \frac{1}{6}$$

h ... lichte Geschosshöhe

b ... Raumbreite

t_i ... Tiefe des indirekt besonnten Wohnungsteils

Formel 30: Baurechtlich maximal zulässige Wohnungstiefe des indirekt belichteten Wohnungsteils

Löst man diese Gleichung mit $h = 2,50$ m nach t_i auf erhält man die Tiefe des indirekt besonnten Wohnungsteils die zweite der drei Teiltiefen des Basismodells mit 15 m.

8.3.1.3.2.3. Teiltiefe t_l - Laubengang

Als grundsätzliche Anforderungen an das Basismodell wird die Nutzungsart Wohnen festgelegt. Dem entsprechend sind für die Bestimmung der Tiefe des Laubengangs folgende Aussagen im X. Abschnitt der Bauordnung für Wien „Vorschriften, die hauptsächlich die Konstruktion betreffen“ relevant:

„§ 106. (6) Die Mindestbreite der notwendigen Verbindungswege hat zu betragen: a) in Wohngebäuden, in denen jedes Hauptgeschoss mit Ausnahme des Erdgeschosses überwiegend Wohnzwecken dient, 1,20 m; (...)“¹⁰³²

¹⁰³⁰ Bauordnung für Wien, 2007, aus dem Internet: <http://www.wien.gv.at/recht/landesrecht-wien/rechtsvorschriften/html/b0200000.htm> (04.07.2007)

¹⁰³¹ Telefonat mit der MA37 am 03.07.2007 mit Frau DI Gessner (01 / 4000 09 501)

¹⁰³² Bauordnung für Wien, 2007, aus dem Internet: <http://www.wien.gv.at/recht/landesrecht-wien/rechtsvorschriften/html/b0200000.htm> (04.07.2007)

Die Tiefe des Laubengangs wird daher als dritte und letzte von drei Teiltiefen des Geschosses des Basismodells mit 1,20 m festgelegt.

8.3.1.3.3. Breite

Breiten des Basismodells sind zu definieren für einerseits die Wohnung und andererseits für den vorgelagerten Laubengang. Wieder wird die Definition auf den Bestimmungen der Wiener Bauordnung aufgebaut.

Die lichte Wohnungsbreite des Basismodells wird demnach mit 4,60 m und in einer Variante davon mit 2,30 m festgelegt. Die Breite des Laubengangs wird als theoretisch unendlich festgelegt.

Detaillierte Herleitung und Begründung siehe nachfolgend.

8.3.1.3.3.1. Breite der Wohnung

Die Breite der Wohnung des Basismodells wird durch den Abstand von zwei parallelen, durchgängig ebenen Trennwänden definiert. Die Bauordnung für Wien liefert für die Bestimmung dieses Abstandes keine anwendbaren Vorgaben. Daher wird der Definition der Wohnungsbreite ein Konstruktionsraster zugrunde gelegt, dessen Abmessungen aus dem „Gesetz über Anlagen zum Einstellen von Kraftfahrzeugen und über Tankstellen in Wien (Wiener Garagengesetz)“ übernommen werden.

Im V. Abschnitt: „Verpflichtung zur Schaffung von Einstellplätzen und Garagen“ wird ein Bezug zwischen Wohnung und Stellplätzen für Personenkraftwagen wie folgt hergestellt:

„§ 36. (1) Bei Neu- und Zubauten sowie Änderungen der Raumwidmung entsteht eine Stellplatzverpflichtung nach Maßgabe der folgenden Bestimmungen; diese ist entweder als Naturalleistung (Pflichtstellplätze) grundsätzlich auf dem Bauplatz oder Baulos oder durch Entrichtung der Ausgleichsabgabe an die Stadt Wien zu erfüllen.“¹⁰³³

„§ 36a. (1) Für jede Wohnung ist ein Stellplatz zu schaffen. ...“¹⁰³⁴

Im III. Abschnitt dieses Gesetzes: „Bauvorschriften“ werden die Mindestabmessungen eines Pflichtstellplatzes festgelegt.

„§ 12. (2) Die Stellplätze müssen nachstehende Mindestabmessungen aufweisen:

- a) eine Breite von 2,30 m, bei Behindertenstellplätzen von 3,50 m;
- b) eine Länge von 6 m bei Hintereinanderaufstellung der Fahrzeuge;
- c) eine Länge von 4,80 m bei allen anderen Aufstellungsarten. ...“¹⁰³⁵

¹⁰³³ Bauordnung für Wien, 2007, aus dem Internet: <http://www.wien.gv.at/recht/landesrecht-wien/rechtsvorschriften/html/b0200000.htm> (04.07.2007)

¹⁰³⁴ Bauordnung für Wien, 2007, aus dem Internet: <http://www.wien.gv.at/recht/landesrecht-wien/rechtsvorschriften/html/b0200000.htm> (04.07.2007)

¹⁰³⁵ Bauordnung für Wien, 2007, aus dem Internet: <http://www.wien.gv.at/recht/landesrecht-wien/rechtsvorschriften/html/b0200000.htm> (04.07.2007)

Ausgehend von diesen Angaben kann die Wahl eines Konstruktionsrasters mit einer Rasterbreite von 2,30 m entsprechend der Mindestbreite eines Stellplatzes, als relevante Basis zumindest im Sinne der logischen Konzeption der Tragkonstruktion eines Wiener Wohngebäudes herangezogen werden. Als sinnvolle Abstände für lastabtragende Elemente werden ganzzahlige Vielfache des Rastermasses gewählt. Die Elemente, die innerhalb des Basismodells für die Abtragung vertikaler Gebäudelasten zur Verfügung stehen, sind die Wohnungstrennwände. Der Abstand zwischen den Wohnungstrennwänden ist so zu wählen, dass er die Mindestanforderungen an die Lichtqualität definiert. Da die Verschattung mit sinkendem Elementabstand zunimmt, ist für die Wohnungsbreite innerhalb des Basismodells also das kleinste ganzzahlige Vielfache des Rasterabstands von 2,30 m auszuwählen, das eine reale Wohnungsbreite darstellen kann. Als lichte Wohnungsbreite wird daher der zweifache Rasterabstand mit 4,60 m gewählt. Zusätzlich wird in weiterer Folge auch eine Variante des Basismodells mit Trennwänden im Rasterabstand von jeweils 2,30 m untersucht.¹⁰³⁶

8.3.1.3.3.2. Breite des Laubengangs

Der Laubengang ist ein durchgängiges Erschließungselement, das den Wohnungen verbindend vorgelagert ist. So enthält der Laubengang im Basismodell keine die Breite begrenzenden Elemente. Die Breite des Laubenganges wird daher als theoretisch unendlich definiert.¹⁰³⁷

8.3.1.4. Abmessungen der übergeordneten Raumstruktur

8.3.1.4.1. Tiefe

Die Tiefe t_{UR} der übergeordneten Raumstruktur entspricht der ermittelten Gesamttiefe t der Laubengangeinheit des Basismodells und beträgt daher 29,7 m im Basismodell GGG und 14,7 m im Basismodell GWG.

8.3.1.4.2. Höhe

Die Höhe h_{UR} der übergeordneten Raumstruktur wird basierend auf dem VIII. Abschnitt der Bauordnung für Wien „Bauliche Ausnützbarkeit der Bauplätze“, dort unter „Bauklasseneinteilung, zulässige Gebäudehöhe“, wie folgt begrenzt:

¹⁰³⁶ Damit wird eine konsequente, methodisch richtige Herangehensweise einerseits sichergestellt und andererseits die Vergleichbarkeit einer Wohneinheit mit zwei durch eine Zwischenwand getrennte Räumen und einer Wohneinheit mit nur einem Raum möglich.

¹⁰³⁷ Unendliche Längen sind in Simulationsprogrammen nur begrenzt abbildbar. Wesentlich ist, dass die Breite des Laubengangs rechnerisch so angenommen wird, dass der Schattenwurf des Laubenganges nicht auf der Fassadenebene zwischen Laubengang und Wohnung abgebildet wird.

„§ 75. (1) Die Bauklasseneinteilung setzt die Gebäudehöhe für Wohngebiete und gemischte Baugebiete fest.

(2) Die Gebäudehöhe hat, soweit sich nicht nach den Bestimmungen der Abs. 4 bis 6 und des § 81 sowie des Bebauungsplanes eine andere Gebäudehöhe ergibt, zu betragen:

- > in Bauklasse I mindestens 2,5 m, höchstens 9 m
- > in Bauklasse II mindestens 2,5 m, höchstens 12 m
- > in Bauklasse III mindestens 9 m, höchstens 16 m
- > in Bauklasse IV mindestens 12 m, höchstens 21 m
- > in Bauklasse V mindestens 16 m, höchstens 26 m

(3) In der Bauklasse VI beträgt die Gebäudehöhe mindestens 26 m; der Bebauungsplan hat die einzuhaltenden Gebäudehöhen innerhalb zweier Grenzmaße festzusetzen.“¹⁰³⁸

Die größte normativ definierte Höhe beträgt 26 m. Die lichte Raumhöhe der Laubengangeinheit wurde mit 2,5 m definiert. Bei einer multiplikativen horizontalen Stapelung können innerhalb von 26 m daher maximal zehn komplette Geschosse untergebracht werden.

Daraus ergibt sich die Höhe $h_{\text{üR}}$ der übergeordneten Raumstruktur mit 25 m.

8.3.1.4.3. Breite

Betreffend die Breite $b_{\text{üR}}$ der übergeordneten Raumstruktur finden sich Aussagen zu einer maximalen Ausdehnung im X. Abschnitt der Bauordnung für Wien unter „Stiegen, Gänge und sonstige Verbindungswege“ wie folgt:

“§ 106. (2) Notwendige Stiegen dürfen von Türen, die aus notwendigen Verbindungswegen in Wohnungen oder Betriebseinheiten führen, nicht weiter als 40 m entfernt sein. ...“¹⁰³⁹

Ausgehend von der Annahme eines zentral gelegenen Stiegenhauses in der Mitte der übergeordneten Raumstruktur kann beidseits des Stiegenhauses ein Verbindungsweg mit maximal 40 m Länge bis zur nächsten notwendigen konstruktiven Zäsur angelegt werden. Den Bestimmungen der Bauordnung für Wien folgend beträgt die maximale Breite $b_{\text{üR}}$ die zweifache zulässige Länge des Verbindungsweges zuzüglich der Breite des Stiegenhauses, die ebenfalls dem konstruktiven Raster von 4,6 m unterworfen wird. Bei einer multiplikativen Vervielfachung der Wohnung in horizontaler Richtung ergibt sich die maximale zulässige Länge eines Verbindungsweges von 36,8 m.

¹⁰³⁸ Bauordnung für Wien, 2007, aus dem Internet: <http://www.wien.gv.at/recht/landesrecht-wien/rechtvorschriften/html/b0200000.htm> (04.07.2007)

¹⁰³⁹ Bauordnung für Wien, 2007, aus dem Internet: <http://www.wien.gv.at/recht/landesrecht-wien/rechtvorschriften/html/b0200000.htm> (04.07.2007)

Die Breite $b_{\text{üR}}$ ergibt sich daher wie folgt:

$$b_{\text{üR}} = 2 \cdot 36,8 + 4,6 = 78,2 \text{ m}$$

Die übergeordnete Raumstruktur mit der Geometrie eines Quaders ist damit festgelegt:

- > Mit der Tiefe $t_{\text{üR}} = 29,7 \text{ m}$ im Basismodell GGG beziehungsweise $14,7 \text{ m}$ im Basismodell GWG.
- > Sowie in beiden Fällen mit der Höhe $h_{\text{üR}}=25 \text{ m}$ und der Breite $b_{\text{üR}}=78,2 \text{ m}$.

8.3.2. Grundsätzliche Festlegungen zur Bauphysik des Modells

Im Folgenden werden dem geometrisch definierten Modell bauphysikalische Eigenschaften auf Basis der Erfordernisse der Bauordnung für Wien zugeordnet.

8.3.2.1. Beheiztes Volumen

Das beheizte Bruttovolumen (V_{B}) der übergeordneten Raumstruktur, wie es in die Bemessung des höchstzulässigen spezifische Transmissions-Wärmeverlustes laut der Wiener Bauordnung und auch in die Bemessung der Anforderung an den Heizwärmebedarf laut der ÖNORM B 8110-1 eingeht, beträgt:

$$\text{Für das Basismodell GGG: } V_{\text{B}} = (28,5 \text{ m} \cdot 25 \text{ m} \cdot 78,2 \text{ m}) = 55.718 \text{ m}^3.$$

$$\text{Für das Basismodell GWG: } V_{\text{B}} = (13,5 \text{ m} \cdot 25 \text{ m} \cdot 78,2 \text{ m}) = 26.393 \text{ m}^3.$$

8.3.2.2. Umschließende Oberfläche des beheizten Volumens

Die umschließende Oberfläche des beheizten Volumens, wie es in die Bemessung der Anforderung an den Heizwärmebedarf laut der ÖNORM B 8110-1 eingeht, beträgt:

Für das Basismodell GGG:

$$A_{\text{B}} = 2 \cdot (28,5 \text{ m} \cdot 25 \text{ m} + 78,2 \text{ m} \cdot 25 \text{ m} + 28,5 \text{ m} \cdot 78,2 \text{ m}) = 9.792 \text{ m}^2$$

Für das Basismodell GWG:

$$A_{\text{B}} = 2 \cdot (13,5 \text{ m} \cdot 25 \text{ m} + 78,2 \text{ m} \cdot 25 \text{ m} + 13,5 \text{ m} \cdot 78,2 \text{ m}) = 6.696 \text{ m}^2$$

8.3.2.3. Charakteristische Länge

Die charakteristische Länge ist ein Maß für die Kompaktheit eines Baukörpers. Sie berechnet sich nach $l_{\text{c}} = V_{\text{B}} / A_{\text{B}}$. Für die übergeordnete Raumstruktur ergibt sich die folgende charakteristische Länge:

$$\text{Für das Basismodell GGG: } l_{\text{c}} = 5,70 \text{ m}.$$

$$\text{Für das Basismodell GWG: } l_{\text{c}} = 3,94 \text{ m}.$$

8.3.2.4. Beheizte Bruttogrundfläche

Die beheizte Bruttogrundfläche ergibt sich aus der Geschossfläche mal der Anzahl der Geschosse.

Für das Basismodell GGG ergibt sich unabhängig von seiner Breite die BGF der übergeordneten Raumstruktur zu $78,2 \cdot 28,50 \cdot 10 = 22.287 \text{ m}^2$.

Für das Basismodell GGG ergibt sich unabhängig von seiner Breite die BGF der übergeordneten Raumstruktur zu $78,2 \cdot 13,50 \cdot 10 = 10.557 \text{ m}^2$.

8.3.2.5. Wärmeschutzstandard des Basismodells

Analog der Vorgehensweise bei der Definition der Abmessungen werden auch die wärmeschutztechnischen Qualitäten des Basismodells basierend auf den konkreten normativen und baurechtlichen Vorgaben im Sinne der zulässigen Extremwerte festgelegt. Berücksichtigt werden dabei die Bestimmungen der Wiener Bauordnung und der OENORM B 8110 – Wärmeschutz im Hochbau.

8.3.2.5.1. Anforderungen der Wiener Bauordnung

8.3.2.5.1.1. Höchstzulässige U-Werte

Die Mindestanforderungen an die Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) beheizter Räume werden im X. Abschnitt der Bauordnung für Wien: „Vorschriften, die hauptsächlich die Konstruktion betreffen“, Unterabschnitt "Baulicher Wärmeschutz" festgelegt:

"§ 97a. (6) Unbeschadet des Abs. 5 dürfen bei beheizten Räumen folgende Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) nicht überschritten werden:

1. Außenwände, Feuermauern und erdberührte Wände: $U = 0,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$;
2. Fenster, Dachgauben, Außentüren und dergleichen: $U = 1,9 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$;
3. Trennwände: $U = 0,9 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$;
4. Trennwände zwischen Wohnungen, Aufenthaltsräumen, Badezimmern und Aborten in Dachgeschossen einerseits und dem übrigen Dachgeschoss andererseits: $U = 0,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$;
5. Decken gegen Kellerräume, Geschäftsräume, Verkaufsräume und Räume mit ähnlicher Funktion, Lagerräume, Garagen und dergleichen sowie erdberührte Fußböden: $U = 0,45 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$;
6. Decken gegen Außenluft, Ein- und Ausfahrten beziehungsweise Durchfahrten sowie Decken des obersten Geschosses: $U = 0,25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$;
7. Sonstige Geschossdecken, ausgenommen solche innerhalb von Wohnungen oder Betriebseinheiten: $U = 0,9 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$;
8. Abschlüsse von Deckenöffnungen in der obersten Decke, wie Lichtkuppeln und dergleichen: $U = 2,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.¹⁰⁴⁰

¹⁰⁴⁰ Bauordnung für Wien, 2007, aus dem Internet: <http://www.wien.gv.at/recht/landesrecht-wien/rechtvorschriften/html/b0200000.htm> (04.07.2007)

Im gegenständlichen Basismodell sind demnach folgende U-Werte einzuhalten:

- > Wand direkt gegen außen $U = 0,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})^{1041}$
- > Trennwand gegen Laubengang $U = 0,9 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
- > Fenster gegen außen sowie gegen Laubengang $U = 1,9 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})^{1042}$

8.3.2.5.1.2. Höchstzulässiger spezifischer Transmissions-Wärmeverlust

Die Wiener Bauordnung legt in ihrem X. Abschnitt: „Vorschriften, die hauptsächlich die Konstruktion betreffen“, Unterabschnitt "Baulicher Wärmeschutz" für Neubauten mit Wohnnutzung höchstzulässige Werte des spezifischen Transmissions-Wärmeverlustes fest:

"§ 97a. (1) Neubauten mit Wohnungen oder sonstigen Aufenthaltsräumen müssen einen baulichen Wärmeschutz aufweisen, der der festgelegten höchstzulässigen energetischen Kennzahl „spezifischer Transmissions-Wärmeverlust“ entspricht; bei Zubauten, Umbauten und baulichen Änderungen genügt die Einhaltung des Abs. 6.

(2) Der spezifische Transmissions-Wärmeverlust $\text{W}/(\text{m}^3\text{K})$ ist der rechnerische Wärmeleistungsbedarf in Watt je Kubikmeter des beheizten Volumens und je Kelvin Temperaturdifferenz zwischen der Außentemperatur und der Raumtemperatur.

(3) Mit den Anforderungsklassen wird der unterschiedlichen Begrenzung der Anforderungen nach dem beheizten Volumen Rechnung getragen. Das beheizte Volumen V_B in m^3 ist die Summe der Brutto-Rauminhalte aller beheizten Räume des Gebäudes. Beheizte Räume sind alle Räume von Wohnungen sowie sonstige Aufenthaltsräume. Verkaufsräume, Gaststätten und Räume mit ähnlicher Funktion müssen in die Summe der Brutto-Rauminhalte aller beheizten Räume des Gebäudes nicht eingerechnet werden.

(4) Es gibt folgende Anforderungsklassen: A: beheiztes Volumen $\leq 500 \text{ m}^3$;
B: beheiztes Volumen $\leq 1.000 \text{ m}^3$; C: beheiztes Volumen $\leq 1.500 \text{ m}^3$;
D: beheiztes Volumen $\leq 2.200 \text{ m}^3$; E: beheiztes Volumen $\leq 3.000 \text{ m}^3$;
F: beheiztes Volumen $\leq 4.500 \text{ m}^3$; G: beheiztes Volumen $\leq 6.000 \text{ m}^3$;
H: beheiztes Volumen $\leq 8.000 \text{ m}^3$; I: beheiztes Volumen $> 8.000 \text{ m}^3$.

¹⁰⁴¹ Die Festlegung des U-Wertes der AW erfolgt nur der Vollständigkeit halber. Aufgrund der Annahme der Vollverglasung definitionsgemäß im Basismodell keine opaken Außenwände.

¹⁰⁴² Eine diesbezügliche Anfrage bei Dr. Irmgard Eder, MA37, vom 15.08.07 zeigte Interpretationsspielraum auf hinsichtlich der Frage, ob von allen Elementen in Trennwänden, mit Ausnahme von Wohnungseingangstüren, der U-Wert von $0,9 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ einzuhalten sei. Diese Interpretation würde nach sich ziehen, dass Fenster gegen einen Laubengang ebenfalls $U = 0,9 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ unterschreiten müssten, also einen höheren Wärmeschutz als Fenster gegen außen aufweisen müssten. Nachdem das ein Paradoxon darstellen würde und nachdem diese Interpretation aus der Bauordnung nicht abzulesen ist, wurde auch gegen den Laubengang an der Mindestanforderung für Fenster von $U = 1,9 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ festgehalten.

(5) Der spezifische Transmissions-Wärmeverlust darf bei Gebäuden der Anforderungsklasse A den Wert von $0,36 \text{ W}/(\text{m}^3\text{K})$, B den Wert von $0,34 \text{ W}/(\text{m}^3\text{K})$, C den Wert von $0,32 \text{ W}/(\text{m}^3\text{K})$, D den Wert von $0,30 \text{ W}/(\text{m}^3\text{K})$, E den Wert von $0,28 \text{ W}/(\text{m}^3\text{K})$, F den Wert von $0,26 \text{ W}/(\text{m}^3\text{K})$, G den Wert von $0,24 \text{ W}/(\text{m}^3\text{K})$, H den Wert von $0,22 \text{ W}/(\text{m}^3\text{K})$ und I den Wert von $0,20 \text{ W}/(\text{m}^3\text{K})$ nicht überschreiten. Zwischenwerte sind durch lineare Interpolation einzuschalten.
(...)

(7) Bei Glasvorbauten darf bei der Ermittlung des spezifischen Transmissions-Wärmeverlustes der Wärmedurchgangskoeffizient der angrenzenden Bauteile des Gebäudes mit seinem halben Wert in Rechnung gestellt werden. Glasvorbauten (wie Wintergärten und Innenhöfe mit Glasüberdachung) sind geschlossene, nicht unmittelbar beheizte Räume unter konstruktiver Durchbildung nach den Erfahrungen der technischen Wissenschaften."¹⁰⁴³

Im gegenständlichen Fall ist als das beheizte Gebäudevolumen im Sinne der Bauordnung jenes der übergeordneten Raumstruktur heranzuziehen. Im Basismodell GGG beträgt dieses 55.718 m^3 . Im Basismodell GWG beträgt es 26.393 m^3 .

In Anwendung der Wiener Bauordnung, Baulicher Wärmeschutz, § 97a sind somit beide Varianten des Basismodells der Anforderungsklasse I, $V_B > 8.000 \text{ m}^3$, zuzuordnen. Der höchstzulässige spezifische Transmissions-Wärmeverlust beträgt demnach $0,20 \text{ W}/(\text{m}^3\text{K})$. Die Berechnung des spezifischen Transmissions-Wärmeverlustes ergibt, dass für beide definierten übergeordneten Raumstrukturen der höchstzulässige spezifische Transmissions-Wärmeverlust bei Verwendung der mindest erforderlichen U-Werte eingehalten wird. Die diesbezüglichen Berechnungen sind im Anhang, Kapitel 16 dokumentiert. Die Berechnungsergebnisse sind in der nachfolgenden Zusammenfassung übersichtlich dargestellt.

8.3.2.5.2. Anforderungen der ÖNORM B 8110-1

In der ÖNORM B 8110-1 sind für den Neubau von Wohngebäuden Anforderungen an den Heizwärmebedarf sowie Anforderungen an den U-Wert wärmeübertragender Bauteile festgeschrieben.¹⁰⁴⁴

8.3.2.5.2.1. Höchstzulässige U-Werte

Die höchstzulässigen Wärmedurchgangskoeffizienten, gültig für Neubau und umfassende Sanierung, sowie gültig für Wohngebäude ebenso wie für Nicht-Wohngebäude, sind in der bereits genannten ÖNORM B 8110-1, Tabelle 6 wie folgt festgeschrieben.

¹⁰⁴³ Bauordnung für Wien, 2007, aus dem Internet: <http://www.wien.gv.at/recht/landesrecht-wien/rechtsvorschriften/html/b0200000.htm> (04.07.2007)

¹⁰⁴⁴ ÖNORM B 8110-1 (2007)

Wände gegen Außenluft	U = 0,35 W/(m ² K)
Innendecken gegen unbeheizte Gebäudeteile	U = 0,40 W/(m ² K)
Wände gegen unbeheizte, frostfrei zu haltende Gebäudeteile	U = 0,60 W/(m ² K)
Fenster gegen (...) unbeheizte Gebäudeteile	U = 2,50 W/(m ² K)
Fenster (...) in Wohngebäuden gegen Außenluft	U = 1,40 W/(m ² K)

Tabelle 28: Liste der höchstzulässigen Wärmedurchgangskoeffizienten laut ÖMORM B 8110-1

Nachdem bei einem geschlossenen Laubengang normalerweise Frostfreiheit nicht vorliegt, sind die Bestimmungen für Bauteile gegen Außenluft anzuwenden, ist also für die Wand gegen den Laubengang der U-Wert von 0,35 W/(m²K) einzuhalten und für Fenster gegen den Laubengang ein U-Wert von 1,4 W/(m²K).

Für die Verglasung vom Laubengang gegen außen ist in der ÖNORM B 8110-1 keine Anforderung festgelegt.

8.3.2.5.2.2. Höchstzulässiger Heizwärmebedarf

In der ÖNORM B 8110-1, Kapitel 7.2.1., Anforderungen an den Heizwärmebedarf für den Neubau sind die Anforderung an den Heizwärmebedarf ($HWB_{BGF,WG,Ref}$) für das Referenzklima festgeschrieben, definiert als die Wärmemenge, die den konditionierten Räumen zugeführt werden muss, um deren vorgegebene Solltemperatur einzuhalten.¹⁰⁴⁵

Einzuhalten ist demnach:

$$HWB_{BGF,WG,Ref} = 26 \times (1+2/lc)$$

$$\text{mit } HWB_{BGF,WG,Ref,max} = 78,0 \text{ kWh}/(m^2a)$$

Formel 31: Anforderung an den Heizwärmebedarf ($HWB_{BGF,WG,Ref}$) laut ÖNORM B 8110-1

Im gegenständlichen Fall ist die charakteristische Länge der übergeordneten Raumstruktur heranzuziehen. Sie beträgt für das Basismodell GGG 5,7 m und für das Basismodell GWG 3,94 m.

Die Anforderung an den höchstzulässigen Heizwärmebedarf lautet demnach

> für das Basismodell GGG: $HWB_{BGF,WG,Ref} = 26 \times (1+2/5,70) = 35,1 \text{ kWh}/m^2$.

> für das Basismodell GWG: $HWB_{BGF,WG,Ref} = 26 \times (1+2/3,94) = 39,2 \text{ kWh}/m^2$.

Auch hier ergibt die Berechnung, dass für beide definierten übergeordneten Raumstrukturen der höchstzulässige spezifische Heizwärmebedarf bei Verwendung der mindest erforderlichen U-Werte bei Weitem eingehalten wird. Die diesbezüglichen Berechnungen sind im Anhang, Kapitel 16 dokumentiert. Die Berechnungsergebnisse sind in der nachfolgenden Zusammenfassung übersichtlich dargestellt.

¹⁰⁴⁵ ÖNORM B 8110-1 (2007)

8.3.2.6. Strahlungsdurchgang durch transparente Bauteile

Als Teilbereich des baulichen Wärmeschutzes sind für das Basismodell auch die Kennwerte des Strahlungsdurchgangs transparenter Bauteile festzulegen.

Diese werden abgeleitet aus der Festlegung der höchstzulässigen U-Werte unter Heranziehung gegenwärtig am Markt verfügbaren Glasqualitäten und unter begleitender Modellierung dieser Glasqualitäten mit der bauphysikalischen Software Calumen¹⁰⁴⁶.

Wärmebrückeneffekte aufgrund des Glasrandverbundes sowie aufgrund von Glashalterungen werden in einem gegenüber U_w um $0,2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ verringertem U_g berücksichtigt. Opake Rahmenteile werden im Einklang mit der archetypischen Definition des Basismodells idealisiert gleich null gesetzt.

Verglasung der Wohnung gegen außen und gegen den Laubengang

Ausgehend von $U_w = 1,4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ gemäß Anforderung der ÖNORM B 8110-1 werden folgende strahlungs- und wärmetechnische technische Kennwerte abgeleitet:

$U_w = 1,4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$	bei Annahme eines Zweischeiben-Verbundsicherheitsglases
$U_g = 1,2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$	abgeleitet aus einem angenommenen Wärmebrückenbeitrag von $0,2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
$g = 0,62$	abgeleitet aus Produktdaten und Modellrechnungen
$T_L = 0,80$	abgeleitet aus Produktdaten und Modellrechnungen

Verglasung des Laubengangs gegen außen

Für die Verglasung des Laubengangs gegen außen besteht keine wärmeschutztechnische Anforderung. Es wurde daher unter Abbildung der Baupraxis von einer Zweischeiben-Verbundsicherheitsverglasung ausgegangen. Wärmebrückeneffekte treten angesichts des hohen Glas-U-Wertes in den Hintergrund und werden daher vernachlässigt.

$U_w = 5,6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$	bei Annahme eines Zweischeiben-Verbundsicherheitsglases
$U_g = 5,6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$	
$g = 0,84$	abgeleitet aus Produktdaten und Modellrechnungen
$T_L = 0,90$	abgeleitet aus Produktdaten und Modellrechnungen

8.3.3. Zusammenfassung Modelldefinition

Für die weiteren Untersuchungen werden demnach zwei Basismodelle eingeführt und hinsichtlich ihrer Geometrie und hinsichtlich des Wärmeschutzniveaus der Hüllbauteile definiert. Dem zugeordnet werden auch zwei übergeordnete Raumstrukturen definiert. Die Festlegungen orientieren sich sämtlich an dem Prinzip, vor dem realen rechtlichen Hintergrund der Wiener Bauordnung und der relevanten Normen die Grenzen des gerade noch zulässig Baubaren abzubilden.

¹⁰⁴⁶ Calumen 2.3.1; National Instruments Corporation 2007; Saint-Gobain Glass Deutschland; Software zur Berechnung der Leistungen von Verglasungen im Bereich Lichttechnik, Energie und optische Eigenschaften; Zertifiziert gemäß DIN EN 410 und DIN EN 673 von Fraunhofer Institut Deutschland

Nachfolgend sind sämtliche Spezifikationen der beiden Basismodelle und der übergeordneten Raumstrukturen zusammenfassend dargestellt. Erläuterungen zu den vorgenommenen wärmetechnischen Berechnungen finden sich darüber hinaus auch im Anhang, Kapitel 16.

8.3.3.1. Geometrie

Aus den vorgenommenen geometrischen Festlegungen ergeben sich vier unterschiedliche Basismodelle:

Erstens gebildet aus den beiden Ausformungen des Basismodells, mit einmal beidseitiger Vollverglasung der Wohnung, demnach auch gegen den Laubengang, sowie einmal mit opaker Begrenzungswand der Wohnung gegen den Laubengang. Die erste Ausformung wird mit dem Kürzel GGG (Glas-Glas-Glas) gekennzeichnet, die zweite mit dem Kürzel GWG (Glas-Wand-Glas).

Zweitens gebildet aus der unterschiedlichen Wohnungsbreite von einmal 4,60 m und einmal 2,30 m. Die erste Variante wird mit dem Kürzel B460 gekennzeichnet, die zweite mit dem Kürzel B230.

Zur eindeutigen Kennzeichnung der vorliegenden und auch späteren Varianten der Basismodelle wird eindeutige und einheitliche Kennzeichnung anhand von „Typen“ der Basismodelle und ihrer Weiterentwicklungen eingeführt. So werden die vier vorliegenden Basismodelle anhand dieser Nomenklatur wie folgt bezeichnet:

T_GGG_B460_T2850	Typ des Basismodells in der Ausformung mit Glaswand gegen Laubengang, mit Breite der Wohnung von 4,6 m und mit der Tiefe der Wohnung von 28,5 m
T_GGG_B230_T2850	Typ des Basismodells in der Ausformung mit Glaswand gegen Laubengang, mit Breite der Wohnung von 2,3 m und mit der Tiefe der Wohnung von 28,5 m
T_GWG_B460_T1350	Typ des Basismodells in der Ausformung mit opaker Wand gegen Laubengang, mit Breite der Wohnung von 4,6 m und mit der Tiefe der Wohnung von 13,5 m
T_GWG_B230_T1350	Typ des Basismodells in der Ausformung mit opaker Wand gegen Laubengang, mit Breite der Wohnung von 2,3 m und mit der Tiefe der Wohnung von 13,5 m

In der weiteren Bearbeitung wird auch noch das Kürzel für die Orientierung der Laubengangfassade in die Bezeichnung des jeweiligen Typs mit aufgenommen.

Zusammenfassend stellt sich die Geometrie der vier Typen des Basismodells (Tabelle 29) und der jeweils entsprechenden übergeordneten Raumstruktur (Tabelle 30) wie folgt dar:

	GGG_B460_T2850	GGG_B230_T2850	GWG_B460_T1350	GWG_B230_T1350
Tiefe	29,7 m	29,7 m	14,7 m	14,7 m
Teiltiefe Wohnung	28,5 m	28,5 m	13,5 m	13,5 m
Teiltiefe Laubengang	1,2 m	1,2 m	1,2 m	1,2 m
Breite	4,6 m	4,6 m	2,3 m	2,3 m
Höhe	2,5 m	2,5 m	2,5 m	2,5 m

Tabelle 29: Geometrie der Basismodelle

	GGG_B460_T2850	GGG_B230_T2850	GWG_B460_T1350	GWG_B230_T1350
Tiefe	29,7 m	29,7 m	14,7 m	14,7 m
Teiltiefe Wohnung	28,5 m	28,5 m	13,5 m	13,5 m
Teiltiefe Laubengang	1,2 m	1,2 m	1,2 m	1,2 m
Breite	78,2 m	78,2 m	78,2 m	78,2 m
Höhe	25 m	25 m	25 m	25 m
Beheiztes Volumen	55.718 m ³	55.718 m ³	26.393 m ³	26.393 m ³
Fläche der Gebäudehülle	9.792 m ²	9.792 m ²	6.696 m ²	6.696 m ²
Charakteristische Länge	5,70 m	5,70 m	3,94 m	3,94 m
beheizte Bruttogrundfläche	22.287 m ²	22.287 m ²	10.557 m ²	10.557 m ²

Tabelle 30: Geometrie der übergeordneten Raumstrukturen

8.3.3.2. Bauphysik

Der Wärmeschutz der Bauteile und der Strahlungstransmissionsgrad der Fenster wurde, wieder nach den Prinzipien der konstruktivistischen Theorie, als das gerade noch Zulässige im Sinne der Wiener Bauordnung und der relevanten ÖNORM B 8110-1 festgelegt.¹⁰⁴⁷

¹⁰⁴⁷ ÖNORM B 8110-1 (2007)

Es ergeben sich die folgenden Werte der Wärmedurchgangskoeffizienten der Hüllbauteile (Tabelle 31) und der Gesamtenergiedurchlassgrade der Verglasungen (Tabelle 32):

	GGG_B460_T2850	GGG_B230_T2850	GWG_B460_T1350	GWG_B230_T1350
Wand geg. außen	0,35 W/(m ² K)	0,35 W/(m ² K)	0,35 W/(m ² K)	0,35 W/(m ² K)
Wand geg. Laubengang	0,35 W/(m ² K)	0,35 W/(m ² K)	0,35 W/(m ² K)	0,35 W/(m ² K)
Decke geg. Keller	0,40 W/(m ² K)	0,40 W/(m ² K)	0,40 W/(m ² K)	0,40 W/(m ² K)
Dach	0,20 W/(m ² K)	0,20 W/(m ² K)	0,20 W/(m ² K)	0,20 W/(m ² K)
Fenster geg. außen	1,40 W/(m ² K)	1,40 W/(m ² K)	1,40 W/(m ² K)	1,40 W/(m ² K)
Fenster geg. Laubeng.	1,40 W/(m ² K)	1,40 W/(m ² K)	1,40 W/(m ² K)	1,40 W/(m ² K)
Glas Laubeng. g. außen	5,6 W/(m ² K)	5,6 W/(m ² K)	5,6 W/(m ² K)	5,6 W/(m ² K)

Tabelle 31: U-Werte der Hüllbauteile der Basismodelle und der übergeordneten Raumstrukturen

	GGG_B460_T2850	GGG_B230_T2850	GWG_B460_T1350	GWG_B230_T1350
Verglasung Wohnung gegen außen	0,62	0,62	0,62	0,62
Verglasung Wohnung gegen Laubengang	0,62	0,62	0,62	0,62
Verglasung Laubengang gegen außen	0,84	0,84	0,84	0,84

Tabelle 32: Gesamtenergiedurchlassgrade der Verglasungen

8.4. Voruntersuchung und Verkürzung des Basismodells

8.4.1. Herangehensweise

Die vier Raumtypen der Basismodelle werden in Kapitel 8.3. in ihrer Geometrie und ihren grundlegenden Bauteildefinitionen so definiert, dass die Anforderungen des Wiener Baurechts und der österreichischen bautechnischen Normung gerade noch eingehalten wurden.

Dabei erweisen sich die Anforderungen des Wiener Baurechts hinsichtlich der Sicherstellung auch nur einigermaßen ausreichender Tageslichtversorgung in Verbindung mit dem verwendeten Raummodell als völlig unzureichend. Es werden daher in einem weiteren Schritt die Anforderungen der DIN 5034-1 auf die Basismodelle angewandt, in der Mindestanforderungen an den Tageslichtquotienten (D) auf die horizontale Messebene in 85 cm Höhe definiert sind.¹⁰⁴⁸

Es zeigt sich, dass mit den gewählten, extremen Raumtiefen von 28,5 und 13,5 die Anforderungen der DIN 5034-1 bei weitem unterschritten werden, woraufhin der jeweilige Raumtyp soweit in seiner Tiefe reduziert wird, bis der mindest erforderliche Tageslichtquotient gerade eingehalten wird.

Mit der Verkürzung der Basismodelle ändert sich auch die Geometrie der übergeordneten Raumstrukturen, mit ihr die Anforderungen an den Wärmeschutz und auch die Größe der relevanten Kennzahlen. Es wird daher anschließend an die Verkürzung der Basismodelle auch eine Überprüfung der Definition und gegebenenfalls eine Neudefinition des Wärmeschutzes vorgenommen. Die solcherart definierten neuen Raumtypen werden als „verkürzte Basismodelle bezeichnet“ und sind Gegenstand der detaillierten Untersuchungen der orientierungsabhängigen Potentiale in Kapitel 8.5.

8.4.2. Anforderungen an den Tageslichtquotienten

Der Tageslichtquotient¹⁰⁴⁹ ist definiert als das Verhältnis zwischen der Beleuchtungsstärke auf einen bestimmten Punkt einer horizontalen Ebene im Innenraum zu der Beleuchtungsstärke auf eine ebenfalls horizontale, unverschattete Ebene im Außenraum unter standardisierten außenräumlichen Strahlungsbedingungen, definiert als der bedeckte Himmel nach CIE.¹⁰⁵⁰

Der Tageslichtquotient wird demnach unter Ausklammerung direkten Sonnenlichts bestimmt, womit er nicht sensibel für Orientierungen transparenter Flächen und somit als entwurfsrelevante Größe in der Solararchitektur unbrauchbar, ist. Trotz dieses systematischen Mangels ist der Tageslichtquotient eine häufig eingesetzte Kennzahl zur Beschreibung der Tageslichtqualität von Innenräumen und wird, etwa in der DIN 5034-1 als bestimmende Größe zur Formulierung von Mindestanforderungen an die Tageslichtversorgung von Innenräumen herangezogen.

¹⁰⁴⁸ DIN 5034-1 (1999)

¹⁰⁴⁹ Englische Bezeichnung: Daylight Factor

¹⁰⁵⁰ CIE - Commission Internationale d'Eclairage; Internationale Beleuchtungskommission konstituiert 1931. Die CIE arbeitet an der internationalen Standardisierung und Normierung von Lichttechnischen relevanten Größen.

Es gilt dort:

„Die Helligkeit in Wohnräumen, die von dem durch die Fenster eindringenden Tageslicht erzeugt wird, ist im Rahmen ihrer psychischen Bedeutung ausreichend, wenn der Tageslichtquotient (...) auf einer horizontalen Bezugsebene, gemessen in einer Höhe von 0,85 m über dem Fußboden in halber Raumtiefe und in 1 m Abstand von den beiden Seitenwänden im Mittel wenigstens 0,9% und am ungünstigsten dieser Punkte wenigstens 0,75% beträgt.“¹⁰⁵¹

In Anwendung dieser Bestimmungen auf die Basismodelle wird demnach festgelegt: Für die beidseitig belichteten Typen GGG ist an jeder Stelle der fassadennormalen Mittelachse des Raumes ein Tageslichtquotient von 0,9 einzuhalten. Für die einseitig belichteten Typen GWG ist auf ebenfalls dieser Mittelachse in halber Raumtiefe ein Tageslichtquotient von 0,9 einzuhalten.

8.4.3. Berechnung des Tageslichtquotienten

Die Berechnung der Verteilung des Tageslichtquotienten in den originären Basismodellen und die Berechnungen zur Verkürzung der Modelle sind nachfolgend in geraffter Form dokumentiert. Für eine detaillierte Dokumentation der diesbezüglichen Berechnungen siehe im Anhang, Kapitel 12

8.4.3.1. Berechnungsmethode- und Werkzeug

Für die Bestimmung des Tageslichtquotienten wird das Mittel der Tageslichtsimulation angewandt. Zum Einsatz kommt das Softwarepaket RELUX, ein gut validiertes bauphysikalisches Planungstool auf der Basis des Radiocity-Verfahrens.^{1052,1053}

Berechnet wird die Verteilung des Tageslichtquotienten auf einer Ebene in der Höhe von 0,85 m. Nachdem der Tageslichtquotient per Definitionen die Einflüsse direkten Sonnenlichts ausklammert, erübrigt sich eine Untersuchung unterschiedlicher Gebäudeorientierungen.

¹⁰⁵¹ DIN 5034-1 (1999)

¹⁰⁵² Mit dem Begriff Radiocity-Verfahren werden jene Lichtberechnungen zusammengefasst, die von einer rein diffusen Reflexion der Raumboflächen ausgehen. Sie zeichnen sich bei guter Rechengenauigkeit durch kurze Rechenzeiten bei vertretbarem Eingabeaufwand aus. Einsatzgrenzen ergeben sich aus der systematischen Unmöglichkeit, Effekte der spiegelnden Lichtlenkung abzubilden.

¹⁰⁵³ RELUX Professional Version 2007-7.1, RELUX Informatik AG 1998-2007, Basel, Bezugsquelle aus dem Internet <http://www.relux.ch> (21.07.2008)

8.4.3.2. Geometrische Modellbildung

Es werden die Variationen des Basismodells gemäß der Definition aus Kapitel 8.3 als dreidimensionales Modell im genannten Programm zur Tageslichtberechnung abgebildet. Es sind das die folgenden Typen:

T_GGG_B460_T2850	Typ des Basismodells in der Ausformung mit Glaswand gegen Laubengang, mit Breite der Wohnung von 4,6 m und mit der Tiefe der Wohnung von 28,5 m
T_GGG_B230_T2850	Typ des Basismodells in der Ausformung mit Glaswand gegen Laubengang, mit Breite der Wohnung von 2,3 m und mit der Tiefe der Wohnung von 28,5 m
T_GWG_B460_T1350	Typ des Basismodells in der Ausformung mit opaker Wand gegen Laubengang, mit Breite der Wohnung von 4,6 m und mit der Tiefe der Wohnung von 13,5 m
T_GWG_B230_T1350	Typ des Basismodells in der Ausformung mit opaker Wand gegen Laubengang, mit Breite der Wohnung von 2,3 m und mit der Tiefe der Wohnung von 13,5 m

8.4.3.3. Physikalische Modellbildung

8.4.3.3.1. Lichttransmissionsgrad

Der nominelle Lichttransmissionsgrad der transparenten Flächen wurde bereits in Kapitel 8.3. festgelegt. Es gilt:

Verglasung der Wohnung gegen außen	$T_L = 0,80$
Verglasung der Wohnung gegen den Laubengang	$T_L = 0,80$
Verglasung des Laubengangs gegen außen	$T_L = 0,90$

Zusätzlich wurde in Einklang mit OENORM B-8110-6 für nichtnormalen Strahlungseinfall ein Abminderungsfaktor $f_1 = 0,9$ auf den Lichttransmissionsgrad berücksichtigt. Abminderungsfaktoren für den Rahmenanteil und die Scheibenverschmutzung werden dem konstruktivistischen Forschungsansatz entsprechend nicht verwendet.¹⁰⁵⁴

¹⁰⁵⁴ ÖNORM B 8110-6 (2007)

8.4.3.3.2. Reflexionsgrad der opaken Flächen

Nichttransparente Flächen werden, als Eigenschaft des Radiocity-Verfahrens der Lichtberechnung als vollständig diffus reflektierend abgebildet. Die Reflexionsgrade werden im Einklang mit DIN 5034-4 mit folgenden Werten berücksichtigt:¹⁰⁵⁵

Boden	0,20
Wand	0,60
Decke	0,70
Oberflächen des Laubengangs	0,25

8.4.3.4. Berechnungsergebnisse

Die Berechnungen bestätigen eine völlig unzureichende Tageslichtsituation in den originären Basismodellen. Über weite Teile der Wohnungen sinkt der Tageslichtquotient auf das Maß von 0,1 ab. Siehe die folgende tabellarische Zusammenstellung (Tabelle 33) der Berechnungsergebnisse.

Variante	D _{max}	D _{min}	D _{Raummitte}	D _{mittel}
T_GGG_B460_T2850	14,4	0,1	0,1	1,5
T_GGG_B230_T2850	12,3	0,1	0,1	1,1
T_GWG_B460_T1350	16,3	0,1	0,5	2,2
T_GWG_B230_T1350	14,2	0,1	0,3	1,6

Tabelle 33: Ergebnisse der Tageslichtquotientenberechnung an den Basismodellen

Es werden daher die Raumtiefen spezifisch für jeden Typ des Basismodells reduziert auf gerade jenes Maß, bei dem der Tageslichtquotient in der Raummitte nicht unter den Wert von 0,9 sinkt. Es ergeben sich daraus erhebliche Verkürzungen der GGG Typen und moderate Verkürzungen der GWG Typen. Diese Ungleichheit ist paradox, da ja die einseitig belichteten GWG Typen schlechter mit Tageslicht versorgt sind als die beidseitig belichteten GGG Typen. Die Erklärung dafür liegt in der Formulierung der Anforderungen nach DIN 5034-1, die sich stets auf die halbe Raumtiefe beziehen, was den einseitig belichteten Raum dem doppelseitig belichteten nahezu gleichstellt.¹⁰⁵⁶

¹⁰⁵⁵ DIN 5034-4 (1994)

¹⁰⁵⁶ DIN 5034-1 (1999)

Nachfolgende Tabelle (Tabelle 34) fasst die Berechnungsergebnisse des Tageslichtquotienten für die bereits verkürzten Basismodelle zusammen.

Variante	D_{max}	D_{min}	D_{Raummitte}	D_{mittel}
T_GGG_B460_T1400	15,3	0,8	0,9	3,0
T_GGG_B230_T1100	13,7	0,9	0,9	2,9
T_GWG_B460_T1150	15,6	0,2	0,9	2,5
T_GWG_B230_T900	13,6	0,2	0,9	2,4

Tabelle 34: Ergebnisse der Tageslichtquotientenberechnung an den verkürzten Basismodellen

Es ergibt sich demnach die Notwendigkeit zu den folgenden Verkürzungen der vier originären Basismodelle:

- > Das Basismodell T_GGG_B460, also jenes mit doppelseitiger Vollverglasung in der breiten Variante von 4,60 m, muss von vorher 28,5 m Wohnungstiefe auf nunmehr 14 m verkürzt werden.
- > Das Basismodell T_GGG_B230, also jenes mit doppelseitiger Vollverglasung in der schmalen Variante von 2,30 m, muss von vorher 28,5 m Wohnungstiefe auf nunmehr 11 m verkürzt werden.
- > Das Basismodell T_GWG_B460, also jenes mit Vollverglasung gegen außen, aber mit Wand gegen den Laubengang in der breiten Variante von 4,60 m, muss von vorher 13,5 m Wohnungstiefe auf nunmehr 11,5 m verkürzt werden.
- > Das Basismodell T_GWG_B230, also jenes mit Vollverglasung gegen außen, aber mit Wand gegen den Laubengang in der breiten Variante von 2,30 m, muss von vorher 13,5 m Wohnungstiefe auf nunmehr 9 m verkürzt werden.

Den Verlauf des Tageslichtquotienten in zweien der Basismodelle zeigen die folgenden perspektivischen Diagramme, beides Ausdrücke aus dem Tageslichtsimulationsprogramm RELUX:

Erstens der Verlauf des Tageslichtquotienten für das originäre Basismodell des Typs GGG_B460_T2850. Erkennbar die weiten Raumbereiche mit Tageslichtquotienten unter 1, dargestellt mit blauer Färbung (Diagramm 125).

Zweitens der Verlauf des Tageslichtquotienten des bereits verkürzten Basismodells T_GWG_B460_T1150. Die Farbstufen zeigen die Schwellwerte des Tageslichtquotienten von 0,5; 1,0; 2,0; 3,0; 5,0 an (Diagramm 126).¹⁰⁵⁷

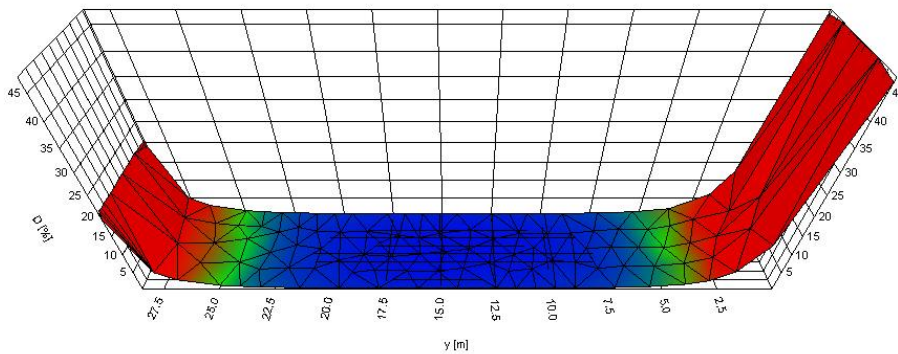


Diagramm 125: Verlauf des Tageslichtquotienten im Raumtyp T_GGG_B460_T2850

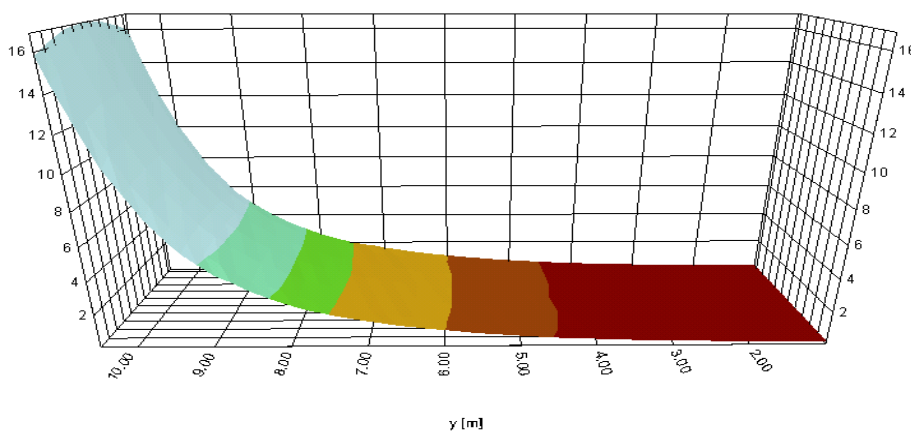


Diagramm 126: Verlauf des Tageslichtquotienten im Raumtyp T_GWG_B460_T1150

¹⁰⁵⁷ Diagramm 125 und Diagramm 126: Peter Holzer, Ergebnisdarstellung aus der Bearbeitung mit der Software RELUX

8.4.4. Geometrie der verkürzten Basismodelle

Es werden demnach die vier Typen der Basismodelle verkürzt und stellen sich nach dieser Verkürzung wie folgt dar (Tabelle 35):

	GGG_B460_T1400	GGG_B230_T1100	GWG_B460_T1150	GWG_B230_T900
Tiefe	15,2 m	12,2 m	12,7 m	10,2 m
Teiltiefe Wohnung	14,0 m	11,0 m	11,5 m	9,0 m
Teiltiefe Laubengang	1,2 m	1,2 m	1,2 m	1,2 m
Breite	4,6 m	4,6 m	2,3 m	2,3 m
Höhe	2,5 m	2,5 m	2,5 m	2,5 m

Tabelle 35: Geometrie der verkürzten Basismodelle

8.4.5. Geometrie der verkürzten übergeordneten Raumstruktur

Mit der Verkürzung der Basismodelle ändert sich auch die Geometrie der übergeordneten Raumstrukturen. Die neuen Geometriekennzahlen sind in der nachfolgenden Tabelle (Tabelle 36) zusammengefasst.

	GGG_B460_T1400	GGG_B230_T1100	GWG_B460_T1150	GWG_B230_T900
Tiefe	15,2 m	12,2 m	12,7 m	10,2 m
Teiltiefe Wohnung	14,0 m	11,0 m	11,5 m	9,0 m
Teiltiefe Laubengang	1,2 m	1,2 m	1,2 m	1,2 m
Breite	78,2 m	78,2 m	78,2 m	78,2 m
Höhe	25 m	25 m	25 m	25 m
Beheiztes Volumen	27.370 m ³	21.505 m ³	22.482 m ³	17.595 m ³
Fläche der Gebäudehülle	5.705 m ²	6.180 m ²	6.284 m ²	5.768 m ²
Charakteristische Länge	4,80 m	3,48 m	3,58 m	3,05 m
beheizte Bruttogrundfläche	10.948 m ²	8.602 m ²	8.993 m ²	7.038 m ²

Tabelle 36: Geometrie der verkürzten übergeordneten Raumstrukturen

8.4.6. Überprüfung und Anpassung des mindest erforderlichen Wärmeschutzes

Mit der Verkürzung der Basismodelle und der übergeordneten Raumstrukturen verändern sich auch die Grundlagen zur Erfüllung des mindest erforderlichen Wärmeschutzes. Es wird daher überprüft, ob die Annahme der gerade noch normgerechten U-Werte laut ÖNORM B 8110-1 auch für die verkürzten Raumstrukturen tatsächlich weiterhin alle diesbezüglichen Anforderungen der Wiener Bauordnung und der ÖNORM erfüllt.¹⁰⁵⁸¹⁰⁵⁹

Nachdem die Hintergründe der Anforderungen und Berechnungen bereits in Kapitel .3 ausreichend dargestellt sind, erübrigt sich an dieser Stelle eine weitere Erläuterung.

¹⁰⁵⁸ ÖNORM B 8110-1 (2007)

¹⁰⁵⁹ Bauordnung für Wien, 2007, aus dem Internet: <http://www.wien.gv.at/recht/landesrecht-wien/rechtvorschriften/html/b0200000.htm> (04.07.2007)

Die Berechnungen des spezifischen Transmissions-Leitwerts und des Heizwärmebedarfs der verkürzten Typen zeigen erwartungsgemäß, dass für die solcherart verkleinerten Baukörper mit den bislang angesetzten U-Werten die Anforderungen an den spezifischen Transmissions-Leitwert nicht mehr für alle Typen erfüllt werden.

Es werden demnach verbesserte U-Werte festgelegt. Wieder wird die Verbesserung derartig moderat ausgeführt, dass die Anforderungen gerade erfüllt werden. Hinsichtlich der Frage, in welcher Weise die theoretisch beliebige Verbesserung der einzelnen Bauteile relativ zueinander erfolgen soll, wird Weg einer baupraktisch realistischen Vorgehensweise gewählt.

Die Verbesserung der Außenwand erfolgte von $U = 0,35 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ auf $U = 0,30 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Die Verbesserung der Kellerdecke erfolgte von $U = 0,40 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ auf $U = 0,35 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Die Verbesserung der Fenster erfolgte von $U = 1,40 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ auf $U = 1,30 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, unter der Annahme verbesserten Abstandhalters und verbesserten Rahmens, aber unter Beibehaltung der Verglasung selbst mit $U_g = 1,2 \text{ W}/\text{m}^2/\text{K}$.¹⁰⁶⁰

Das Dach wurde nicht verbessert.

Alle Raumgeometrien erfüllen unter diesen Voraussetzungen die Anforderungen der Wiener Bauordnung und der ÖNORM B 8110-1.

8.4.7. Bauphysikalische Kennwerte der verkürzten Basismodelle

Es ergeben sich zusammengefasst für die verkürzten Basismodelle und übergeordneten Raumstrukturen die folgenden bauphysikalischen Kennwerte der Hüllbauteile. Diese Werte (Tabelle 37) werden im Folgenden für die detaillierten Analysen aus Kapitel 8.5 herangezogen.

	U-Wert [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$]	g-Wert [-]	T-Wert [-]
Wand gegen außen	0,30		
Wand gegen Laubengang	0,30		
Decke gegen Keller	0,35		
Dach	0,20		
Fenster gegen außen	1,30	0,62	0,80
Fenster gegen Laubengang	1,30	0,62	0,80
Glas Laubengang gegen außen	5,6	0,84	0,90

Tabelle 37: Bauphysikalische Kennwerte der Hüllbauteile der verkürzten Raumstrukturen

¹⁰⁶⁰ Die Geringfügigkeit dieser Verbesserung begründet sich vor dem Hintergrund, die grundsätzliche Typologie der Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung mit den zugeordneten Gesamtenergiedurchlassgrad und Lichttransmissionsgrad beibehalten zu können.

8.5. Detaillierte Untersuchung des Basismodells

8.5.1. Allgemeines

Ziel der detaillierten Untersuchung des verkürzten Basismodells ist die vergleichende Analyse von Qualitäten des sommerlichen wie winterlichen Wärmeschutzes sowie der Tageslichtqualität für unterschiedliche Orientierungen.

Dazu werden drei prinzipielle Potentiale definiert:

- > Tageslichtpotential
- > Passiv solares Gewinnpotential
- > Sommertauglichkeitspotential

Das verkürzte Basismodell wird am Klimastandort Wien in seiner Ausrichtung in 30°-Schritten gedreht. Für diese insgesamt zwölf Orientierungen werden die genannten drei Potentiale berechnet.

Die Rechenergebnisse werden vergleichend ausgewertet. Von Interesse ist dabei insbesondere, ob einzelne Orientierungen hinsichtlich der drei Potentiale Auffälligkeiten aufweisen, aus denen eine gestalterische Empfehlung oder ein technischer Optimierungsansatz abgeleitet werden kann.

Explizit hingewiesen wird darauf, dass es sich um einen konstruktivistischen Forschungsansatz mittels eines typologischen Gebäudemodells handelt. Die Ergebnisse sind daher im Vergleich zueinander sehr aussagekräftig. Sie dürfen aber in ihren absoluten Zahlenwerten keinesfalls unreflektiert auf reale Gebäudesituationen übertragen werden.

8.5.1.1. Tageslichtpotential

Unter dem Tageslichtpotential wird die Eignung des Basismodells in seiner spezifischen Orientierung verstanden, qualitätvolle Tagesbelichtung zur Verfügung zu stellen.

Eine entwurfrelevante Analyse der Tageslichtqualität eines Wohnraumes muss nach Ansicht der Autoren jedenfalls die Qualitäten unterschiedlicher Himmelsrichtungen abbilden und sollte darüber hinaus der medizinischen und gestalterischen Bedeutung direkten Tageslichts Rechnung tragen.

Der Tageslichtquotient mit seiner Ausklammerung direkten Sonnenlichts und seiner somit fehlenden Abbildung spezifischer tageslichttechnischer Qualitäten der unterschiedlichen Fassadenorientierungen scheidet als entwurfsrelevante Beurteilungsgröße aus.

Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen dieser Arbeit von den Autoren der Durchlichtungsfaktor als ein neuer Kennwert zur Bestimmung der Tageslichtqualität entwickelt und erstmals auf die Analyse des Basismodells angewandt. Der Durchlichtungsfaktor wird definiert als jener Anteil des Raumvolumens, der innerhalb eines Tages zumindest einmal von einem direkten Sonnenstrahl durchlichtet werden kann.¹⁰⁶¹

8.5.1.2. Passiv Solares Gewinnpotential

Unter dem Passiv Solaren Gewinnpotential wird die Eignung des Basismodells in seiner spezifischen Orientierung verstanden, passiv solare Wärmegewinne zur teilweisen Abdeckung seiner Wärmeverluste zu nutzen.

Als Maßzahl für diese Eignung wird der Heizwärmebedarf herangezogen. Wobei gilt: Je kleiner der Heizwärmebedarf, desto größer das passiv solare Gewinnpotential.

8.5.1.3. Sommertauglichkeitspotential

Unter dem Sommertauglichkeitspotential wird die Eignung des Basismodells in seiner spezifischen Orientierung verstanden, auch in sommerlichen Hitzeperioden moderate, behagliche Innenraumtemperaturen zur Verfügung zu stellen.

Als Maßzahl für diese Eignung wird der Kühlbedarf herangezogen, der sich ergibt, wenn der Raum konstant auf eine Lufttemperatur von 26°C gekühlt wird. Wieder gilt: Je kleiner der Kühlbedarf, desto größer das Sommertauglichkeitspotential.¹⁰⁶²

¹⁰⁶¹ Der Durchlichtungsfaktor [LPF = Light Penetration Factor] wird von den Autoren Renate Hammer und Peter Holzer an dieser Stelle neu und originär in die Literatur eingeführt und entsprechend definiert.

¹⁰⁶² An dieser Stelle ist nachdrücklich auf den Umstand hinzuweisen, dass per normativer Festlegung neu errichtete Wohngebäude in Österreich per se keinen Kühlbedarf haben dürfen. Dass dennoch der Kühlbedarf als Maßzahl für das Sommertauglichkeitspotential herangezogen wird, begründet sich wiederum vor dem Hintergrund der konstruktivistischen Herangehensweise, bei der eben die Potentiale ausgelotet und die Ergebnisse insbesondere aus dem Variantenvergleich herausgearbeitet werden.

8.5.2. Untersuchung des Tageslichtpotentials

8.5.2.1. Definition des Durchlichtungsfaktors [LPF]©¹⁰⁶³

Eine entwurfrelevante Analyse der Tageslichtqualität eines Wohnraumes muss nach Ansicht der Autoren jedenfalls die Qualitäten unterschiedlicher Himmelsrichtungen abbilden und sollte darüber hinaus der medizinischen und gestalterischen Bedeutung direkten Tageslichts Rechnung tragen.

Vor diesem Hintergrund wurde von den Autoren im Rahmen dieser Arbeit ein neuer Kennwert zur Bestimmung der Tageslichtqualität entwickelt und auf die Analyse des Basismodells angewandt.

Bezeichnet als Durchlichtungsfaktor [LPF - Light Penetration Factor]© wird er definiert als jener Anteil des Nettovolumens eines Raumes, der - unter der Voraussetzung eines wolkenlosen Himmels - innerhalb eines Tages zumindest einmal von einem direkten Sonnenstrahl durchlichtet wird.

In den Durchlichtungsfaktor fließen die Geometrie der Sonnenbahn am konkreten Standort und die Raumgeometrie mit der Position, Größe und Orientierung der transparenten Flächen ein.

Der Durchlichtungsanteil bildet das Potential eines Raumes ab, von direkter Sonnenstrahlung "durchlichtet" zu werden.

Vorbehaltlich weiterer Erprobungen bietet sich der Durchlichtungsfaktor als neue praktisch anwendbare Planungsgröße standortbezogener Solararchitektur an, die dem Tageslichtquotienten an entwurfsrelevanter Aussagekraft bei weitem überlegen ist.

8.5.2.2. Erweiterte Analyse des Durchlichtungsfaktors im Tagesverlauf

Der Durchlichtungsfaktor wurde von den Autoren als Kennzahl zur Beschreibung einer räumlichen Qualität definiert, mit ihrer Aussagekraft für eine konkrete räumliche Situation einen konkreten Ort und einen konkreten Tag des Jahres. In Vorstudien zur gegenständlichen Arbeit hat es sich gezeigt, dass auch die Analyse des Durchlichtungsfaktors im Zeitverlauf über einen Tag aufschlussreiche Informationen verspricht.

Es wird daher die Untersuchung des Tageslichtpotentials ausgeweitet um Ermittlung und geeignete Darstellung des Verlaufs des stündlichen Momentanwerts des Durchlichtungsfaktors, als somit jenem Anteil des Nettovolumens eines Raumes, der - unter der Voraussetzung eines wolkenlosen Himmels - zu dieser konkreten Stunde von einem direkten Sonnenstrahl durchlichtet wird.

¹⁰⁶³ Der Durchlichtungsfaktor (LPF - Light Penetration Factor) ist eine eigenständige Neuentwicklung der Autoren und ist in diesem Sinne urheberrechtlich geschützt.

8.5.2.3. Berechnungsmethode und -werkzeug

In der gegenständlichen Arbeit wird der Durchlichtungsfaktor für jede der zwölf Orientierungen für den jeweils 21. Tag jedes Monats berechnet, als jener Anteil des Raumvolumens, der innerhalb dieses Tages von direktem Sonnenlicht erreicht und durchlichtet werden kann, angegeben in Prozent des Raumvolumens. Die Berechnungen des Durchlichtungsfaktors [LPF - Light Penetration Factor]© wurden mit dem Prototyp einer eigens zu diesem Zweck in der Entwicklungsumgebung C++ entwickelten Software, dem LPF-Tool ¹⁰⁶⁴ durchgeführt.

8.5.2.4. Geometrische Modellbildung

Das verwendete geometrische Modell entspricht dem verkürzten Basismodell, wie in Kapitel 8.4 hergeleitet und beschrieben. Untersucht wurde selbiges in seinen vier Ausformungen:

T_GGG_B460_T1400	Typ des Basismodells in der Ausformung mit Glaswand gegen Laubengang, mit Breite der Wohnung von 4,6 m und mit der Tiefe der Wohnung von 14 m
T_GGG_B230_T1100	Typ des Basismodells in der Ausformung mit Glaswand gegen Laubengang, mit Breite der Wohnung von 2,3 m und mit der Tiefe der Wohnung von 11 m
T_GWG_B460_T1150	Typ des Basismodells in der Ausformung mit opaker Wand gegen Laubengang, mit Breite der Wohnung von 4,6 m und mit der Tiefe der Wohnung von 11,5 m
T_GWG_B230_T900	Typ des Basismodells in der Ausformung mit opaker Wand gegen Laubengang, mit Breite der Wohnung von 2,3 m und mit der Tiefe der Wohnung von 9 m

Programmtechnisch bedingt musste anstelle der idealtypisch zweidimensionalen Begrenzungsflächen eine Wand- und Deckenstärke von 10 cm berücksichtigt werden. Sie wurde geeignet in das geometrische Modell integriert, mit dem Ziel einer möglichst geringfügigen Beeinflussung der Ergebnisse.

¹⁰⁶⁴ LPF-Tool (Light Penetration Factor – Tool) wurde nach einer Idee von Renate Hammer und Peter Holzer von der Fa. ROCAM entwickelt und wird in „Zuviel-Licht“ erstmals im Rahmen einer Forschungsarbeit eingesetzt. Auch für dieses Tool gilt explizit der Schutz durch das Urheberrecht.

Die idealtypisch unendliche Erstreckung des Laubengangs wurde, ähnlich den Berechnungen des Tageslichtquotienten, wieder angenähert mit einer Länge des Laubengangs von je 10 m in beide Richtungen über die Trennwände der Wohnung hinaus. Die nachfolgende Abbildung (Abbildung 50) zeigt exemplarisch eines der zur Untersuchung des Durchlichtungsfaktors verwendeten geometrischen Modelle.¹⁰⁶⁵

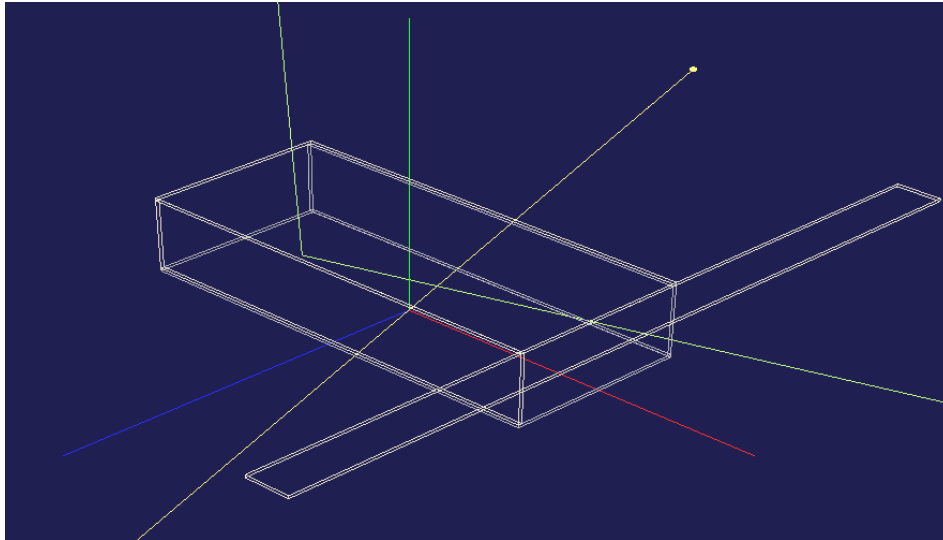


Abbildung 50: Geometrisches Modell zur Berechnung des Durchlichtungsfaktors

8.5.2.5. Physikalische Modellbildung

In die Berechnung des Durchlichtungsfaktors geht die Geometrie der Sonnenbahn ein, beschrieben durch die Stundenwerte der Sonnenhöhe und des Azimuts. Als Quellen für die Stundenwerte dieses Wertepaars werden sowohl die internationale Klimadatenbank METEONORM als auch der Formelsatz aus der Forschungsarbeit von Walter Heindl und Harald A. Koch herangezogen.^{1066,1067}

Weitere Eingaben physikalischer Randbedingungen sind nicht erforderlich.

Das Raumvolumen wird diskretisiert in quadratische Teilvolumina von je ca. 50 cm Seitenlänge.

Die Berechnung erfolgt in Stundenschritten. Für jeden Sonnenstand zur vollen Stunde innerhalb eines Tages wird das durchlichtete Teilvolumen berechnet und über alle dieser Momentaufnahmen die Vereinigungsmenge gebildet.

8.5.2.6. Ergebnisdarstellung

Die Ergebnisse der Berechnung des Durchlichtungsfaktors werden vom LPF-Tool □ ausgegeben als Zahlenwert und als isometrische Darstellung des durchlichteten Volumens in einem Drahtgittermodell des Raummodells. Die durchlichteten Teilvolumina

¹⁰⁶⁵ Abbildung 50: Peter Holzer, 2008, Screenshot aus der Bearbeitung mit der Software LPF-Tool

¹⁰⁶⁶ METEONORM 6.0 – Internationale Klimadatenbank, Meteotest, Schweiz, Bezugsquelle im Internet: <http://www.meteotest.ch> (04.02.2009)

¹⁰⁶⁷ Heindl (1976)

sind farblich angelegt, wobei sich in der von blau bis rot changierenden Farbgebung die Häufigkeit der Durchlichtung über den Tagesverlauf abbildet.

Für die Charakterisierung des Tageslichtpotentials eines Modells in seiner spezifischen Orientierung werden die Durchlichtungsfaktoren der jeweils 21. Tage aller zwölf Monate des Jahres berechnet und in einem Diagramm grafisch dargestellt. Ferner wird zur vergleichenden Analyse unterschiedlicher Basismodelle der Jahresmittelwert des Durchlichtungsfaktors berechnet und ausgewiesen.

Darüber hinaus wird der Verlauf der stündlichen Momentanwerte des Durchlichtungsfaktors für jeweils den 21. Tag jedes Monats berechnet und in Diagrammen dargestellt.

Die folgende Abbildung (Abbildung 51) zeigt exemplarisch die perspektivische Darstellung des Durchlichtungsfaktors für das verkürzte Basismodell Typ T_GGG_B460_T1400_A180, also jenes mit 4,6 m Breite mit nordorientiertem Laubengang für den 15. Juni. Erkennbar ist der auf Grund der hoch stehenden Sonne nur schmale durchlichtete Bereich hinter der südgerichteten Fassade ohne Laubengang. Und erkennbar ist auf der gegenüber liegenden, nördlichen Raumseite das von der Morgen- und Abendsonne durchlichtete Volumen. Erkennbar sind auch die unterschiedlichen Farbgebungen: Rot angelegte Bereiche werden an mehreren Stunden pro Tag von der Sonne durchlichtet, während blau angelegte Teilvolumina nur einmal pro Tag von einem Sonnenstrahl erreicht werden.¹⁰⁶⁸

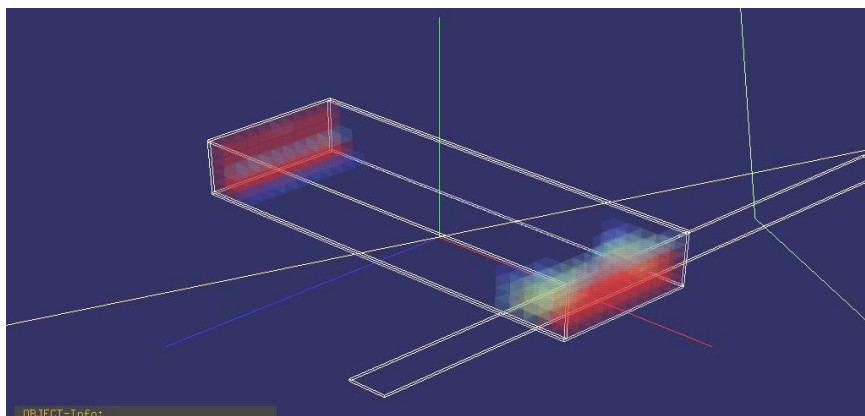


Abbildung 51: Axonometrische Ergebnisdarstellung des LPF für das Basismodell Typ T_GGG_B460_T1400_A180 am 21. Juni

¹⁰⁶⁸ Abbildung 51: Peter Holzer, 2008, Ergebnisdarstellung aus der Bearbeitung mit der Software LPF-Tool

Für denselben Typ des verkürzten Basismodells T_GGG_B460_T1400_A180 zeigt das Diagramm (Diagramm 127) einen exemplarischen Verlauf des Durchlichtungsfaktors über ein Jahr, also wieder für das verkürzte Basismodell mit 4,6 m Breite und nordorientiertem Laubengang. Die Werte des LPF sind auf der rechten Achse abzulesen und verstehen sich in Volumprozenten. Erkennbar ist der grundsätzlich niedrige LPF, mit einem Maximum im Winter aufgrund tief stehender Sonne auf die Südfassade und einem zweiten Hochpunkt im Sommer aufgrund der ebenfalls tief stehenden, schleifenden Einstrahlung auf die Nordfassade.¹⁰⁶⁹

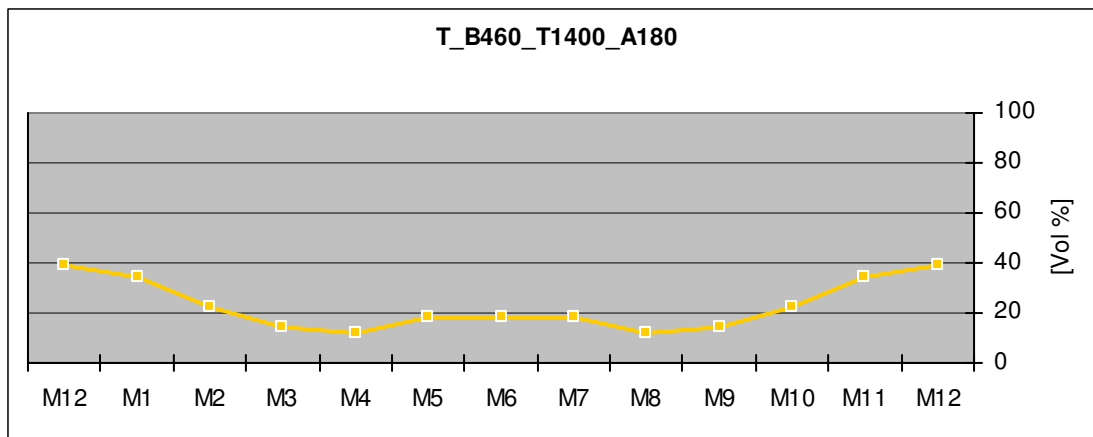


Diagramm 127: Jahresverlauf des LPF für das Basismodell T_GGG_B460_T1400_A180

Und schließlich einen Tagesverlauf der stündlichen Momentanwerte des Durchlichtungsfaktors am 21. März bzw. identisch am 21. September zeigt das folgende Diagramm (Diagramm 128), wieder für das verkürzte Basismodell mit 4,6 m Breite und nordorientiertem Laubengang. Erkennbar ist die grundsätzlich schwache, aber über den Tagesverlauf gleichmäßige Durchlichtung der nord-süd-orientierten Wohnung.¹⁰⁷⁰

¹⁰⁶⁹ Diagramm 127: Peter Holzer, 2008, Zusammenfassende Ergebnisdarstellung aus der Bearbeitung mit der Software LPF-Tool

¹⁰⁷⁰ Diagramm 128: Peter Holzer, 2008, Ergebnisdarstellung aus der Bearbeitung mit der Software LPF-Tool

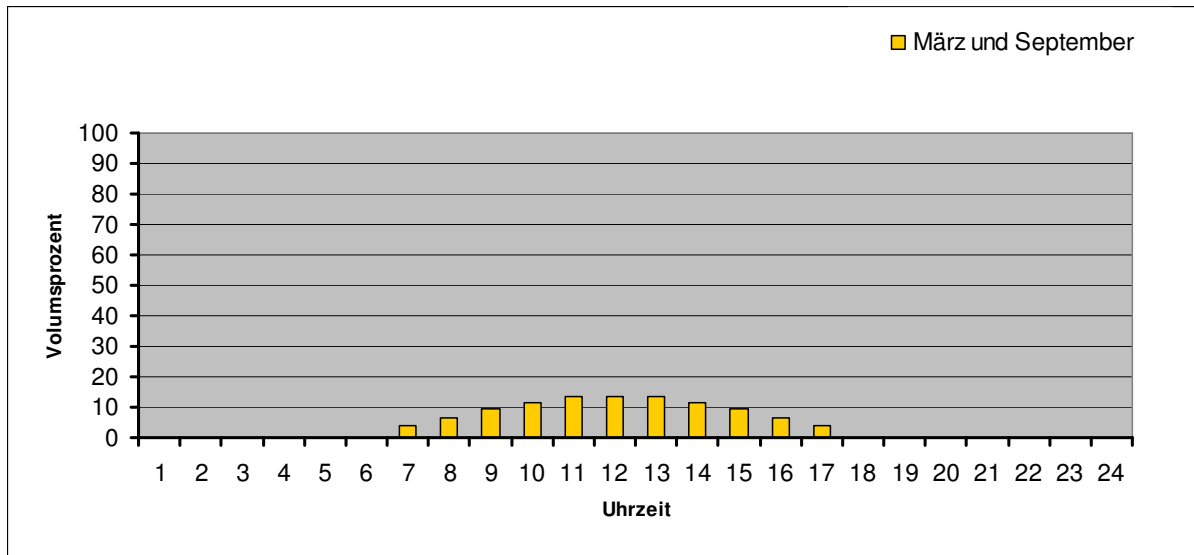


Diagramm 128: Tageserlauf der stündlichen Momentanwerte des LPF für das Basismodell T_GGG_B460_L1400_A180

8.5.3. Untersuchung des Passiv Solaren Gewinnpotentials

8.5.3.1. Erörterung des Heizwärmebedarfs [HWB]

Der Heizwärmebedarf ist definiert in der ÖNORM B 8110-1, als "Wärmemenge, die den konditionierten Räumen zugeführt werden muss, um deren vorgegebene Solltemperatur einzuhalten, wobei für die Luftwechselrate, die inneren Wärmelasten (ohne Berücksichtigung der Beleuchtung) die Bestimmungen für Wohngebäude herangezogen werden."¹⁰⁷¹

Der Heizwärmebedarf ist die Differenz zwischen den Wärmeverlusten und den nutzbaren internen wie den solaren Wärmegewinnen. Er bildet somit in geeigneter Weise die Qualität eines Raumes ab, passiv solare Wärmegewinne zu nutzen. Wobei gilt: Je kleiner der Heizwärmebedarf, desto größer das Passiv Solare Gewinnpotential.

8.5.3.2. Berechnungsmethode und -werkzeug

Im gegenständlichen Forschungsvorhaben wird der Heizwärmebedarf ermittelt unter Verwendung dynamischer thermischer Gebäudesimulation.

Bei diesem Verfahren wird die Wärmebilanz des Gebäudes aufeinander folgend in Zeitschritten von zwei Minuten berechnet und die relevanten Energieströme geeignet aufsummiert. Veränderliche klimatische Randbedingungen werden in Stundenschritten eingelesen. Berücksichtigt werden somit mit großer Genauigkeit die Effekte zeitlich veränderlicher außenräumlicher Randbedingungen, aber auch Effekte zeitlich veränderlicher Nutzung. Berücksichtigt werden ferner auch Effekte der Wärmespeicherung.

¹⁰⁷¹ ÖMORM B 8110-1 (2007)

Als Rechenwerkzeug wird das Softwarepaket TAS des englischen Herstellers EDSL in seiner Version 9.0.9d eingesetzt, ein leistungsfähiges und bestens validiertes Programmpaket.¹⁰⁷²

In Abweichung der ÖNORM B 8110-6 werden der Heizwärmebedarf und der Kühlbedarf in der gegenständlichen Arbeit immer für das gesamte Jahr, ohne Berücksichtigung einer Heizgrenz- oder einer Kühlgrenztemperatur berechnet.¹⁰⁷³

Der Heizwärmebedarf und der Kühlbedarf werden bezogen auf einen Quadratmeter beheizter Nettogrundfläche im Sinne der ÖNORM B 1800.¹⁰⁷⁴

8.5.3.3. Geometrische Modellbildung

Das verwendete geometrische Modell entspricht auch hier wieder dem verkürzten Basismodell, in seinen vier Ausformungen. Die Geometrie des Basismodells wird im Editor '3D-TAS' dreidimensional abgebildet als thermisch zusammenhängende Raumzelle mit dem Laubengang als einer weiteren, vorgelagerten Raumzelle.

- > Die Wohnung ist im Geometriemodell an allen Innenwänden und -decken umgeben von gleichartigen Raumzellen.
- > Der Laubengang wird abgebildet als nach außen und innen voll verglaster Raum von 1,2 m Tiefe, der in der Horizontalen beidseitig die untersuchte Raumzelle um die Breite von jeweils zwei weiteren Raumzellen überragt.
- > Die Fenster werden definitionsgemäß als Vollverglasung abgebildet.

Die nachfolgende Abbildung (Abbildung 52) zeigt das verwendete geometrische Modell eines Basismodells des Typs GGG. Erkennbar sind das rot gefärbte Volumen der Wohnung des Basismodells und das blassgelb gefärbte Volumen des zugeordneten Laubengangs. Die umliegenden Wohnungen dienen nur exemplarisch der Veranschaulichung eines teils der übergeordneten Raumstruktur.¹⁰⁷⁵

¹⁰⁷² TAS - Thermal Analysis System 9.0.9d by EDSL - Environmental Design Solutions Limited; Milton Keynes, GB, 2007

¹⁰⁷³ ÖNORM B 8110-6 (2007)

¹⁰⁷⁴ ÖNORM B 1800 (2002)

¹⁰⁷⁵ Abbildung 52: Peter Holzer, 2008, Darstellung aus der Bearbeitung mit der Software TAS

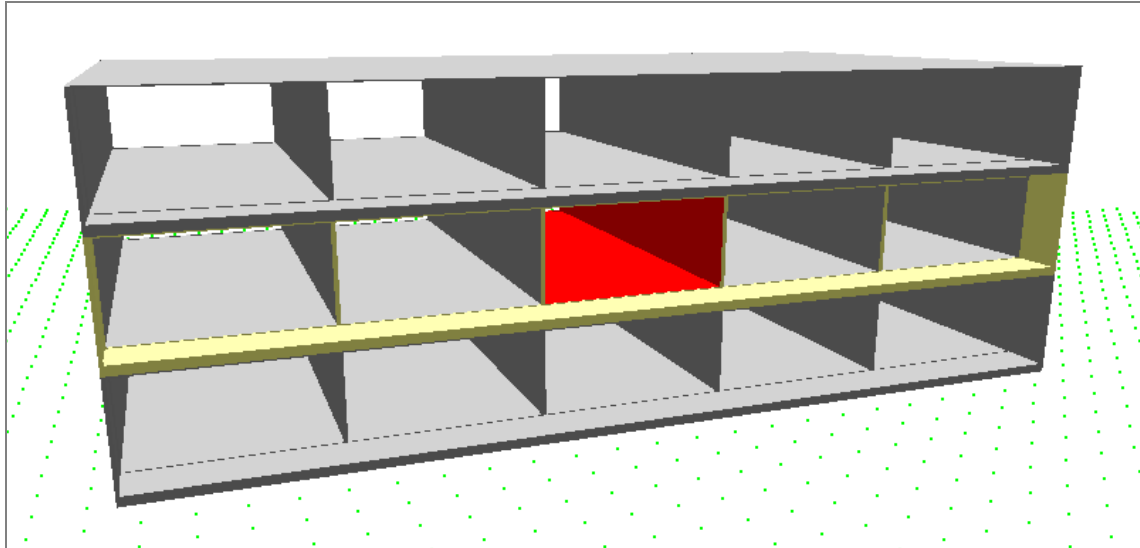


Abbildung 52: Geometrisches Modell zur Berechnung des Heizwärmebedarfs

8.5.3.4. Physikalische Modellbildung

8.5.3.4.1. Außenklima

Zur Beschreibung des Außenklimas wird ein Halbsynthetischer Klimadatensatz für den Standort Wien mit Stundenwerten der Außenlufttemperatur, relativer Feuchtigkeit, Niederschlag, Globalstrahlung, Himmelsstrahlung, Luftdruck, Windgeschwindigkeit und Windrichtung herangezogen. Der Klimadatensatz erfüllt für alle der genannten Parameter den langjährigen Durchschnitt der gemessenen Monatsmittelwerte, gültig für den Beobachtungszeitraum 1976 bis 2005 und bildet darüber hinaus charakteristische dynamische Verläufe der genannten Parameter, also auch sommerliche oder winterliche Extremsituationen, in realistischer Weise auf Basis gemessener Daten ab. Der nämliche Klimadatensatz wurde erstellt und zur Verfügung gestellt von ao. Univ. Prof. Dr. Klaus Krec.¹⁰⁷⁶

8.5.3.4.2. Bauteile

Die Bauteile werden entsprechend den Festlegungen des Basismodells abgebildet. Die Trennbauteile gegen die ebenfalls beheizten umliegenden Wohnungen werden entsprechend der Typologie des mehrgeschossigen Wohnbaus definiert. Folgende Bauteile werden in der Simulationsrechnung verwendet:

¹⁰⁷⁶ W. Heindl, T. Kornicki, A. Sigmund, „Erstellung halbsynthetischer Klimadatensätze für meteorologische Messstationen“, Forschungsbericht im Auftrag des Bundesministeriums für Wissenschaft und Forschung (GZ. 70.630/18-25/88) und des Amtes der NÖ Landesregierung (Zl. NC 23-1988/1989), Wien (1990)

8.5.3.4.2.1. Verglasung gegen direkt außen und gegen den Laubengang

$$U_w = 1,30 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$$

$$U_g = 1,20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$$

$$g = 0,62$$

$$T_L = 0,80$$

8.5.3.4.2.2. Verglasung des Laubengangs gegen außen

$$U_w = 5,60 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$$

$$U_g = 5,60 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$$

$$g = 0,84$$

$$T_L = 0,90$$

8.5.3.4.2.3. Wohnungstrennwand

Die Wohnungstrennwände werden im Einklang mit der Wiener Bauordnung und entsprechend der Typologie des mehrgeschossigen Wohnbaus abgebildet mit den thermischen Eigenschaften einer doppelten Betonscheibe von je 12 cm Stahlbeton mit 3 cm Mineralwoll-Einlage, beidseitig verspachtelt.

Wirksame Speichermasse: 530 kg/m²,

$$U = 0,85 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$$

8.5.3.4.2.4. Trenndecke

Die Trenndecken werden, wie die Wohnungstrennwände, entsprechend den Anforderungen der Wiener Bauordnung und der Typologie des mehrgeschossigen Wohnbaus mit den thermischen Eigenschaften einer 20 cm starken, an der Unterseite mit 0,4 cm Schichtstärke verspachtelten Stahlbetonplatte mit einem Bodenaufbau aus 3,2 cm Trittschalldämmung, 5 cm Estrich und 2 cm Holzboden abgebildet.

Wirksame Speichermasse nach oben: 150 kg/m²

Wirksame Speichermasse nach unten: 530 kg/m²

$$U = 0,86 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$$

8.5.3.4.2.5. Außenwand

Die Außenwand wird wieder entsprechend den Anforderungen der OENORM B 8110-1 und der Typologie des mehrgeschossigen Wohnbaus mit den thermischen Eigenschaften einer 20 cm starken, innen verspachtelten Stahlbetonscheibe mit 12 cm Polystyrol Wärmedämmung, dünn verputzt, abgebildet.

Wirksame Speichermasse: 530 kg/m²

$$U = 0,30 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$$

8.5.3.5. Innere Nutzungsbedingungen

Es wird dem Forschungsziel entsprechend für die Wohnung ein einziges, konsequent vereinfachtes Nutzungsprofil angewandt:

- > Berücksichtigt wird ein konstanter Außenluftwechsel der Wohneinheit von $0,4 \text{ }^1/\text{h}$.
- > Die Heizung wird definiert mit einem Zielwert von 20°C Lufttemperatur.
- > Die Kühlung wird definiert mit einem Zielwert von 26°C Lufttemperatur.
- > Die inneren Wärmelasten werden sommers wie winters Null gesetzt.

Das Nullsetzen der inneren Wärmelasten ist eine Veränderung gegenüber den gültigen Normen, etwa der ÖNORM B 8110-6, in der bei Wohnnutzung konstante innere Wärmelasten von $3,75 \text{ W/m}^2_{\text{NF}}$ vorgesehen sind. Von dieser Regel wurde in der gegenständlichen Analyse ganz bewusst abgewichen, um die Performance des Gebäudes selbst, ohne Überlagerung mit nutzungsbedingten Wärmeeinträgen abzubilden.

Aus analogen Überlegungen wurde von der Definition einer Heizperiode abgesehen und wurde der Heizwärmebedarf für das durchgehende Jahr berechnet. Die Ergebnisse zeigen aber in guter Übereinstimmung mit der Realität die üblichen heizfreien Monate.

Der Laubengang wird als nicht konditionierter Pufferraum abgebildet, mit einem dauerhaft geöffneten Anteil von 5% der Verglasung gegen außen. Somit entsteht ein realistischer Außenluftwechsels des Laubengangs, abhängig von der Temperaturdifferenz und dem Winddruck. Diese Annahme bildet in guter Näherung den häufig gebauten Typus von Laubengängen mit permanenten Lüftungsöffnungen ab.

8.5.3.6. Ergebnisdarstellung

Berechnet werden für jedes Basismodell in seinen je zwölf Orientierungen die Monats- und Jahressummen des Heizwärmebedarfs. Die Ergebnisse werden sowohl tabellarisch als auch als Balkendiagramm für jeden berechneten Typ dargestellt. Sämtliche Ergebnisse werden gemeinsam mit jenen der Berechnung des Durchlichtungspotentials und des Sommertauglichkeitspotentials dargestellt und vergleichend analysiert.

Das folgende Diagramm (Diagramm 129) zeigt einen exemplarischen Verlauf des monatlichen Heizwärmebedarfs über ein Jahr. Die Darstellung gilt für das verkürzte Basismodell T_B460_T1400_A180, also wieder jenes mit 4,6 m Breite und nordorientiertem Laubengang. Die Monatssummen des HWB sind auf der linken Achse abzulesen und verstehen sich in kWh pro Quadratmeter Energiebezugsfläche und Monat.¹⁰⁷⁷ Im gleichen Diagramm dargestellt ist auch der bereits zuvor erläuterte Verlauf des Durchlichtungsfaktors. Erkennbar sind die Heizperiode von Oktober bis April und die heizfreie Zeit von Mai bis September.¹⁰⁷⁸

¹⁰⁷⁷ Angesichts der konstruktivistischen Annahme von verschwindenden Wandstärken erübrigt sich die ansonsten notwendige Festlegung auf Brutto- oder Nettobezugsflächen.

¹⁰⁷⁸ Diagramm 129: Peter Holzer, Zusammenfassende Ergebnisdarstellung aus der Bearbeitung mit den Softwarepaketen LPF-Tool und TAS.

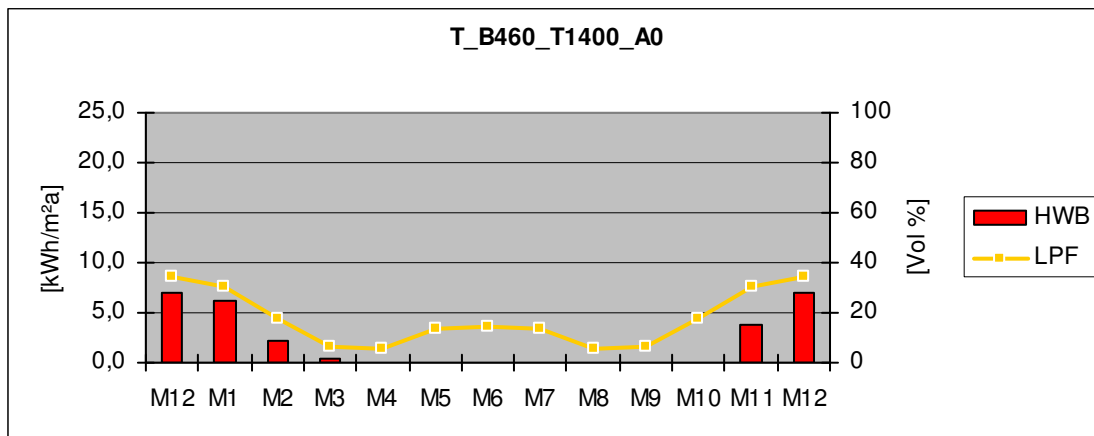


Diagramm 129: Exemplarische Darstellung des monatlichen LPF und HWB über ein Jahr

8.5.4. Untersuchung des Sommertauglichkeitspotentials

8.5.4.1. Erörterung des Kühlbedarfs [KB]

Der Kühlbedarf ist definiert in der ÖNORM B 8110-1, Kap. 3.11, als "Wärmemenge, die den konditionierten Räumen entzogen werden muss, um deren vorgegebene Solltemperatur einzuhalten."¹⁰⁷⁹

Der Kühlbedarf ist demnach eine Maßzahl für die thermische Sommertauglichkeit eines Raumes. Wobei gilt: Je kleiner der Kühlbedarf, desto größer die Sommertauglichkeit.

8.5.4.2. Berechnungsmethode und -werkzeug

Analog dem Heizwärmebedarf wird der Kühlbedarf ermittelt unter Verwendung dynamischer thermischer Gebäudesimulation. Eingesetzt wird auch hier das Softwarepaket TAS des englischen Herstellers EDSL.¹⁰⁸⁰

Auch der Kühlbedarf wird bezogen auf einen Quadratmeter konditionierter Wohnungsgrundfläche.

8.5.4.3. Geometrische Modellbildung

Die geometrische Modellbildung ist identisch mit jener zur Berechnung des Heizwärmebedarfs. Siehe daher Kapitel 8.5.3.3.

8.5.4.4. Physikalische Modellbildung

Die physikalische Modellbildung ist identisch mit jener zur Berechnung des Heizwärmebedarfs. Siehe daher Kapitel 8.5.3.4.

¹⁰⁷⁹ ÖNORM B 8110-1 (2007)

¹⁰⁸⁰ TAS - Thermal Analysis System 9.0.9d by EDSL - Environmental Design Solutions Limited; Milton Keynes, GB; 2007

8.5.4.5. Ergebnisdarstellung

Auch die Ergebnisdarstellung erfolgt analog jener des Heizwärmebedarfs und demnach mit Auswertung die Monats- und Jahressummen.

Das folgende Diagramm (Diagramm 130) zeigt abermals den exemplarischen Verlauf des monatlichen Heizwärmebedarfs über ein Jahr für das verkürzte Basismodell T_B460_T1400_A180, nun in seiner vollständigen Form, also mit Darstellung des LPF, des HWB und des KB.¹⁰⁸¹

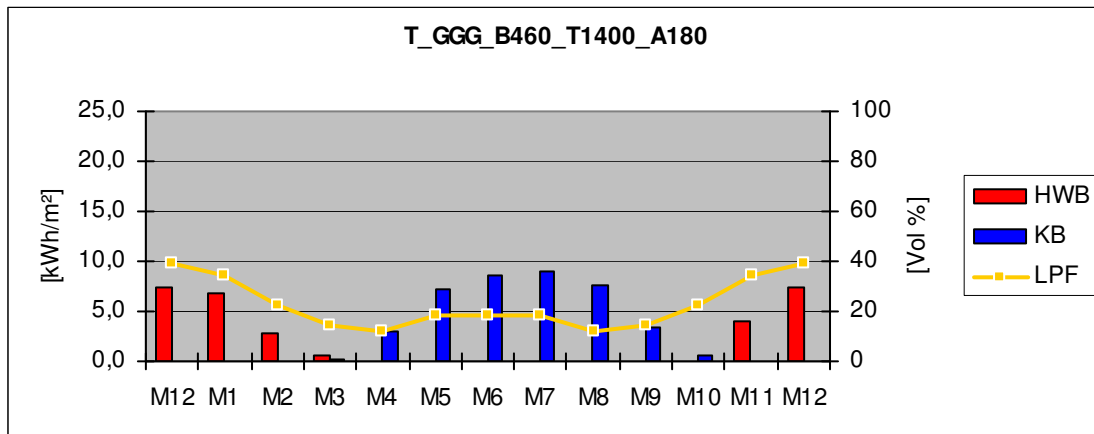


Diagramm 130: Exemplarische Darstellung des monatlichen LPF, HWB und KB über ein Jahr

¹⁰⁸¹ Diagramm 129: Peter Holzer, 2008, Zusammenfassende Ergebnisdarstellung aus der Bearbeitung mit den Softwarepaketen LPF-Tool und TAS.

8.6. Ergebnisse

8.6.1. Erläuterung der Ergebnisdarstellung

Angesichts der Vielzahl von Varianten und Ergebnisparametern bedarf es einer eindeutigen und nachvollziehbaren Festlegung der Ergebnisdarstellung, die nachfolgend erläutert wird.

8.6.1.1. Bezeichnung der Basismodelle

Es wird nochmals die eindeutige Bezeichnung der untersuchten Basismodelle zusammengefasst, wie sie bereits an vorangegangener Stelle der gegenständlichen Arbeit definiert wurde:

Typ	Bezeichnet eine eindeutige Konstellation des Basismodells mit seiner Ausformung, seiner Breite, Tiefe, und Orientierung. Abkürzung „T“.
Ausformung	Bezeichnet eine der beiden Konstellationen GGG – Glaswand gegen den Laubengang, oder GWG – opake Wand gegen den Laubengang.
Breite	Bezeichnet die Breite der Wohnung im jeweiligen Basismodell. Abkürzung „B“, ergänzt durch den Zahlenwert in cm.
Tiefe	Bezeichnet die Tiefe der Wohnung im jeweiligen Basismodell. Abkürzung „T“, ergänzt durch den Zahlenwert in cm.
Ausrichtung	Bezeichnet die Orientierung des Normalvektors auf die Laubengangfassade, als seine Auslenkung aus der Südrichtung an. Gemessen in Grad, mit positiver Zählrichtung im Uhrzeigersinn. ¹⁰⁸²

Es bedeutet z.B.: T_GGG_B460_T1400_A0

T	Typ
GGG	Glas-Glas-Glas
B460	Breite 460 cm
T1400	Tiefe der Wohnung von 1.400 cm
A0	Orientierung der Laubengangfassade nach Süden, definiert als der Zahlenwert als Drehung der Laubengangfassade aus der Südrichtung im Uhrzeigersinn, differenziert in 30°-Schritten.

¹⁰⁸² Diese Nomenklatur steht im Einklang mit der gängigen Normung, etwa ÖNORM M 7701; 2004_09_01; Sonnenteknische Anlagen.

8.6.1.2. Symboldarstellung der Basismodelle

Die Basismodelle entstehen aus der Kombination aus drei Qualitäten, nämlich aus erstens der Ausformung GGG oder GWG, zweitens der Variation „breite“ oder „schmale“ Wohneinheit und drittens der Orientierung der Laubengangfassade.¹⁰⁸³

Ergänzend zur Nomenklatur wurde ein Symbol entwickelt, das diese drei Freiheitsgrade zusammenfassend abbildet.

- > Dargestellt wird symbolhaft ein Grundriss der übergeordneten Raumstruktur, gelb unterlegt der Bereich der Wohneinheiten, blau unterlegt der Bereich des vorgelagerten Laubengangs.
- > Die Qualität der Orientierung der Laubengangfassade wird abgebildet durch die passend gedrehte Positionierung des Grundrisses in einer Windrose mit den vier Haupthimmelsrichtungen.
- > Die Qualität der Wohnungsbreite wird symbolhaft durch die Andeutung der zwei Trennwände der Wohnungseinheit dargestellt, die eine entweder schmale oder breite Wohneinheit andeuten.
- > Die Qualität der Ausformung GGG oder GWG schließlich wird angedeutet durch eine vorhandene oder nicht vorhandene Trennlinie zwischen dem gelb unterlegten Wohnbereich und dem blau unterlegten Laubengang. Eine vorhandene Trennlinie symbolisiert die Ausformung GWG, eine fehlende Trennlinie symbolisiert die Ausformung GGG.

¹⁰⁸³ Die Wohnungstiefe als weitere Variable ist streng genommen kein eigener Freiheitsgrad, sondern ist eindeutig aus der Kombination aus Ausformung und Wohnungsbreite abgeleitet.

Nachfolgend sind die beschriebenen Symbole exemplarisch dargestellt (Abbildung 53) für die Typen.¹⁰⁸⁴

- > T_GGG_B230_T1100_A-30: Wand gegen Laubengang verglast, schmale Wohneinheit, Orientierung des Laubengangs 30° aus Süd gegen den Uhrzeigersinn gedreht
- > T_GWG_B230_T900_A-30: Wand gegen Laubengang opak, schmale Wohneinheit, Orientierung des Laubengangs 30° aus Süd gegen den Uhrzeigersinn gedreht
- > T_GGG_B460_T1400_A-30: Wand gegen Laubengang verglast, breite Wohneinheit, Orientierung des Laubengangs 30° aus Süd gegen den Uhrzeigersinn gedreht
- > T_GWG_B460_T1150_A-30: Wand gegen Laubengang opak, breite Wohneinheit, Orientierung des Laubengangs 30° aus Süd gegen den Uhrzeigersinn gedreht

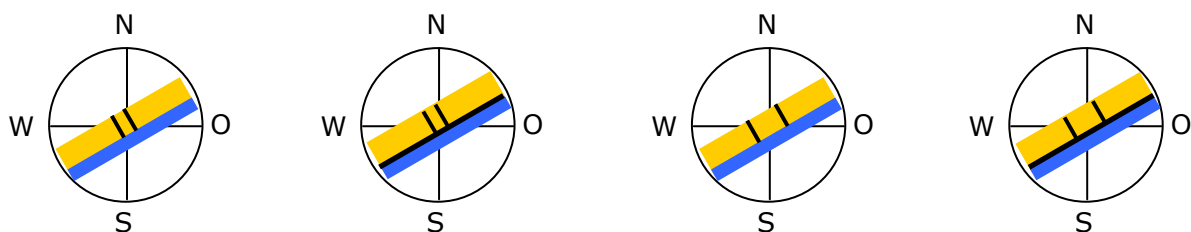


Abbildung 53: Symbole zur Beschreibung der Basismodelle

8.6.1.3. Datenblätter

Die Ergebnisse der vergleichenden Potentialstudie werden auf Datenblättern (exemplarisch Abbildung 54) zusammengefasst. Für jeden Typ wird ein jeweils einseitiges Datenblatt verfasst, auf dem die folgenden Informationen dargestellt sind:¹⁰⁸⁵

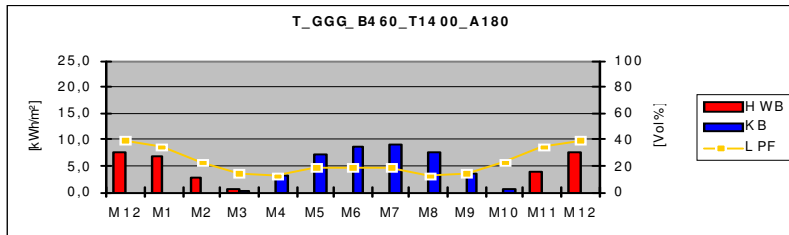
- > Codierung des jeweiligen Typs des Basismodells in der Titelzeile
- > Ergebnistabelle mit jeweils zwölf Monatswerten für HWB, KB und LPF sowie Jahressummen für HWB und KB und Jahresdurchschnitt für LPF
- > Ergebnisdiagramm mit jeweils zwölf Monatswerten für HWB, KB und LPF
- > Drei perspektivische Darstellungen des Durchlichtungsfaktors, jeweils exemplarisch zur Winter- und Sommersonnenwende sowie zur Tag-Nacht-Gleiche
- > Drei Säulendiagramme mit den stündlichen Momentanwerten des Durchlichtungsfaktors, jeweils exemplarisch zur Winter- und Sommersonnenwende sowie zur Tag-Nacht-Gleiche

¹⁰⁸⁴ Abbildung 53: Hammer, Holzer, 2008

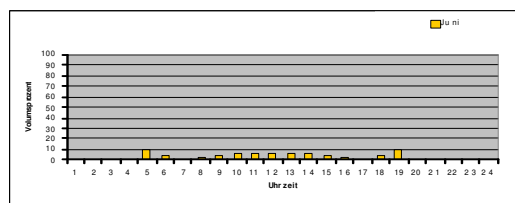
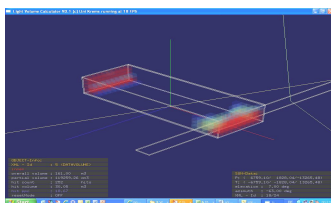
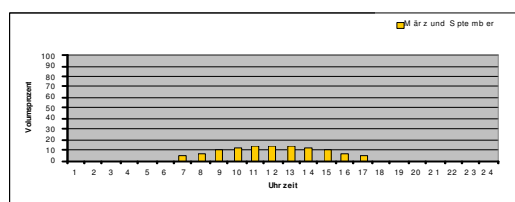
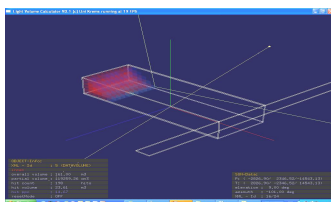
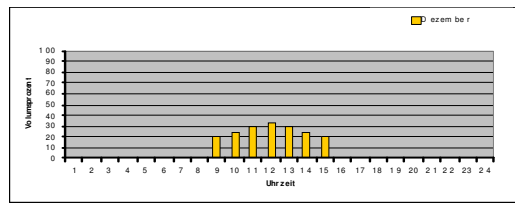
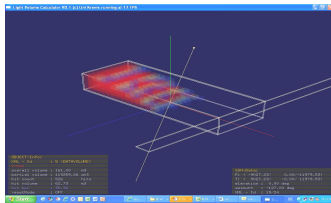
¹⁰⁸⁵ Abbildung 54: Holzer, 2008

Datenblatt Typ T_GGG_B460_T1400_A180

T_GGG_B460_T1400_A180														
	M 12	M 1	M 2	M 3	M 4	M 5	M 6	M 7	M 8	M 9	M 10	M 11	M 12	Sum/Average
LPF	39	34	22	15	12	19	19	19	12	15	22	34	39	22 %
HWB	7,4	6,8	2,8	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,1	7,4	22 kWh/m ²
KB	0,0	0,0	0,0	0,2	3,1	7,1	8,6	9,0	7,7	3,4	0,6	0,0	0,0	40 kWh/m ²



Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]



Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

Abbildung 54: Exemplarisches Datenblatt zur Ergebnisdarstellung

8.6.1.4. Vergleichende Ergebnisdarstellung

Aufbauend auf den Ergebnissen der einzelnen Basismodelle in deren spezifischer Orientierung werden die Auswirkungen der unterschiedlichen Orientierungen auf die Qualitäten des Tageslichtpotentials, des passiv solaren Gewinnpotentials und des Sommertauglichkeitspotentials vergleichend untersucht.

Zu diesem Zweck werden der Mittelwert der Durchlichtungsfaktoren zum jeweils 21. Tag jedes Monats, der Heizwärmebedarf sowie der Kühlbedarf der unterschiedlichen Orientierungen jedes der vier untersuchten Basismodelle vergleichend analysiert.

Jene Werte, die vom Durchschnitt über alle Ergebnisse ein und derselben Raumgeometrie besonders abweichen, werden farbig unterlegt, wobei eine rote Hinterlegung eine starke Abweichung mit negativen Auswirkungen für die Innenraumqualität anzeigt und die grüne Hinterlegung eine starke Abweichung mit positiven Auswirkungen.¹⁰⁸⁶

Durchlichtungsfaktor:

Unterdurchschnittliche Durchlichtung	Durchschnittliche Durchlichtung	Überdurchschnittliche Durchlichtung
--------------------------------------	---------------------------------	-------------------------------------

Heizwärmebedarf:

Überdurchschnittlicher Bedarf	Durchschnittlicher Bedarf	Unterdurchschnittlicher Bedarf
-------------------------------	---------------------------	--------------------------------

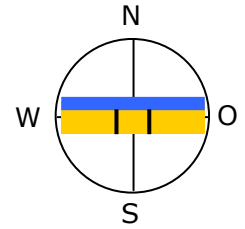
Kühlbedarf:

Überdurchschnittlicher Bedarf	Durchschnittlicher Bedarf	Unterdurchschnittlicher Bedarf
-------------------------------	---------------------------	--------------------------------

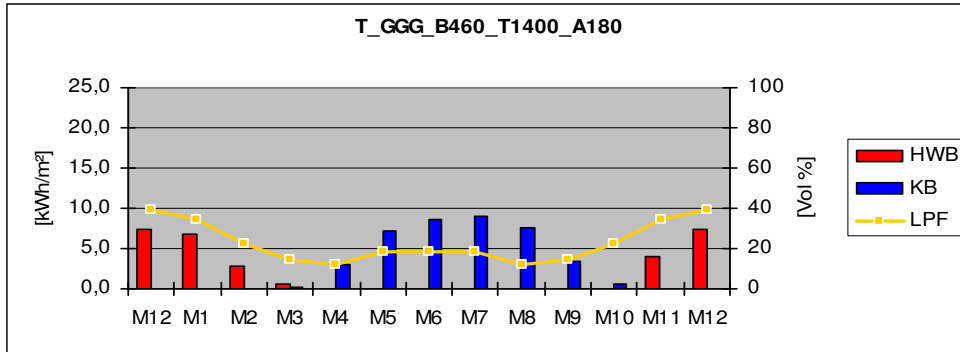
¹⁰⁸⁶ Die Unterteilung in drei Gruppen entspricht der A-B-C-Methode. Die mittlere Gruppe wurde rund um den Mittelwert der jeweiligen Kennzahl durch Definition einer prozentualen Abweichung rund um diesen Mittelwert gebildet. Die Breite dieses Mittelfeldes wurde für jedes der vier Basismodelle und für jede der drei Kennzahlen so gewählt, dass aus den jeweils zwölf untersuchten Orientierungen stets ein Drittel der Orientierungen in diesem Mittelfeld liegen.

8.6.2. Exemplarische Datenblätter

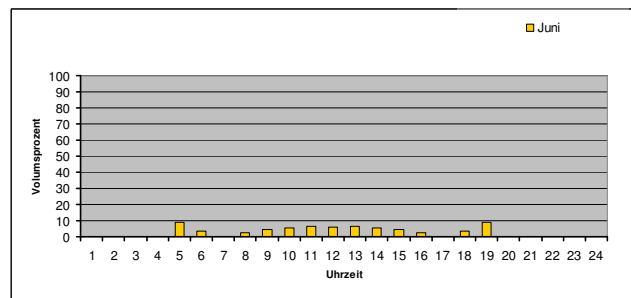
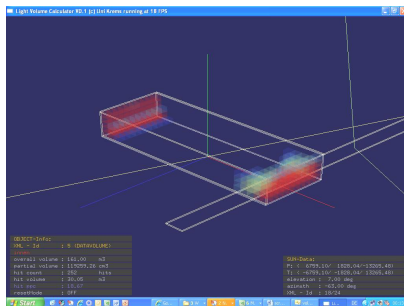
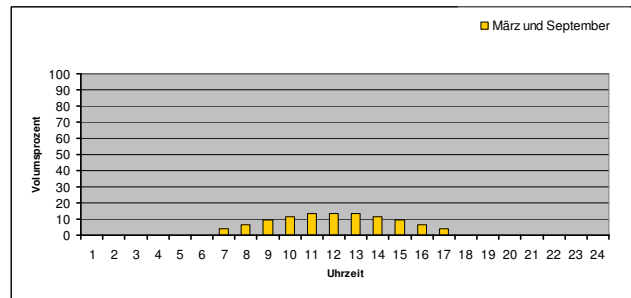
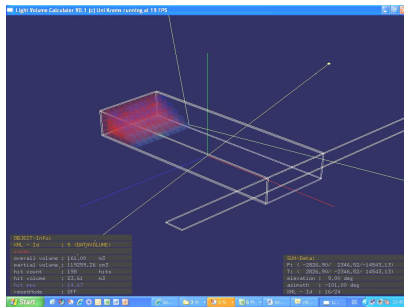
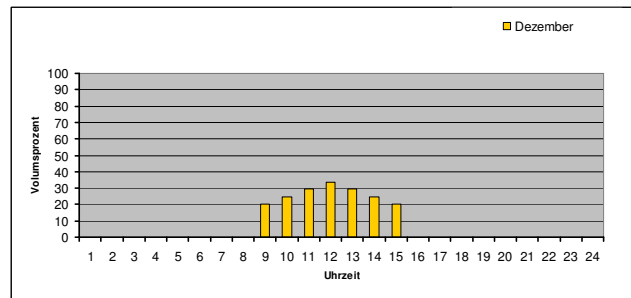
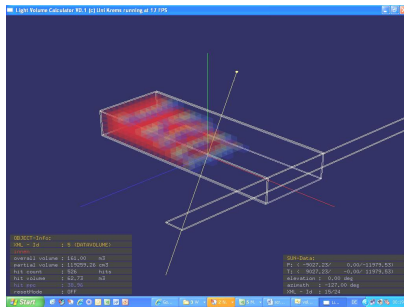
Datenblatt Typ T_GGG_B460_T1400_A180



T_GGG_B460_T1400_A180													Sum/Average	
LPF	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	22 %
HWB	7,4	6,8	2,8	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,1	7,4	22 kWh/m ²
KB	0,0	0,0	0,0	0,2	3,1	7,1	8,6	9,0	7,7	3,4	0,6	0,0	0,0	40 kWh/m ²

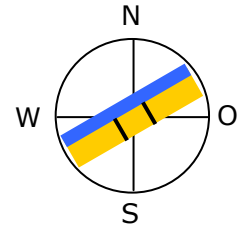


Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]

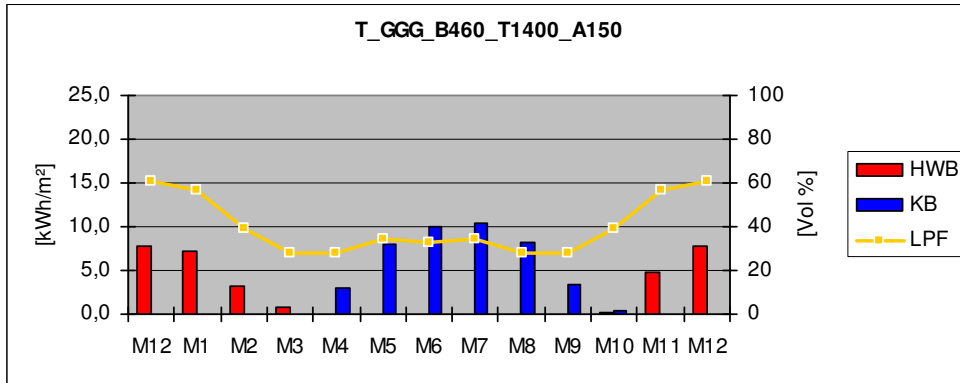


Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

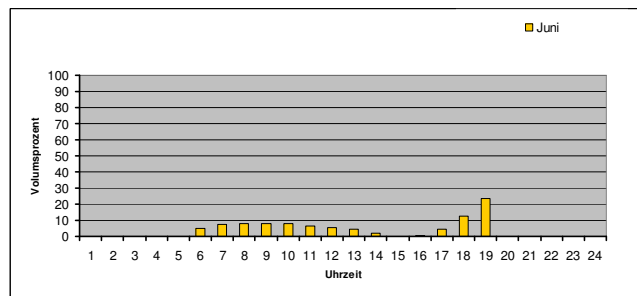
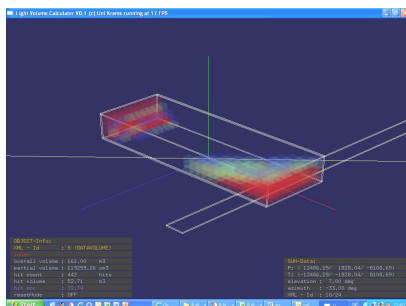
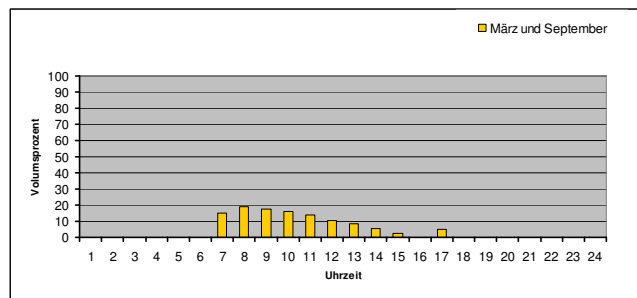
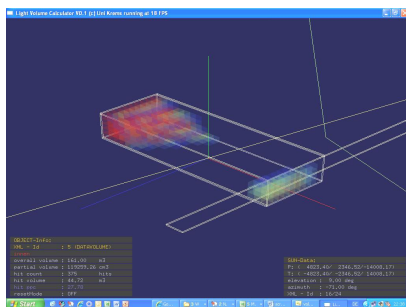
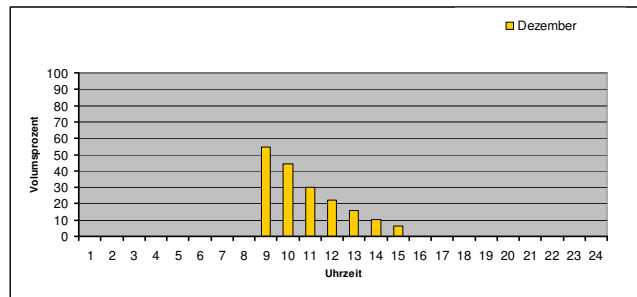
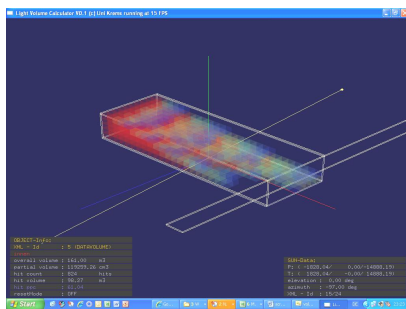
Datenblatt Typ T_GGG_B460_T1400_A150



T_GGG_B460_T1400_A150													Sum/Average	
LPF	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	39 %
HWB	7,8	7,2	3,2	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	4,7	7,8	24 kWh/m ²	
KB	0,0	0,0	0,0	0,1	3,0	8,0	10,1	10,4	8,2	3,3	0,4	0,0	43 kWh/m ²	

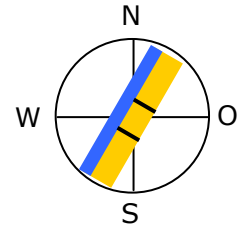


Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]

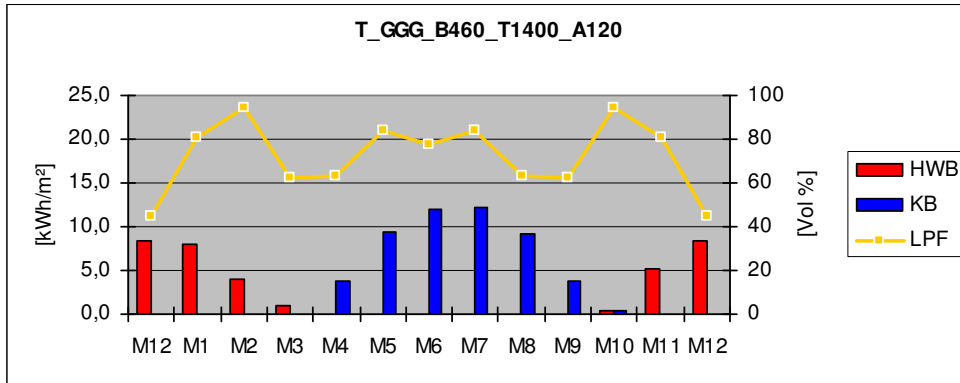


Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

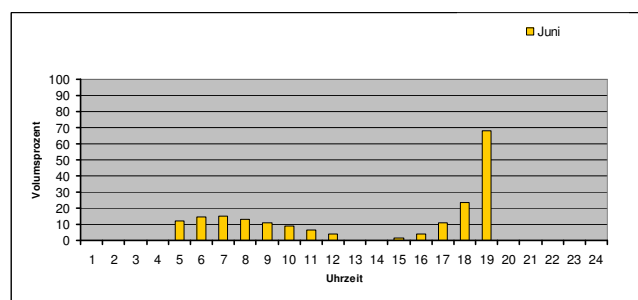
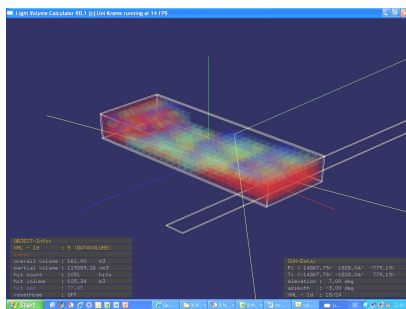
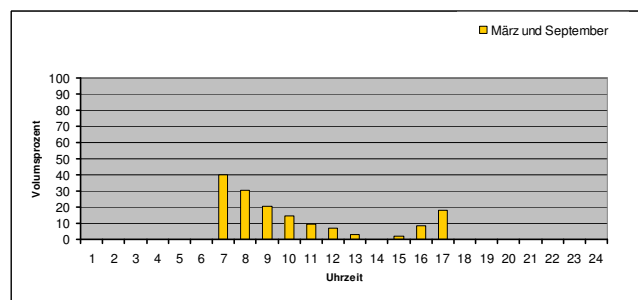
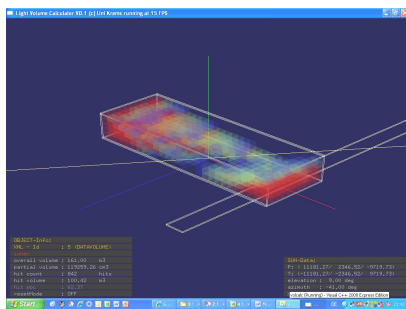
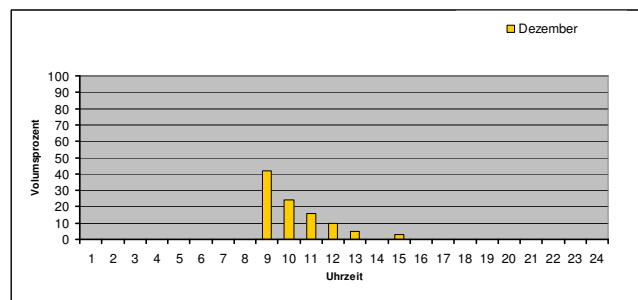
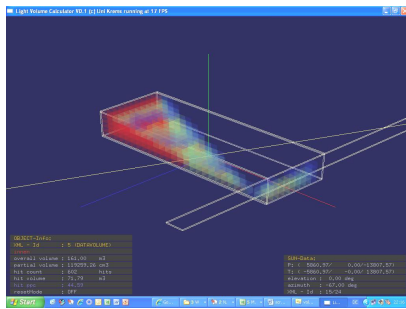
Datenblatt Typ T_GGG_B460_T1400_A120



T_GGG_B460_T1400_A120														
	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	Sum/Average
LPF	45	81	94	62	63	84	78	84	63	62	94	81	45	74 %
HWB	8,4	8,0	4,1	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	5,1	8,4	27 kWh/m ²
KB	0,0	0,0	0,0	0,0	3,9	9,5	12,0	12,2	9,2	3,8	0,4	0,0	0,0	51 kWh/m ²

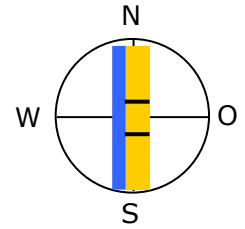


Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]

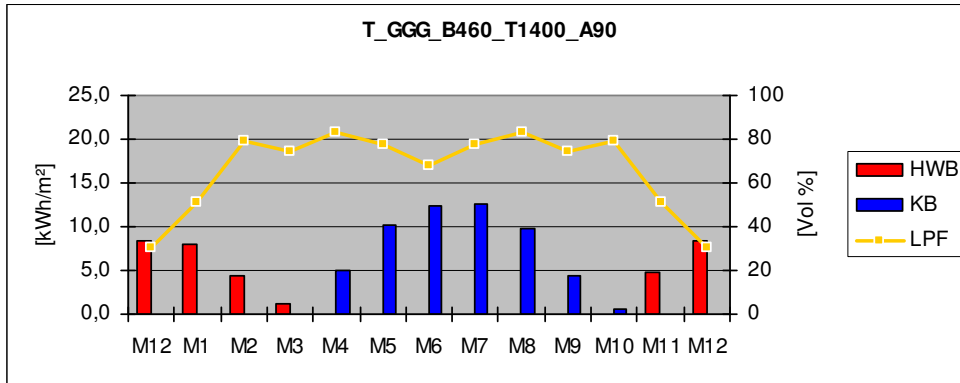


Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

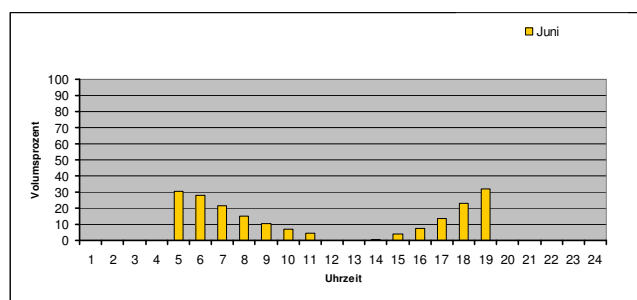
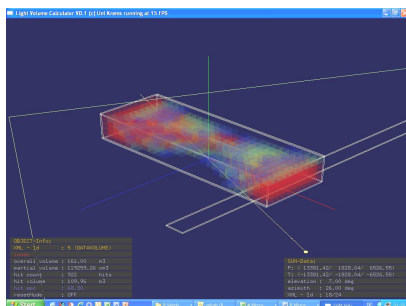
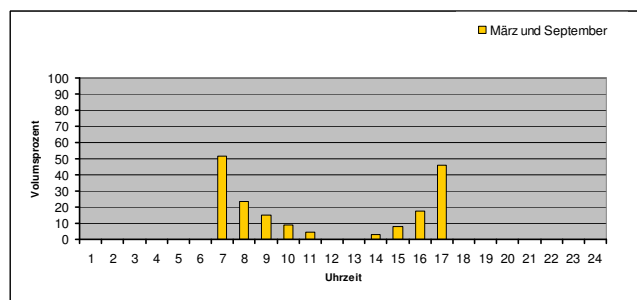
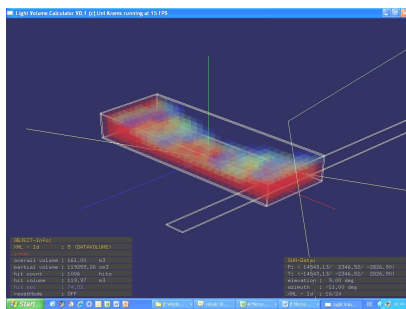
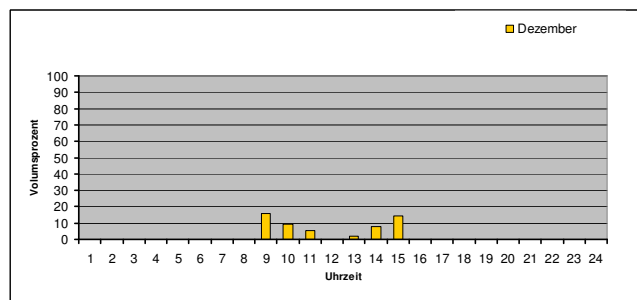
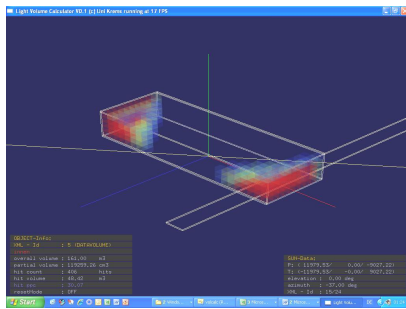
Datenblatt Typ T_GGG_B460_T1400_A90



T_GGG_B460_T1400_A90														
	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	Sum/Average
LPF	30	51	79	75	83	77	68	77	83	75	79	51	30	69 %
HWB	8,3	8,1	4,4	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0			0,1	4,8	8,3	27 kWh/m ²
KB	0,0	0,0	0,0	0,1	4,9	10,3	12,5	12,7	9,9	4,3	0,6	0,0	0,0	55 kWh/m ²

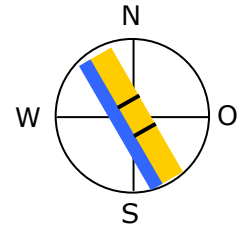


Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]

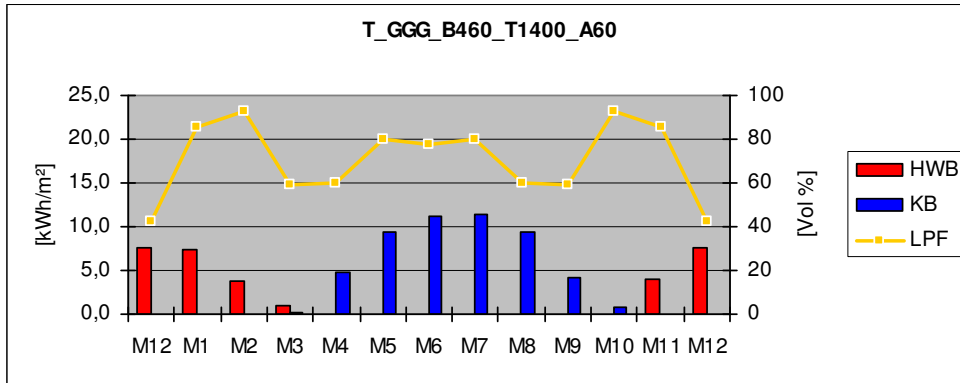


Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

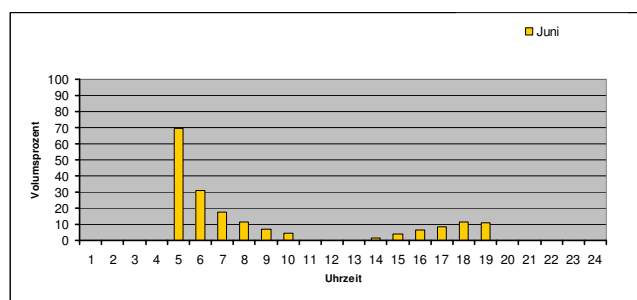
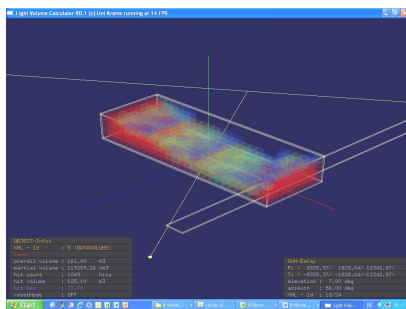
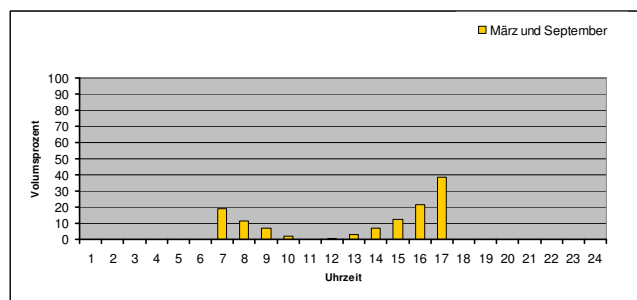
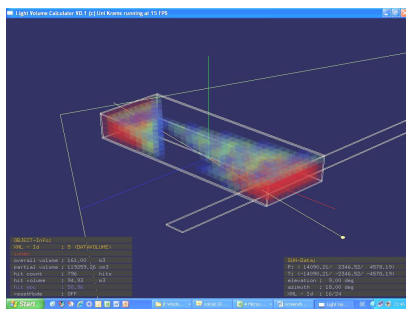
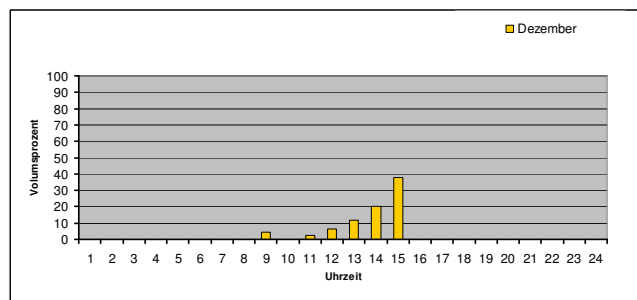
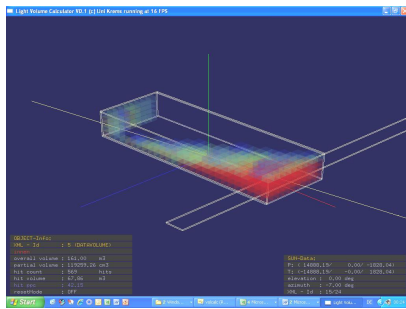
Datenblatt Typ T_GGG_B460_T1400_A60



T_GGG_B460_T1400_A60													Sum/Average	
LPF	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	73 %
HWB	42	86	93	59	60	80	78	80	60	59	93	86	42	24 kWh/m ²
KB	7,5	7,3	3,8	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,9	7,5	0,0	51 kWh/m ²
KB	0,0	0,0	0,0	0,2	4,9	9,4	11,1	11,4	9,3	4,3	0,8	0,0	0,0	

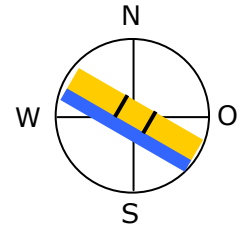


Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]

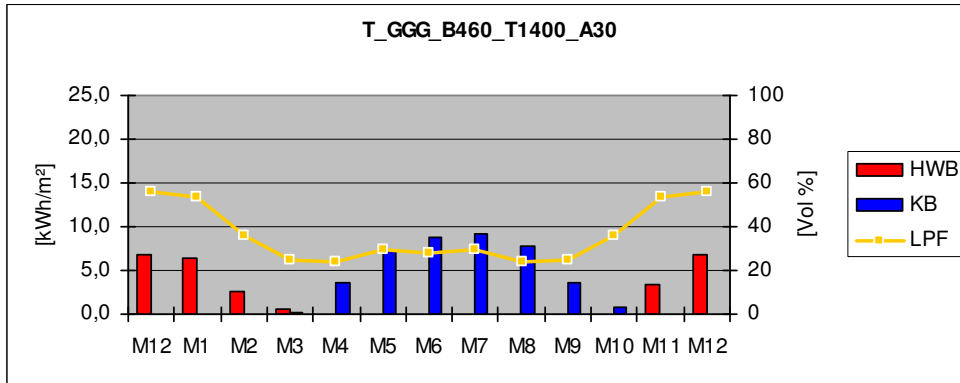


Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

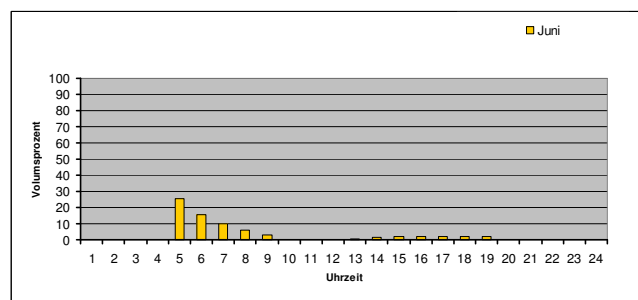
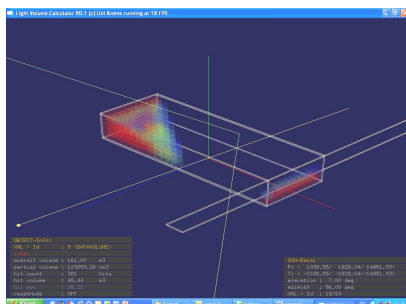
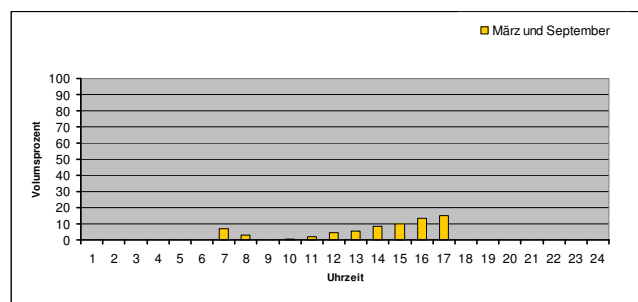
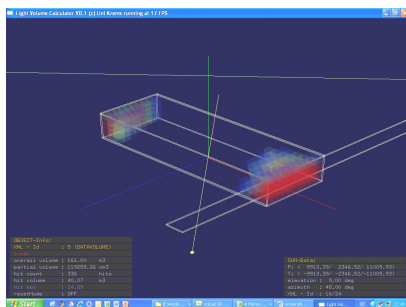
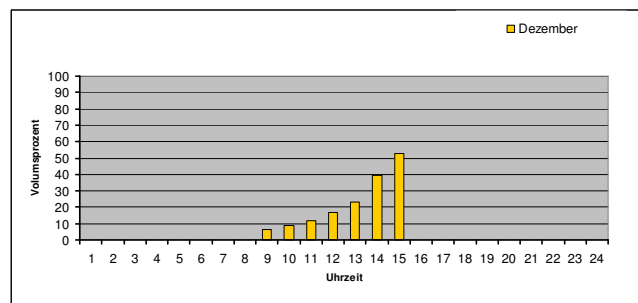
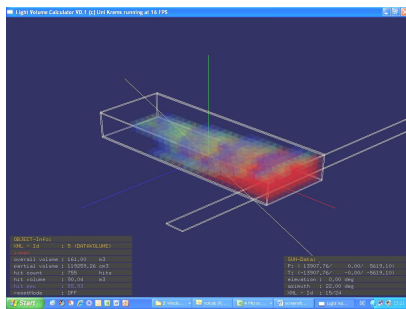
Datenblatt Typ T_GGG_B460_T1400_A30



T_GGG_B460_T1400_A30													Sum/Average	
LPF	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	35 %
HWB	6,9	6,3	2,7	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,4	6,9	20 kWh/m ²
KB	0,0	0,0	0,0	0,3	3,6	7,3	8,8	9,2	7,8	3,5	0,8	0,0	0,0	41 kWh/m ²

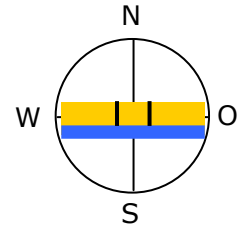


Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]

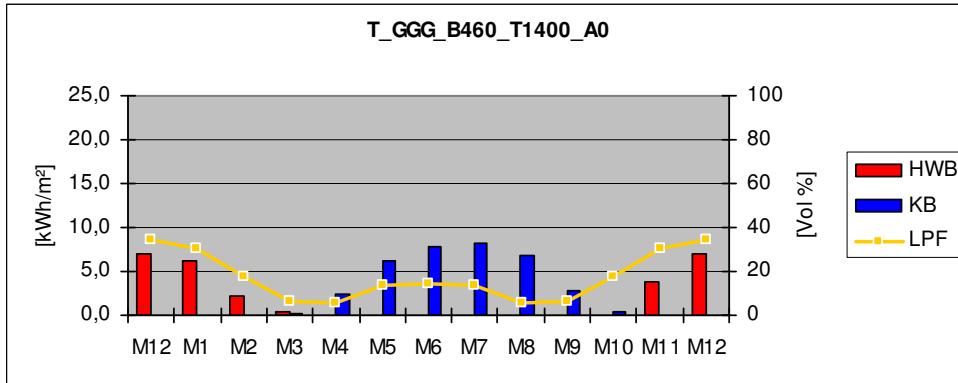


Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

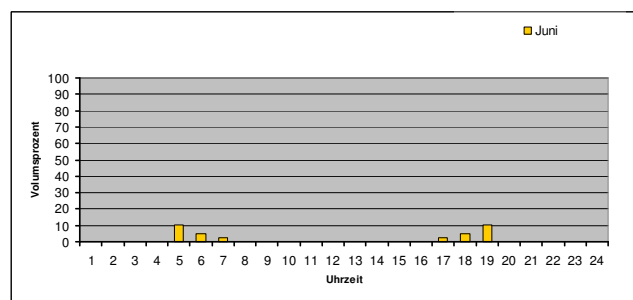
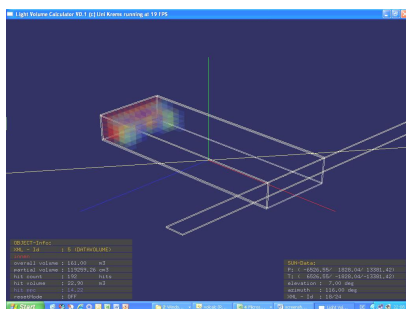
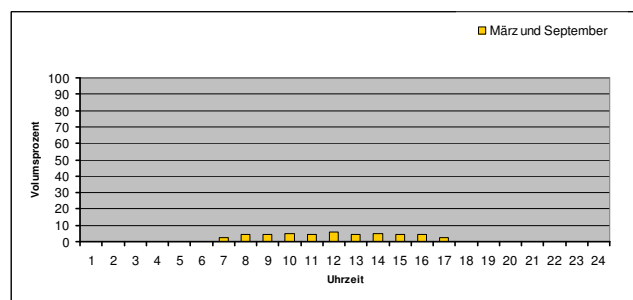
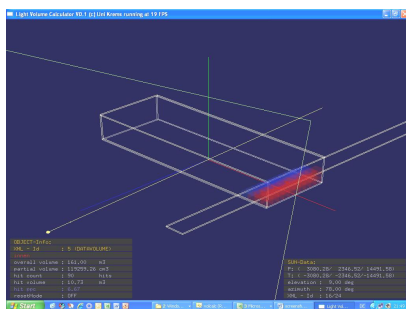
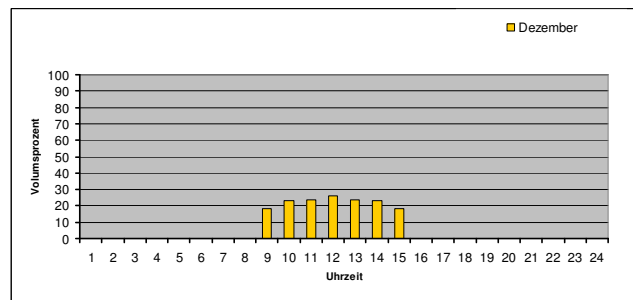
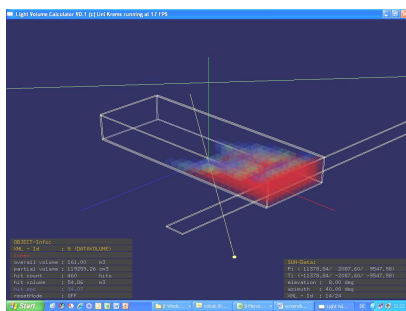
Datenblatt Typ T_GGG_B460_T1400_A0



T_GGG_B460_T1400_A0														
	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	Sum/Average
LPF	34	31	17	7	6	13	14	13	6	7	17	31	34	16 %
HWB	6,9	6,1	2,2	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,8	6,9	20 kWh/m ²
KB	0,0	0,0	0,0	0,2	2,5	6,2	7,9	8,3	6,8	2,9	0,5	0,0	0,0	35 kWh/m ²

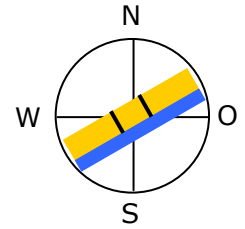


Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]

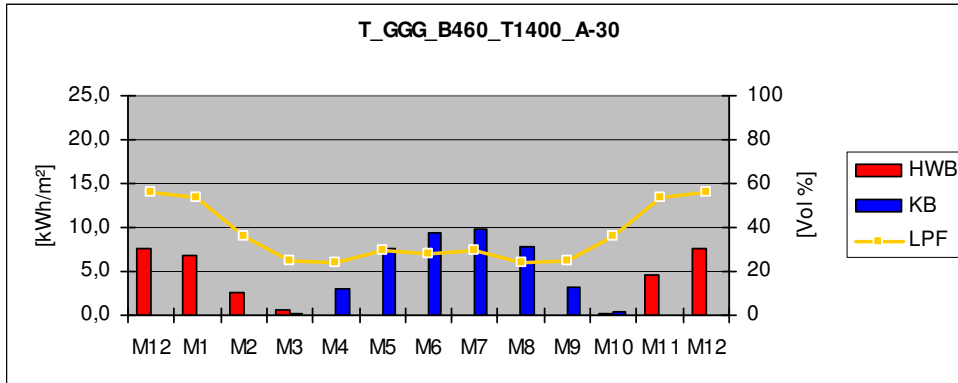


Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

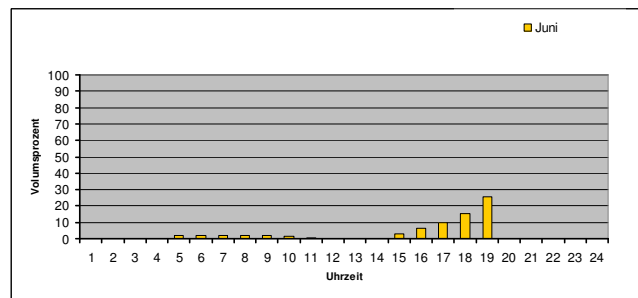
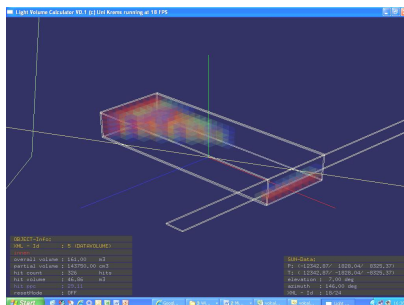
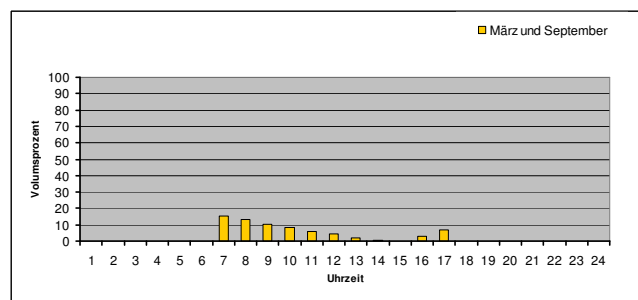
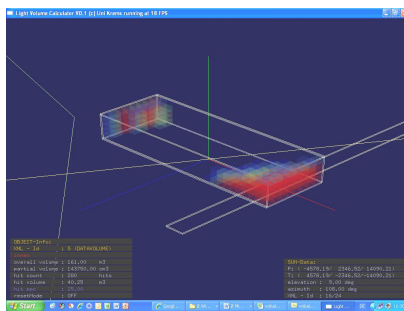
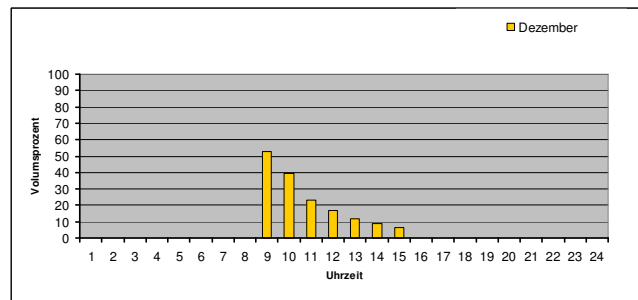
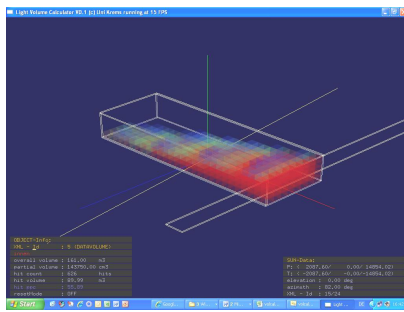
Datenblatt Typ T_GGG_B460_T1400_A-30



T_GGG_B460_T1400_A-30													Sum/Average	
LPF	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	35 %
HWB	7,7	6,9	2,7	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	4,7	7,7	23 kWh/m ²	
KB	0,0	0,0	0,0	0,1	2,9	7,5	9,4	9,8	7,7	3,2	0,3	0,0	41 kWh/m ²	

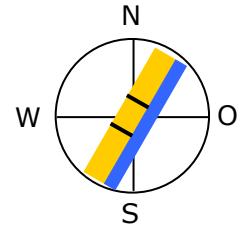


Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]

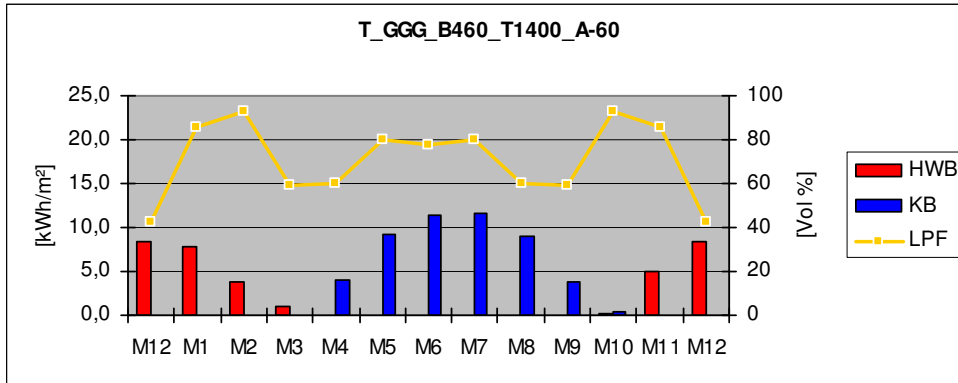


Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

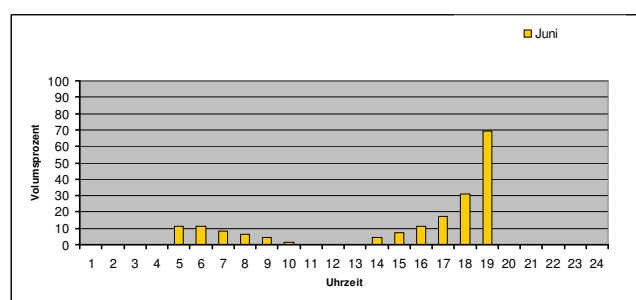
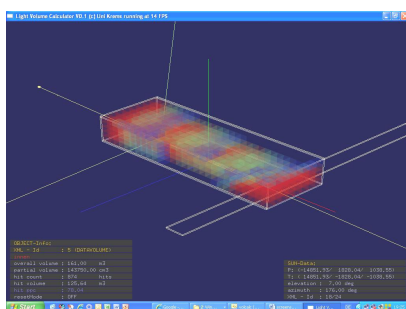
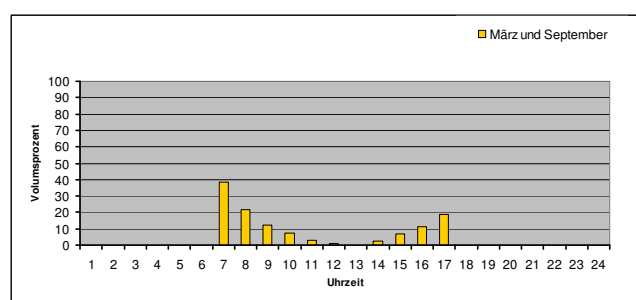
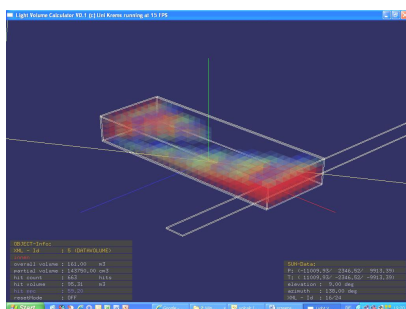
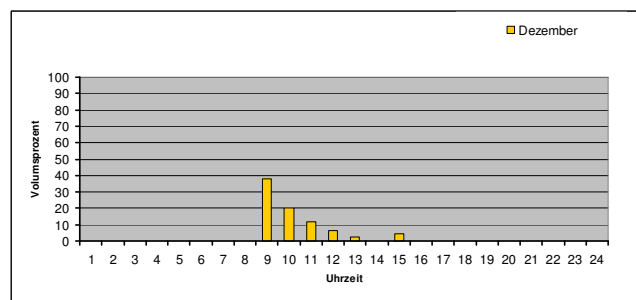
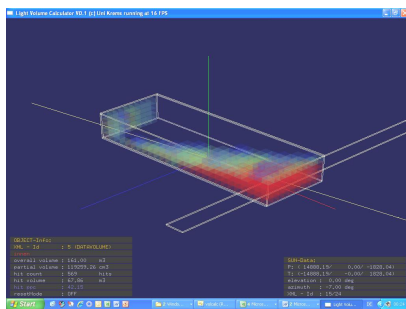
Datenblatt Typ T_GGG_B460_T1400_A-60



T_GGG_B460_T1400_A-60													Sum/Average	
LPF	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	73 %
HWB	8,4	7,9	3,8	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	5,1	8,4	26 kWh/m ²
KB	0,0	0,0	0,0	0,1	3,9	9,2	11,4	11,7	9,1	3,7	0,4	0,0	0,0	49 kWh/m ²

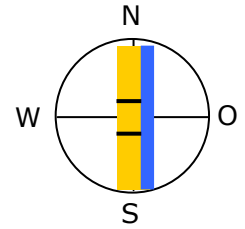


Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]

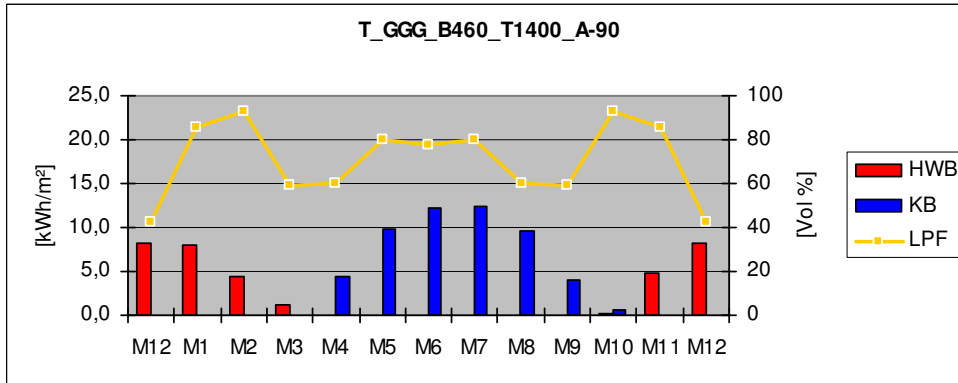


Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

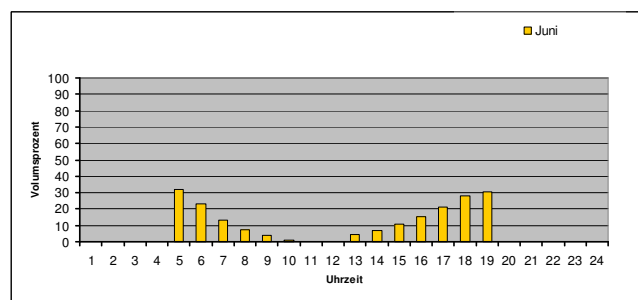
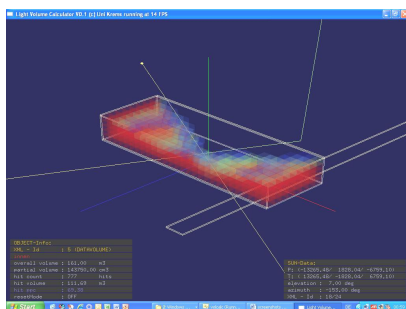
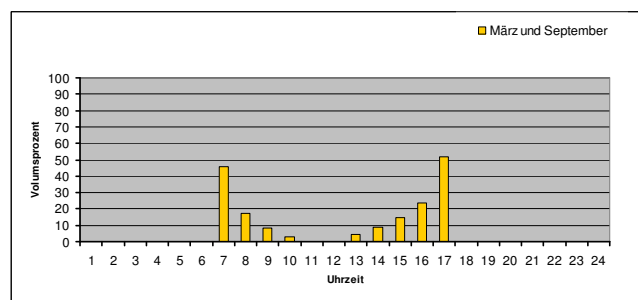
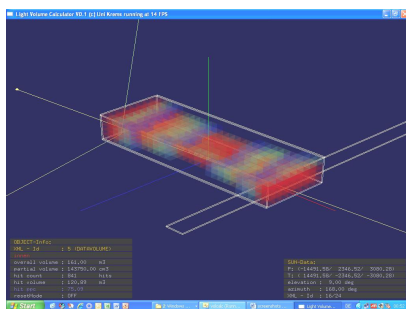
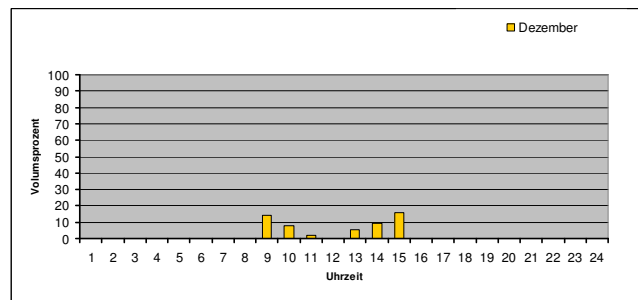
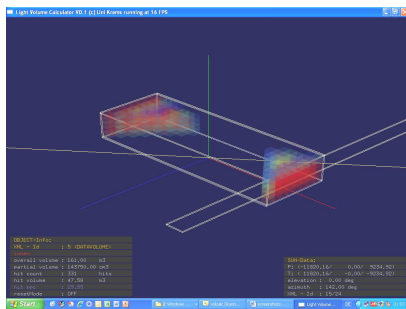
Datenblatt Typ T_GGG_B460_T1400_A-90



T_GGG_B460_T1400_A-90													Sum/Average	
LPF	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	69 %
HWB	8,3	8,0	4,4	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	4,9	8,3	27 kWh/m ²
KB	0,0	0,0	0,0	0,1	4,3	9,8	12,1	12,4	9,7	4,0	0,5	0,0	0,0	53 kWh/m ²

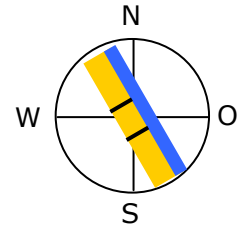


Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]

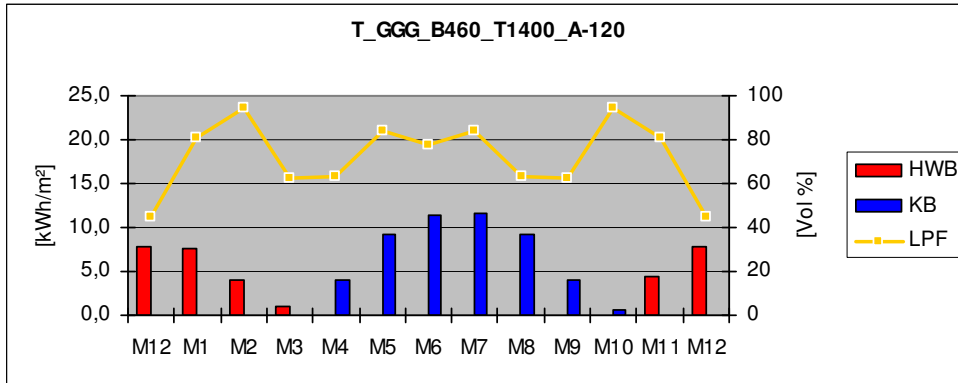


Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

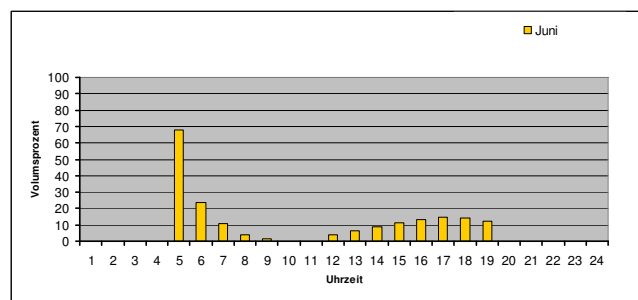
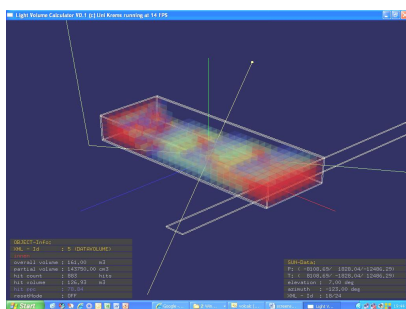
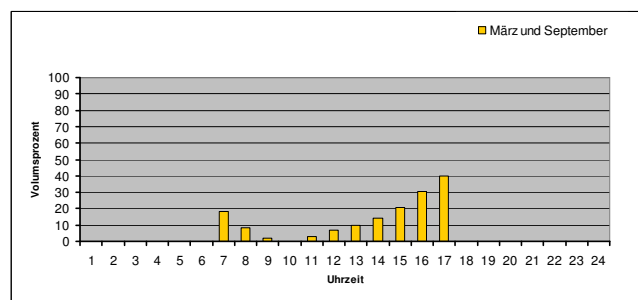
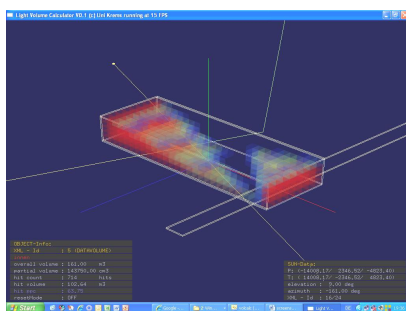
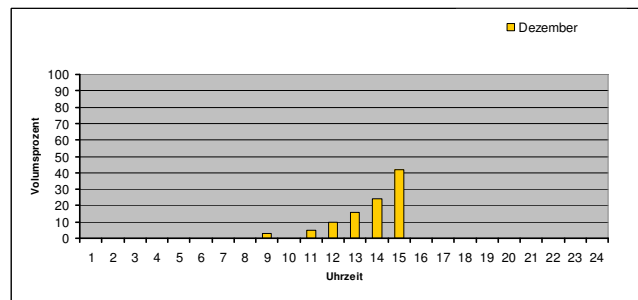
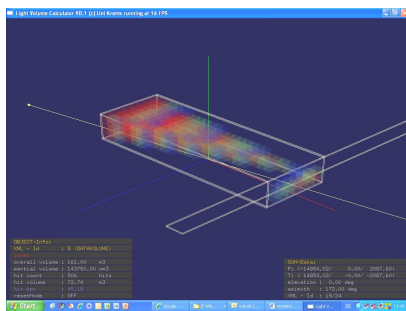
Datenblatt Typ T_GGG_B460_T1400_A-120



T_GGG_B460_T1400_A-120													Sum/Average		
LPF	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12		74 %
HWB	7,8	7,5	4,0	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,3	7,8		25 kWh/m ²
KB	0,0	0,0	0,0	0,1	4,1	9,2	11,4	11,6	9,3	4,0	0,6	0,0	0,0		50 kWh/m ²

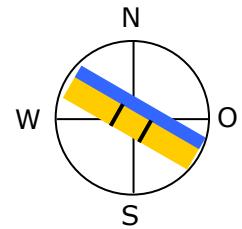


Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]

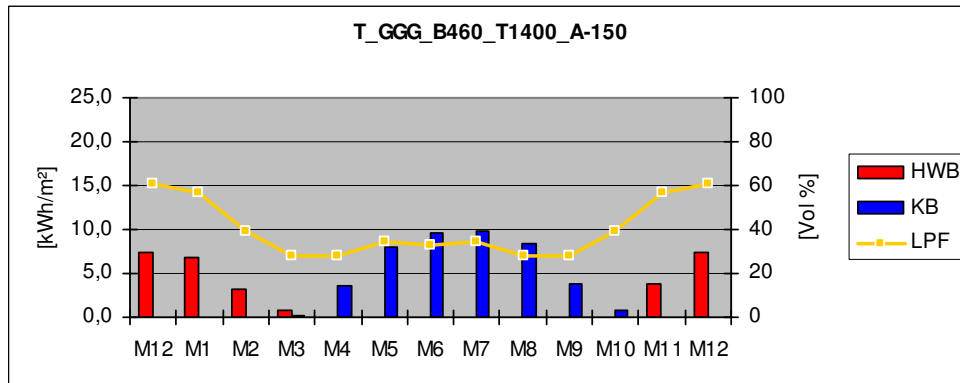


Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

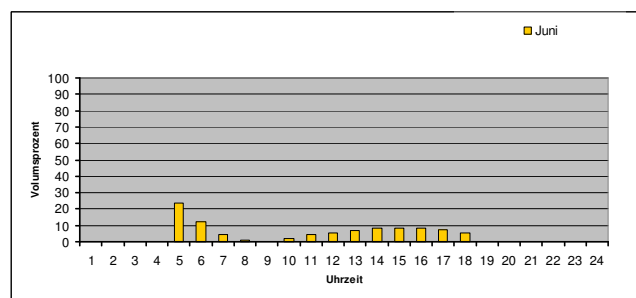
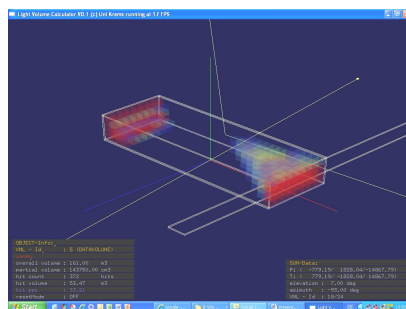
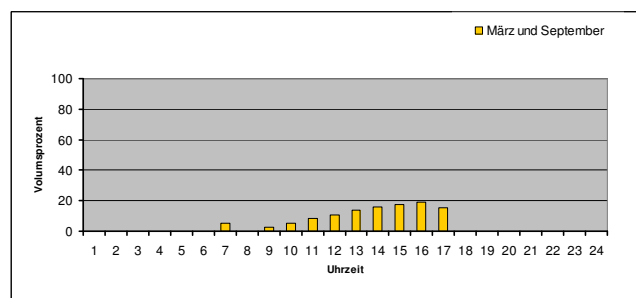
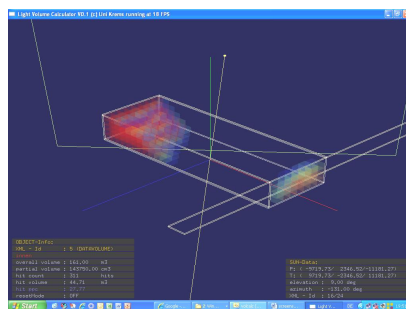
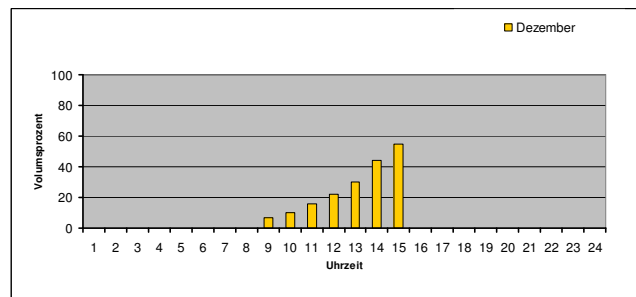
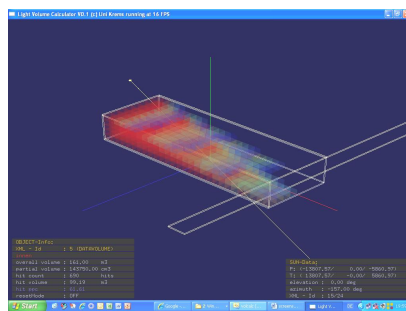
Datenblatt Typ T_GGG_B460_T1400_A-150



T_GGG_B460_T1400_A-150													Sum/Average	
LPF	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	39 %
HWB	7,4	6,9	3,2	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,9	7,4	22 kWh/m ²
KB	0,0	0,0	0,0	0,2	3,6	8,0	9,5	9,9	8,4	3,8	0,7	0,0	0,0	44 kWh/m ²



Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]



Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

8.6.3. Vergleichende Ergebnisauswertung

8.6.3.1. T_GGG_B460_T1400

Mittelwerte über alle Ausrichtungen

LPF 52%

HWB 24 kWh/m²a

KB 46 kWh/m²a

Definition der dreistufigen Bewertungsskala

LPF Mittelfeld um $\pm 33\%$ vom Mittelwert

HWB Mittelfeld um $\pm 5\%$ vom Mittelwert

KB Mittelfeld um $\pm 10\%$ vom Mittelwert

Die folgende Tabelle (Tabelle 38) zeigt eine Ergebnisübersicht über den Light Penetration Factor, den Heizwärmebedarf und den Kühlbedarf des T_GGG_B460_T1400 entsprechend den zwölf gewählten Ausrichtungen.

	LPF [%]	HWB [kWh/m ²]	KB [kWh/m ²]
T_GGG_B460_T1400_A180	22	22	40
T_GGG_B460_T1400_A150	39	24	43
T_GGG_B460_T1400_A120	74	27	51
T_GGG_B460_T1400_A90	69	27	55
T_GGG_B460_T1400_A60	73	24	51
T_GGG_B460_T1400_A30	35	20	41
T_GGG_B460_T1400_A0	16	20	35
T_GGG_B460_T1400_A-30	35	23	41
T_GGG_B460_T1400_A-60	73	26	49
T_GGG_B460_T1400_A-90	69	27	53
T_GGG_B460_T1400_A-120	74	25	50
T_GGG_B460_T1400_A-150	39	22	44

Tabelle 38: Ergebnisübersicht T_GGG_B460_T1400

8.6.3.2. Basismodell T_GGG_B230_T1100

Mittelwerte über alle Ausrichtungen

LPF 49%

HWB 23 kWh/m²a

KB 66 kWh/m²a

Definition der dreistufigen Bewertungsskala

LPF Mittelfeld um $\pm 33\%$ vom Mittelwert

HWB Mittelfeld um $\pm 7,8\%$ vom Mittelwert

KB Mittelfeld um $\pm 8\%$ vom Mittelwert

Die folgende Tabelle (Tabelle 39) zeigt eine Ergebnisübersicht über den Light Penetration Factor, den Heizwärmebedarf und den Kühlbedarf des T_GGG_B230_T1100 entsprechend den zwölf gewählten Ausrichtungen.

	LPF [%]	HWB [kWh/m ²]	KB [kWh/m ²]
T_GGG_B230_T1100_A180	24	21	55
T_GGG_B230_T1100_A150	38	24	60
T_GGG_B230_T1100_A120	71	27	72
T_GGG_B230_T1100_A90	64	28	74
T_GGG_B230_T1100_A60	69	22	76
T_GGG_B230_T1100_A30	32	17	62
T_GGG_B230_T1100_A0	16	17	54
T_GGG_B230_T1100_A-30	32	21	60
T_GGG_B230_T1100_A-60	69	26	71
T_GGG_B230_T1100_A-90	64	27	74
T_GGG_B230_T1100_A-120	71	25	69
T_GGG_B230_T1100_A-150	38	22	61

Tabelle 39: Ergebnisübersicht T_GGG_B230_T1100

8.6.3.3. Basismodell T_GWG_B460_T1150

Mittelwerte über alle Ausrichtungen

LPF 33%

HWB 33 kWh/m²a

KB 24 kWh/m²a

Definition der dreistufigen Bewertungsskala

LPF Mittelfeld um ± 18% vom Mittelwert

HWB Mittelfeld um ± 12% vom Mittelwert

KB Mittelfeld um ± 13% vom Mittelwert

Die folgende Tabelle (Tabelle 40) zeigt eine Ergebnisübersicht über den Light Penetration Factor, den Heizwärmebedarf und den Kühlbedarf des T_GWG_B460_T1150 entsprechend den zwölf gewählten Ausrichtungen.

	LPF [%]	HWB [kWh/m ²]	KB [kWh/m ²]
T_GWG_B460_T1150_A180	27	26	35
T_GWG_B460_T1150_A150	36	30	36
T_GWG_B460_T1150_A120	52	36	35
T_GWG_B460_T1150_A90	46	40	31
T_GWG_B460_T1150_A60	32	42	24
T_GWG_B460_T1150_A30	10	42	17
T_GWG_B460_T1150_A0	4	42	15
T_GWG_B460_T1150_A-30	10	42	24
T_GWG_B460_T1150_A-60	32	41	32
T_GWG_B460_T1150_A-90	64	27	74
T_GWG_B460_T1150_A-120	52	28	45
T_GWG_B460_T1150_A-150	36	26	41

Tabelle 40: Ergebnisübersicht T_GWG_B460_T1150

8.6.3.4. Basismodell T_GWG_B230_T900

Mittelwerte über alle Ausrichtungen

LPF 33%

HWB 35 kWh/m²a

KB 34 kWh/m²a

Definition der dreistufigen Bewertungsskala

LPF Mittelfeld um ± 18% vom Mittelwert

HWB Mittelfeld um ± 18% vom Mittelwert

KB Mittelfeld um ± 7% vom Mittelwert

Die folgende Tabelle (Tabelle 41) zeigt eine Ergebnisübersicht über den Light Penetration Factor, den Heizwärmebedarf und den Kühlbedarf des T_GWG_B230_T900 entsprechend den zwölf gewählten Ausrichtungen.

	LPF [%]	HWB [kWh/m ²]	KB [kWh/m ²]
T_GWG_B230_L900_A180	27	26	35
T_GWG_B230_L900_A150	36	30	36
T_GWG_B230_L900_A120	52	36	35
T_GWG_B230_L900_A90	46	40	31
T_GWG_B230_L900_A60	32	42	24
T_GWG_B230_L900_A30	10	42	17
T_GWG_B230_L900_A0	4	42	15
T_GWG_B230_L900_A-30	10	42	21
T_GWG_B230_L900_A-60	32	41	32
T_GWG_B230_L900_A-90	64	27	74
T_GWG_B230_L900_A-120	52	28	45
T_GWG_B230_L900_A-150	35	26	41

Tabelle 41: Ergebnisübersicht T_GWG_B230_T900

8.7. Interpretation und Schlussfolgerungen

8.7.1. Vergleichende Analyse der Potentiale über die Orientierungen

Als erste Form der Interpretation werden die Zusammenhänge zwischen Bereichen der Orientierung und den einzelnen drei Potentialen analysiert. Aufgrund ihrer grundsätzlich unterschiedlichen Charakteristik werden dabei die Paare GGG und GWG getrennt behandelt.

8.7.1.1. Ergebnisdarstellung in Kreisdiagrammen

Zur Interpretation der Ergebnisse werden grafische Übersichtsdarstellungen angefertigt, wie sie nachfolgend abgebildet sind: Für jeden der vier Basistypen (GGG und GWG, jeweils B460 und B230) werden die Ergebnisse aus der A-B-C-Analyse in einem Kreisdiagramm eingetragen.

Wie schon im vorangegangenen Kapitel erläutert, bezeichnet eine graue Einfärbung jene vier Ergebniskennzahlen, die am Nächsten zum Mittelwert aus allen Orientierungen angeordnet sind und bezeichnet eine grüne Einfärbung die demgegenüber besseren und eine rote Einfärbung die demgegenüber schlechteren Werte des jeweiligen Potentials.

Im äußeren Ring der nachfolgenden Darstellung ist der LPF eingetragen, im mittleren der HWB und im inneren der KB (Abbildung 55). Im Anschluss wird diese vergleichende Kreisdarstellung auf die Typen GGG (Abbildung 56) und die Typen GWG (Abbildung 57) angewandt.¹⁰⁸⁷

¹⁰⁸⁷ Abbildung 55 bis Abbildung 57: Holzer, Hammer, 2008

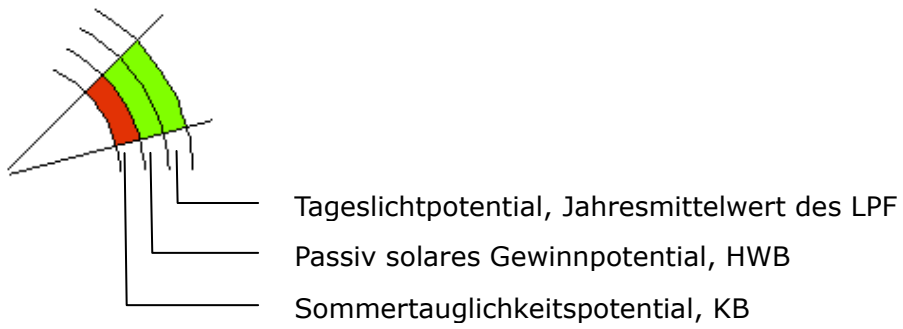


Abbildung 55: Legende zur Ergebnisdarstellung in Kreisdiagrammen

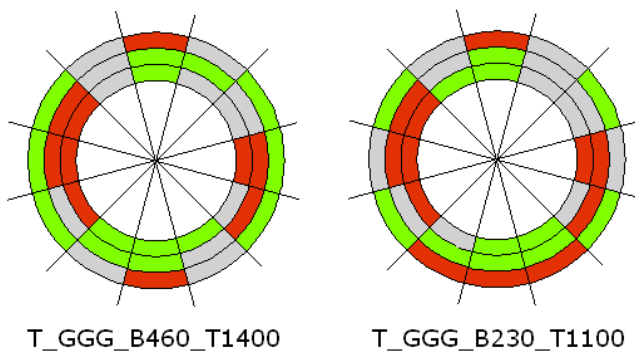


Abbildung 56: Ergebnisdarstellung in Kreisdiagrammen für die Typen GGG

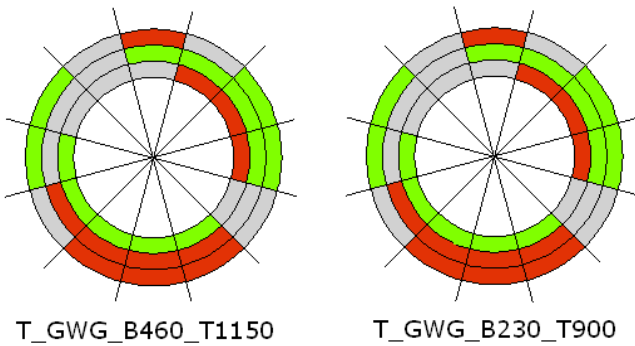


Abbildung 57: Ergebnisdarstellung in Kreisdiagrammen für die Typen GWG

8.7.1.2. Typen GGG

- > Der Durchlichtungsfaktor (LPF) weist in beiden Basismodellen GGG (B460 und B230) seine Maxima bei Ost-West-Orientierung der Wohneinheit auf, konkret in den Orientierungen $A\pm 60$ und $A\pm 120$ und, beim Basismodell B460 auch in der Orientierung $A\pm 90$. Als hinsichtlich der Durchlichtung problematisch erweisen sich die Nord-Süd-Ausrichtungen A0 und A180 sowie im schmalen Basismodell auch die Orientierungen $A\pm 30$.
- > Der Heizwärmebedarf (HWB) weist seine Optima bei Nord-Süd-Ausrichtung der Wohneinheit auf, konkret bei A0 und A180 sowie – bedingt – auch bei $A\pm 30$ und $A\pm 150$ auf. Überdurchschnittlich hoher HWB tritt bei Ost-West-Orientierung auf, demnach bei $A\pm 90$ und auch bei $A+120$ und $A-60$.
- > Der Kühlbedarf (KB) erreicht wie der HWB seine Optima im Bereich annähernder Nord-Süd-Orientierung, konkret bei A0 und A180, sowie bedingt bei $A\pm 30$

Zusammenfassend bestätigt sich bei der Analyse der Typen GGG die Hypothese, wonach ein systematischer Zielkonflikt zwischen der Optimierung der Tageslichtversorgung und der Optimierung des tageslichtinduzierten thermischen Verhaltens eines Innenraumes in Bezug auf die Ausrichtung der diesem Innenraum zugeordneten transparenten vertikalen Flächen vorliegt: Es gibt keine einzige Orientierung, bei der eine der beiden thermischen Potentiale und das Tageslichtpotential gleichzeitig im „grünen“ Bereich liegen.

8.7.1.3. Typen GWG

- > Der Durchlichtungsfaktor (LPF) weist in beiden Basismodellen GWG (B460 und B230) seine Maxima bei Ost- bis Nordost und bei West- bis Nordwestorientierung der opaken Trennwand gegen den Laubengang auf, demnach in den Orientierungen $A\pm 90$ und $A\pm 120$. Als hinsichtlich der Durchlichtung problematisch erweisen sich wenig überraschend jene Ausrichtungen, bei denen die opake Trennwand gegen den Laubengang gegen Süden orientiert ist, also $A0$ und $A\pm 30$.
- > Der Heizwärmebedarf (HWB) weist seine Optima bei Nord- bis Ost-Ausrichtung der opaken Trennwand gegen den Laubengang auf, konkret bei $A-90$ bis $A-150$ und $A180$. Überdurchschnittlich hoher HWB tritt rund um die Südorientierung der opaken Trennwand gegen den Laubengang auf, konkret bei $A0$, $A\pm 30$ und $A60$.
- > Der Kühlbedarf (KB) erreicht seine Optima im Bereich von SSO bis O-Orientierung der opaken Trennwand gegen den Laubengang, also bei $A-30$ bis $A90$. Die höchsten Werte des Kühlbedarfs werden erreicht bei NNO- bis O-Orientierungen der opaken Trennwand gegen den Laubengang, also bei $A-150$ bis $A-90$.

Bei der Zusammenschau der Ergebnisse des Typs GWG ergeben sich zwar – im Gegensatz zum Typ GGG – Orientierungen, bei denen sowohl eine der beiden thermischen Potentiale und das Tageslichtpotential im „grünen“ Bereich liegen. Es zeigt sich aber ein eindeutiges Ausschlusskriterium zwischen Orientierungen mit guter Sommertauglichkeit und gutem passiv solarem Gewinnpotential.

8.7.2. Bildung ergebnisbezogener Typologien

Aufbauend auf der oben vorgenommenen orientierungsabhängigen Analyse der einzelnen Potentiale werden nun Typen entsprechend ihrer spezifischen Performance charakterisiert und in Gruppen zusammengefasst. Differenziert werden:

- > Moderate Typen
mit mittlerer Performance in allen Potentialen
- > Dunkle Typen
mit niedrigem LPF bei teils guter thermischer Performance
- > Thermisch mehrfach problematische Typen
mit hohem HWB und hohem KB
- > Heizproblematische Typen
mit hohem HWB
- > Überhitzungstypen
mit hohem KB

Zur leichteren Orientierung wird nachfolgend, zusätzlich zur eingeführten Codierung, auch die Ausrichtung des Laubengangs in der üblichen Bezeichnung der Himmelsrichtungen vor der Typenbezeichnung notiert. Wieder erweist sich eine getrennte Betrachtung der Typen GGG und GWG als notwendig und sinnvoll.

8.7.2.1. Moderate Typen

Die "moderaten Typen" haben mittelmäßige und bis gute Ergebnisse (Tabelle 42) in allen drei Potentialen.

In der Ausformung GGG handelt es sich dabei um die die Typen mit einer um $\pm 30^\circ$ aus der Nord-Süd-Richtung gedrehten Längsachse der Wohnung, sowohl bei nord-, als auch südseitig orientiertem Laubengang.¹⁰⁸⁸

In der Ausformung GWG treten moderate Typen in den Ausrichtungen A90bis A150 und in der Ausrichtung A-60 auf, demnach bei W- bis NNW- und bei OSO-Orientierung der opaken Trennwand gegen den Laubengang.

	LPF [%]	HWB [kWh/m ²]	KB [kWh/m ²]
T_GGG_B460_T1400_A30	35	20	41
T_GGG_B460_T1400_A-30	35	23	41
T_GGG_B460_T1400_A150	39	24	43
T_GGG_B460_T1400_A-150	39	22	44
T_GGG_B230_T1100_A150	38	24	60
T_GGG_B230_T1100_A-150	38	22	61
T_GWG_B460_T1150_A150	36	30	36
T_GWG_B460_T1150_A120	52	36	35
T_GWG_B460_T1150_A90	46	40	31
T_GWG_B460_T1150_A-60	32	41	32
T_GWG_B230_L900_A150	36	30	36
T_GWG_B230_L900_A120	52	36	35
T_GWG_B230_L900_A90	46	40	31
T_GWG_B230_L900_A-60	32	41	32

Tabelle 42: Ergebnisse "Moderate Typen"

¹⁰⁸⁸ Eine Ausnahme bildet die Orientierung A \pm 30 beim schmalen Typ GGG_B230. Hier wirken sich die Flankenverschattung durch die Trennwände und die Laubengangverschattung zu einem bereits schlechten Tageslichtpotential aus.

8.7.2.2. Thermisch mehrfach problematische Typen

Die "thermisch mehrfach problematischen Typen" weisen Defizite sowohl hinsichtlich des passiv solaren Gewinnpotentials als auch hinsichtlich des Sommertauglichkeitspotentials auf wie die folgende Tabelle zeigt (Tabelle 43).

In der Ausformung GGG sind das die Typen mit einer ost-west gerichteten Längsachse der Wohnung, sowohl bei ost-, als auch westseitig orientiertem Laubengang, im Detail die Ausrichtungen A±90 und A120. Das Tageslichtpotential liegt bei diesen Typen an der Schwelle vom mittleren zum guten Bereich.

In der Ausformung GWG treten mehrfach thermisch problematische Typen in keiner Orientierung auf.

	LPF [%]	HWB [kWh/m ²]	KB [kWh/m ²]
T_GGG_B460_T1400_A120	74	27	51
T_GGG_B460_T1400_A90	69	27	55
T_GGG_B460_T1400_A-90	69	27	53
T_GGG_B230_T1100_A120	71	27	72
T_GGG_B230_T1100_A90	64	28	74
T_GGG_B230_T1100_A-90	64	27	74

Tabelle 43: Ergebnisse "Thermisch mehrfach problematische Typen"

8.7.2.3. Dunkle Typen

Die "dunklen Typen" weisen allesamt schlechte Tageslichtpotentiale auf, bei gleichzeitig durchwegs gutem Abschneiden in beiden thermischen Kategorien (Tabelle 44).

Im Fall GGG sind das die Typen mit einer exakt Nord-Süd gerichteten Längsachse der Wohnung, sowohl bei nord-, als auch südseitig orientiertem Laubengang. Im Fall der schmalen Wohneinheit dehnt sich der Bereich der dunklen Typen auch auf Laubengangorientierungen nach SSW und SSO aus.

Im Fall GWG ergibt sich ein ähnliches Bild, wenn auch auf zum Teil eklatant niedrigerem Niveau.

	LPF [%]	HWB [kWh/m ²]	KB [kWh/m ²]
T_GGG_B460_T1400_A180	22	22	40
T_GGG_B460_T1400_A0	16	20	35
T_GGG_B230_T1100_A180	24	21	55
T_GGG_B230_T1100_A0	16	17	54
T_GWG_B460_T1150_A180	27	26	35
T_GWG_B460_T1150_A30	10	42	17
T_GWG_B460_T1150_A0	4	42	15
T_GWG_B460_T1150_A-30	10	42	24
T_GWG_B230_L900_A180	27	26	35
T_GWG_B230_L900_A30	10	42	17
T_GWG_B230_L900_A0	4	42	15
T_GWG_B230_L900_A-30	10	42	21

Tabelle 44: Ergebnisse "Dunkle Typen"

8.7.2.4. Heizproblematische Typen

Die "heizproblematischen Typen" weisen allesamt ein schlechtes Passiv Solares Gewinnpotential und somit einen hohen HWB auf, bei gleichzeitig zumindest mittlerem KB wie die Tabelle im Anschluss zeigt (Tabelle 45).

Es sind das im Fall GGG die Typen mit einem OSO-orientiertem Laubengang. Der LPF weist dabei einen Wert im guten Bereich auf.

Im Fall GWG sind es jene Typen mit einem SSO- bis WSW-orientierten Laubengang. Der LPF liegt dabei überwiegend im schlechten Bereich. Es handelt sich demnach um gleichzeitig heizproblematische und dunkle Typen.

	LPF [%]	HWB [kWh/m ²]	KB [kWh/m ²]
T_GGG_B460_T1400_A-60	73	26	49
T_GGG_B230_T1100_A-60	69	26	71
T_GWG_B460_T1150_A60	32	42	24
T_GWG_B460_T1150_A30	10	42	17
T_GWG_B460_T1150_A0	4	42	15
T_GWG_B460_T1150_A-30	10	42	24
T_GWG_B230_L900_A60	32	42	24
T_GWG_B230_L900_A30	10	42	17
T_GWG_B230_L900_A0	4	42	15
T_GWG_B230_L900_A-30	10	42	21

Tabelle 45: Ergebnisse "Heizproblematische Typen"

8.7.2.5. Überhitzungstypen

Die "Überhitzungstypen" weisen allesamt ein schlechtes Sommertauglichkeitspotential und somit einen hohen KB auf. Gleichzeitig ist der HWB im mittleren oder guten Bereich, wie die folgende Tabelle (Tabelle 46) zeigt.

Im Fall GGG sind das die Typen mit einem WSW-orientierten Laubengang.

Im Fall GWG handelt es sich dabei um dieselbe Ausrichtung sowie um die NNO- bis O-Orientierung der opaken Trennwand gegen den Laubengang.

	LPF [%]	HWB [kWh/m ²]	KB [kWh/m ²]
T_GGG_B460_T1400_A60	73	24	51
T_GGG_B230_T1100_A60	69	22	76
T_GWG_B460_T1150_A-90	64	27	74
T_GWG_B460_T1150_A-120	52	28	45
T_GWG_B460_T1150_A-150	36	26	41
T_GWG_B230_L900_A-90	64	27	74
T_GWG_B230_L900_A-120	52	28	45
T_GWG_B230_L900_A-150	35	26	41

Tabelle 46: Ergebnisse "Überhitzungstypen"

8.7.2.6. Darstellung der ergebnisbezogenen Typologien in Kreisdiagrammen

Nachfolgend wird die bereits eingeführte Kreisdarstellung (Abbildung 58) zur Veranschaulichung der fünf ergebnisorientierten Typen für T_GGG_B460_T1400 (Abbildung 59), für T_GGG_B230_T1100 (Abbildung 60), für T_GWG_B460_T1150 (Abbildung 61) und für T_GWG_B230_T900 (Abbildung 62) herangezogen.¹⁰⁸⁹

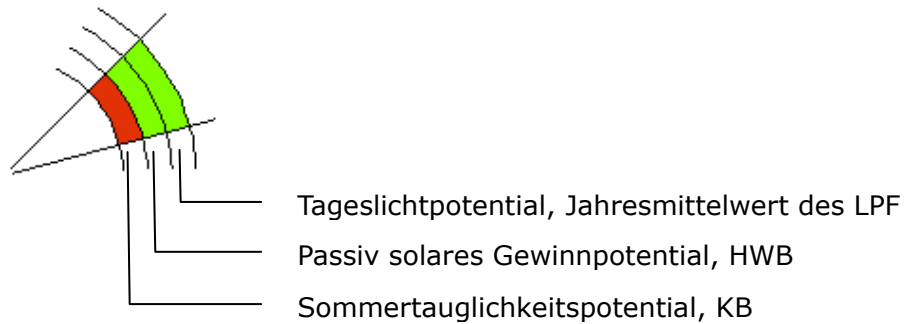


Abbildung 58: Legende zur Ergebnisdarstellung in Kreisdiagrammen

¹⁰⁸⁹ Abbildung 58 bis Abbildung 62: Holzer, Hammer, 2008

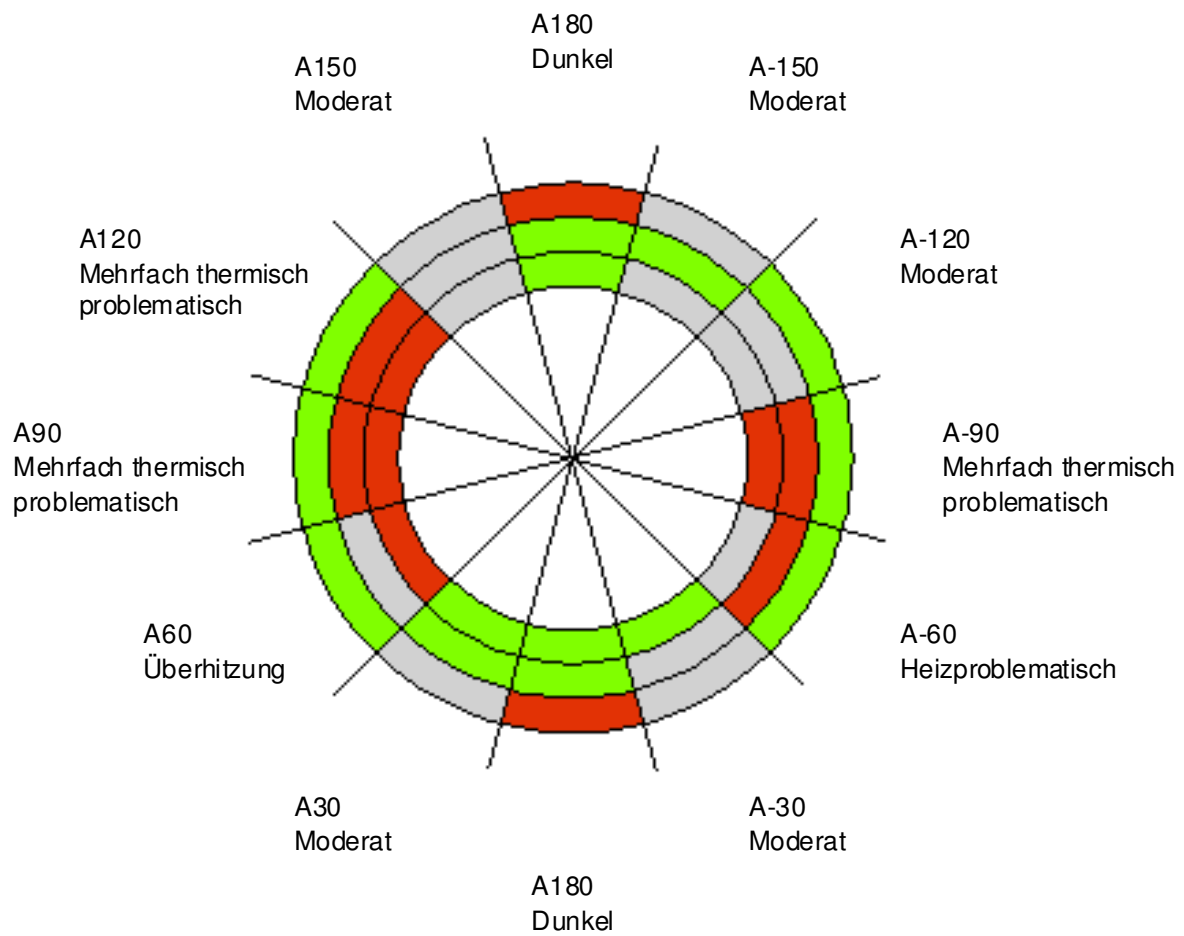


Abbildung 59: Ergebnisdarstellung im beschrifteten Kreisdiagramm für die Typen T_GGG_B460_T1400

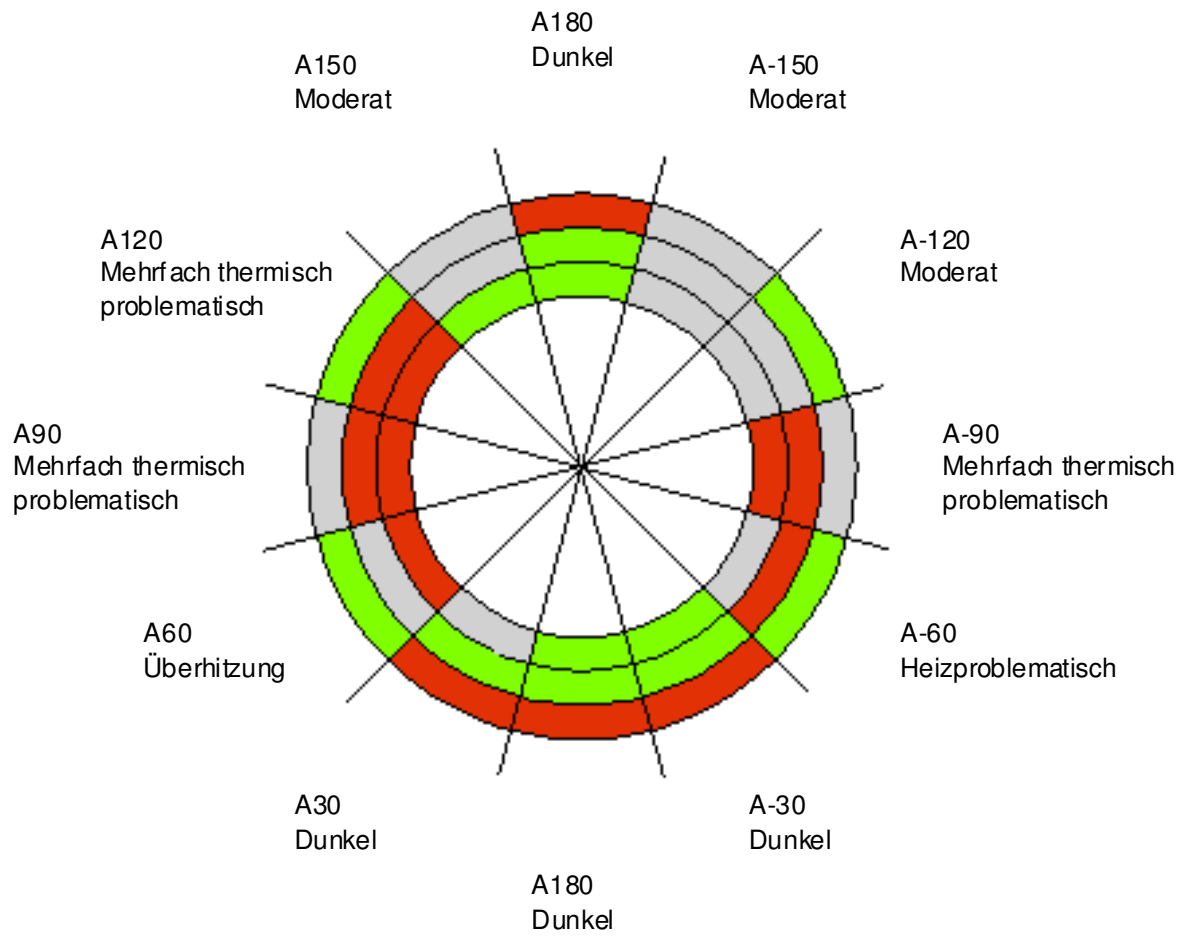


Abbildung 60: Ergebnisdarstellung im beschrifteten Kreisdiagramm für die Typen T_GGG_B230_T1100

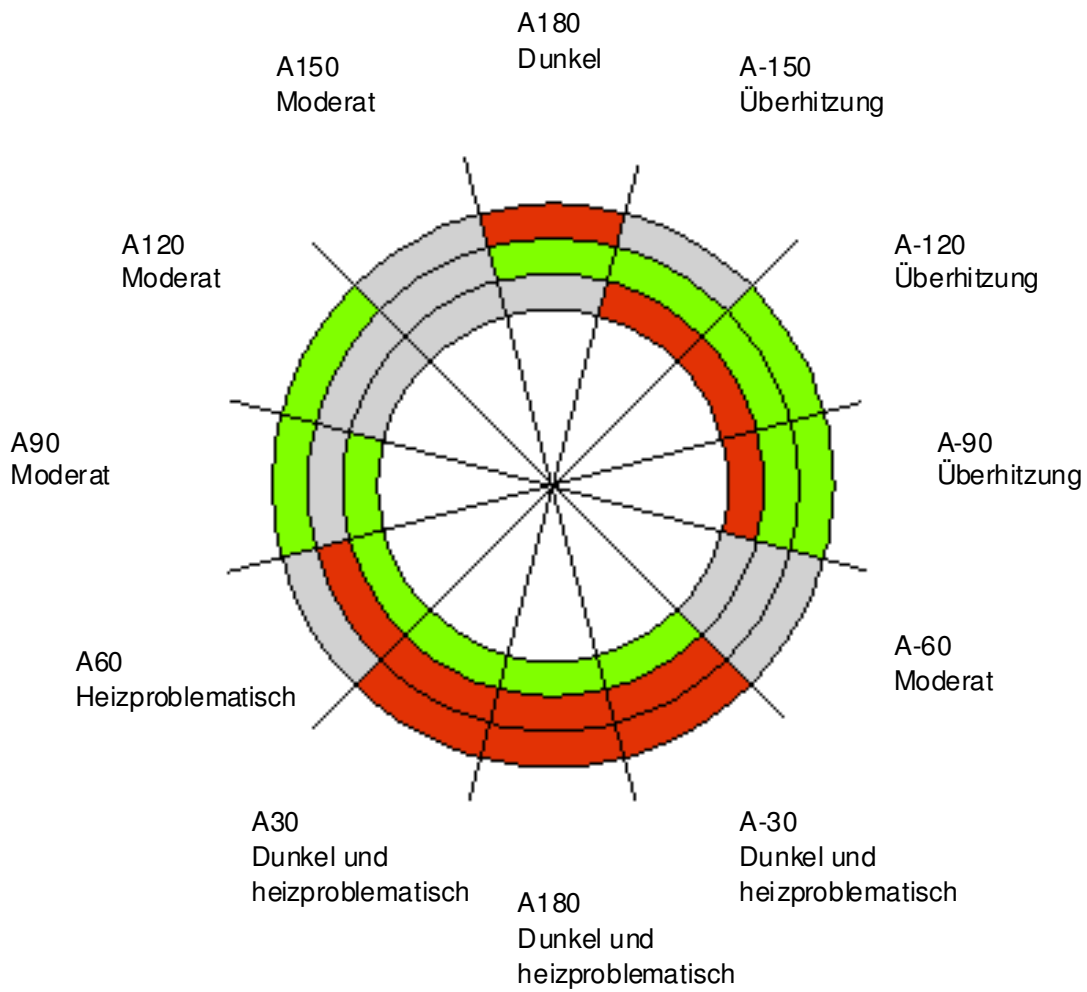


Abbildung 61: Ergebnisdarstellung im beschrifteten Kreisdiagramm für die Typen T_GWG_B460_T1150

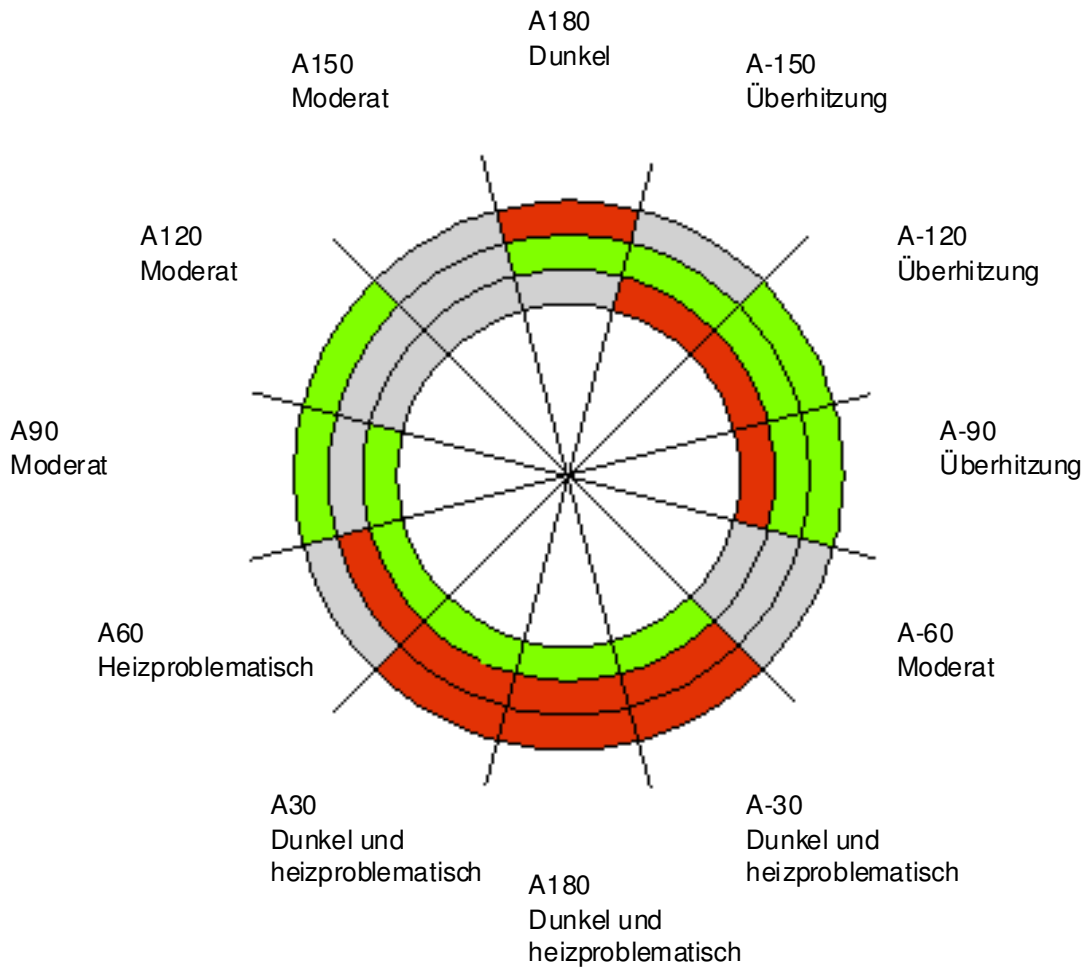


Abbildung 62: Ergebnisdarstellung im beschrifteten Kreisdiagramm für die Typen T_GWG_B230_T900

8.7.3. Vergleichende Analyse der vier Basismodelle

Über die Charakteristika unterschiedlicher Orientierungen innerhalb eines jeweiligen Basismodells hinaus bietet sich auch ein Vergleich der unterschiedlichen Basismodelle untereinander an.

Als Vergleichskennzahlen werden herangezogen:

- > Der Jahresmittelwert aus den Durchlichtungsfaktoren des jeweils 21. Tags jedes Monats.
- > Der Heizwärmebedarf über das ganze Jahr
- > Der Kühlbedarf über das ganze Jahr

Es ergibt sich:

- > Der Durchlichtungsfaktor LPF der Typen GGG ist deutlich, nämlich um ca. 50% höher als jener der Typen GWG, weitgehend unabhängig von der Breite des Basismodells.
- > Der HWB der Typen GGG liegt signifikant, nämlich um ca. 30%, unter jenem der Typen GWG, wiederum weitgehend unabhängig von der Breite des Basismodells.
- > Der KB der Typen GGG liegt erheblich, nämlich um ca. 90%, über jenem der Typen GWG. Die schmalen Typen weisen einen jeweils deutlich höheren KB auf als die breiten derselben Ausformung.

8.8. Zusammenfassung

Die vorliegende Potentialstudie untersucht mit einem sehr strikten konstruktivistischen Ansatz die grundsätzlichen thermischen und optischen Potentiale von zweiseitig belichtbaren Laubengangwohnungen.

Sie definiert zu diesem Zweck Basismodelle von Wohneinheiten vor dem realen baurechtlichen Hintergrund des Wiener Wohnbaus und untersucht diese in unterschiedlichen Konstellationen hinsichtlich Befensterung, Wohnungsbreite und -tiefe sowie Orientierung.

Die Arbeit hat die Hypothese bestätigt, dass zweiseitig belichtete Laubengangwohnungen ein grundsätzlich hohes Potential für gleichzeitig optische und thermische Qualität aufweisen. Sie hat aber auch bestätigt dass die Nutzung dieses Potentials eine sehr gute Kenntnis der Zusammenhänge, eine eingehende Prüfung der tatsächlichen Gegebenheiten und schließlich eine konsequente Umsetzung voraussetzt.

Prägnant gezeigt hat sich der gegenläufige Zusammenhang zwischen thermisch guter Performance im Sinne von Heizwärmebedarf und Kühlbedarf einerseits und gutem Tageslichtpotential im Sinne der Durchlichtung andererseits.

Die Ergebnisse scheinen geeignet, daraus grundsätzliche Handlungsempfehlungen für den Entwurf von Laubengangwohnhäusern oder analogen Wohneinheiten ableiten zu können. Etwa folgende:

Nord-Süd-belichtete Wohnungen weisen bei gleichzeitig vorteilhaftem thermischem Verhalten eine schlechte Durchlichtung auf, was die sinnvollen Wohnungstiefen beschränkt und/oder Fragestellungen optimierter Lichtführung aufwirft.¹⁰⁹⁰

Wohnungen mit moderat aus der Nord-Süd-Richtung verschwenkten Längsachsen weisen eine sehr ausgewogene thermische und optische Performance auf. In der gegenständlichen Arbeit hat sich das an den Typen mit Orientierungen von SSO bis SSW bzw. NNW bis NNO gezeigt.

Wohnungs-Längsachsen in Ost-West-Richtung führen zu Situationen mit zwar exzellenter Durchlichtung, aber auch zu schlechten Ausgangsbedingungen hinsichtlich der thermischen Performance. Ansätze einer gezielten Verkleinerung der Verglasungsflächen oder auch Erhöhung der Wohnungstiefen sind geeignet, dieses Ungleichgewicht zu entschärfen.

¹⁰⁹⁰ Hinzuweisen ist hier auf die konstruktivistische Annahme einer Vollverglasung zwischen Wohnung und Laubengang, was einen bewussten Extremwert darstellt. Nur vor diesem Hintergrund gilt die ermittelte nahezu gleichartige Performance von nord- und von südgerichtetem Laubengang.

Festzuhalten ist jedenfalls, dass natürlich durch konstruktive und technische Maßnahmen die tatsächliche Performance von vergleichbaren Wohnungstypen in hohem Maß gegenüber den Ergebnisse dieser Arbeit verbessert werden kann. Dennoch bleiben die grundsätzlichen Zusammenhänge als Ausgangsposition jeglicher nachträglicher Maßnahmen stets bestehen und sollen daher tunlichst im Entwurf ihre Berücksichtigung finden.

Festzuhalten ist auch, dass die drei analysierten Qualitäten der Durchlichtung, der Heizenergieeffizienz und der thermischen Sommertauglichkeit, ausgehend von den drei ermittelten Potentialen, mit ergänzenden technischen und architektonischen Maßnahmen unterschiedlich gut beeinflussbar sind:

- > Die Qualität der Durchlichtung, ausgedrückt durch den Durchlichtungsfaktor (LPF), reagiert äußerst sensibel auf die Anordnung von Zwischenwänden im analysierten Basismodell. Der Durchlichtungsfaktor kann für das jeweils untersuchte Raumvolumen in seiner Orientierung weder durch technische noch durch architektonische Mittel über das errechnete Durchlichtungspotential gesteigert werden. Es wird vielmehr durch die Anordnung von Zwischenwänden mehr oder weniger verringert.
- > Die Qualität der Heizenergieeffizienz, konkret die Eignung eines definierten Gebäudevolumens Basismodells in seiner spezifischen Orientierung, passiv solare Wärmegewinne zur teilweisen Abdeckung seiner Wärmeverluste zu nutzen, ausgedrückt durch den Heizwärmebedarf (HWB), ist über die Wahl der Verglasungsart, konkret über die Variierung des Gesamtenergiedurchlassgrades und des Wärmedurchgangskoeffizienten, beeinflussbar. Auch mit dem architektonischen Mittel der Grundrissgestaltung wird die Nutzbarkeit solarer Gewinne und mit Ihr das Passiv Solare Gewinnpotential beeinflusst.¹⁰⁹¹
- > Die Qualität der thermischen Sommertauglichkeit schließlich ist immanent von der Orientierung der verglasten Hüllflächen abhängig und kann durch baulichen oder technischen Sonnenschutz sowie durch die Wahl der Verglasungseigenschaften in weiten Grenzen variiert werden. Zu beachten sind aber die existierenden, erheblichen Wechselwirkungen von Sonnenschutzmaßnahmen auf die Qualität der Durchlichtung.

Mit der Kennzahl des Durchlichtungsfaktors wurde schließlich in dieser Arbeit eine neue Bewertungsgröße für das Tageslichtpotential eingeführt, die sich zur praktischen Anwendung in der Vorentwurfsphase anbietet und die in dieser Eigenschaft dem Tageslichtquotienten jedenfalls überlegen ist.

¹⁰⁹¹ Hinzuweisen ist darauf, dass die Heizenergieeffizienz auch mit dem Mittel der Verringerung des Verglasungsanteils und der Anwendung konsequenten Wärmeschutzes auf die opaken Hüllbauteile ganz erheblich gesteigert werden kann und in realen baulichen Situationen auch wird,, was aber nicht Fragestellung der gegenständlichen Forschungsarbeit ist.

D. SCHLUSS

9. Ergebnisse

Die Ergebnisse der Potentialstudie „Photophysiologie im Innenraum“ sowie der vergleichenden Potentialstudie „Licht und thermische Optimierung“ werden im Anschluss zusammenfassend dargelegt. Die für die Durchführung der Potentialstudien zu definierenden Bedingungen sind so gewählt, dass sich sinnvolle Querbezüge zwischen verschiedenen Einzelergebnissen herstellen lassen.

9.1. These 1 zur Photophysiologie von Innenräumen

Die hypothetische Annahme aus 2.1. wird in Kapitel 7 mit einer Vielzahl von Belegen untermauert und kann daher als verifiziert gelten und in die folgende These übergeführt werden.

Es besteht ein ursächlicher Zusammenhang zwischen der Evidenz des epidemischen Auftretens von Lichtmangelerscheinungen und dem lang andauernden Aufenthalt hinter Verglasungen im Inneren von Gebäuden allgemein und von Gebäuden mit thermisch optimierten Funktionsglasscheiben im Besonderen.

Obwohl die Hypothese klar verifiziert ist und somit als belegte These gilt, ist anzumerken, dass das photobiologisch wirksame Strahlungsangebot im Innenraum in Bezug auf die derzeit bekannten und hier untersuchten Wirkungen entweder deutlich unterhalb oder deutlich oberhalb der definierten Schwellwerte liegt. Das bedeutet, dass die, durch die verschiedenen Transmissionseigenschaften der untersuchten Gläser hervorgerufenen Angebotsunterschiede zwar erheblich sind, jedoch keine Schwellwertüber- oder Schwellwertunterschreitung verursachen. Gesondert zu betrachten ist in diesem Zusammenhang, die ebenfalls in der Arbeit erhobene Beleuchtungsstärke. Auch hier liegt in allen Fällen ein ausreichendes Lichtangebot zur Bewältigung von Sehaufgaben vor. Hinter einer unbeschichteten Einscheibenverglasung reduziert sich die Beleuchtungsstärke allerdings lediglich um 14% im Vergleich zum Außenraum. Hinter einer Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung liegt diese Reduktion jedoch bei 53%.

9.1.1. Terrestrisches Sonnenstrahlungsangebot

Um entsprechende Nachweise vorlegen zu können sind Grundlagen ermittelt und Rahmenbedingungen definiert worden. So ist der Ausgangspunkt für die Studie zur Photophysiologie im Innenraum, das Sonnenstrahlungsangebot im Außenraum, auf das referenziert wird. Dieses Sonnenstrahlungsangebot ist unter Anwendung der Software SMARTS¹⁰⁹² für den Standort Wien durch eine Faltung des spektral aufgelösten extraterrestrischen Sonnenstrahlungsangebots mit der spektralen Durchlässigkeit der

¹⁰⁹² SMARTS - Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine, Gueymard C., 1994-2005, NREL - National Renewable Energy Laboratory, U.S.A, Golden, Colorado
<http://www.nrel.gov/rredc/smarts/> (02.01.2009)

Erdatmosphäre modelliert worden. SMARTS berechnet die relevanten Extinktionsprozesse der Sonnenstrahlung in der wolkenlosen Atmosphäre.

Vorgelegt werden die derart ermittelten terrestrischen Spektren für den 15. März, den 15. Juni, den 15. September und den 15. Dezember, da diese Referenztage die jahreszeitlichen Unterschiede am Referenzstandort Wien charakterisieren. Darüber hinaus erleichtert die symmetrische Lage des 15. Tages im Monat den Vergleich mit Monatsmittelwerten.

Innerhalb der vier Referenztage sind die photophysiologisch relevanten Tageszeitpunkte 7:00, 12:00 und 17:00 ausgewertet worden.¹⁰⁹³ In Übereinstimmung mit der medizinischen Fachliteratur wird die Orientierung der Ernteflächen, entsprechend der tagsüber vorwiegend aufrechten Haltung des Menschen als vertikal und dem Azimut der Sonne nachgeführt festgelegt. Exemplarisch werden die entsprechend ermittelten terrestrischen Spektren in einem vergleichenden Diagramm (Diagramm 131) in der spektralverteilten Bestrahlungsstärke dargestellt für den Tageszeitpunkt 12:00 an den vier Referenztagen.

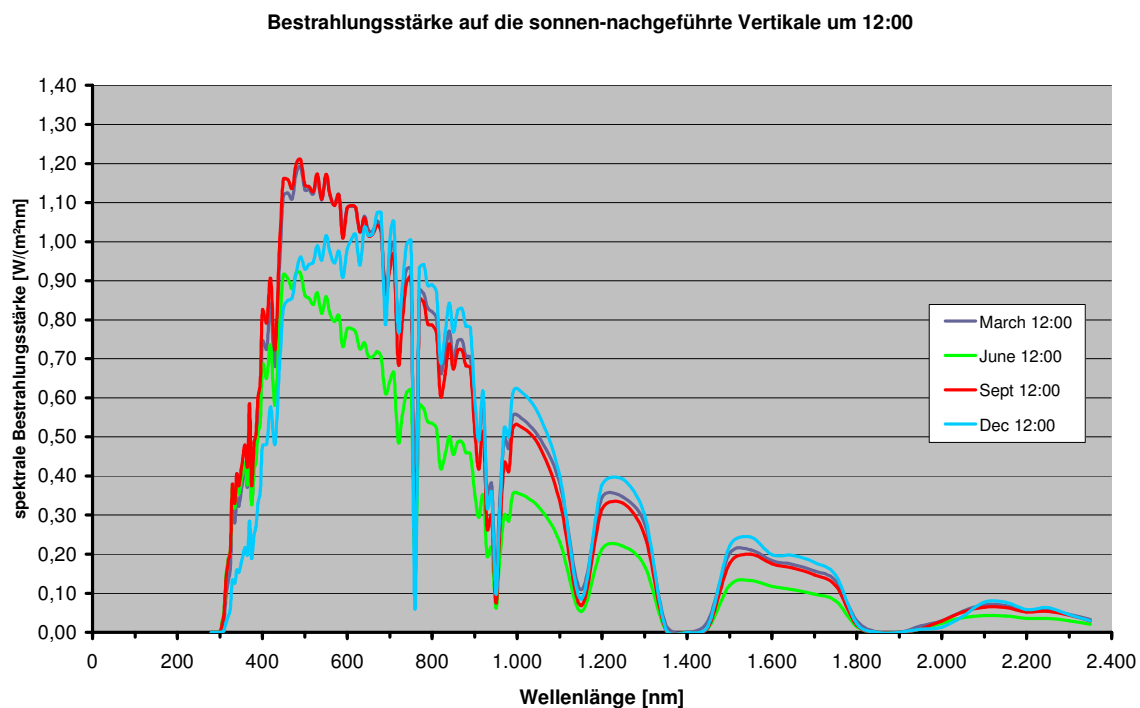


Diagramm 131: Spektrale terrestrische Bestrahlungsstärken um jeweils 12:00

¹⁰⁹³ Zu den aus photophysiologischer Sicht relevanten Tageszeitpunkten um etwa 07:00 morgens und um etwa 17:00 nachmittags ist die Sonne am 15. Dezember allerdings noch nicht aufgegangen beziehungsweise bereits untergegangen. Diese beiden Tageszeitpunkte sind daher als Referenzzeitpunkte im Sinne der vorliegenden Arbeit irrelevant.

9.1.2. Durchgang durch technische Funktionsglasscheiben

Um das spektralaufgelöste Tageslichtangebot im Innenraum anzugeben wird das terrestrische Sonnenspektrum mit der spektralen Durchlässigkeit unterschiedlicher technischer Funktionsglasscheiben gefaltet. Dabei wird die Auswahl der technischen Funktionsglasscheiben auf heute exemplarisch und baupraktisch zum Einsatz kommende Typen begrenzt, die neben der immanenten Glasqualität der Transparenz für Licht auch die ergänzenden Qualitäten der Wärmedämmung oder des Sonnenschutzes aufweisen.¹⁰⁹⁴ Gewählt werden eine Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung, eine Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung und eine Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung sowie eine unbeschichtete Einscheiben-Verglasung, um Vergleiche ziehen zu können.

Die spektrale Durchlässigkeit der vier gewählten Glasscheiben ist an den genannten Referenztagen zu den festgelegten Tageszeiten untersucht worden, wobei charakteristische und signifikant unterschiedliche Verläufe festgestellt werden. Exemplarisch dargestellt wird das vergleichende Diagramm (Diagramm 132) der spektralen Bestrahlungsstärke, die sich unmittelbar nach dem Durchgang durch die gewählten technischen Funktionsglasscheiben am 15. Juni um 12:00 einstellen.

spektrale Bestrahlungsstärke auf eine vertikale, sonnennachgeführte Messfläche

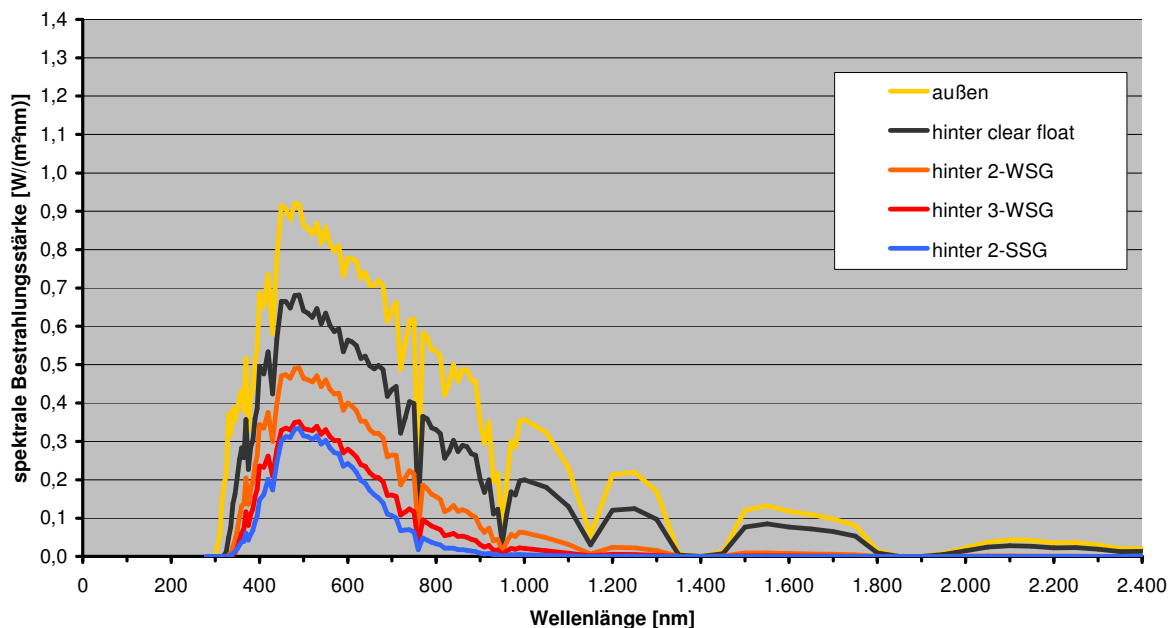


Diagramm 132: Spektrale Bestrahlungsstärken am 15. Juni um 12:00 hinter technischen Funktionsglasscheiben

¹⁰⁹⁴ Nicht berücksichtigt werden in diesem Sinn Materialien wie Silikatgläser oder Quarzgläser, die auf Grund ihrer Produktionskosten, Verarbeitbarkeit oder Ähnlichem bislang technischen oder medizinischen Spezialanwendungen vorbehalten sind.

Das folgende Diagramm (Diagramm 133) zeigt einen Ausschnitt der vorangegangenen Darstellung, nämlich den Wellenlängenbereich der UV-B-Strahlung und des sichtbaren Lichts. Die essentiellen Unterschiede der Durchlässigkeit speziell im photophysiologisch bedeutenden UV-B-Spektralbereich werden hier besonders deutlich.

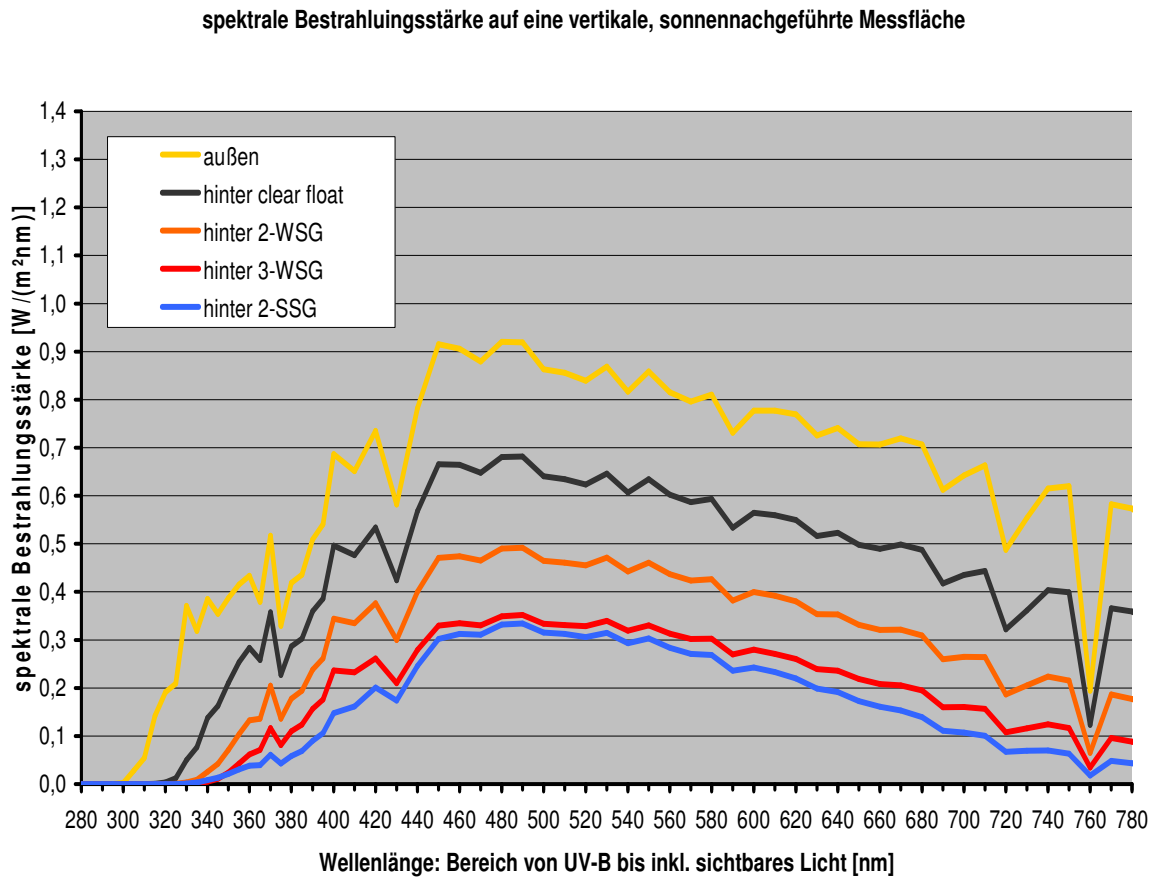


Diagramm 133: Spektrale Bestrahlungsstärken am 15. Juni um 12:00 hinter den technischen Funktionsglasscheiben, Ausschnitt 280nm bis 780 nm

9.1.3. Photobiologische Wirkungen

Entsprechend dem aktuellen Forschungsstand kann eine Vielzahl von photobiologischen Wirkungen zwar beschrieben werden, jedoch liegt nur für eine geringe Anzahl eine spektralverteilte Wirkungs-Kurve vor. Durch Faltung dieser photobiologischen Wirkungs-Kurven mit dem spektralverteilten Tageslichtangebot im Innenraum, werden Wirkpotentiale ermittelt und mit publizierten Schwellwerten oder Minimaldosen verglichen.

9.1.3.1. Ausgewählte photobiologische Wirkungs-Kurven

Im folgenden Diagramm (Diagramm 134) sind ausgewählte relevante photobiologische Wirkungs-Kurven in ihren jeweiligen Empfindlichkeiten spektralverteilt aufgetragen,

wobei ausdrücklich zu betonen ist, dass alle Kurven auf eine relative Skala der jeweiligen Wirkmaxima bezogen sind.¹⁰⁹⁵

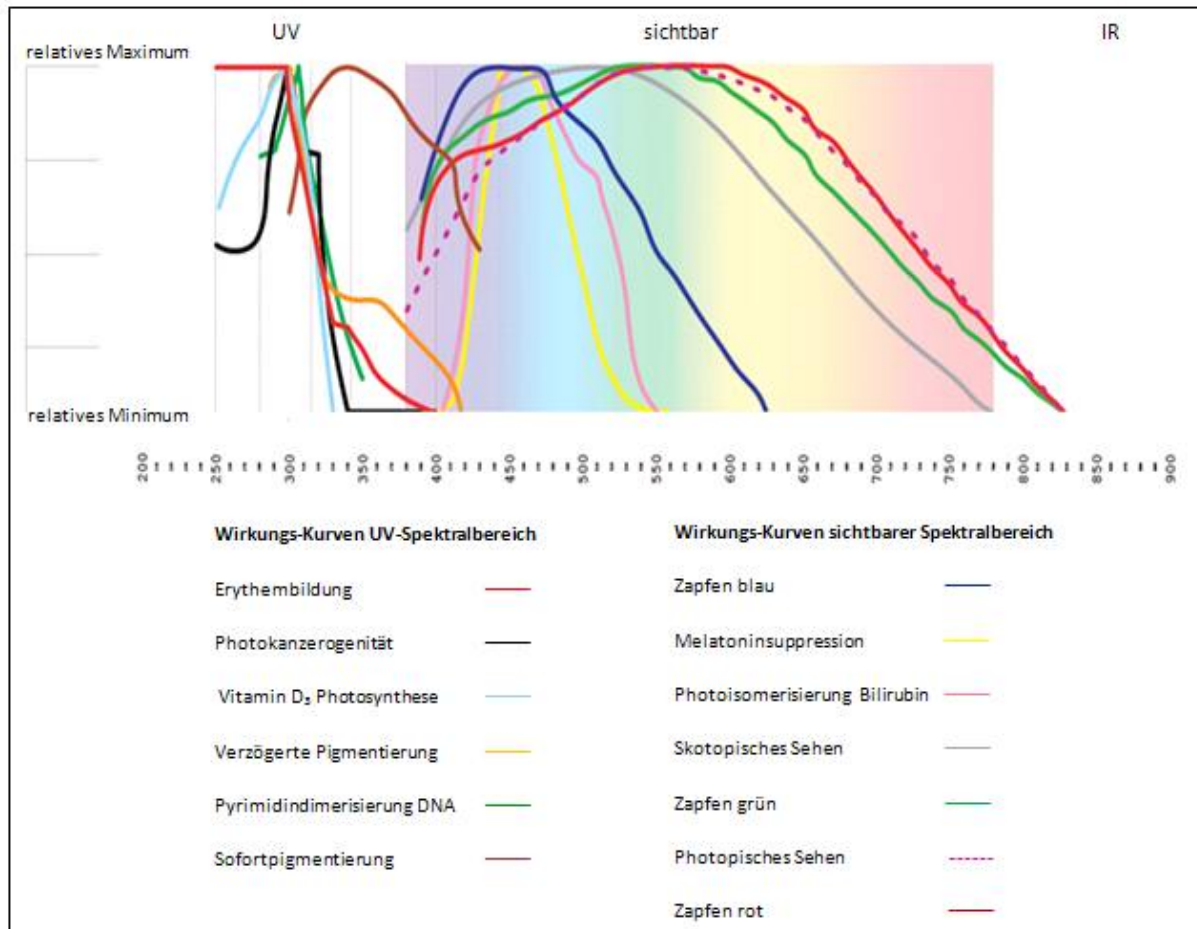


Diagramm 134: Ausgewählte photobiologische Wirkungs-Kurven des Menschen

Diese Wirkungs-Kurven können im Sinne der vorliegenden Arbeit mit dem Wellenlängen bezogenen terrestrischen Srahlungsangebot und der spektralen Durchlässigkeit unterschiedlicher Funktionsglasscheiben gefaltet werden. Ausgewählt für diese Faltungen werden ausgehend von den in Kapitel 6 beschriebenen photophysiologischen und photopathologischen Wirkungen jene Wirkungs-Kurven, die von hoher allgemeiner Relevanz sind und für die Dosis-Wirkungsbeziehungen oder zumindest Schwellwerte zur Erreichung einer Wirksamkeit definiert sind.

9.1.3.2. Wirkpotentiale im ultravioletten Spektralbereich

Im UV-Strahlungsbereich ist eine Vielzahl von Wirkungen bekannt und es liegen vergleichsweise auch viele Wirkungs-Kurven für die Ermittlung von Wirkpotentialen vor die allesamt die Haut als Rezeptororgan adressieren. Zu den photopathologischen Wirkungen zu zählen sind: die Photokanzerogenität, die Pyrimidindimerisierung der DNA, sowie in Abhängigkeit von der Dosis die Erythembildung. Photoadaptive Wirkungen sind

¹⁰⁹⁵ Hammer R., graphische Aufbereitung Radinger G.

die Sofortpigmentierung und die verzögerte Pigmentierung. Als photophysiologische Wirkung liegt die Pre-Vitamin D₃ Photosynthese vor. Ausgewählt für die eingehende Untersuchung auf Basis einer Faltung werden im Rahmen der Potentialstudie die Pre-Vitamin D₃ Photosynthese und die Erythembildung.

9.1.3.2.1. Pre-Vitamin D₃ Photosynthese

Der Ausgangsstoff für die Photosynthese von Vitamin D₃ ist 7-Dehydrocholesterol, ein Stoffwechselprodukt der Verdauung das in der menschlichen Epidermis vorliegt. Unter Einwirkung von ultravioletter Strahlung mit einer Wellenlänge zwischen 252 nm und 330 nm¹⁰⁹⁶ wird 7-Dehydrocholesterol zu Pre-Vitamin D₃ umgewandelt. Pre-Vitamin D₃ ist instabil und wird in einem thermischen Umwandlungsprozess in Vitamin D₃ umgesetzt.¹⁰⁹⁷

9.1.3.2.1.1. Auswahlbegründung

Die Pre-Vitamin D₃ Photosynthese stellt innerhalb des UV-Strahlungsbereichs zumindest derzeit die einzige für den menschlichen Organismus notwendige und zuträgliche Wirkung dar, für die eine Wirkungs-Kurve vorliegt. Sie ist damit die einzige Wirkung aus dem Bereich Photophysiologie, die im Sinne der Studie auswertbar ist. Tatsächlich wird die Wirkungs-Kurve zur Vitamin D₃ Photosynthese auf Grund der zentralen Bedeutung des Vitamin D₃ für die Gewährleistung unterschiedlicher humanphysiologischer Abläufe einer entsprechenden Faltung unterzogen.

9.1.3.2.1.2. Schwellenwert bezogene Ergebnisse

Für das Einsetzen der Vitamin D₃ Photosynthese liegen mehrfach belegte Schwellenwerte vergleichbarer Größenordnung vor. Gewählt wurde der Wert von 18 mJ/cm² Strahlungsdosis auf der Haut.^{1098,1099,1100}

In der folgenden Tabelle (Tabelle 47) sind die stündlichen Pre-Vitamin D₃ bewerteten Dosen in mJ/cm² zu den zehn Referenzzeitpunkten am 15. März um 07:00, um 12:00 und um 17:00, am 15. Juni um 07:00, um 12:00 und um 17:00, am 15. September um 07:00, um 12:00 und um 17:00, sowie am 15. Dezember¹¹⁰¹ um 12:00 auf eine senkrechte, nach dem Sonnenazimut orientierte Messfläche zusammengefasst.

¹⁰⁹⁶ CIE (2006)

¹⁰⁹⁷ CIE (2006)

¹⁰⁹⁸ Hollis (2005)

¹⁰⁹⁹ Andere Quellen geben eine etwas höhere Schwellenbestrahlung von 200 J/m² erforderlich, siehe dazu Fisch (2000).

¹¹⁰⁰ Fisch (2000)

¹¹⁰¹ Zu den aus photophysiologischer Sicht relevanten Tageszeitpunkten um etwa 07:00 morgens und um etwa 17:00 nachmittags ist die Sonne noch nicht aufgegangen beziehungsweise bereits untergegangen. Diese beiden Tageszeitpunkte sind daher als Referenzzeitpunkte im Sinne der vorliegenden Arbeit irrelevant.

In der ersten Ergebnisspalte sind die stündlichen Pre-Vitamin D₃ bewerteten Dosen außen, also unmittelbar vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheibe angegeben. In den nachfolgenden Ergebnisspalten sind die ermittelten stündlichen Pre-Vitamin D₃ bewerteten Dosen unmittelbar nach dem Durchgang durch eine unbeschichtete Einscheiben-Verglasung, eine Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung, eine Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung und eine Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung angeführt.

	außen mJ/cm ²	hinter clear float mJ/cm ²	hinter 2-WSG mJ/cm ²	hinter 3-WSG mJ/cm ²	hinter 2-SSG mJ/cm ²
März, 07:00	0	0	0	0	0
März, 12:00	26	0	0	0	0
März, 17:00	0	0	0	0	0
Juni, 07:00	10	0	0	0	0
Juni, 12:00	67	0	0	0	0
Juni, 17:00	10	0	0	0	0
September, 07:00	1	0	0	0	0
September, 12:00	55	0	0	0	0
September, 17:00	1	0	0	0	0
Dezember, 12:00	4	0	0	0	0

Tabelle 47: stündliche Pre-Vitamin D₃ bewertete Strahlungsdosis zu den Referenzzeitpunkten

Exemplarisch für alle anderen Referenztage und Tageszeitpunkte wird das Diagramm (Diagramm 135) zur spektralen Pre-Vitamin D₃ bewertete Strahlungsdichte am 15. Juni, 12:00 im Folgenden abgebildet. Es wird deutlich, dass selbst bei maximaler Bestrahlungsdichte keine Wirkungen im Innenraum erzielt werden können.

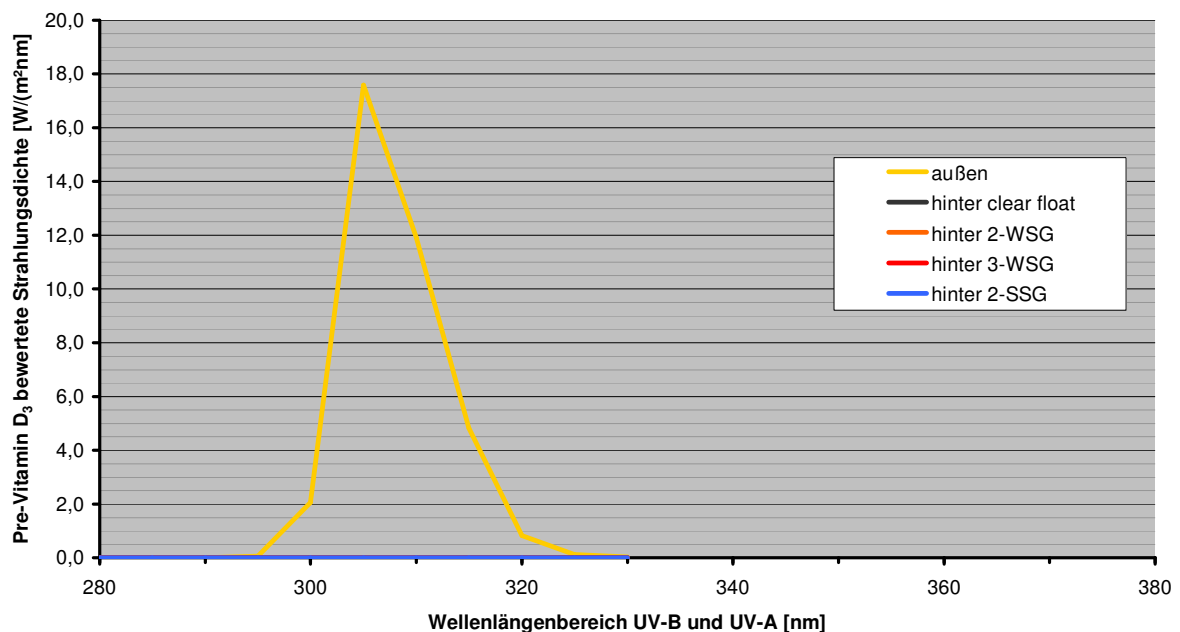


Diagramm 135: spektrale Pre-Vitamin D₃ bewertete Strahlungsdichte am 15. Juni, 12:00

So kann klar gezeigt werden, dass alle untersuchten Glasscheiben nahezu intransparent für jene Spektralanteile der UV-Strahlung sind, die dem Ablauf der Photosynthese von Pre-Vitamin D₃ zugrunde liegen. An dieser Stelle ist zu bemerken, dass das Solarstrahlungsangebot am gewählten Standort Wien während der Wintermonate selbst im Außenraum für die Pre-Vitamin D₃ Synthese nicht ausreicht, und eine adäquate Sonnenstrahlungsversorgung in den verbleibenden Monaten daher umso wichtiger ist.

9.1.3.2.1.3. Epidemische Auswirkungen

Der Status der Vitamin D₃ Versorgung kann anhand der Blutserumkonzentration von 25(OH) Vitamin D₃ festgestellt werden. Bei einem Wert zwischen 50 nmol/L und 100 nmol/L wird von einer geringen Unterversorgung ausgegangen, bei einem Wert zwischen 100 nmol/L und 250 nmol/L liegt ein ausreichendes Angebot vor.¹¹⁰²

Zahlreiche Studien befassen sich mit der Ermittlung des durchschnittlichen Vitamin D₃ Status, den eine bestimmte Bevölkerungsgruppe tatsächlich aufweist. Die Tabelle (Tabelle 48) im Anschluss bietet eine Übersicht ausgewählter Studienergebnisse, zur Vitamin D₃ Versorgung der europäischen Bevölkerung.¹¹⁰³

¹¹⁰² Zittermann (2003)

¹¹⁰³ Vgl. Zittermann (2003)

Altersgruppe, Land und studienspezifische Differenzierungen		Durchschnittliche 25(OH) Vitamin D ₃ Serumkonzentration [nmol/L]	
		Sommer	Winter
Kinder			
1	Deutschland ¹¹⁰⁴	84	43
2	Großbritannien hellhäutig ¹¹⁰⁵	80	52
3	Großbritannien dunkelhäutig ¹¹⁰⁶	36 - 42	
4	Spanien ¹¹⁰⁷	75	32
Jugendliche			
5	Frankreich ¹¹⁰⁸	71	21
6	Finnland ¹¹⁰⁹	63	34
Junge Erwachsene			
7	Deutschland ¹¹¹⁰	70	30
8	Zentral- und Westeuropa ¹¹¹¹	68	42
	Türkei ¹¹¹²		
9	Frauen westliche Kleidung	56	
10	Frauen traditionelle Kleidung	32	
11	Frauen streng islamische Kleidung	9	
Ältere Erwachsene			
12	Großbritannien ¹¹¹³	35	23
13	Italien ¹¹¹⁴		28
14	Griechenland ¹¹¹⁵		24
In einer Pflegeanstalt lebend			
15	Schweiz ¹¹¹⁶		18
16	Frankreich ¹¹¹⁷	8	

Tabelle 48: Überblick über ausgewählte Studienergebnisse betreffend den Vitamin D₃ Status in unterschiedlichen europäischen Ländern differenziert nach Populationsgruppen und Winter- beziehungsweise Sommerhalbjahr

Zwei Tendenzen werden besonders deutlich: Die Vitamin D₃ Versorgung jüngerer Menschen ist generell besser als die der Älteren, und der Vitamin D₃ Status korreliert mit dem jahreszeitlichen Strahlungsangebot.

¹¹⁰⁴ Zittermann (1987)

¹¹⁰⁵ Davies (1999)

¹¹⁰⁶ Lawson (1999)

¹¹⁰⁷ Docio (1998)

¹¹⁰⁸ Guillemant (2001)

¹¹⁰⁹ Lehotonen (1999)

¹¹¹⁰ Zittermann (1998)

¹¹¹¹ McKenna 1992

¹¹¹² Alagol (2000)

¹¹¹³ Hegarty (1994)

¹¹¹⁴ Van der Wielen (1995)

¹¹¹⁵ Van der Wielen (1995)

¹¹¹⁶ Bischoff (1999)

¹¹¹⁷ Fardellone (1995)

Eindeutige Zusammenhänge zwischen der Vitamin D₃ Versorgung und der Auftretshäufigkeit von Erkrankungen konnten sowohl im Bereich der klassischen wie der nichtklassischen Wirkungen des Vitamin D₃ festgestellt werden. Explizit genannt werden an dieser Stelle Rachitis und Osteomalazie, sowie Myopathie, Krebserkrankungen wie Prostatakrebs, Brustkrebs, Darmkrebs, Eierstockkrebs und Non-Hodgkin-Lymphom, Herzkreislauferkrankungen, Autoimmunerkrankungen wie Multiple Sklerose, Diabetes Mellitus Typ 1a, rheumatoide Arthritis, chronisch-entzündlichen Darmerkrankungen sowie verschiedene Infektionskrankheiten.

9.1.3.2.2. Erythembildung

Als Erythem wird eine mit bloßem Auge erkennbare Hautrötung bezeichnet, die durch eine lokal stärkere Durchblutung der Haut hervorgerufen wird. Ultraviolette Bestrahlung bewirkt das Auftreten eines hellroten und gleichmäßig gefärbten Erythems. Die Rötung tritt erst einige Stunden nach der Bestrahlung auf und klingt langsam im Allgemeinen in einem Zeitraum von drei bis vier Tagen wieder ab.¹¹¹⁸

Die minimale Erythemdosis, abgekürzt mit MED, ist definiert als jene minimale Strahlendosis, die ein scharf abgrenzbares, gerade noch erkennbares Erythem mit einer Mindestfläche von 1 cm² hervorruft.¹¹¹⁹

9.1.3.2.2.1. Auswahlbegründung

Da das Auftreten eines Erythems nach Verabreichung dieser individuellen minimalen erythemalen Dosis zwar keine unmittelbaren Schädigungen hervorruft, jedoch als Anzeichen von Belastung gesehen und vom Betroffenen wahrgenommen und verstanden werden kann, erscheint die Auswertung der Wirkungs-Kurve zur Erythembildung sinnvoll. Insbesondere als das für beispielsweise die Wirkungs-Kurve der Photokarzinogenität keine Schwellwerte angegeben werden können.

9.1.3.2.2.2. Schwellwerte bezogene Ergebnisse

Die Empfindlichkeit gegenüber UV-Strahlung und damit die MED ist stark vom Individuum abhängig. Um eine quantitative Abschätzung möglich zu machen, wurde für den Hauttyp II nach der Hauttypklassifikation von Fitzpatrick¹¹²⁰ eine standardisierte gewichtete MED von 250 J/m² festgesetzt.¹¹²¹ Diese standardisierte MED dient einer grundlegenden Risikoeinschätzung, hat aber keinen Anspruch auf individuelle Gültigkeit. Eine Applikation von etwa 4 MED führt beim Hauttyp II zur Ausbildung von Sonnenbrand¹¹²² ohne Blasenbildung.¹¹²³

¹¹¹⁸ Schulungbaum (1994)

¹¹¹⁹ Lowe (1990)

¹¹²⁰ Fitzpatrick (1988)

¹¹²¹ Deutsche Strahlenschutzkommission (2001)

¹¹²² Der medizinische Begriff für Sonnenbrand ist Dermatitis solaris.

¹¹²³ Taylor (1990)

Jene Spektralanteile der UV-Strahlung, die zur Bildung eines UV-Erythems führen, können nur in sehr geringem Ausmaß durch sämtliche der untersuchten Glasscheiben dringen. Entsprechend kann auch davon ausgegangen werden, dass sowohl photopathologische aber auch photoadaptive Wirkungen in diesem Spektralbereich hinter Glasscheiben weitgehend ausbleiben. Es ist festzuhalten, dass aktuelle medizinische Forschungsergebnisse daraufhin deuten, dass nicht oder ungenügend adaptierte Haut, bei plötzlicher Strahlungseinwirkung für Schädigungen besonders anfällig ist.

In der folgenden Tabelle (Tabelle 49) sind die stündlichen erythemalen Dosen in J/m^2 zu den zehn Referenzzeitpunkten am 15. März um 07:00, um 12:00 und um 17:00, am 15. Juni um 07:00, um 12:00 und um 17:00, am 15. September um 07:00, um 12:00 und um 17:00, sowie am 15. Dezember¹¹²⁴ um 12:00 auf eine senkrechte, nach dem Sonnenazimut orientierte Messfläche zusammengefasst.

In der ersten Ergebnisspalte sind die stündlichen erythemalen Dosen außen, also unmittelbar vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheibe angegeben. In den nachfolgenden Ergebnisspalten sind die ermittelten stündlichen erythemalen Dosen unmittelbar nach dem Durchgang durch eine unbeschichtete Einscheiben-Verglasung, eine Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung, eine Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung und eine Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung zum unmittelbaren Vergleich in Absolutwerten angeführt.

	außen J/m^2	hinter clear float J/m^2	hinter 2-WSG J/m^2	hinter 3-WSG J/m^2	hinter 2-SSG J/m^2
März, 07:00	8	3	2	1	1
März, 12:00	190	31	15	10	5
März, 17:00	8	3	2	1	1
Juni, 07:00	96	22	11	7	4
Juni, 12:00	370	33	16	10	5
Juni, 17:00	96	22	11	7	4
September, 07:00	21	7	4	2	1
September, 12:00	325	36	18	11	6
September, 17:00	21	7	4	2	1
Dezember, 12:00	54	16	8	5	3

Tabelle 49: stündliche erythemale Dosis zu den Referenzzeitpunkten

Das Säulendiagramm (Diagramm 136) im Anschluss zeigt die stündlichen erythemalen Strahlungsdosen in J/m^2 auf eine senkrechte, nach dem Sonnenazimut orientierte Messfläche zu den Referenzzeitpunkten 07:00, 12:00 und 17:00 am 15. Juni. Die erste Säule bildet die stündliche erythemale Strahlungsdosis außen, unmittelbar vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheibe ab. Die jeweils vier anschließenden Säulen zeigen die ermittelten stündlichen erythemalen Strahlungsdosen unmittelbar nach dem Durchgang durch eine unbeschichtete Einscheiben-Verglasung, eine Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung, eine Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung und eine Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung.

¹¹²⁴ Zu den aus photophysiologischer Sicht relevanten Tageszeitpunkten um etwa 07:00 morgens und um etwa 17:00 nachmittags ist die Sonne noch nicht aufgegangen beziehungsweise bereits untergegangen. Diese beiden Tageszeitpunkte sind daher als Referenzzeitpunkte im Sinne der vorliegenden Arbeit irrelevant.

Mit einer strichlierten, horizontalen Linie gekennzeichnet ist der in Kapitel 7.5.3. erläuterte Grenzwert der minimalen Erythemdosis MED von 250 J/m².

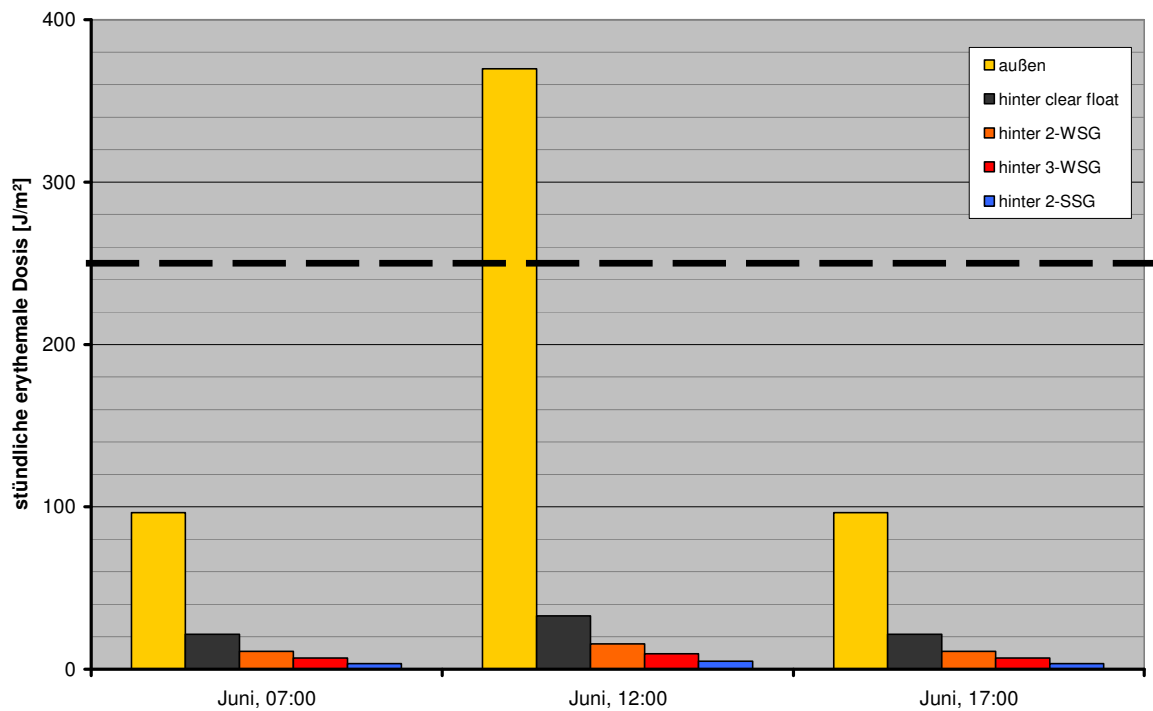


Diagramm 136: Stündliche erythemale Dosis zu den Referenzzeitpunkten des 15. Juni

Das nachfolgende Liniendiagramm (Diagramm 137) zeigen die spektral verteilten erythemalen Strahlungsdichten auf eine vertikal sonnennachgeführte Messfläche in W/(m²nm) zum Referenzzeitpunkt 12:00 am 15. Juni als exemplarisch für Situationen besonders intensiver Strahlungsdichte. Wobei die Linie der spektral verteilten erythemalen Strahlungsdichte außen, jene Werte angibt, die unmittelbar vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheiben ermittelt wurden. Die weiteren vier abgebildeten Linien stellen die spektral verteilten erythemalen Strahlungsdichten unmittelbar nach dem Durchgang durch eine unbeschichtete Einscheiben-Verglasung, eine Zweischeiden-Wärmeschutzverglasung, eine Dreischeiden-Wärmeschutzverglasung und eine Zweischeiden-Sonnenschutzverglasung dar.

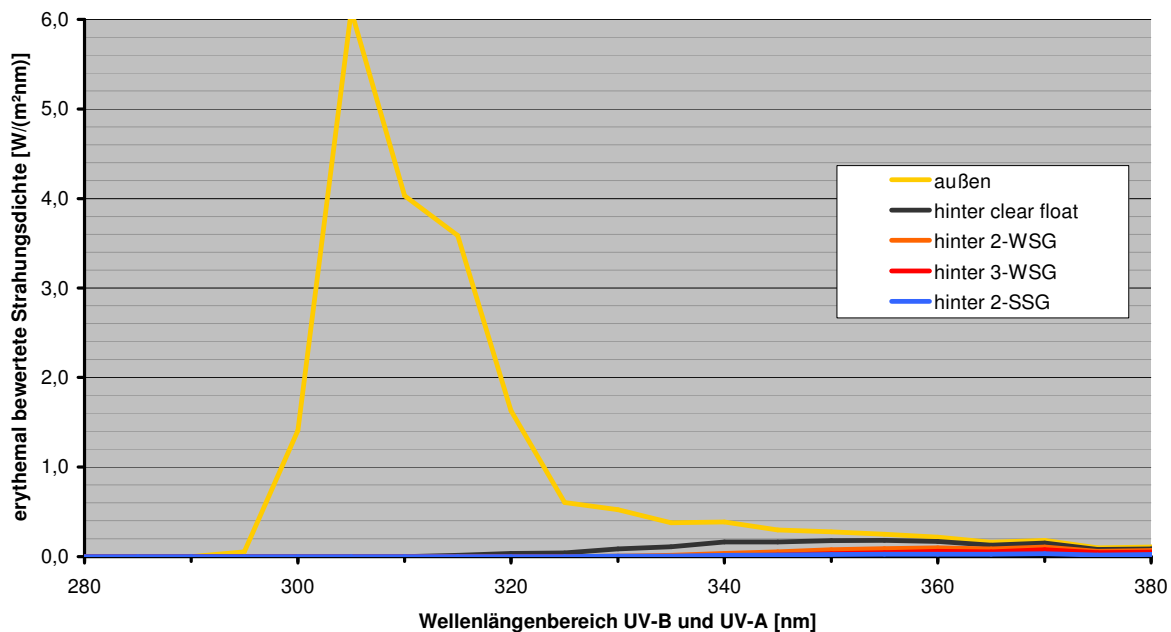


Diagramm 137: Spektrale erythemal bewertete Strahlungsdichte am 15. Juni um 12:00

Unter den angenommenen Randbedingungen kommt es im Außenraum zur Mittagszeit des 15. Juni und 15. September mit 370 J/m^2 beziehungsweise 325 J/m^2 bereits in weniger als einer Stunde zur Überschreitung der MED.

Hinter den untersuchten technischen Funktionsglasscheiben sinkt aufgrund deren stark eingeschränkten Durchlässigkeit für ultraviolette Strahlung, die erreichbare erythemale Dosis drastisch ab. Demnach ist die Gefahr der Erythembildung aber auch die Chance auf eine Adaption der Haut verschwindend gering. Im Folgenden wird darüber hinaus darauf hingewiesen, dass der Aufenthalt in Innenräumen, in denen das Angebot an Tageslicht im ultravioletten Spektralbereich minimal ist, dazu führt, dass der kurzfristige Aufenthalt im Freien unter den Bedingungen des terrestrischen Tageslichtspektrums ein besonders unregelmäßiges Expositionsmuster darstellt.

9.1.3.2.2.3. Epidemische Auswirkungen

Die Unregelmäßigkeit der Exposition im ultravioletten Spektralbereich des Tageslichts erhöht das Risiko des Auftretens von malignen Melanomen. Als malignes Melanom wird ein Photokarzinom der Pigmentzellen der Haut bezeichnet. Es wird zu über 90% durch indirekte, lichtbedingte Schädigung von DNA-Strukturen hervorgerufen.¹¹²⁵ Die indirekte Schädigung erfolgt durch die Absorption eines Photons des ultravioletten Spektralbereichs durch ein Molekül, das selbst kein Bestandteil einer DNA-Struktur ist. Das veränderte Molekül löst seinerseits eine photochemische Reaktion innerhalb des Körpers aus, die in weiterer Folge zu einer Schädigung von DNA-Strukturen führt.

¹¹²⁵ Davies (2002)

Maligne Melanome werden vorwiegend durch UV-A-Strahlen hervorgerufen.¹¹²⁶ Obwohl das Auftreten eines Photokarzinoms nicht mit einer konkret quantifizierbaren Bestrahlungsdosis verbunden werden kann, sind qualitative Parameter beschreibbar, die das Risiko an einem Photokarzinom zu erkranken, abbilden.¹¹²⁷

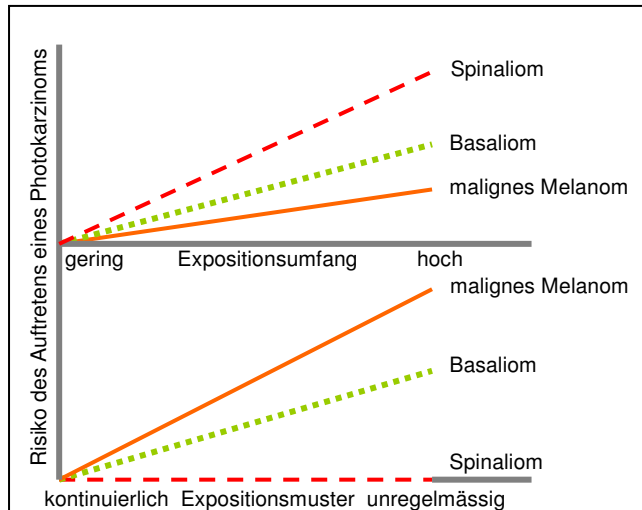


Diagramm 138: Qualitative Risikoabschätzung über das Auftreten von Photokarzinomen

Das obige Diagramm (Diagramm 138) stellt den beschriebenen Bezug zwischen der Auftrittshäufigkeit von Photokarzinomen und dem Expositionsumfang einerseits sowie dem Expositionsmuster andererseits dar.

9.1.3.3. Wirkpotentiale im sichtbaren Spektralbereich

Für den sichtbaren Spektralbereich des Lichts liegen Wirkungen vor, die als Rezeptororgan sowohl die Haut als auch das Auge adressieren. Für die Haut wird mit der Photoisomerisierung von Bilirubin eine Wirkungs-Kurve vorgelegt, die den Abbau von Bilirubin beschreibt, das bei ungenügender Leberfunktion als Abfallprodukt des Hämoglobinstoffwechsels in der Haut angereichert wird. Für das Auge liegen Wirkungs-Kurven vor, die visuelle wie nichtvisuelle Wirkungen beschreiben. Zu den visuellen Wirkungen sind das photopische Sehen, vermittelt über die Stäbchenrezeptoren der Retina und das skotopische Sehen, vermittelt über die drei Zapfenrezeptoren der Retina zu zählen. Als nicht visuelle Wirkung wird schließlich die Licht vermittelte Suppression der Melatonin Ausschüttung im Gehirn durch eine Wirkungs-Kurve ausgewiesen.

Aus dem sichtbaren Spektralbereich werden die Wirkungs-Kurve zur Melatonin Suppression und die gemittelte Wirkungs-Kurven zum photopischen Sehen mit der Bezeichnung $V(\lambda)$ nach DIN 5031-3 zur weiteren Bearbeitung durch Faltung ausgewählt.¹¹²⁸

¹¹²⁶ Armstrong (2001)

¹¹²⁷ Vgl. Abbildung überarbeitet: Armstrong (2001)

¹¹²⁸ DIN 5031-3 (1982)

9.1.3.3.1. Melatonin Suppression

Als Rezeptoren für die nichtvisuelle Wirkung der Suppression von Melatonin wurde eine kleine spezifische Untergruppe von Ganglienzellen in der entsprechenden Retinales Schicht im Inneren des menschlichen Auges identifiziert. Diese Ganglienzellen enthalten Melanopsin als Chromophor und werden als mcGanglienzellen bezeichnet.¹¹²⁹ Von diesen mcGanglienzellen gehen die neuronalen Fasern des retino-hypothalamischen Traktes aus. Die meisten dieser Fasern projizieren in den suprachiasmatischen Nucleus des Hypothalamus. Der Eingang von Erregungspotentialen aus den mcGanglienzellen im suprachiasmatischen Nucleus hemmt die Aktivität des benachbart liegenden paraventriculären Nucleus. Langen nur wenige Erregungspotentiale im suprachiasmatischen Nucleus ein, wird die Hemmung des paraventriculären Nucleus aufgehoben, was zu einer Aktivierung der sekretorischen Neuronen der Zirbeldrüse führt. Dort wird das Enzym Tryptophan-Hydroxylase angeregt und damit die Geschwindigkeit des Ablaufes der Biosynthese von Melatonin erhöht. Melatonin wird von der Zirbeldrüse in die Blutbahn abgegeben und durch die Blutzirkulation als Botenstoff zu verschiedenen Zielgeweben transportiert die Melatonin adäquate Rezeptoren tragen.¹¹³⁰

9.1.3.3.1.1. Auswahlbegründung

Als einzige Wirkungs-Kurve zur Feststellung nichtvisueller durch das Auge vermittelter Wirkpotentiale des sichtbaren Spektralbereichs steht die der Melatonin Suppression zur Verfügung. Der Melatonin Suppression kommt für die Regelung der Aktivitätszustände des menschlichen Organismus zentrale Bedeutung zu. Daher wird die Wirkungs-Kurve zur Melatonin Suppression als mittelbare photophysiological Reaktion durch entsprechende Faltung der weiterführenden Auswertung unterzogen.

9.1.3.3.1.2. Dosis bezogene Ergebnisse

Der Wirkungs-Kurve zur Melatonin Suppression sind drei unterschiedliche Dosis-Wirkungs-Kurven zur circadianen Phasenverschiebung zur subjektiven Munterkeit und zur Suppression des Melatonins selbst zugeordnet. Entsprechend der Phasen besonderer Empfindlichkeit innerhalb der endogenen circadianen Rhythmik des Menschen, werden die erreichbaren Strahlungsdosen, für die Melatonin Suppression um 12:00 Ortszeit sowie für die circadiane Phasenverschiebung fünf Stunden vor und fünf Stunden nach 12:00 Ortszeit ermittelt. In der folgenden Tabelle (Tabelle 50) sind die Melatonin Suppression gewichteten Strahlungsdichten in W/m^2 zu den zehn Referenzzeitpunkten am 15. März um 07:00, um 12:00 und um 17:00, am 15. Juni um 07:00, um 12:00 und um 17:00, am 15. September um 07:00, um 12:00 und um 17:00, sowie am 15. Dezember¹¹³¹ um 12:00 auf eine senkrechte, nach dem Sonnenazimut orientierte Messfläche zusammengefasst.

¹¹²⁹ Berson (2002)

¹¹³⁰ Reppert (1995)

¹¹³¹ Zu den aus photophysiologicaler Sicht relevanten Tageszeitpunkten um etwa 07:00 morgens und um etwa 17:00 nachmittags ist die Sonne noch nicht aufgegangen beziehungsweise bereits untergegangen. Diese beiden Tageszeitpunkte sind daher als Referenzzeitpunkte im Sinne der vorliegenden Arbeit irrelevant.

In der ersten Ergebnisspalte sind die Melatonin Suppression gewichteten Strahlungsdichten außen, also unmittelbar vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheibe angegeben. In den nachfolgenden Ergebnisspalten sind die Melatonin Suppression gewichteten Strahlungsdichten unmittelbar nach dem Durchgang durch eine unbeschichtete Einscheiben-Verglasung, eine Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung, eine Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung und eine Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung zum unmittelbaren Vergleich in Absolutwerten angeführt.

	außen W/m ²	hinter clear float W/m ²	hinter 2-WSG W/m ²	hinter 3-WSG W/m ²	hinter 2-SSG W/m ²
März, 07:00	22	20	17	15	11
März, 12:00	97	84	71	60	46
März, 17:00	22	20	17	15	11
Juni, 07:00	85	74	64	55	42
Juni, 12:00	77	57	41	29	26
Juni, 17:00	85	74	64	55	42
September, 07:00	45	40	35	31	23
September, 12:00	100	86	71	59	46
September, 17:00	45	40	35	31	23
Dezember, 12:00	75	67	58	51	37

Tabelle 50: Melatonin Suppression bewertete Strahlungsdichte

Exemplarisch für alle anderen Referenztage und Tageszeitpunkt wird das Säulendiagramm (Diagramm 139) des 15. März im Folgenden abgebildet. An diesem Referenztag wird, wie aus der obigen Tabelle hervorgeht, die geringste Strahlungsdichte verzeichnet werden, damit dieser niedrigste Wert in Bezug zum Grenzwert aus der Dosis-Wirkungskurve der Melatonin Suppression gebracht werden kann. Das Säulendiagramm zeigt die Melatonin Suppression bewerteten Strahlungsdichten in W/m² auf eine senkrechte, nach dem Sonnenazimut orientierte Messfläche zu den Referenzzeitpunkten 07:00, 12:00 und 17:00 am 15. März. Die erste Säule bildet die Melatonin Suppression bewertete Strahlungsdichte außen, unmittelbar vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheibe ab. Die jeweils vier anschließenden Säulen zeigen die ermittelten Melatonin Suppression bewerteten Strahlungsdichten unmittelbar nach dem Durchgang durch eine unbeschichtete Einscheiben-Verglasung, eine Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung, eine Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung und eine Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung.

Mit einer strichlierten, horizontalen Linie gekennzeichnet ist die in Kapitel 7.6.5.3. erläuterte Obergrenze der Verschiebung der circadianen Rhythmik bei 7,2 W/m² Melatonin Suppression bewerteter Strahlungsdichte.

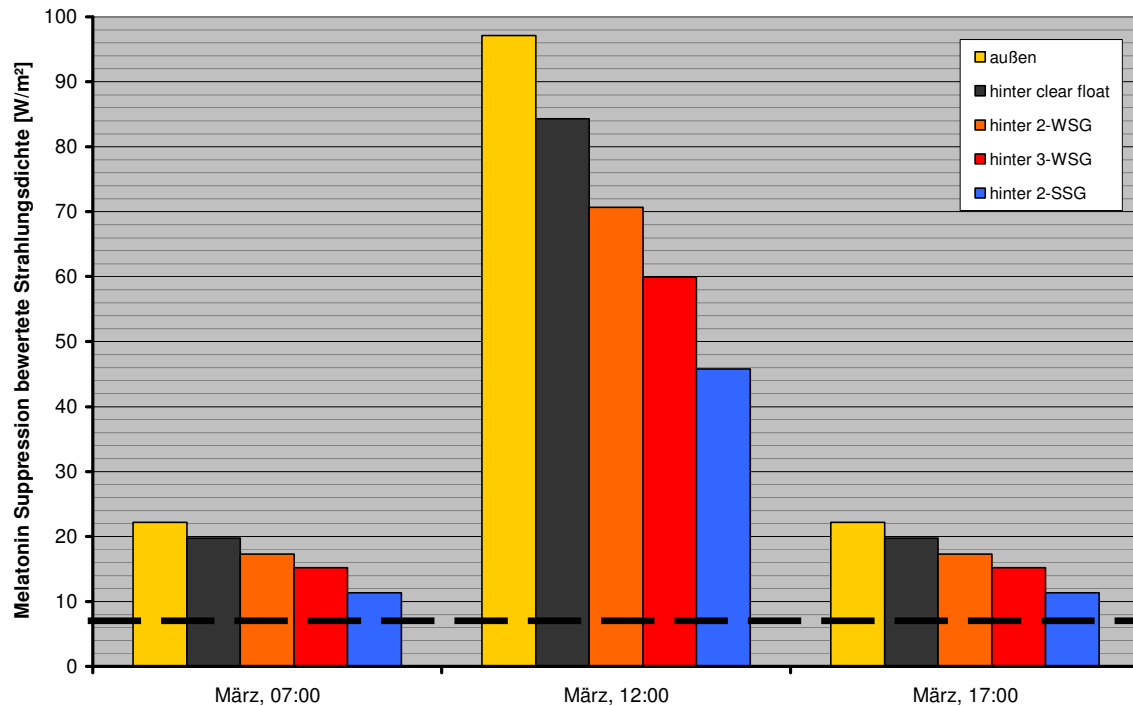


Diagramm 139: Melatonin Suppression bewertete Strahlungsdichte zu den Referenzzeitpunkten des 15. März

Es wird deutlich, dass die untersuchten Glasscheiben im sichtbaren Spektralbereich derart transparent sind, dass für alle derzeit bekannten nichtvisuellen mittelbaren Wirkungen der Melatonin Suppression die photophysiologisch relevanten Schwellwerte jedenfalls erreicht werden. Bemerkenswert muss allerdings, dass die Deutlichkeit des natürlichen Helldunkel-Rhythmus einerseits durch das geringere Tageslichtangebot hinter den angeführten Glasscheiben und andererseits durch die Verwendung von Kunstlicht mit entsprechenden Spektralanteilen während der Nacht, erheblich reduziert wird. Daher wird nachfolgend auf gesundheitliche Folgen reduzierter Melatonin Suppression durch unzureichende Dunkelheit hingewiesen.

9.1.3.3.1.3. Epidemische Auswirkungen

Im Rahmen einer in den vereinigten Staaten von Amerika durchgeführten Befragung geben 44% der erwachsenen Bevölkerung an, nahezu jede Nacht mit Schlafstörungen konfrontiert zu sein.¹¹³² Wobei krankhafte Störungen der Schlaf-Wach-Rhythmik und des Schlafes durch unterschiedlichste exogene Faktoren wie beispielsweise Lärm, Nahrungsinhaltsstoffe oder Licht, und endogene Faktoren wie eine genetische Disposition, Schwangerschaft, nicht schlafbezogene Krankheiten oder Vergleichbarem begünstigt sein oder ausgelöst werden können. Die genaue Betrachtung und Bewertung der Lebenssituation eines Menschen hinsichtlich des stärksten exogenen Zeitgeber Licht, ist

¹¹³² National Sleep Foundation, 2008 Sleep in America Poll, Summary of Findings, <http://www.sleepfoundation.org/atf/cf/%7Bf6bf2668-a1b4-4fe8-8d1a-a5d39340d9cb%7D/2008%20POLL%20SOF.PDF>, (15.02.2009)

beim Auftreten von Schlafstörungen jedenfalls von besonderer Wichtigkeit.¹¹³³ Da die Schlafphasen von vorrangiger Bedeutung für die Erholung des menschlichen Organismus in vielfältiger Hinsicht sind, ziehen anhaltende krankhafte Schlafstörungen Folgeerkrankungen nach sich. So sind etwa 20 bis 30% aller Erwachsenen von essentiellen Gesundheitsproblemen auf Grund von derartigen Schlafstörungen betroffen.¹¹³⁴

Im Folgenden werden nicht visuelle photobiologische Wirkungen des Lichts im sichtbaren Spektralbereich angeführt, die aktuelle Schwerpunkte in der medizinisch wissenschaftlichen Literatur darstellen. So konnte eine direkte Relation zwischen dem Angebot an Umgebungslicht und der Konzentration von Serotonin in den synaptischen Spalten diverser Hirnneuronen nachgewiesen werden.¹¹³⁵ Ein Zusammenhang mit dem Auftreten von saisonal affektiven Depressionen wird daher vermutet.

Ein anderer Aspekt ist die besonders hohe antioxidative Wirksamkeit von Melatonin auch im Vergleich mit anderen bekannten Antioxidantien wie Vitamin C und E.^{1136,1137} Eine ausreichende Melatoninausschüttung ist folglich von besonderer Bedeutung für die Moderation von Zellalterungsprozessen.

9.1.3.3.2. Visuelle Wirkungen

Das visuelle System des Menschen wird in die drei Bereiche Auge, Sehbahn und primäre Sehrinde unterteilt. Die für sichtbares Licht reizadäquaten Rezeptoren befinden sich im Inneren des menschlichen Auges und liegen dort in drei unterschiedlichen Ausprägungsformen in der Retina vor. Als Chromophore dienen Rhodopsin und drei Zapfenopsine. Bei Leutdichten über 3 cd/m² sind die Zapfenrezeptoren in ihren drei Typen aktiv. Das ermöglicht eine den Tageslichtbedingungen entsprechende umfassende visuelle Wahrnehmungleistung, die als photopisches Sehen bezeichnet wird.¹¹³⁸ Schon im Auge werden die aus rezipierten Reizen aufgebauten endogene Erregungspotentiale weiter verarbeitet. Ebenso ist die Sehbahn an dieser Verarbeitung beteiligt, sodass in der primären Sehrinde bereits vorstrukturierte Erregungsmuster einlangen. Zwischen diesen drei Bereichen Auge, Sehbahn und primäre Sehrinde bestehen vielfältige laterale Beziehungen. Darüber hinaus existieren vielfältige und weiterführende Vernetzungen zu nicht visuellen Systemen.

¹¹³³ Lack (2003)

¹¹³⁴ Schobersberger (2007)

¹¹³⁵ Praschak-Rieder (2008)

¹¹³⁶ López-Burillo (2003)

¹¹³⁷ Reiter (2004)

¹¹³⁸ Im Gegensatz zum skotopischen Sehen, das sich unter nächtlichen Bedingungen einstellt.

9.1.3.3.2.1. Auswahlbegründung

Die Qualitäten Helligkeit und spektrale Ausgewogenheit stellen, wie in Kapitel 6.2.2. erläutert, die Grundlage zur Erreichung visueller Ergonomie dar. Entsprechend eignen sich die Werte der $V(\lambda)$ Kurve nach DIN 5031-3, die aus einer Mittelung hervorgehen und nicht die Reaktivität eines spezifischen Chromophors abbilden, zur Annäherung an die generelle Helligkeitsempfindlichkeit des menschlichen Auges unter den Bedingungen des photopischen Sehens.¹¹³⁹

9.1.3.3.2.2. Ergebnisse

In der folgenden Tabelle (Tabelle 51) sind die Bestrahlungsstärken in W/m^2 zu den zehn Referenzzeitpunkten am 15. März um 07:00, um 12:00 und um 17:00, am 15. Juni um 07:00, um 12:00 und um 17:00, am 15. September um 07:00, um 12:00 und um 17:00, sowie am 15. Dezember¹¹⁴⁰ um 12:00 in Absolutwerten auf eine senkrechte, nach dem Sonnenazimut orientierte Messfläche zusammengefasst.

In der ersten Ergebnisspalte sind die Bestrahlungsstärken außen, also unmittelbar vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheibe angegeben. In den nachfolgenden Ergebnisspalten sind die ermittelten Bestrahlungsstärken unmittelbar nach dem Durchgang durch eine unbeschichtete Einscheiben-Verglasung, eine Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung, eine Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung und eine Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung angeführt.

	außen W/m^2	hinter clear float W/m^2	hinter 2-WSG W/m^2	hinter 3-WSG W/m^2	hinter 2-SSG W/m^2
März, 07:00	357	273	142	98	55
März, 12:00	749	577	341	247	157
März, 17:00	357	273	142	98	55
Juni, 07:00	697	542	328	240	150
Juni, 12:00	523	342	179	110	85
Juni, 17:00	697	542	328	240	150
September, 07:00	520	404	231	166	98
September, 12:00	726	555	331	237	155
September, 17:00	520	404	231	166	98
Dezember, 12:00	713	557	325	238	143

Tabelle 51: Bestrahlungsstärken zu den Referenzzeitpunkten

Das nachfolgend abgebildete Liniendiagramm (Diagramm 140) zeigt exemplarisch die spektral verteilten Bestrahlungsstärken in $W/(m^2nm)$ auf eine vertikal sonnennachgeführte Messfläche zu den Referenzzeitpunkten 07:00, 12:00 und 17:00 am 15. Juni. Die Linie der Bestrahlungsstärke außen gibt jene Werte an, die unmittelbar vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheiben ermittelt werden. Die weiteren vier abgebildeten Linien stellen die Bestrahlungsstärken unmittelbar nach dem Durchgang durch eine unbeschichtete Einscheiben-Verglasung, eine Zweischeiben-

¹¹³⁹ DIN 5031-3 (1982)

¹¹⁴⁰ Zu den aus photophysiologischer Sicht relevanten Tageszeitpunkten um etwa 07:00 morgens und um etwa 17:00 nachmittags ist die Sonne noch nicht aufgegangen beziehungsweise bereits untergegangen. Diese beiden Tageszeitpunkte sind daher als Referenzzeitpunkte im Sinne der vorliegenden Arbeit irrelevant.

Wärmeschutzverglasung, eine Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung und eine Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung dar.

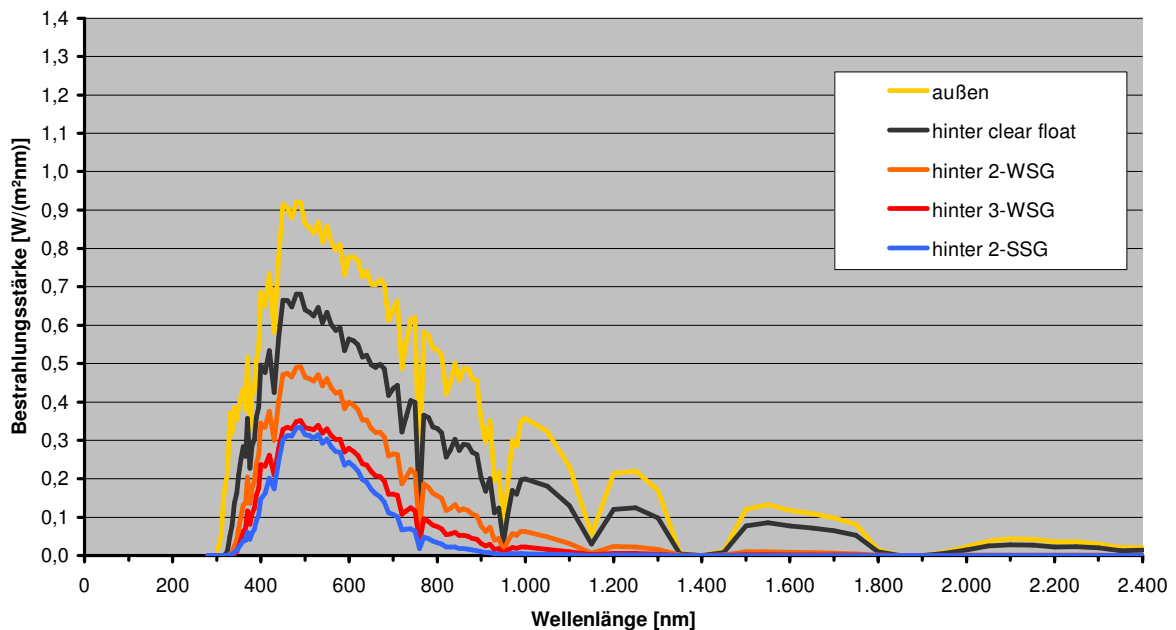


Diagramm 140: Spektrale Bestrahlungsstärke am 15. Juni um 12:00

Es ist also festzuhalten, dass die Bestrahlungsstärke im Innenraum durch den Einsatz technischer Funktionsglasscheiben deutlich, im Fall der Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung um mehr als die Hälfte, im Vergleich zum Außenraum reduziert wird. Darüber hinaus treten auch Verschiebungen in der spektralen Zusammensetzung des Tageslichts im Innenraum auf.

9.1.3.3.2.3. Auswirkungen

Die Reduktion der Bestrahlungsstärke ist visuell oftmals deutlich wahrnehmbar und führt zum vermehrten Einsatz von Kunstlicht als Tageslichtergänzung. Starke Unausgewogenheit der spektralen Zusammensetzung des Tageslichts kann zu einer als unnatürlich empfundenen Farbwiedergabe führen. Ausreichende Helligkeit und eine ausgewogene Spektralverteilung sind daher notwendig aber keineswegs hinreichende Bedingungen zu Gewährleistung visueller Ergonomie. So zählt die, den visuellen Verarbeitungsprozessen immanente Verstärkung von Kontrasten zu jenen Eigenschaften, die in Hinsicht auf die visuelle Leistungsfähigkeit jenseits von Helligkeit und spektralem Angebot speziell zu berücksichtigen sind.

9.1.3.4. Wirkpotentiale im infraroten Spektralbereich

Auch für den infraroten Spektralbereich sind photobiologische Wirkungen bekannt, wie das Auftreten von infrarot Erythemen oder entzündungshemmende und durchblutungsfördernde Wirkungen. Auch Wechselwirkungen mit den photobiologischen Wirkungen des ultravioletten Spektralbereichs werden vermutet. Auf Grund des Fehlens von Wirkungs-Kurven können jedoch keine Wirkpotentiale ermittelt werden.

9.2. These 2 zu Licht und thermischer Optimierung

Die hypothetische Annahme aus 2.2. wird in Kapitel 8 im Rahmen einer vergleichenden Potentialstudie vielfach belegt und kann daher als verifiziert gelten und in die folgende These übergeführt werden.

Es liegt ein Zielkonflikt vor zwischen der Optimierung der Tageslichtversorgung und der Optimierung des solarstrahlungsinduzierten thermischen Verhaltens eines Innenraumes in Bezug auf die Ausrichtung der, diesem Innenraum zugeordneten transparenten vertikalen Flächen.

9.2.1. Parameter zur vergleichenden Beurteilung

Um entsprechende Belege im Sinne der Fragestellung erbringen zu können, ist eine modellhafte Wohneinheit nach konstruktivistischen Prinzipien entwickelt und schrittweise in ihrer Orientierung zum Sonnengang am Referenzstandort Wien verändert worden. Die Unterschiedlichkeit der Tageslichtversorgung und des tageslichtinduzierten Verhaltens in Abhängigkeit von der jeweiligen Orientierung wurde anhand von drei Parametern, dem Durchlichtungsfaktor, dem Heizwärmebedarf und dem Kühlbedarf verglichen.

9.2.1.1. Durchlichtungsfaktor

Da außer dem orientierungsunabhängigen Tageslichtquotienten kein anschaulicher und vergleichsweise einfach zu ermittelnder Parameter für die Beurteilung der Versorgung mit direkter Sonnenstrahlung recherchiert werden kann, wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit der Durchlichtungsfaktor mit der Kurzbezeichnung LPF für Light Penetration Factor definiert und eine Software zur Kalkulation entwickelt.

Der Durchlichtungsfaktor wird definiert als jener Anteil des Nettovolumens eines Raumes, der - unter der Voraussetzung eines wolkenlosen Himmels - innerhalb eines Tages zumindest einmal von einem direkten Sonnenstrahl durchlichtet wird.

In seine Berechnung fließen die Geometrie der Sonnenbahn am konkreten Standort und die Raumgeometrie mit der Position, Größe und Orientierung der transparenten Flächen ein.

In der gegenständlichen Arbeit wird der LPF für jedes der untersuchten Basismodelle in ihren spezifischen Ausrichtungen für den jeweils 21. Tag jedes Monats berechnet. Aus diesen Werten wird ein Jahresmittelwert gebildet. Darüber hinaus werden die Monatswerte dargestellt und für wiederum den jeweils 21. Tag jedes Monats wird auch der Verlauf der stündlichen Momentanwerte des LPF ermittelt und dargestellt.

9.2.1.2. Heizwärmebedarf

Zur Beschreibung des Potentials zur Nutzung passiv solarer Gewinne zur teilweisen Deckung der winterlichen Wärmeverluste wird der Heizwärmebedarf herangezogen, definiert als die Wärmemenge, die den konditionierten Räumen zugeführt werden muss, um deren vorgegebene Solltemperatur einzuhalten, bezogen auf die Grundfläche des konditionierten Raumverbandes.

Der Heizwärmebedarf ist die Differenz zwischen den Wärmeverlusten und den internen wie den solaren Wärmegewinnen. Er bildet somit umgekehrt proportional in geeigneter Weise die Qualität eines Raumes ab, passiv solare Wärmegewinne zu nutzen.

9.2.1.3. Kühlbedarf

Das Potential zur Erreichung thermischer Sommertauglichkeit auch als Sommertauglichkeitspotential bezeichnet, wird schließlich, analog dem Heizwärmebedarf, mit dem Kühlbedarf abgebildet, definiert als Wärmemenge, die den konditionierten Räumen entzogen werden muss, um deren vorgegebene Solltemperatur einzuhalten, wieder bezogen auf die Grundfläche des konditionierten Raumverbandes.

Analog dem passiv solaren Gewinnpotential und dem Heizwärmebedarf besteht zwischen dem Sommertauglichkeitspotential und dem Kühlbedarf ein umgekehrt proportionaler Zusammenhang.¹¹⁴¹

9.2.2. Typologie mit beidseitiger Belichtung

Untersucht wird ein stark vereinfachtes, kubisches Raumvolumen, mit beidseitig vollverglasten Fassaden und einem einseitig vorgelagerten, ebenfalls vollverglasten Laubengang. Dieses als Basismodell bezeichnete Volumen wird eingebettet in eine übergordnete Raumstruktur in der Typologie des mehrgeschossigen Wohnbaus. Geometrie und thermische Bauteileigenschaften werden solcherart definiert, dass die Mindestbestimmungen der geltenden Baugesetze und Normen am konkreten Standort Wien genau erfüllt werden.

Die Ausrichtung des solcherart definierten Volumens wird in Schritten von 30° verändert. Für jede dieser Orientierungen werden die drei oben genannten Kennzahlen Durchlichtungsfaktor, Heizwärmebedarf und Kühlbedarf ermittelt. Im Folgenden wird der Durchlichtungsfaktor mit der Abkürzung LPF, der Heizwärmebedarf mit der Abkürzung HWB und der Kühlbedarf mit der Abkürzung KB bezeichnet.

¹¹⁴¹ Explizit hingewiesen wird auf den Umstand, dass die Verwendung des Kühlbedarfs in der gegenständlichen konstruktivistischen Potentialstudie seine Berechtigung hat, dass aber im realen Wohnbau thermische Sommertauglichkeit ohne technische Kühlung erreicht werden muss, dass also im Wohnbau durch geeignete Maßnahmen wie die Dimensionierung und Materialwahl der Fenster, durch Beschattungsmaßnahmen und Ähnliches, der Kühlbedarf auf Null zu reduzieren ist.

9.2.2.1. Abbildung der Windrose

Zur anschaulichen und vergleichenden Darstellung der Ergebnisse von LPF, HWB und KB wird eine Abbildung in einer abstrahierten Windrose entwickelt.

In konzentrischen Kreisen sind – von außen nach innen– Farbkodierungen für die drei Kennzahlen LPF, HWB und KB eingetragen. Graue Farbgebung bezeichnet einen Kennwert im Mittelfeld der Ergebnisse aller zwölf untersuchten Ausrichtungen, rote Farbgebung bezeichnet schlechteren Ergebnisse des jeweiligen Kennwerts, grüne Farbgebung bessere Ergebnisse. Die zwölf Sektoren der Windrosendarstellung bezeichnen jeweils die Orientierung der Laubengangfassade, in positiver Zählweise von der Südrichtung im Uhrzeigersinn und negativer Zählweise von der Südrichtung gegen den Uhrzeigersinn.

Es werden zwei unterschiedlich breite und auch unterschiedlich tiefe Basismodelle untersucht, einmal jenes mit 4,6m Wohnungsbreite und 14m Tiefe, bezeichnet als T_GGG_B460_T1400 sowie jenes mit 2,3m Wohnungsbreite und 11m Tiefe, bezeichnet als T_GGG_B460_T1100, wobei GGG für die Konstellation mit den insgesamt drei vollverglasten Fassaden steht.

In den nachfolgenden vergleichenden Kreisdarstellungen für T_GGG_B460_T1400 (Abbildung 64) und T_GGG_B230_T1100 (Abbildung 65) wird die Orientierung des Basismodells mit dem Kürzel A, gefolgt von der Ausrichtung jeweils der Laubengangfassade, bezeichnet. Weiters wird eine verbale Charakterisierung der jeweiligen Typen in ihrer konkreten Orientierung angeführt, die nachfolgend erläutert wird. Es gilt folgende Legende (Abbildung 63):

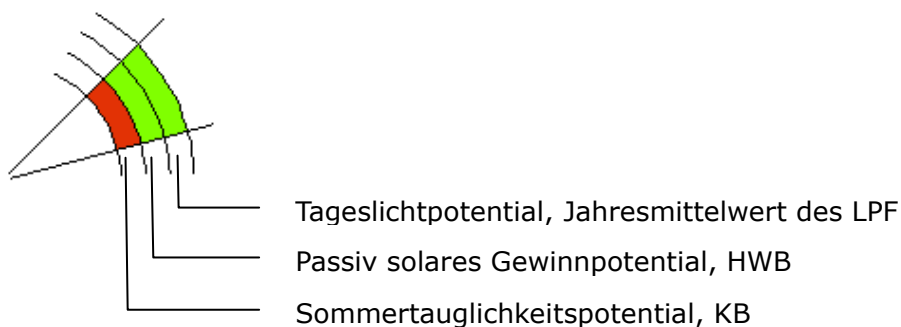


Abbildung 63: Schema der vergleichenden Kreisdarstellung wie bereits eingeführt

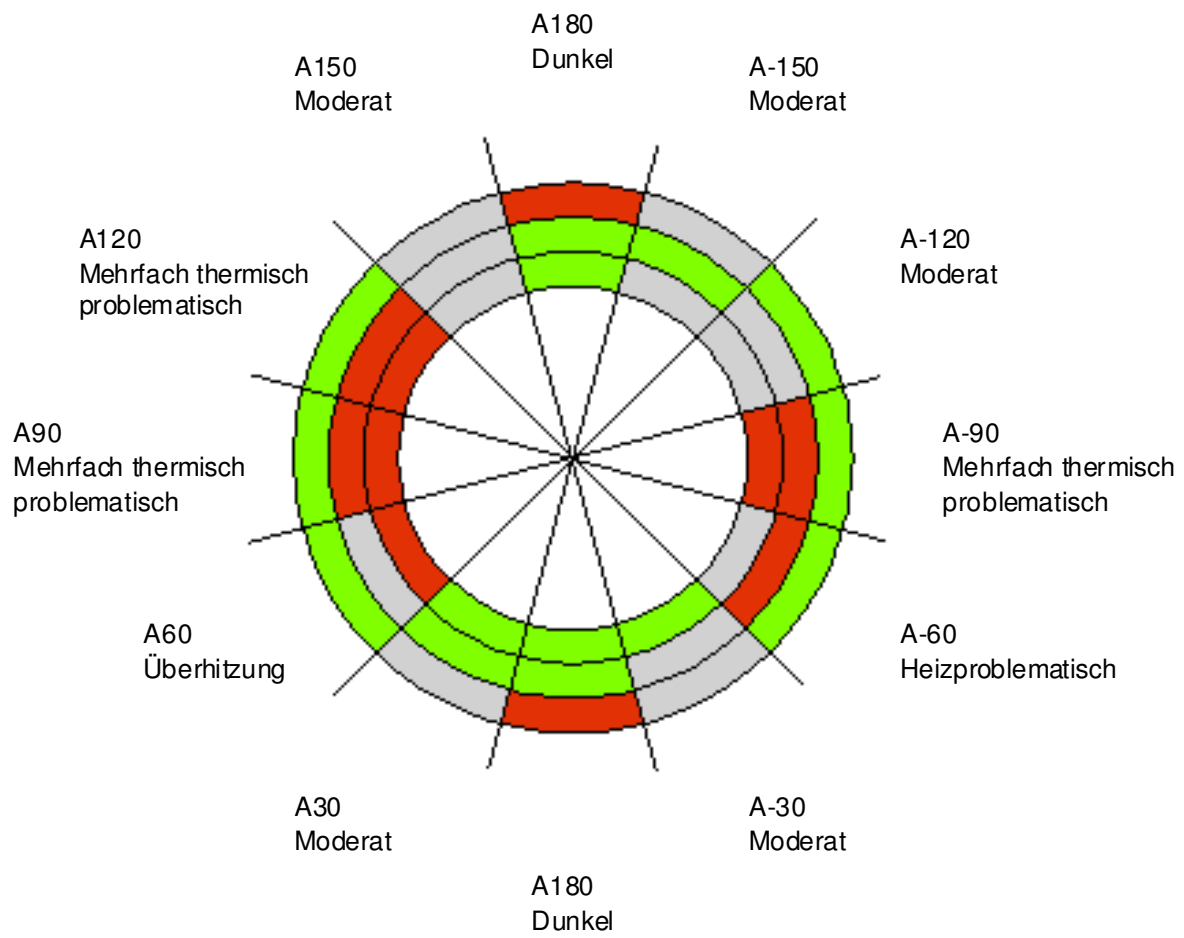


Abbildung 64: Beschriftete Kreisdarstellung der Typologien für T_GGG_B460_T1400

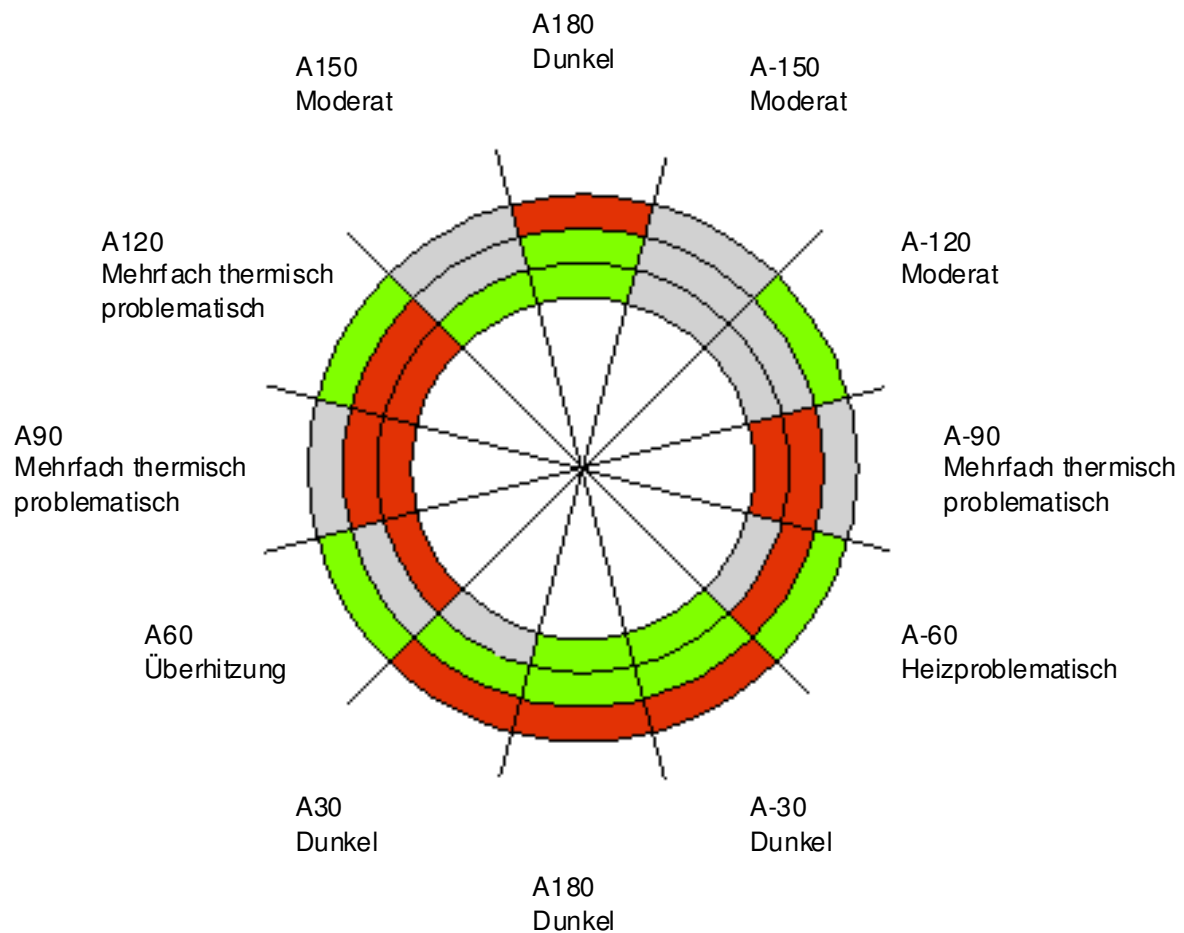


Abbildung 65: Beschriftete Kreisdarstellung der Typologien für T_GGG_B230_T1100

Aus beiden Abbildungen (Abbildung 64, Abbildung 65) bestätigt sich eindrücklich der angenommene Zielkonflikt zwischen der Optimierung der Tageslichtversorgung und der Optimierung des solarstrahlungsinduzierten thermischen Verhaltens eines Innenraumes in Bezug auf die Ausrichtung der, diesem Innenraum zugeordneten transparenten vertikalen Flächen: In keiner einzigen Orientierung erreicht das Tageslichtpotential gleichzeitig mit auch nur einem der beiden thermischen Potentiale ein Ergebnis im grünen, optimalen Bereich.

9.2.2.2. Übersichtstabelle mit HWB, KWB, LPF numerisch

Die oben grafisch veranschaulichten Ergebnisse sind nachfolgend tabellarisch mit Zahlenwerten angeführt, wiederum für die beiden, beidseitig belichteten Basismodelle.

9.2.2.2.1. Basismodell T_GGG_B460_T1400

Mittelwerte über alle Ausrichtungen

LPF 52%

HWB 24 kWh/m²a

KB 46 kWh/m²a

Definition der dreistufigen Bewertungsskala

LPF Mittelfeld um ± 33% vom Mittelwert

HWB Mittelfeld um ± 5% vom Mittelwert

KB Mittelfeld um ± 10% vom Mittelwert

Die folgende Tabelle (Tabelle 52) zeigt eine Ergebnisübersicht über den Light Penetration Factor, den Heizwärmebedarf und den Kühlbedarf des T_GGG_B460_T1400 entsprechend den zwölf gewählten Ausrichtungen.

	LPF [%]	HWB [kWh/m ²]	KB [kWh/m ²]
T_GGG_B460_T1400_A180	22	22	40
T_GGG_B460_T1400_A150	39	24	43
T_GGG_B460_T1400_A120	74	27	51
T_GGG_B460_T1400_A90	69	27	55
T_GGG_B460_T1400_A60	73	24	51
T_GGG_B460_T1400_A30	35	20	41
T_GGG_B460_T1400_A0	16	20	35
T_GGG_B460_T1400_A-30	35	23	41
T_GGG_B460_T1400_A-60	73	26	49
T_GGG_B460_T1400_A-90	69	27	53
T_GGG_B460_T1400_A-120	74	25	50
T_GGG_B460_T1400_A-150	39	22	44

Tabelle 52: Ergebnisübersicht T_GGG_B460_T1400

9.2.2.2.2. Basismodell T_GGG_B230_T1100

Mittelwerte über alle Ausrichtungen

LPF 49%

HWB 23 kWh/m²a

KB 66 kWh/m²a

Definition der dreistufigen Bewertungsskala

LPF Mittelfeld um $\pm 33\%$ vom Mittelwert

HWB Mittelfeld um $\pm 7,8\%$ vom Mittelwert

KB Mittelfeld um $\pm 8\%$ vom Mittelwert

Die folgende Tabelle (Tabelle 53) zeigt eine Ergebnisübersicht über den Light Penetration Factor, den Heizwärmebedarf und den Kühlbedarf des T_GGG_B230_T1100 entsprechend den zwölf gewählten Ausrichtungen.

	LPF [%]	HWB [kWh/m ²]	KB [kWh/m ²]
T_GGG_B230_T1100_A180	24	21	55
T_GGG_B230_T1100_A150	38	24	60
T_GGG_B230_T1100_A120	71	27	72
T_GGG_B230_T1100_A90	64	28	74
T_GGG_B230_T1100_A60	69	22	76
T_GGG_B230_T1100_A30	32	17	62
T_GGG_B230_T1100_A0	16	17	54
T_GGG_B230_T1100_A-30	32	21	60
T_GGG_B230_T1100_A-60	69	26	71
T_GGG_B230_T1100_A-90	64	27	74
T_GGG_B230_T1100_A-120	71	25	69
T_GGG_B230_T1100_A-150	38	22	61

Tabelle 53: Ergebnisübersicht T_GGG_B230_T1100

9.2.2.3. Verbalbeschreibung der Typen

Aufbauend auf der oben vorgenommenen orientierungsabhängigen Analyse der einzelnen Potentiale werden Typen entsprechend ihrer spezifischen Performance charakterisiert und in Gruppen zusammengefasst. Differenziert werden:

- > Moderate Typen
mit mittlerer Performance in allen Potentialen
- > Dunkle Typen
mit niedrigem LPF bei teils guter thermischer Performance
- > Thermisch mehrfach problematische Typen
mit hohem HWB und hohem KB
- > Heizproblematische Typen
mit hohem HWB
- > Überhitzungstypen
mit hohem KB

9.2.2.3.1. Moderate Typen

Die "moderaten Typen" haben mittelmäßige und bis gute Ergebnisse in allen drei Potentialen.

Im beidseitig belichteten Basismodell (GGG) handelt es sich dabei um die die Typen mit einer um $\pm 30^\circ$ aus der Nord-Süd-Richtung gedrehten Längsachse der Wohnung, sowohl bei nord-, als auch südseitig orientiertem Laubengang.

9.2.2.3.2. Thermisch mehrfach problematische Typen

Die "thermisch mehrfach problematischen Typen" weisen Defizite sowohl hinsichtlich des passiv solaren Gewinnpotentials als auch hinsichtlich des Sommertauglichkeitspotentials auf.

Im beidseitig belichteten Basismodell (GGG) sind das die Typen mit einer ost-west gerichteten Längsachse der Wohnung, sowohl bei ost-, als auch westseitig orientiertem Laubengang, im Detail die Ausrichtungen $A \pm 90$ und $A120$. Das Tageslichtpotential liegt bei diesen Typen an der Schwelle vom mittleren zum guten Bereich.

9.2.2.3.3. Dunkle Typen

Die "dunklen Typen" weisen allesamt schlechte Tageslichtpotentiale auf, bei gleichzeitig durchwegs gutem Abschneiden in beiden thermischen Kategorien.

Im beidseitig belichteten Basismodell (GGG) sind das die Typen mit einer exakt Nord-Süd gerichteten Längsachse der Wohnung, sowohl bei nord-, als auch südseitig orientiertem Laubengang. Im Fall der schmalen Wohneinheit dehnt sich der Bereich der dunklen Typen auch auf Laubengangorientierungen nach SSW und SSO aus.

9.2.2.3.4. Heizproblematische Typen

Die "heizproblematischen Typen" weisen allesamt ein schlechtes Passiv solares Gewinnpotential und somit einen hohen HWB auf, bei gleichzeitig zumindest mittlerem KB.

Es sind das im beidseitig belichteten Basismodell (GGG) die Typen mit einem OSO-orientiertem Laubengang. Der LPF weist dabei einen Wert im guten Bereich auf.

9.2.2.3.5. Überhitzungstypen

Die "Überhitzungstypen" weisen allesamt ein schlechtes Sommertauglichkeitspotential und somit einen hohen KB auf. Gleichzeitig ist der HWB im mittleren oder guten Bereich.

Im beidseitig belichteten Basismodell (GGG) sind das die Typen mit einem WSW-orientierten Laubengang.

9.2.2.4. Ergebnisse im Zeitverlauf

Über die Berechnung und Auswertung der Jahresmittelwerte des LPF und der Jahressummen von HWB und KB hinaus werden Ergebnisse im Zeitverlauf ermittelt und ausgewertet: Der LPF für den jeweils 21. Tag jedes Monats des Jahres sowie der Verlauf des stündlichen Momentanwert des LPF innerhalb jedes dieser Tage. Weiters die Monatssummen von HWB und KB.

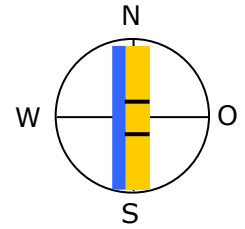
Diese Analyse im Zeitverlauf erlaubt eine differenzierte, jahres- und tageszeitabhängige Beurteilung der Kennzahlen, was insbesondere im Fall des LPF eine wertvolle Information für den Tageslicht optimierenden Entwurf ist. Aufgrund des großen Datenumfangs wird eine Zusammenfassung der Ergebnisse auf ein jeweils einseitiges Datenblatt für jedes der untersuchten Basismodelle in ihren jeweils 12 Orientierungen vorgenommen.

Die Datenblätter sind im Kapitel 8.6 beziehungsweise ergänzend im Anhang vollständig dokumentiert. Nachfolgend exemplarisch abgebildet sind zwei Datenblätter: Erstens jenes für das breite, doppelseitig belichtete Basismodell mit westorientiertem Laubengang, gekennzeichnet als T_GGG_B460_1400_A90 und der Gruppe der mehrfach thermisch problematischen Typen zugehörig. Zweitens jenes für dasselbe breite, doppelseitig belichtete Basismodell, diesmal aber mit südorientiertem Laubengang, gekennzeichnet als T_GGG_B460_1400_A0 und der Gruppe der dunklen Typen zugehörig.

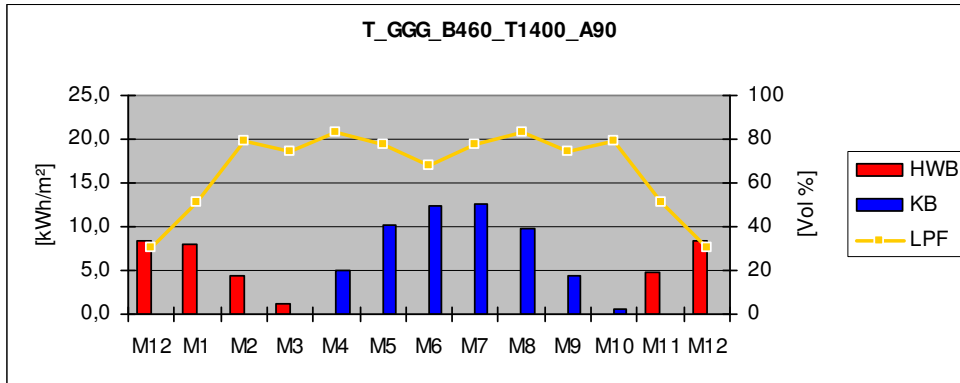
Auf den Datenblättern sind die folgenden Informationen dargestellt:

- > Codierung des jeweiligen Typs des Basismodells in der Titelzeile
- > Ergebnistabelle mit jeweils zwölf Monatswerten für HWB, KB und LPF sowie Jahressummen für HWB und KB und der Jahresdurchschnitt des LPF
- > Ergebnisdiagramm mit jeweils zwölf Monatswerten für HWB, KB und LPF
- > Drei perspektivische Darstellungen des Durchlichtungsfaktors, jeweils exemplarisch zur Winter- und Sommersonnenwende sowie zur Tag-Nacht-Gleiche, darin farbig angelegt jene Teilvolumen, die innerhalb des Tages jeweils zumindest einmal von direkter Strahlung durchlichtet werden können.
- > Drei Säulendiagramme mit den stündlichen Momentanwerten des Durchlichtungsfaktors, jeweils exemplarisch zur Winter- und Sommersonnenwende sowie zur Tag-Nacht-Gleiche

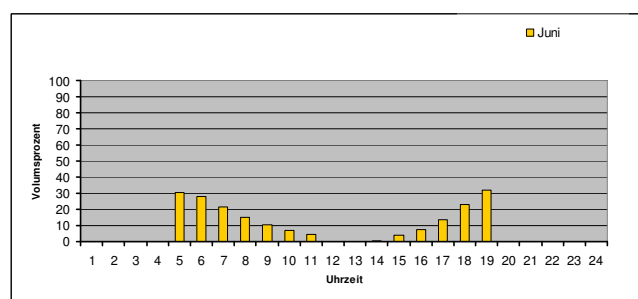
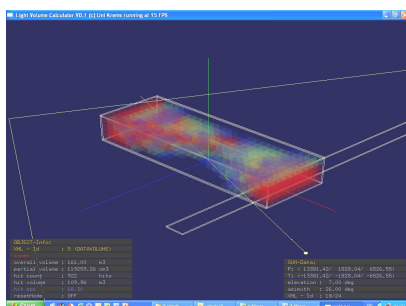
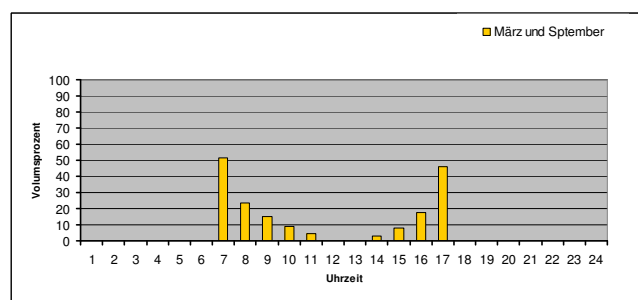
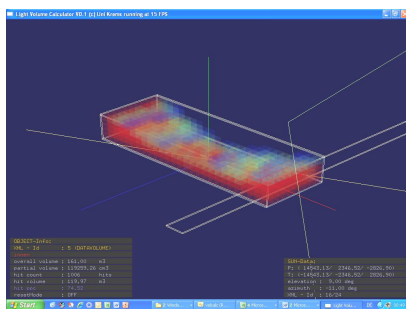
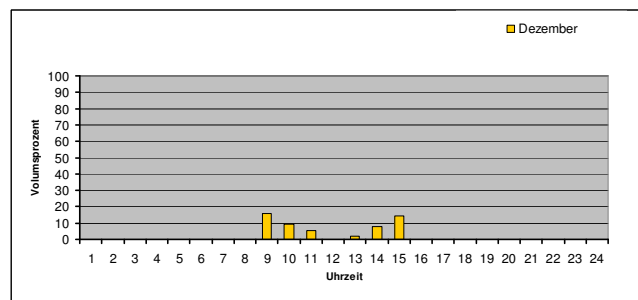
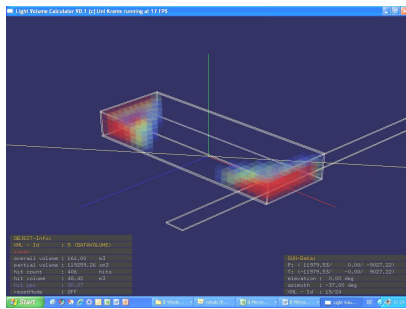
Datenblatt Typ T_GGG_B460_T1400_A90



T_GGG_B460_T1400_A90														
	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	Sum/Average
LPF	30	51	79	75	83	77	68	77	83	75	79	51	30	69 %
HWB	8,3	8,1	4,4	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0			0,1	4,8	8,3	27 kWh/m ²
KB	0,0	0,0	0,0	0,1	4,9	10,3	12,5	12,7	9,9	4,3	0,6	0,0	0,0	55 kWh/m ²

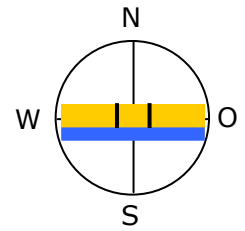


Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]

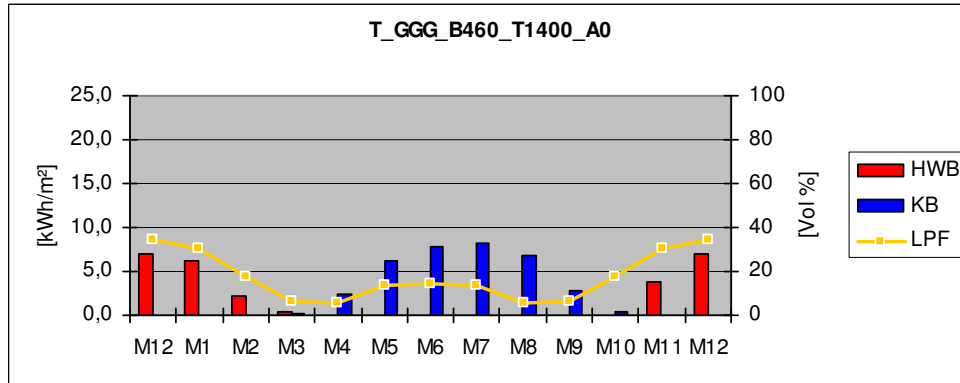


Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

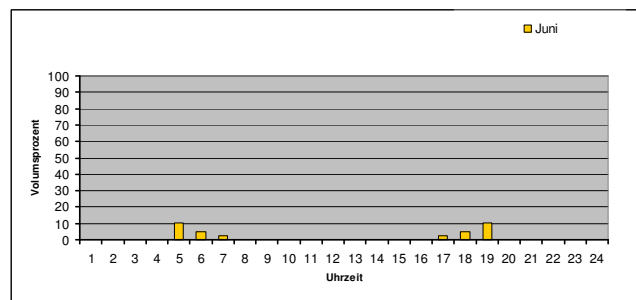
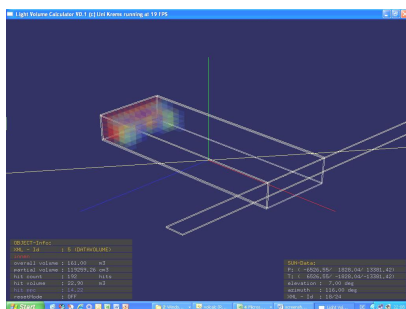
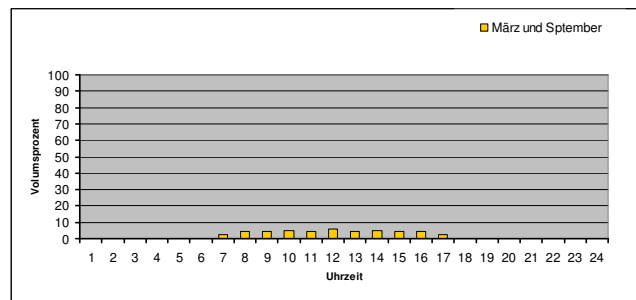
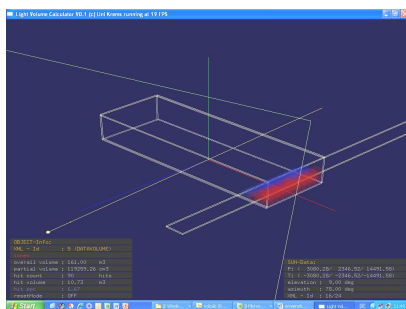
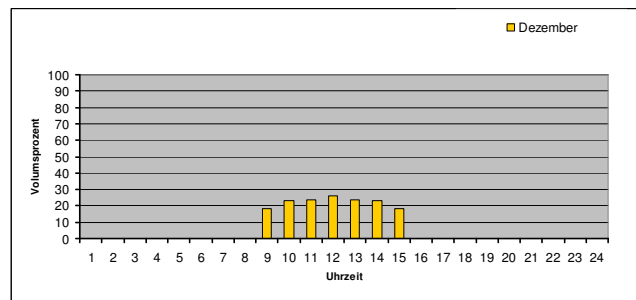
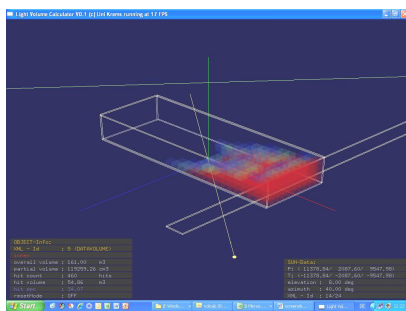
Datenblatt Typ T_GGG_B460_T1400_A0



T_GGG_B460_T1400_A0														
	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	Sum/Average
LPF	34	31	17	7	6	13	14	13	6	7	17	31	34	16 %
HWB	6,9	6,1	2,2	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,8	6,9	20 kWh/m ²
KB	0,0	0,0	0,0	0,2	2,5	6,2	7,9	8,3	6,8	2,9	0,5	0,0	0,0	35 kWh/m ²



Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]



Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

Im Vergleich der beiden Datenblätter zeigen sich deutlich die grundsätzlich unterschiedlichen Charakteristika der beiden Orientierungen des ansonsten identischen Raummodells, auf die in der Realität insbesondere mit einer geeigneten Grundrissgestaltung zu reagieren ist.

9.2.3. Typologie mit einseitiger Belichtung

Ergänzend zu dem oben diskutierten Raumvolumen mit beidseitig vollverglasten Fassaden wurden auch zwei analoge Raummodelle mit einer jeweils vollständig opaken Wand gegen den Laubengang untersucht. Die Abfolge von einer verglasten Fassade, einer Wand und wiederum der Verglasung des Laubengangs wird im Kürzel GWG ausgedrückt. Alle anderen Festlegungen und Analysemethoden werden beibehalten.

9.2.3.1. Abbildung der Windrose

Wiederum werden die Ergebnisse von LPF, HWB und KB in einer abstrahierten Windrose qualitativ dargestellt:

In konzentrischen Kreisen sind – von außen nach innen– Farbkodierungen für die drei Kennzahlen LPF, HWB und KB eingetragen. Graue Farbgebung bezeichnet einen Kennwert im Mittelfeld der Ergebnisse aller zwölf untersuchten Ausrichtungen, rote Farbgebung bezeichnet schlechtere Ergebnisse des jeweiligen Kennwerts, grüne Farbgebung alle besseren Ergebnisse. Die zwölf Sektoren der Windrosendarstellung bezeichnen jeweils die Orientierung der Laubengangfassade, in positiver Zählweise von der Südrichtung im Uhrzeigersinn und negativer Zählweise von der Südrichtung gegen den Uhrzeigersinn.

Es werden zwei unterschiedlich breite und auch unterschiedlich tiefe Basismodelle untersucht, einmal jenes mit 4,6m Wohnungsbreite und 11,5m Tiefe, bezeichnet als T_GWG_B230_T1150 sowie jenes mit 2,3m Wohnungsbreite und 9m Tiefe, bezeichnet als T_GWG_B230_T900.

In den nachfolgenden vergleichenden Kreisdarstellungen für T_GWG_B460_T1150 (Abbildung 66) und für T_GWG_B230_T900 (Abbildung 67) wird wieder die Orientierung des Basismodells mit dem Kürzel A, gefolgt von der Ausrichtung jeweils der Laubengangfassade, bezeichnet. Weiters wird wieder die bereits beschriebene verbale Charakterisierung der jeweiligen Typen in ihrer konkreten Orientierung angeführt. Es gilt die eingeführte Legende.

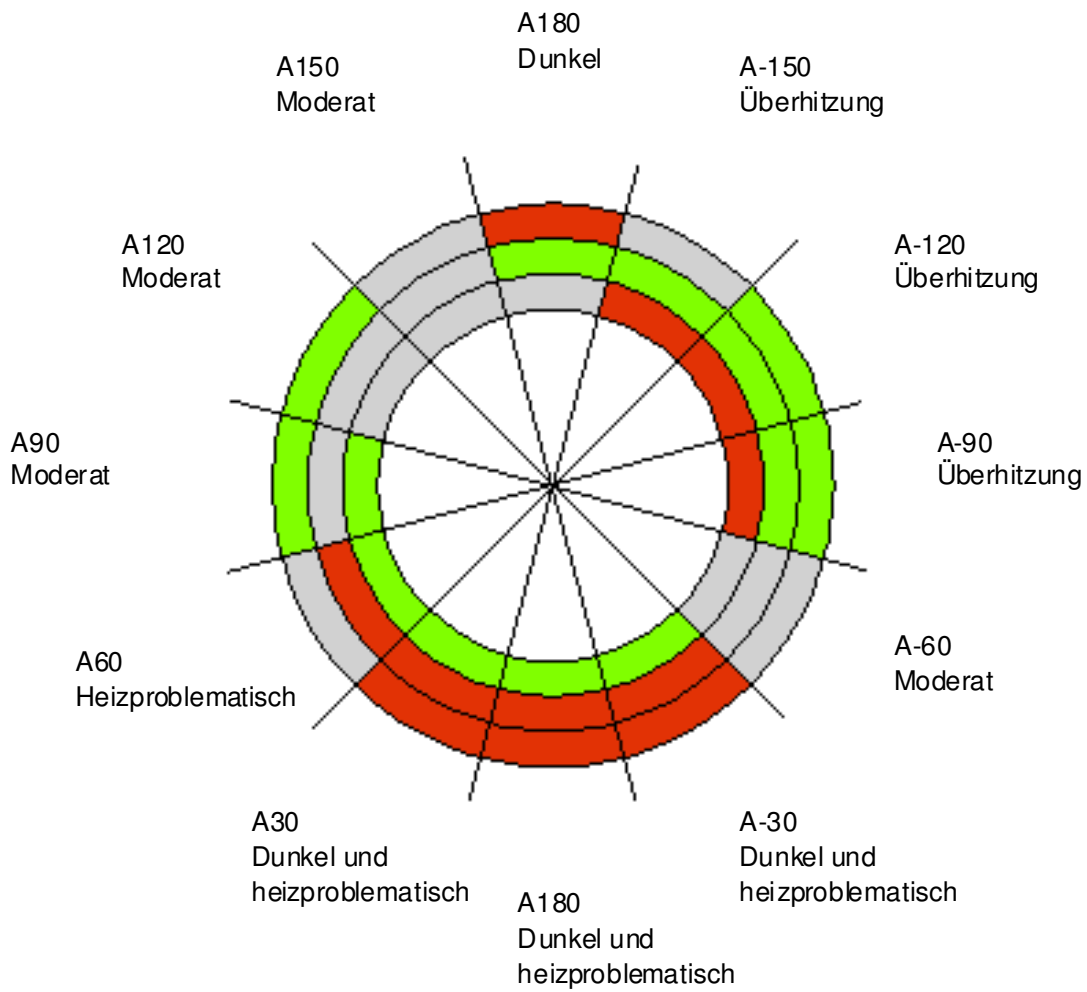


Abbildung 66: Beschriftete Kreisdarstellung der Typologien für T_GWG_B460_T1150

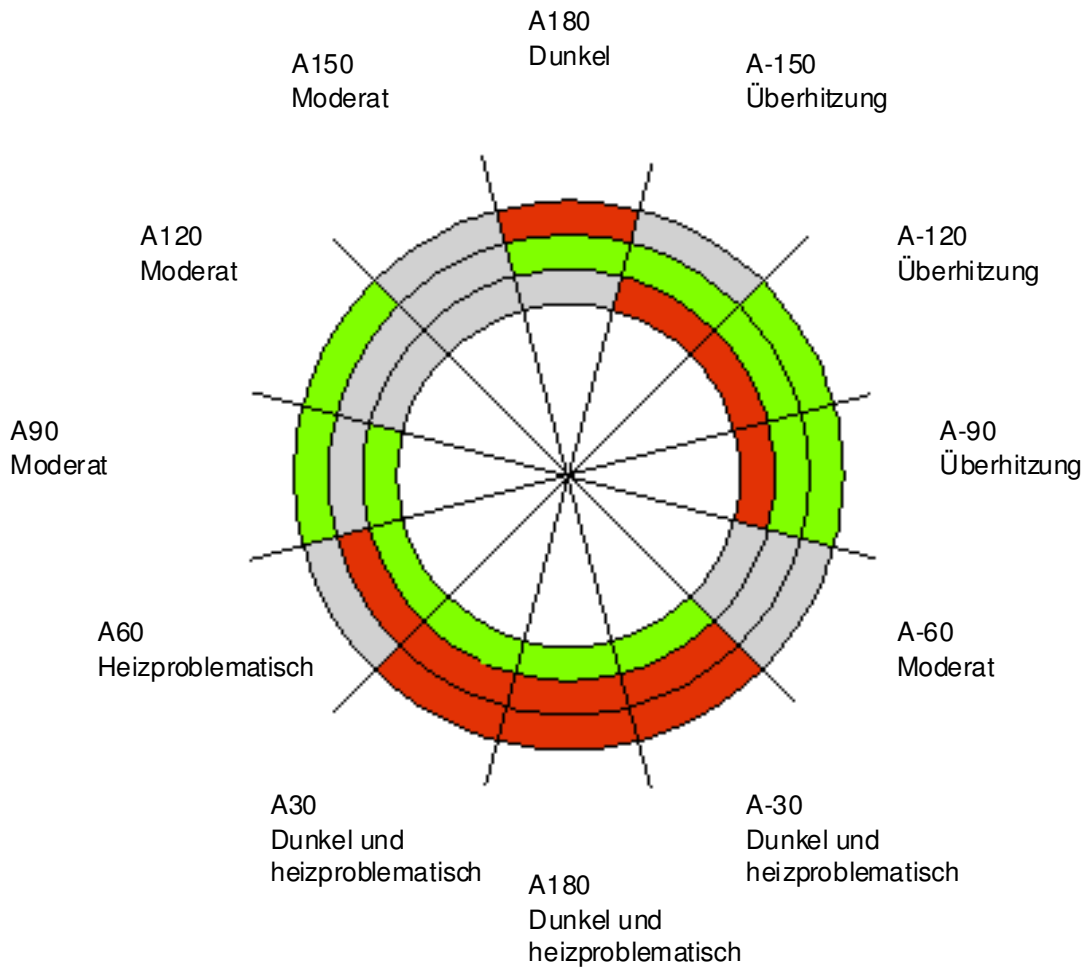


Abbildung 67: Beschriftete Kreisdarstellung der Typologien für T_GWG_B230_T900

Auch aus diesen beiden Abbildungen bestätigt sich der angenommene Zielkonflikt zwischen der Optimierung der Tageslichtversorgung und der Optimierung des solarstrahlungsinduzierten thermischen Verhaltens eines Innenraumes in Bezug auf die Ausrichtung der, diesem Innenraum zugeordneten transparenten vertikalen Flächen, wobei bei dem zugrunde gelegten einseitig belichteten Volumen insbesondere der Zielkonflikt zwischen Optimierung des HWB und des KB augenscheinlich wird.

9.2.3.2. Übersichtstabelle mit HWB, KWB, LPF numerisch

Die oben grafisch veranschaulichten Ergebnisse sind nachfolgend wiederum tabellarisch mit Zahlenwerten angeführt, wiederum für die beiden, einseitig belichteten Basismodelle.

9.2.3.3. Basismodell T_GWG_B460_T1150

Mittelwerte über alle Ausrichtungen

LPF 33%

HWB 33 kWh/m²a

KB 24 kWh/m²a

Definition der dreistufigen Bewertungsskala

LPF Mittelfeld um $\pm 18\%$ vom Mittelwert

HWB Mittelfeld um $\pm 12\%$ vom Mittelwert

KB Mittelfeld um $\pm 13\%$ vom Mittelwert

Die folgende Tabelle (Tabelle 54) zeigt eine Ergebnisübersicht über den Light Penetration Factor, den Heizwärmebedarf und den Kühlbedarf des T_GWG_B460_T1150 entsprechend den zwölf gewählten Ausrichtungen.

	LPF [%]	HWB [kWh/m ²]	KB [kWh/m ²]
T_GWG_B460_T1150_A180	27	26	35
T_GWG_B460_T1150_A150	36	30	36
T_GWG_B460_T1150_A120	52	36	35
T_GWG_B460_T1150_A90	46	40	31
T_GWG_B460_T1150_A60	32	42	24
T_GWG_B460_T1150_A30	10	42	17
T_GWG_B460_T1150_A0	4	42	15
T_GWG_B460_T1150_A-30	10	42	24
T_GWG_B460_T1150_A-60	32	41	32
T_GWG_B460_T1150_A-90	64	27	74
T_GWG_B460_T1150_A-120	52	28	45
T_GWG_B460_T1150_A-150	36	26	41

Tabelle 54: Ergebnisübersicht T_GWG_B460_T1150

9.2.3.4. Basismodell T_GWG_B230_T900

Mittelwerte über alle Ausrichtungen

LPF 33%

HWB 35 kWh/m²a

KB 34 kWh/m²a

Definition der dreistufigen Bewertungsskala

LPF Mittelfeld um $\pm 18\%$ vom Mittelwert

HWB Mittelfeld um $\pm 18\%$ vom Mittelwert

KB Mittelfeld um $\pm 7\%$ vom Mittelwert

Die folgende Tabelle (Tabelle 55) zeigt eine Ergebnisübersicht über den Light Penetration Factor, den Heizwärmebedarf und den Kühlbedarf des T_GWG_B230_T900 entsprechend den zwölf gewählten Ausrichtungen.

	LPF [%]	HWB [kWh/m ²]	KB [kWh/m ²]
T_GWG_B230_L900_A180	27	26	35
T_GWG_B230_L900_A150	36	30	36
T_GWG_B230_L900_A120	52	36	35
T_GWG_B230_L900_A90	46	40	31
T_GWG_B230_L900_A60	32	42	24
T_GWG_B230_L900_A30	10	42	17
T_GWG_B230_L900_A0	4	42	15
T_GWG_B230_L900_A-30	10	42	21
T_GWG_B230_L900_A-60	32	41	32
T_GWG_B230_L900_A-90	64	27	74
T_GWG_B230_L900_A-120	52	28	45
T_GWG_B230_L900_A-150	35	26	41

Tabelle 55: Ergebnisübersicht T_GWG_B230_T900

9.2.3.5. Verbalbeschreibung der Typen

Aufbauend auf der oben vorgenommenen orientierungsabhängigen Analyse der einzelnen Potentiale werden wieder Typen entsprechend ihrer spezifischen Performance charakterisiert und in Gruppen zusammengefasst. Identisch mit der Analyse des beidseitig belichteten Raumvolumens werden auch für das einseitig belichtete Raumvolumen folgende Typen differenziert:

- > Moderate Typen
mit mittlerer Performance in allen Potentialen
- > Dunkle Typen
mit niedrigem LPF bei teils guter thermischer Performance
- > Thermisch mehrfach problematische Typen
mit hohem HWB und hohem KB
- > Heizproblematische Typen
mit hohem HWB
- > Überhitzungstypen
mit hohem KB

9.2.3.5.1. Moderate Typen

Die "moderaten Typen" haben mittelmäßige und bis gute Ergebnisse in allen drei Potentialen.

Im einseitig belichteten Basismodell (GWG) treten moderate Typen in den Ausrichtungen A90 bis A150 und in der Ausrichtung A-60 auf, demnach bei W- bis NNW- und bei OSO-Orientierung des Laubenganges mit intransparentem Trennelement zur Wohneinheit.

9.2.3.5.2. Thermisch mehrfach problematische Typen

Die "thermisch mehrfach problematischen Typen" weisen Defizite sowohl hinsichtlich des passiv solaren Gewinnpotentials als auch hinsichtlich des Sommertauglichkeitspotentials auf.

Im einseitig belichteten Basismodell (GWG) treten mehrfach thermisch problematische Typen in keiner Orientierung auf.

9.2.3.5.3. Dunkle Typen

Die "dunklen Typen" weisen allesamt schlechte Tageslichtpotentiale auf, bei gleichzeitig durchwegs gutem Abschneiden in beiden thermischen Kategorien.

Im einseitig belichteten Basismodell (GWG) ergibt sich hinsichtlich der dunklen Typen ein ähnliches Bild wie im beidseitig belichteten Basismodell (GGG), wenn auch auf zum Teil eklatant niedrigerem Niveau.

Dunkle Typen sind somit jene mit einer exakt Nord-Süd gerichteten Längsachse der Wohnung, sowohl bei nord-, als auch südseitig orientiertem Laubengang. Im Fall der schmalen Wohneinheit dehnt sich der Bereich der dunklen Typen auch auf Laubengangorientierungen nach SSW und SSO aus.

9.2.3.5.4. Heizproblematische Typen

Die "heizproblematischen Typen" weisen allesamt ein schlechtes passiv solares Gewinnpotential und somit einen hohen HWB auf, bei gleichzeitig zumindest mittlerem KB. Im einseitig belichteten Basismodell (GWG) sind es jene Typen mit einem SSO- bis WSW-orientierten Laubengang. Der LPF liegt dabei überwiegend im schlechten Bereich. Es handelt sich demnach um gleichzeitig heizproblematische und dunkle Typen.

9.2.3.5.5. Überhitzungstypen

Die "Überhitzungstypen" weisen allesamt ein schlechtes Sommertauglichkeitspotential und somit einen hohen KB auf. Gleichzeitig ist der HWB im mittleren oder guten Bereich. Im einseitig belichteten Basismodell (GWG) handelt es sich dabei – wie auch beim beidseitig belichteten Modell - um die Typen mit einem WSW-orientierten Laubengang dieselbe Ausrichtung sowie, nur hier, um die NNO- bis O- Orientierung des Laubenganges mit intransparentem Trennelement zur Wohneinheit.

9.2.3.6. Ergebnisse im Zeitverlauf

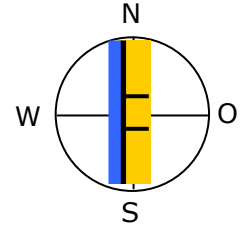
Identisch mit der Ergebnisauswertung der beidseitig belichteten Modelle wird auch für die einseitig belichteten Typen eine Auswertung der Ergebnisse im Zeitverlauf vorgenommen: Der LPF für den jeweils 21. Tag jedes Monats des Jahres sowie der Verlauf des stündlichen Momentanwert des LPF innerhalb jedes dieser Tage. Weiters die Monatssummen von HWB und KB.

Auch hier werden die Ergebnisse auf Datenblättern zusammengefasst, von denen wiederum zwei exemplarisch nachfolgend abgebildet sind: Erstens jenes für das breite, einseitig belichtete Basismodell mit westorientiertem Laubengang, gekennzeichnet als T_GWG_B460_1400_A90 und der Gruppe der moderaten Typen zugehörig. Zweitens jenes für dasselbe breite, doppelseitig belichtete Basismodell, diesmal aber mit südorientiertem Laubengang, gekennzeichnet als T_GGG_B460_1400_A0 und der Gruppe der dunklen und gleichzeitig heizproblematischen Typen zugehörig.

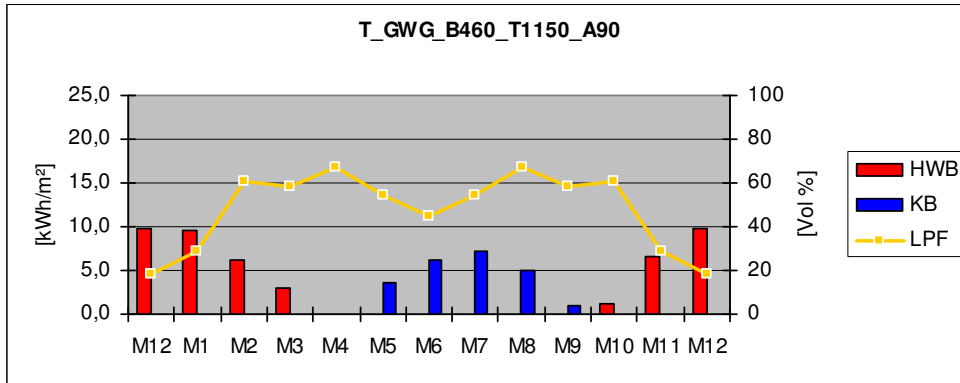
Auf den Datenblättern sind wiederum die folgenden Informationen dargestellt:

- > Codierung des jeweiligen Typs des Basismodells in der Titelzeile
- > Ergebnistabelle mit jeweils zwölf Monatswerten für HWB, KB und LPF sowie Jahressummen für HWB und KB und den Jahresdurchschnitt des LPF
- > Ergebnisdiagramm mit jeweils zwölf Monatswerten für HWB, KB und LPF
- > Drei perspektivische Darstellungen des Durchlichtungsfaktors, jeweils exemplarisch zur Winter- und Sommersonnenwende sowie zur Tag-Nacht-Gleiche, darin farblich angelegt jene Teilvolumen, die innerhalb des Tages jeweils zumindest einmal von direkter Strahlung durchlichtet werden können.
- > Drei Säulendiagramme mit den stündlichen Momentanwerten des Durchlichtungsfaktors, jeweils exemplarisch zur Winter- und Sommersonnenwende sowie zur Tag-Nacht-Gleiche

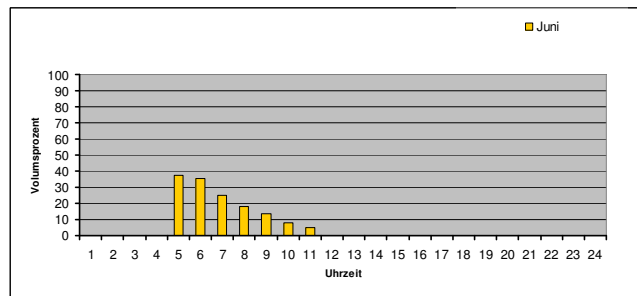
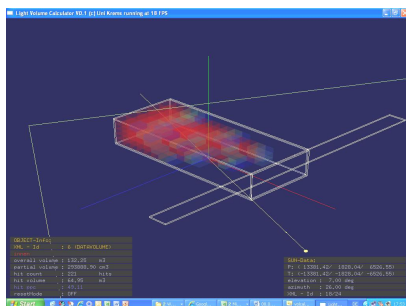
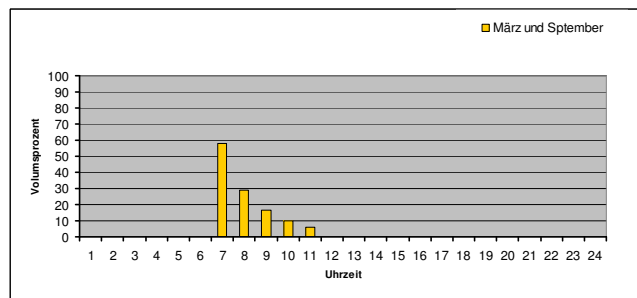
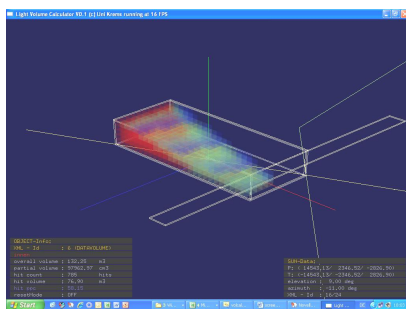
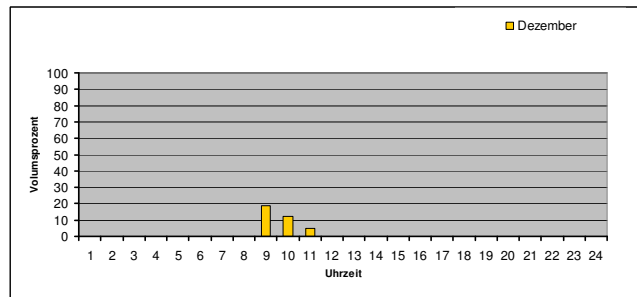
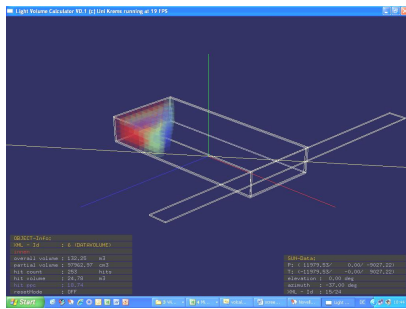
Datenblatt Typ T_GWG_B460_T1150_A90



T_GWG_B460_T1150_A90														
	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	Sum/Average
LPF	19	29	61	58	67	54	45	54	67	58	61	29	19	50,22 %
HWB	9,8	9,6	6,2	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,3	6,7	9,8	36,57 kWh/m ²
KB	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,6	6,3	7,2	5,0	1,1	0,0	0,0	0,0	23,17 kWh/m ²

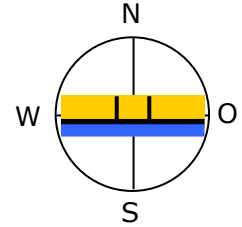


Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]

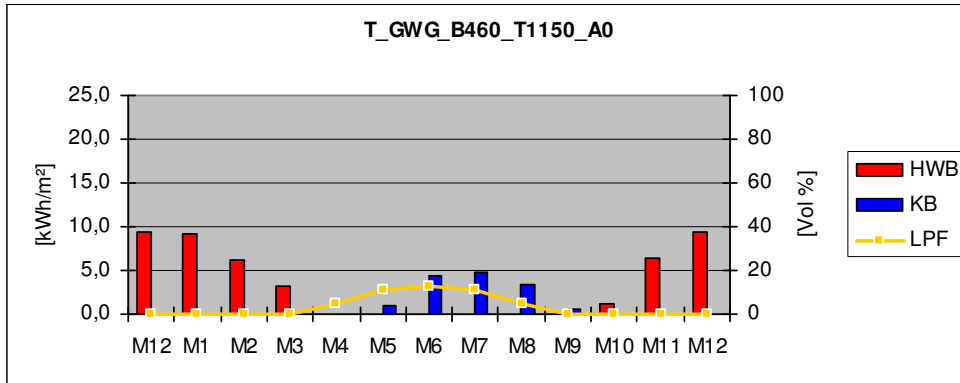


Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

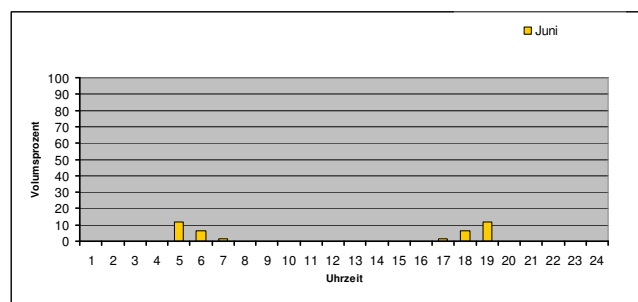
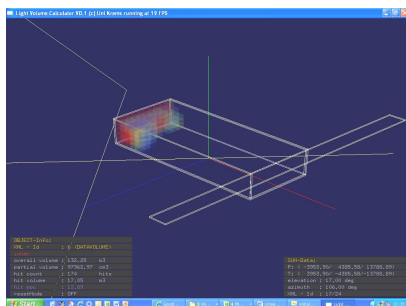
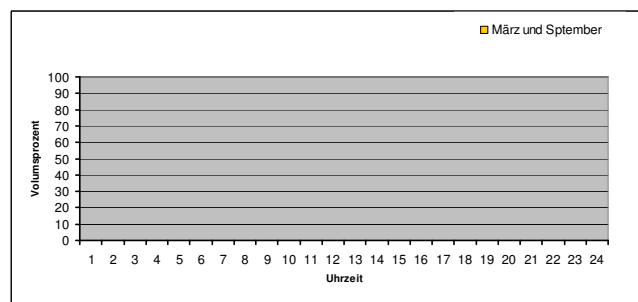
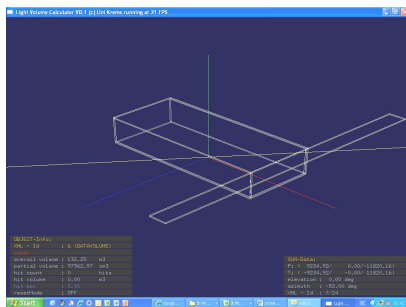
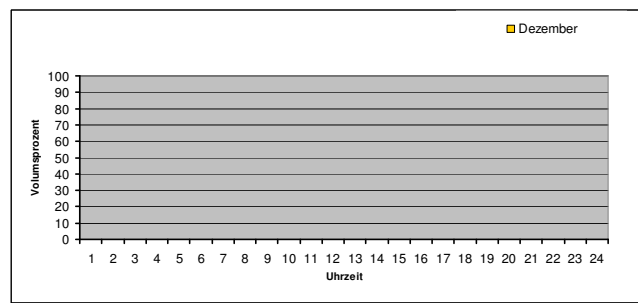
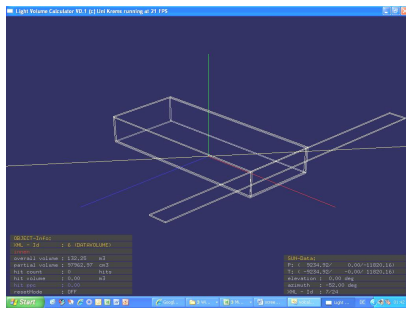
Datenblatt Typ T_GWG_B460_T1150_A0



T_GWG_B460_T1150_A0														
	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	Sum/Average
LPF	0	0	0	0	5	11	13	11	5	0	0	0	0	3,69 %
HWB	9,4	9,3	6,2	3,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,3	6,4	9,4	35,85 kWh/m ²
KB	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1	4,3	4,9	3,4	0,6	0,0	0,0	0,0	14,25 kWh/m ²



Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]



Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

Auch hier zeigen sich im Vergleich der beiden Datenblätter markante Unterschiede in der Performance der beiden unterschiedlichen Orientierungen des ansonsten identischen Raummodells. Bemerkenswert ist insbesondere das, nicht unerwartete, hinsichtlich des LPF extrem schlechte Abschneiden des Modells mit südgerichteter Laubengangfassade und somit nordgerichteter Verglasung und die ausgeprägte Morgendurchlichtung des Modells mit westorientiertem Laubengang und somit ostorientierter Verglasung.

9.2.4. Vergleichende Analyse der vier Basismodelle

Über die Charakteristika unterschiedlicher Orientierungen innerhalb eines jeweiligen Basismodells wird auch ein Vergleich der vier Basismodelle untereinander vorgenommen.

Als Vergleichskennzahlen werden herangezogen:

- > Der Mittelwert aus den Durchlichtungsfaktoren des jeweils 21. Tag jedes Monats.
- > Der Heizwärmebedarf über das ganze Jahr
- > Der Kühlbedarf über das ganze Jahr

Es ergibt sich:

- > Der Durchlichtungsfaktor LPF der Typen GGG ist deutlich, nämlich um ca. 50% höher als jener der Typen GWG, weitgehend unabhängig von der Breite des Basismodells.
- > Der HWB der Typen GGG liegt signifikant, nämlich um ca. 30%, unter jenem der Typen GWG, wiederum weitgehend unabhängig von der Breite des Basismodells.
- > Der KB der Typen GGG liegt erheblich, nämlich um ca. 90%, über jenem der Typen GWG. Die schmalen Typen weisen einen jeweils deutlich höheren KB auf als die breiten Typen derselben Ausformung.

Die Arbeit hat die Hypothese bestätigt, dass zweiseitig belichtete Laubengangwohnungen ein grundsätzlich großes Potential für gleichzeitig hohes Tageslichtangebot und thermische Qualität aufweisen. Sie hat aber auch bestätigt dass die Nutzung dieses Potentials eine sehr gute Kenntnis der Zusammenhänge, eine eingehende Prüfung der tatsächlichen Gegebenheiten und schließlich eine konsequente Umsetzung voraussetzt.

Prägnant gezeigt hat sich der gegenläufige Zusammenhang zwischen thermisch guter Performance im Sinne von Heizwärmebedarf und Kühlbedarf einerseits und gutem Tageslichtpotential im Sinne der Durchlichtung andererseits. Die Optimierungsansätze haben ihrerseits deutlich gezeigt, wie sensibel die Dimension der Wohnungstiefe alle drei Potentiale beeinflusst.

Die Ergebnisse scheinen geeignet, daraus grundsätzliche Handlungsempfehlungen im frühen Entwurfsstadium von Laubengangwohnhäusern oder vergleichbar strukturierte Gebäude ableiten zu können. Etwa Folgende:

- > Nord-Süd-belichtete Wohnungen weisen bei gleichzeitig vorteilhaftem thermischen Verhalten eine schlechte Durchlichtung auf, was die sinnvollen Wohnungstiefen beschränkt und/oder Fragestellungen optimierter Lichtführung aufwirft.¹¹⁴²
- > Wohnungen mit moderat aus der Nord-Süd-Richtung verschwenkten Längsachsen weisen eine sehr ausgewogene thermische Performance und Durchlichtung auf. In der gegenständlichen Arbeit hat sich das an den Typen mit Orientierungen von SSO bis SSW beziehungsweise NNW bis NNO gezeigt.
- > Wohnungs-Längsachsen in Ost-West-Richtung führen zu Situationen mit zwar exzellenter Durchlichtung, aber auch zu schlechten Ausgangsbedingungen hinsichtlich der thermischen Performance. Ansätze einer gezielten Verkleinerung der Verglasungsflächen oder auch Erhöhung der Wohnungstiefen sind geeignet, dieses Ungleichgewicht zu entschärfen.

9.3. Bezüge zwischen Thesen 1 und These 2

Setzt man die Ergebnisse von These 1 und These 2 zueinander in Bezug, stellt sich die Frage nach einer realen Umsetzbarkeit einer adäquaten Solarstrahlungsversorgung innerhalb der Raumtiefe einer Wohneinheit bei gleichzeitiger Gewährleistung thermischen Komforts unter Nutzung solarer Wärmeenergieeinträge. Dazu müssen die, durch die Potentialstudien generierten Extremwerte beziehungsweise Typologien ins Verhältnis zu realen Rahmenbedingungen gebracht werden. Im Fall der Potentialstudie zur Photophysilogie von Innenräumen und der zur Orientierungsabhängigen Lichtversorgung und thermischen Optimierung sind zunächst zwei Zusammenhänge zu erörtern, die eine angemessene Übertragung der Ergebnisse in reale Anwendungssituationen ermöglichen. Einerseits die Verhältnismäßigkeit zwischen der terrestrischen Bestrahlungsstärke zum Referenzzeitpunkt mit definitionsgemäß klarem Himmel und jener zum selben Zeitpunkt im langjährigen Mittel und somit unter Einbezug des statistischen Bewölkungsanteils. Andererseits die Verhältnismäßigkeit der Beleuchtungsstärke unmittelbar hinter der Verglasung zu jener in der Raumtiefe, unter der Annahme modellhafter Raumgeometrien und Oberflächenqualitäten.¹¹⁴³

¹¹⁴² Hinzuweisen ist hier auf die konstruktivistische Annahme einer Vollverglasung zwischen Wohnung und Laubengang, was einen bewussten Extremwert darstellt. Nur vor diesem Hintergrund gilt die ermittelte nahezu gleichartige Performance von nord- und von südgerichtetem Laubengang.

¹¹⁴³ Unter der vereinfachenden Annahme spektral gleich verteilter Reflexionseigenschaften von Raumbooberflächen kann das Verhältnis der Beleuchtungsstärke zwischen der unmittelbar hinter dem Glas und den in der Raumtiefe angeordneten Messflächen auch auf die (anderen) physiologischen Wirkpotentiale angewandt werden.

9.3.1. Abminderungen durch Bewölkung

Das folgende Säulendiagramm (Diagramm 141) veranschaulicht den Unterschied der potentiell auftretenden Strahlungssummen und jener unter Berücksichtigung eines statistischen Bewölkungsanteils an den vier referenztagen 15. März, 15. Juni, 15. September und 15. Dezember, die zur Betrachtung im Rahmen der Potentialstudie zu Hypothese 1 herangezogen wurden. Verglichen wurde die stündliche flächenbezogene Bestrahlungsmenge auf die vertikale, zum Sonnenazimut orientierte Fläche unter wolkenlosem Himmel mit erstens stündlichen flächenbezogenen Bestrahlungsmenge und mit zweitens der im langjährigen Mittel auftretenden täglichen flächenbezogenen Bestrahlungssumme auf dieselbe, feststehende Fläche exemplarisch um 12:00 Uhr.

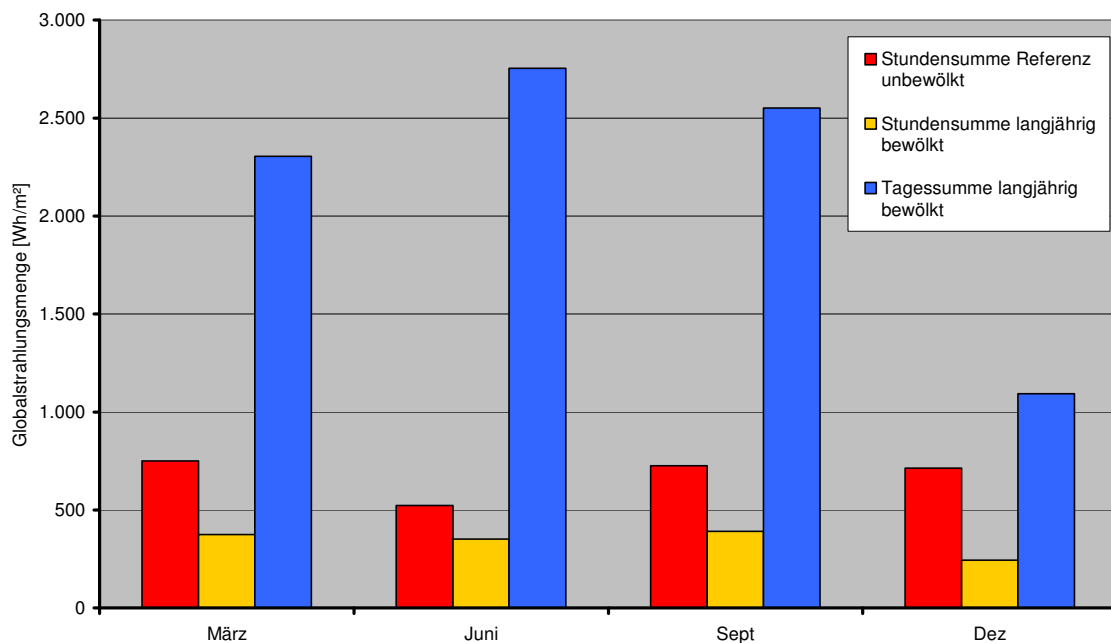


Diagramm 141: Strahlungssummen unter Referenzbedingungen und im langjährigen Mittel, 12:00

Es zeigt sich demnach, dass die stündlichen Strahlungsmengen während der Mittagsstunden unter wolkenlosen Referenzbedingungen von den stündlichen Strahlungsmengen im langjährigen Mittel um 25% bis 75% unterschritten werden, mit geringster Unterschreitung im Sommer und höchster Unterschreitung im Winter.

9.3.2. Abminderungen mit zunehmender Raumtiefe

Auch die Abminderung der potentiell erzielbaren Wirkpotentiale mit zunehmendem Abstand von der technischen Funktionsglasscheibe wurde quantifiziert. Mittels Tageslichtsimulation wird die Verringerung der Beleuchtungsstärke auf eine Messebene unmittelbar hinter der Glasscheibe im Vergleich zu sechs weiteren, jeweils in 1,5 m Abstand raumseitig angeordneten Messebenen ermittelt.¹¹⁴⁴ Das Raummodell entspricht dabei weitgehend jenem, das zur Bearbeitung der zweiten Hypothese entwickelt wurde.

¹¹⁴⁴ RELUX Professional Version 2007-7.1, RELUX Informatik AG 1998-2007, Basel, Bezugsquelle aus dem Internet <http://www.relux.ch> (21.07.2008)

Exemplarische Berechnungen werden durchgeführt sowohl für den klaren Himmel als auch für den bedeckten Himmel an einem 21. März um 12:00. Nachfolgend dargestellt sind die Verläufe der Bestrahlungsstärke auf jeweils die Mittelpunkte der horizontal sonnennachgeführten und damit südorientierten vertikalen Messebenen. Es ergibt sich das folgende Diagramm (Diagramm 142).

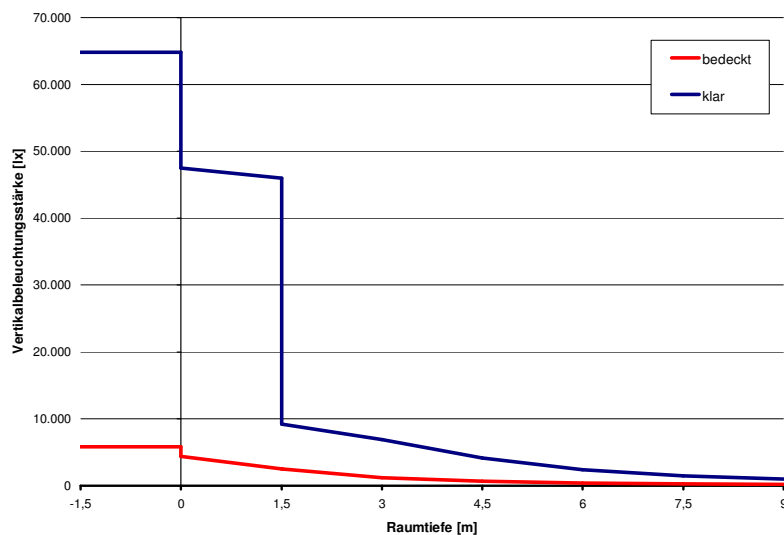


Diagramm 142: Verlauf der Beleuchtungsstärke an vertikalen Messebenen in der Raumtiefe

Die blaue Kurve zeigt den Verlauf der Bestrahlungsstärke bei klarem Himmel, die rote Linie bei bedecktem Himmel. Die Ergebnisse der Vergleichsrechnung zeigen, dass eine differenzierte Interpretation vorgenommen werden muß.

Innerhalb des direkten Sonnenlichts verringert sich die Strahlungsintensität mit der Raumtiefe nur geringfügig. Wird der Betrachtungspunkt aus dem Lichtstrahl heraus verschoben, verringert sich die Strahlungsintensität schlagartig und klingt mit zunehmender Raumtiefe erwartungsgemäß weiter ab. Bei bedecktem Himmel ist das Ausgangsniveau der Bestrahlungsstärke erwartungsgemäß deutlich niedriger. Im Rauminneren sinkt die Bestrahlungsstärke kontinuierlich weiter ab.

9.3.3. Reale Werte und ihre Bedeutung für die Ergebnisse der Potentialstudien

Es kann also festgehalten werden, dass die errechneten Werte der photophysiologischen Wirkpotentiale in guter Näherung ihre Gültigkeit behalten, sofern die Messebene oder der betroffene Mensch im Wortsinn im direkten Sonnenlicht steht. Die Entfernung von der Glasscheibe ist dabei von sekundärer Bedeutung. Außerhalb des direkten Sonnenlichts sind strahlungstechnische und in erster Näherung auch photophysiologische Intensitäten um zirka einen Faktor drei niedriger und klingen mit der Raumtiefe weiter ab.

Die vordringliche Bedeutung, die dem Vorhandensein von direkter Sonnenstrahlung für die photophysiologicalische Qualität von Innenräumen zukommt, wird somit klargestellt. Sich über die Ermittlung des Tageslichtquotientenverlaufs hinaus mit der Innenraumgeometrie der Direktstrahlung der Sonne zu befassen und diese bei der Gestaltung von Gebäudevolumen, Gebäudehülle und Grundrissen zu berücksichtigen erscheint daher unabdinglich.

Festzuhalten ist außerdem, dass durch konstruktive und technische Maßnahmen die tatsächliche Performance von vergleichbaren Wohnungstypen in hohem Maß gegenüber den Ergebnisse dieser Arbeit verbessert werden kann. Dennoch bleiben die grundsätzlichen Zusammenhänge als Ausgangsposition jeglicher nachträglicher Maßnahmen stets bestehen und sollen daher tunlichst im Entwurf ihre Berücksichtigung finden.

Die Ergebnisse scheinen geeignet, daraus grundsätzliche Handlungsempfehlungen im frühen Entwurfsstadium von Laubengangwohnhäusern ableiten zu können. Etwa folgende:

Nord-Süd-belichtete Wohnungen weisen bei gleichzeitig vorteilhaftem thermischen Verhalten eine schlechte Durchlichtung auf, was die sinnvollen Wohnungstiefen beschränkt und Fragestellungen optimierter Lichtführung aufwirft.¹¹⁴⁵

Wohnungen mit moderat aus der Nord-Süd-Richtung verschwenkten Längsachsen weisen eine sehr ausgewogene thermische und optische Performance auf. In der gegenständlichen Arbeit hat sich das an den Typen mit Orientierungen von SSO bis SSW beziehungsweise NNW bis NNO gezeigt.

Wohnungs-Längsachsen in Ost-West-Richtung führen zu Situationen mit zwar exzellenter Durchlichtung, aber auch zu schlechten Ausgangsbedingungen hinsichtlich der thermischen Performance. Ansätze einer gezielten Verkleinerung der Verglasungsflächen oder auch Erhöhung der Wohnungstiefen sind geeignet, dieses Ungleichgewicht zu entschärfen.

Festzuhalten ist auch, dass die einzelnen Potentiale mit nachträglichen Verbesserungsmaßnahmen unterschiedlich gut beeinflussbar sind: Am leichtesten zu optimieren ist sicherlich der Heizwärmebedarf, der unter den drei Potentialen auch die am wenigsten starke Bindung an die Ausrichtung der Fassaden aufweist. Weit grundlegender mit der Wohnungsorientierung und der Wohnungstiefe sowie dem Innenausbau verbunden ist dagegen der Kühlbedarf und erst recht das Durchlichtungspotential.

¹¹⁴⁵ Hinzuweisen ist hier auf die konstruktivistische Annahme einer Vollverglasung zwischen Wohnung und Laubengang, was einen bewussten Extremwert darstellt. Nur vor diesem Hintergrund gilt die ermittelte nahezu gleichartige Performance von nord- und von südgerichtetem Laubengang.

10. Empfehlungen

Aus den Ergebnissen der Potentialstudien zur „Photophysiology im Innenraum“ und zu „Licht und thermischer Optimierung“ können im Sinne einer äußersten Komprimierung der Ergebnisse die folgenden beiden grundlegenden Empfehlungen abgeleitet werden:

- > Die terrestrische Sonnenstrahlung erreicht den Innenraum, nach dem Durchgang durch technische Funktionsglasscheiben quantitativ und in seiner physiologischen Wirksamkeit auch qualitativ reduziert. Deshalb wird empfohlen, gegenüber der gängigen Planungspraxis das Angebot an Tageslicht im Innenraum generell und das an direkter Sonnenstrahlung speziell zu erhöhen.
- > Alle Gebäude, deren Funktion einen langfristigen Aufenthalt der Nutzer in Innenräumen bedingt, sind derart mit dem Außenraum zu verbinden, dass ein regelmäßiger und ausreichender Konsum von ungefilterter Sonnenstrahlung sicher gestellt werden kann. Spezifisch zu berücksichtigen sind die Funktionen der Gebäude, wie Wohnen, Arbeiten, Pflegen, Betreuen, Bilden und Vergleichbare.

10.1. Art der Empfehlungen

Nachfolgend werden Empfehlungen vertieft erläutert, wobei an dieser Stelle grundsätzlich keine Empfehlungen gegeben werden, die eine singuläre Ausrichtung, Formgebung, Gebäudehüllengestaltung, technische Maßnahme oder Ähnliches beschreiben. Zu unterschiedlich sind die physiologischen Dispositionen und die Lebensgewohnheiten der individuellen Nutzer einerseits, und zu groß ist der Anteil von Gebäuden, die in gebauten Strukturen eingefügt sind, deren Orientierung unter anderen Prämissen gewählt wurde als der Ausrichtung zum natürlichen Licht. Darüber hinaus besteht, wie die zweite Potentialstudie beschreibt, ein Zielkonflikt zwischen der strahlungsinduzierten thermischen Optimierung und der geforderten Erhöhung des Tageslichtangebots im Innenraum, der nicht durch eine singuläre, sondern nur durch ein Bündel jeweils situationsbezogener Maßnahmen aufgehoben werden kann.

Die, den folgenden Empfehlungen zugeordneten Abbildungen dienen der Veranschaulichung spezifischer Ideen.¹¹⁴⁶ Sie können weder den Anspruch erheben ideale Lösungen darzustellen noch einen umfassenden Überblick zu liefern.

¹¹⁴⁶ Auf eine detaillierte Beschreibung und Nennung der jeweiligen Bildinhalte im Fließtext wird im Rahmen der Empfehlungen daher ausnahmsweise und in Abweichung von der für wissenschaftliche Arbeiten gängigen Praxis verzichtet. Die notwendige Nennung und Beschreibung der Bildinhalte erfolgt lediglich unter den Abbildungen selbst.

10.2. Bauvolumen im natürlichen Lichtraum

Prinzipiell sind die Innenräume gebauter Strukturen in Bezug zum Sonnengang am konkreten Ort zu setzen. Unablässig dafür ist eine Analyse des Tageslichtangebots am Bauplatz bereits in den frühesten Phasen des Planungsprozesses. Diese Analyse bildet die Basis zur sinnvollen Ausformung des Gebäudevolumens im realen Lichtraum und damit die Grundlage für die Belichtbarkeit des Innenraumes. Einfache Hilfsmittel die dazu zur Verfügung stehen und zur Anwendung empfohlen werden sind Sonnenbahndiagramme, Belichtungsstudien am städtebaulichen Modell und der Einsatz einschlägiger Simulationsprogramme. Für Standorte, deren klimatische Bedingungen und Sonnengeometrie dem Referenzstandort Wien entsprechen, kann auch die, in der Potentialstudie „Licht und thermische Optimierung“ entwickelte Windrose als Hilfsmittel zur generellen Einschätzung der, auf dem Bauplatz vorzufindenden Potentiale herangezogen werden.

10.3. Durchlichtbarkeit von Innenräumen

10.3.1. Innenraumproportionen

Ein grundlegender Parameter für die Durchlichtbarkeit von Innenräumen stellt deren Proportion dar. Generell wird empfohlen, die Möglichkeiten einer moderaten Verschiebung des Verhältnisses von vorgeschriebener Mindestraumhöhe zu höchstzulässiger Raumtiefe zu Gunsten der Raumhöhe zu verschieben (Abbildung 68, Abbildung 69).^{1147,1148}



Abbildung 68: Unité d´habitation, Marseille, Blick aus dem zweigeschossigen Wohnbereich auf die Loggia, Le Corbusier, 1952

Abbildung 69: Haus Tak, Tokyo, Durchblick vom Erdgeschoss bis in den Dachraum, Shioda Y., 2002

¹¹⁴⁷ Corrodi (2008)

¹¹⁴⁸ Futagawa (2003)

10.3.2. Transparentes Fassadenelement und innenräumliche Organisation

Es wird empfohlen durch die Ausrichtung, Größe und Situierung transparenter Flächen in der Gebäudehülle geeignete Bezüge zwischen dem tagesgangabhängigen Angebot an natürlichem Licht und der funktionalen Nutzungsorganisation im Gebäudeinneren herzustellen. Speziell zu berücksichtigen ist dabei die Positionierung, Verteilung und Ausrichtung von opaken Elementen zur Strukturierung des Innenraumes in Bezug zum direkteinfallenden Sonnenlicht, weil diese die grundsätzliche Durchlichtbarkeit des Innenvolumens des Gebäudes bestimmen (Abbildung 70, Abbildung 71, Abbildung 72).^{1149,1150,1151}

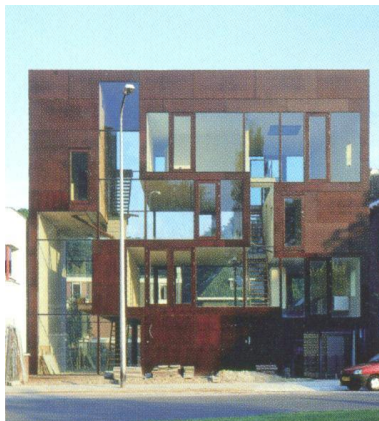


Abbildung 70: Zweifamilienhaus, Utrecht, Fassade Süd, Maas W., van Rijs J., de Vries N., 1997

Abbildung 71: Miyama-so, Präfektur Kyoto, Blick längs der Engawa, um 1850

Abbildung 72: Wohnhaus Buck, Los Angeles, Durchblick in die Bibliothek, Schindler R., 1934

Empfohlen wird daher ein verstärkter Einsatz von transparenten, transluzenten und oder verschieblichen Elementen zur Strukturierung von Innenräumen, sowie die Reduktion von opaken Elementen auf das funktional Notwendige. Die Berücksichtigung der räumlichen Ausbreitung des Lichtes ist dabei von zentraler Bedeutung und erfordert eine Auseinandersetzung mit Innenraum über eine zweidimensionale Grundrissgestaltung hinaus. Der Einsatz des LPF als einfaches und veranschaulichendes Planungswerkzeug kann hierbei unterstützen, ebenso die Beobachtung am Innenraummodell oder die Verwendung geeigneter Lichtsimulationswerkzeuge.

10.3.3. Öffenbares Fassadenelement und innenräumliche Organisation

Wie die Potentialstudie „Photophysiology im Innenraum“ verdeutlicht, ist auf Grund der Strahlungsdurchlässigkeit der derzeit am Markt eingeführten technischen

¹¹⁴⁹ Corodi (2008)

¹¹⁵⁰ Black (2001)

¹¹⁵¹ Steele (1999)

Funktionsglasscheiben eine physiologisch ausreichende Versorgung mit terrestrischer Sonnenstrahlung speziell im ultravioletten und infraroten Spektralbereich nicht möglich. Es wird daher dringend, und im Sinne der Verhinderung epidemisch auftretender Lichtmangelercheinungen dazu geraten, die Durchlässigkeit der Gebäudehülle für Tageslicht zu erhöhen beziehungsweise generell herzustellen. Empfohlen wird die Anordnung großflächig öffentlicher Fassadenteile, speziell wenn dadurch der Eintritt direkter Sonnenstrahlung in den Innenraum erreicht werden kann. Gerade bei Gebäuden mit großer Höhenentwicklung wird dafür eine eingehende Auseinandersetzung mit der Gebäudeaerodynamik erforderlich, der so gestaltungsrelevante Bedeutung zukommt (Abbildung 73).¹¹⁵²



Abbildung 73: Hochhaus mit gemischter Nutzung Sky Village, Wettbewerbsprojekt zur Realisierung in Kopenhagen, Maas W., van Rijs J., de Vries N., Krogh M., Laursen M., Lonka A., aktuell

Zu beachten ist dabei jedenfalls auch die Gewährleistung der visuellen Ergonomie, speziell bei den Funktionen Arbeiten, Bilden, Pflegen oder Ähnlichem, wo Blickrichtungs- oder Positionswechsel der Nutzer nur eingeschränkt möglich sind (Abbildung 74).¹¹⁵³



Abbildung 74: Sanatorium Sonnenstrahl, Hilversum, Duiker J., 1931

¹¹⁵² <http://www.dysturb.net/2008/mvrdvs-sky-village-winning-skyscraper-competition-entry/>

¹¹⁵³ <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Zonstrhoofd01voorkant.jpg&filetimestamp=20071029202528>

10.3.4. Tageslichtbezogene Funktionszuordnung

Es wird empfohlen, der besonderen Bedeutung direkt besonnbaren Zonen von Innenräumen durch eine geeignete Funktionszuordnung Rechnung zu tragen. Das führt zu einer teils grundlegenden Veränderung gewohnter Grundrissanordnungen. Beispielsweise sind gering oder nicht natürlich belichtete Bäder durchaus gängige Praxis. Wird aber in Betracht gezogen, dass das Bad der einzige Ort der Wohnung ist, an dem eine regelmäßige Strahlungsexposition großer Hautflächen erfolgen könnte, wird verständlich, dass gänzlich neue Lösungen für die Belichtung von Bädern gefunden werden müssen. Zu ermöglichen ist die ungefilterte Direktbesonnung, vielleicht sogar das gänzliche Hinaustreten ins Freie bei gleichzeitiger Gewährleistung ausreichender Privatsphäre (Abbildung 75, Abbildung 76).^{1154,1155}



Abbildung 75: Einfamilienhaus Müller, Staufen, Blick in das Badezimmer, Degelo H., Morger M., 1999

Abbildung 76: Einfamilienhaus, Präfektur Gunma, Blick in das Badezimmer, Shiina E., keine Angaben

10.4. Ausrichtung transparenter Fassadenflächen

Für die Tageslichtoptimierung mit dem begründeten Schwerpunkt auf Durchlichtung mit direktem Sonnenlicht wird eine zumindest 30-gradige Auslenkung von Fassaden mit hohem Anteil an transparenten Flächen aus der Südrichtung empfohlen. Unabdingbar dabei ist die Gewährleistung der thermischen Sommertauglichkeit durch den Einbau und den konsequenten Einsatz marktgängiger Sonnenschutzvorrichtungen.

Ein schwerwiegender Zielkonflikt zwischen der Lukrierung passiv solarer Gewinne und einer ausreichenden Durchlichtung besteht dabei nicht, nachdem auch unter guten baupraktischen Randbedingungen marktübliche Wärmeschutzfenster in bis zu 90-

¹¹⁵⁴ Cuito (2002)

¹¹⁵⁵ Black (2001)

grädiger Auslenkung aus der Südrichtung geringere Netto Wärmeverluste aufweisen als eine flächengleiche Wand. Der großzügige Einsatz von Verglasungen auch in der durchlichtungsoptimalen Ost- und Westorientierung bewirkt demnach keine Erhöhung des Heizwärmebedarfs. Unter diesem Blickwinkel besteht somit in den allermeisten baupraktischen Fällen keine Ursache, Verglasungen überwiegend oder ausschließlich nach Süden zu orientieren.

Zweischeiben-Wärmeschutzverglasungen weisen eine etwa um 25% höhere Tageslichttransparenz auf als Dreischeiben Wärmeschutzverglasungen. Gleichzeitig aber reduzieren sich die Netto-Wärmegewinne der Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung gegenüber der Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung um rund 12% bei Südausrichtung.¹¹⁵⁶ Vor diesem Hintergrund wird empfohlen, die Entscheidung, ob Zwei- oder Dreischeiben-Wärmeschutzverglasungen in eine Fassade einzubauen sind nicht generell sondern am konkreten Projekt und unter spezieller Berücksichtigung der jeweiligen Gebäudenutzung zu entscheiden.

¹¹⁵⁶ Berechnungen von Holzer P., mit 2_WSV und 3-WSV laut den Referenzverglasungen aus der Potentialstudie „Photophysiology im Innenraum“, für den Standort Tattendorf NÖ.

10.5. Sanierungsmaßnahmen und Tageslichtangebot

Trotz der unbestrittenen Wichtigkeit der Steigerung der Energieeffizienz von Gebäuden wird empfohlen, Sanierungen nicht ausschließlich auf Aspekte der thermischen Optimierung zu reduzieren. So bedingen Maßnahmen wie, das Vertiefen von Fensterlaibungen und Tür laibungen, durch das Aufbringen von Wärmedämmung oder der Austausch herkömmlicher Einscheiben- und Zweischiebengläser durch hochwertige thermische Funktionsglasscheiben, eine deutliche Reduktion der Qualität und Quantität des Tageslichtangebotes im Innenraum. Dementsprechend wird empfohlen, diese Verluste durch geeignete Maßnahmen wieder auszugleichen, beziehungsweise für eine Erhöhung des ursprünglichen Lichtangebotes zu sorgen. Auch hier sind grundlegende Veränderungen im Umgang mit bestehenden Fassaden und die Entwicklung neuer baulicher Lösungen notwendig. Empfohlen wird die Prüfung der Möglichkeit bestehende Fenster zu vergrößern oder die Anzahl der Fenster zu erhöhen (Abbildung 77, Abbildung 78).^{1157,1158}

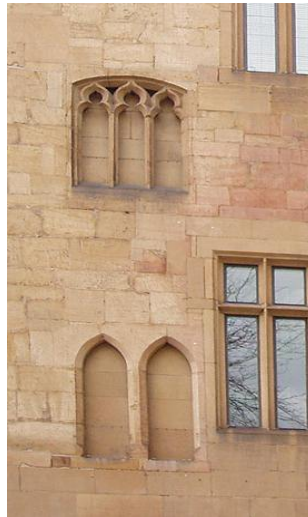


Abbildung 77: Einfamilienhaus, Aufbringen von Wärmedämmung an einer Fensterlaibung, anonym
Abbildung 78: Rathaus, Heilbronn, alte Fassade Ost mit vermauerten historischen Fenstern, Kern um 1300, mehrfach umgebaut und erweitert

¹¹⁵⁷ [http://www.salzburg.com/nwas/loadcluster.php?Ref=DBild/lqmf\\$xxf3yxm237qf1t3ybz&AttrName=BildLr](http://www.salzburg.com/nwas/loadcluster.php?Ref=DBild/lqmf$xxf3yxm237qf1t3ybz&AttrName=BildLr), 01.06.2009

¹¹⁵⁸ http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1a/Heilbronn_Rathaus_Ausschnitt.jpg, 01.06.2009

Spezielles Augenmerk ist auf die Ausgestaltung der Laibungsgeometrie und auf die Farbwahl fensterangrenzender und fensternaher Flächen zulegen. So ist die Absorption des Lichts durch dunkle Farben bei gleichzeitiger Blendfreiheit zur Sicherstellung visueller Ergonomie zu gewährleisten (Abbildung 79, Abbildung 80).^{1159,1160}



Abbildung 79: Palazzo Salis, Bondo im Bergell, Eckraum, Croce F., 1765-1774

Abbildung 80: Einfamilienhaus, Pavi, Bad Waltersdorf, Ausgestaltung der Fensterlaibung, Kaufmann J., 2002

¹¹⁵⁹ Corrodi (2008)

¹¹⁶⁰ Corrodi (2008)

10.6. Gebäude zugeordnete Außenräume

Auf eine unmittelbare Zuordnung und leichte Erreichbarkeit von attraktiven, besonnten Aufenthaltsbereichen im Freien ist zu achten. Balkone, Loggien, Terrassen, Vorplätze, Gärten und dergleichen müssen nicht nur Wohnungen sondern allen Nutzungseinheiten längeren Aufenthalts wie Büros, Produktionsstätten, Schulen, Pflegeheimen und Ähnlichem zugeordnet sein. Auch in diesem Zusammenhang bedarf es bei hohen Gebäuden einer eingehenden Auseinandersetzung mit der Gebäudeaerodynamik.

Eine kritische Durchsicht der Baugesetzgebung in Bezug auf Hemmnisse betreffend die Errichtung gebäudeintegrierter oder gebäudezugeordnete Aufenthaltsbereiche im Freien wird ebenso empfohlen wie die Bereitstellung von Fördermitteln zur entsprechenden Nachrüstung von Bestandsobjekten (Abbildung 81).¹¹⁶¹



Abbildung 81: Hochhaus mit gemischter Nutzung Namba Park, Osaka, 2003, Jerde, 2003

10.7. Produkt- und Materialentwicklung

Innerhalb der Bandbreite handelsüblicher Baugläser kann keine photobiologisch begründete Empfehlung für ein bestimmtes Produkt abgegeben werden, da die ermittelten photobiologischen Wirkpotentiale hinter allen untersuchten Verglasungen deutlich unter- oder überschwellig sind. Angeregt wird daher einerseits die Entwicklung großflächig temporär offenbaren Fassadenelemente und andererseits die materialtechnologische Entwicklungen von Gläsern mit verbessertem Strahlungsdurchgang in photophysiologisch und photoadaptiv relevanten UV-Spektralbereichen.

¹¹⁶¹ <http://www.tamuaias.org/wp-content/uploads/2008/11/namba-parks.jpg>, 01.06.2009

10.8. Überangebot an Licht

10.8.1. Nutzungsabhängige Beschattung

Aus Sicht der Nachhaltigkeit ist das Lukrieren von Wärmeenergie durch passive Solarnutzung am Gebäude, die unmittelbarste und damit verlustärmste Form nachhaltiger Energiebereitstellung. Um entsprechend große Fenster als Ernteflächen zur Verfügung stellen zu können, und dennoch überschüssige Wärmeeinträge in der warmen Jahreszeit zu vermeiden, ist eine konsequente und effektive funktionsabhängige und nutzerspezifische Beschattungen der Innenräume bei gleichzeitig möglicher Belüftung, beispielsweise einer tagsüber nicht benutzten Wohnung, zu gewährleisten (Abbildung 82, Abbildung 83).^{1162,1163}



Abbildung 82: Bürogebäude der Firma Graf, Dornbirn, Fassade mit Klappläden, Baumschlager C., Eberle D., 1995

Abbildung 83: Historische Fassade mit Klappläden, Corniglio, Ligurien, anonym

Auf Grund der großen Individuums bezogenen Bandbreite an Empfindlichkeit gegenüber der Sonnenstrahlung, beispielsweise ausgedrückt durch die Klassifizierung von Hauttypen, ist es unerlässlich in gebäudezugeordneten Freiräumen unterschiedlich beschattete Zonen anzubieten oder individuell regelbare Beschattungseinrichtungen bereit zu stellen.

¹¹⁶² Cuito (2002)

¹¹⁶³ <http://home.arcor.de/pawelz/files/manarola.htm>, 01.06.2009

10.8.2. Nächtliche Dunkelheit

Schließlich wird, im Sinne der Aufrechterhaltung einer stabilen circadianen Rhythmik der Menschen in dicht besiedelten Gebieten, dringend empfohlen Zustände natürlicher nächtlicher Dunkelheit im Innenraum, speziell im Schlafbereich zu sichern oder beim Bestehen von Kunstlichteinträgen aus dem Außenraum, durch geeignete Maßnahmen herzustellen. Derzeit wird der Gewährleistung dieser innenräumlichen Qualität wenig oder keine Beachtung geschenkt. Dämmerungsgesteuerte Verdunklungseinrichtungen wären beispielsweise ein möglicher Lösungsansatz, da diese die Lukrierung des photophysologisch so bedeutungsvollen Morgen- und Abendlichtes ermöglichen, bei gleichzeitiger Gewährleistung nächtlicher Dunkelheit (Abbildung 84, Abbildung 85).^{1164,1165}



Abbildung 84: Blick in eine nächtliche Engawa, Japan, anonym

Abbildung 85: Satellitenbild, Nachtaufnahme des Mittelmeerraumes

¹¹⁶⁴ http://mn_nihongo.tripod.com/shoji_fusuma.html, 01.06.2009

¹¹⁶⁵ http://www.sternwarte-kohlhau.de/dark_sky/dark_sky-images/europakarte.jpg, 01.06.2009

E. ANHÄNGE

11. Grundlagen der Strahlungsphysik

Das folgende Kapitel definiert Begriffe und erläutert grundlegende Zusammenhänge der Strahlungsphysik. Umfang und Detaillierungsgrad orientieren sich dabei an dem konkreten Forschungsinhalt der gegenständlichen Arbeit.

Hinsichtlich der Nomenklatur der Größen und Formelzeichen wurde größtmögliche Konsistenz mit der DIN 5031 - Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik^{1166,1167,1168}, angestrebt, welche ihrerseits weitgehende Übereinstimmung mit den Empfehlungen der CIE aufweist. Wo notwendig, wurden weitere Quellen herangezogen oder werden weitere gebräuchliche Bezeichnungen, gegebenenfalls auch aus dem Englischen, angegeben.

11.1. Begriffsdefinition und Eingrenzung

Der Begriff der Strahlung bezeichnet in der Physik die Ausbreitung von Teilchen oder Wellen. Die Frage, ob Strahlung aus Wellen oder aus Teilchen bestünde, war etwa dreihundert Jahre lang Gegenstand intensiver Forschungstätigkeit und heftiger wissenschaftlicher Auseinandersetzungen. Heute sind sowohl der Wellen- als auch der Teilchencharakter von Strahlung als der Welle-Teilchen-Dualismus anerkannt und werden mit Hilfe der Quantenmechanik beschrieben. Beiträge zur Diskussion und Klärung der elementaren Frage nach dem Wellen oder Teilchencharakter von Strahlung bzw. des Lichts erarbeiteten seit dem unter anderem Christiaan Huygens¹¹⁶⁹, Isaac Newton¹¹⁷⁰, Thomas Young¹¹⁷¹, Max Planck¹¹⁷², Albert Einstein¹¹⁷³ und Louis de Broglie¹¹⁷⁴,

¹¹⁶⁶ DIN 5031-3 (1982)č

¹¹⁶⁷ DIN 5031-7 (1984)

¹¹⁶⁸ DIN 5031-10 (2000)

¹¹⁶⁹ Christiaan Huygens, niederländischer Astronom, Mathematiker und Physiker, 1629-1695, Holland, begründete in der zweiten Hälfte des 17. Jhdts. die Wellenoptik und wendet sie mit Erfolg zur Verbesserung optischer Geräte an, ohne sie jedoch experimentell beweisen zu können.

¹¹⁷⁰ Isaac Newton, englischer Astronom, Mathematiker und Physiker, 1643-1727, England, begründete, ebenfalls in der zweiten Hälfte des 17. Jhdts., im Zuge seiner Arbeiten zur geometrischen Optik die Theorie, dass Licht aus Teilchen besteht und lieferte sich in dieser Frage mit Huygens einen erbitterten Expertenstreit.

¹¹⁷¹ Thomas Young, englischer Augenarzt und Physiker, 1773-1829, bewies 1802 mit dem Doppelspaltexperiment, dass Licht sich durch Interferenz auslöschen lässt und legte damit nach dem Expertenstreit zwischen Newton und Huygens den Grundstein für die endgültige Anerkennung des Wellencharakters des Lichts.

¹¹⁷² Max Planck, deutscher Physiker, 1858-1947, publizierte 1900 sein Strahlungsgesetz, welches erstmals die Leistung und Frequenzverteilung der Schwarzkörperstrahlung für sowohl hohe als auch niedrige Frequenzen beschreibt. Im Zuge dessen publizierte er mit $E = h \cdot \nu$ auch erstmals die Existenz diskreter Energieeinheiten (Quanten) und definierte h als das Planck'sche Wirkungsquantum.

welche die Grundlage für die moderne Quantenphysik bilden, die im Zeitraum von 1925 bis 1935 insbesondere durch Beiträge von Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger, Max Born, Pascal Jordan, Wolfgang Pauli, Niels Bohr, Paul Dirac und John von Neumann begründet wurde.

Die in der gegenständlichen Arbeit untersuchten Phänomene und Zusammenhänge werden überwiegend mit den Gesetzen der Wellencharakteristik des Lichts beschrieben. Mit dem Planck'schen Gesetz der Strahlung schwarzer Körper fließen aber auch die Ergebnisse der Teilchencharakteristik mit ein.

11.2. Größen, Formelzeichen und Einheiten

Nachfolgend wird eine anlassbezogene Auswahl von strahlungsphysikalischen Größen dargestellt und gegebenenfalls erläutert. Vorab ist zur Nomenklatur ihrer Bezeichnung anzumerken:

- > Für die meisten energietechnischen Größen der Strahlungsphysik gibt es in der Strahlungsphysik auch korrespondierende lichttechnische Größen, mit jeweils analoger Definition, aber eingeschränktem Wellenlängenbereich der Strahlung. Zur Unterscheidung werden die Indizes „e“ im Fall der energetischen (auch: strahlungsphysikalischen) Größen und „v“ im Fall der lichttechnischen (visuellen) Größen verwendet. In der Fachliteratur häufig und so auch im Folgenden werden bei typischen lichttechnischen Kennzahlen die erläuternden Indizes „v“ weggelassen.
- > In den seltenen Fällen, in denen nachfolgend Größen aus der Photonen-Theorie der Strahlung verwendet werden, sind diese mit dem Index „p“ gekennzeichnet.
- > Zahlreiche Größen der Strahlungsphysik beschreiben Eigenschaften von bzw. Wechselwirkung mit monochromatischer Strahlung. In diesem Fall spricht man von „spektralen“ Größen und kennzeichnet sie im Fall von spektralen Wirkkennzahlen als Funktion der Wellenlänge, z.B. spektraler Transmissionsgrad $\tau(\lambda)$, oder im Fall von spektralen Dichten als Differential nach der Wellenlänge, z.B. X_λ .
- > Die Integration spektraler Dichten über die Wellenlänge ergibt die energietechnischen oder strahlungsphysikalischen Größen. Es gilt allgemein: $X_e = \int X_{e\lambda} \cdot d\lambda$. Durch zusätzliche Bewertung der spektralen Dichten mit einem spektralen Helligkeitsempfindlichkeitsgrad $V_i(\lambda)$ werden die korrespondierenden lichttechnischen Größen errechnet. Es gilt allgemein: $X_v = K_m \cdot \int X_{e\lambda} \cdot V_i(\lambda) \cdot d\lambda$

¹¹⁷³ Albert Einstein, deutscher Physiker, 1879-1955, erklärte 1905 den Photoeffekt (das Herauslösen von Elektronen aus einer Metalloberfläche durch auftreffende Strahlung) auf der Basis der Arbeiten von Max Planck mit der Teilchencharakteristik der Strahlung und begründet damit die Quantenmechanik.

¹¹⁷⁴ Louis de Broglie, französischer Physiker, 1892-1987, postulierte 1924, dass auch massebehaftete Teilchen einen Wellencharakter besitzen.

- > Werden Kennzahlen durch Integration der spektralen Kennzahlen über einen definierten Wellenlängenbereich der Strahlung gebildet, so werden wieder Indizes zur Kennzeichnung des betrachteten Wellenlängenbereichs wie „e“ und „v“ sowie auch präzisierende Vorsilben wie Strahlungs- und Licht- verwendet, z.B. Strahlungsreflexionsgrad ρ_e .

11.2.1. Strahlungsenergie und Lichtmenge

Mit **Strahlungsenergie Q_e** wird die gesamte durch Strahlung transportierte Energie bezeichnet. Grundeinheit der Strahlungsenergie ist die Wattsekunde [W·s]. Ihre Ableitung nach der Wellenlänge $dQ/d\lambda$ wird als spektrale Dichte der Strahlungsenergie bezeichnet.

Die korrespondierende lichttechnische Größe, also die mit der Lichtempfindlichkeit des menschlichen Auges bewertete Strahlungsenergie, ist die **Lichtmenge Q** . Grundeinheit ist die Lumensekunde [lm·s].

11.2.2. Strahlungsleistung und Lichtstrom

Die **Strahlungsleistung P** , identisch mit dem **Strahlungsfluss Φ_e** , bezeichnet die pro Zeiteinheit übertragene Strahlungsenergie. Grundeinheit ist das Watt [W]. Ihre Ableitung nach der Wellenlänge $dP/d\lambda$ wird als spektrale Dichte der Strahlungsleistung bezeichnet.

Die korrespondierende lichttechnische Größe ist der **Lichtstrom Φ** . Grundeinheit ist das Lumen [lm].

11.2.3. Strahlstärke und Lichtstärke

Die **Strahlstärke I_e** ist der Quotient aus der von einer Strahlungsquelle in einer Richtung ausgehenden Strahlungsleistung Φ und dem durchstrahlten Raumwinkel Ω .¹¹⁷⁵ Grundeinheit ist Watt pro Steradian [W/sr]. Die Bildung der spektralen Dichte der Strahlstärke ist möglich, aber wenig gebräuchlich.

Die korrespondierende lichttechnische Größe ist die **Lichtstärke I** . Grundeinheit ist die Candela [cd].

Eine Candela ist definiert als die Lichtstärke in einer bestimmten Richtung einer Strahlungsquelle, die monochromatische Strahlung der Frequenz $540 \cdot 10^{12}$ Hertz aussendet, was in Luft einer Wellenlänge von 555 nm entspricht, und deren Strahlstärke in dieser Richtung 1/683 Watt pro Steradian beträgt.

¹¹⁷⁵ Der Raumwinkel ist definiert als das Verhältnis der Fläche A einer Kugelhaube, die ein Kegelmantel aus einer um seinen Scheitel gelegten Kugel ausschneidet, zum Quadrat des Radius dieser Kugel. Der Raumwinkel ist somit im mathematischen Sinn dimensionslos.

11.2.4. Strahldichte und Leuchtdichte

Die Strahldichte ist L_e , ist der Quotient aus der Strahlstärke und der Projektion der durchstrahlten Fläche auf eine Ebene senkrecht zur betrachteten Richtung. Grundeinheit ist Watt pro Steradian und Quadratmeter [$W/(sr \cdot m^2)$]. Die korrespondierende lichttechnische Größe ist die **Leuchtdichte L**. Grundeinheit ist das Candela pro Quadratmeter [cd/m^2].

11.2.5. Bestrahlungsstärke und Beleuchtungsstärke

Die **Bestrahlungsstärke E_e** ist der Quotient aus der auf eine Fläche A auftretenden Strahlungsleistung und dieser Fläche. Grundeinheit ist Watt pro Quadratmeter [W/m^2].

Die korrespondierende lichttechnische Größe ist die die **Beleuchtungsstärke E**. Grundeinheit ist Lumen pro Quadratmeter, identisch mit Lux [$lm/m^2 = lx$].

Von besonderer Bedeutung sind vielfach die Bestrahlungs- und Beleuchtungsstärken auf entweder horizontale oder auf eine zum Strahl normale Fläche, welche in der Fachliteratur häufig als Horizontal- und Normalbestrahlungs- bzw. -beleuchtungsstärke bezeichnet werden.

Außerdem werden Bestrahlungsstärken nach dem Ort ihres Auftretens und nach ihren Entstehungsquellen spezifiziert, etwa als extraterrestrische Bestrahlungsstärke oder als Globalbestrahlungsstärke.

Schließlich werden in der gegenständlichen Arbeit als zentraler Forschungsgegenstand die physiologischen Wirkpotentiale von Tageslicht hinter technischen Funktionsverglasungen untersucht. Selbige werden, analog den lichttechnischen Größen, durch Bewertung der strahlungsphysikalischen Größen mit den jeweiligen physiologischen Empfindlichkeiten errechnet.

11.3. Grundgesetze der Strahlungsphysik

11.3.1. Photometrisches Entfernungsgesetz

Das photometrische Entfernungsgesetz (Formel 32) beschreibt die proportional zum Quadrat der Entfernung zur Lichtquelle abnehmende, von derselben bewirkte, Beleuchtungsstärke. Es gilt:

$$E = \frac{I}{r^2} \cdot \cos \varepsilon$$

mit I ... Lichtstärke [cd]

mit r ... Abstand der Empfängerebene zur Lichtquelle [m]

mit ε ... Winkel zwischen Flächennormale der Empfängerebene und Strahlrichtung

Formel 32: Photometrisches Entfernungsgesetz

11.3.2. Planck'sches Strahlungsgesetz

Das Planck'sche Strahlungsgesetz (Formel 33) stellt den Zusammenhang her zwischen der spektralen spezifischen Ausstrahlung eines schwarzen Körpers mit dessen Temperatur. Es gilt:

$$M_{\lambda}^o(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k T}} - 1}$$

mit $M_{\lambda}^o(\lambda, T)$ spektrale spez. Ausstrahlung eines schwarzen Körpers der absoluten Temp. T

mit h ... Planck'sches Wirkungsquantum

mit c ... Lichtgeschwindigkeit

mit k ... Boltzmannkonstante

Formel 33: Planck'sches Strahlungsgesetz

11.3.3. Wiensches Verschiebungsgesetz

Das Wiensche Verschiebungsgesetz (Formel 34) bezeichnet jene Wellenlänge, bei der die spektrale spez. Ausstrahlung eines schwarzen Körpers der Temperatur T das Maximum aufweist. Es gilt:

$$\lambda_{\max} = \frac{2897,8 \mu m \cdot K}{T}$$

mit λ_{\max} ... Wellenlänge, bei der die größte Strahlungsintensität auftritt

mit T ... absolute Temperatur der strahlenden Fläche

Formel 34: Wiensches Verschiebungsgesetz

11.3.4. Stefan Boltzmann'sches Gesetz

Das Stefan Boltzmann'sche Gesetz (Formel 35) errechnet die Strahlungsleistung eines schwarzen Körpers als proportional zur vierten Potenz seiner absoluten Temperatur, unter Einführung der Stefan Boltzmann Konstante.

$$P = \sigma \cdot A \cdot T^4$$

mit P ... Strahlungsleistung

mit σ ... Stefan Boltzmann Konstante

mit A ... Fläche des strahlenden Körpers

mit T ... absolute Temperatur des strahlenden Körpers

Formel 35: Boltzmann'sches Gesetz

11.3.5. Strahlungsenergie von Photonenströmen

Strahlung besitzt neben der Wellencharakteristik auch stets eine Teilchencharakteristik. Siehe dazu auch im gegenständlichen Abschnitt das Kapitel „Begriffsdefinition und Eingrenzung“.

Zur Beschreibung der Teilchencharakteristik wird Strahlung von der Quantenphysik als gerichteter Strom der kleinstmöglichen Teilchen, der Quanten, interpretiert. Die Licht- bzw. allgemeinen Strahlungsquanten werden als Photonen bezeichnet. Das Photon definiert demnach als Begriff der Quantenphysik die kleinste diskrete Energieeinheit (Quant) des Lichts bzw. allgemein einer Strahlung.

Der Energieinhalt eines Photons wird in der Fachliteratur mit dem Buchstaben E_p beschrieben und in der Einheit Elektronenvolt (eV) angegeben. Er ist abhängig von der Wellenlänge der Strahlung. Dieser Zusammenhang wurde quantitativ erstmals von Max Planck im Zuge der Aufstellung des Planck'schen Strahlungsgesetzes (Formel 36) formuliert. Es gilt:

$$E_p = h \cdot c / \lambda$$

- mit E_p ... Energieinhalt eines Photons
- mit h ... Planck'sches Wirkungsquantum
- mit c ... Lichtgeschwindigkeit im Vakuum

Formel 36: Planck'sches Strahlungsgesetz

Für die gegenständliche Forschungsarbeit spielt die Teilchenbetrachtung der Strahlung eine untergeordnete Rolle. Lediglich in einigen medizinischen Publikationen wird die Bestrahlungsstärke als Größe einer Photonenstromdichte beschrieben, weshalb hier die Umrechnung (Formel 37) zwischen den Einheiten des Photonenflusses und der energetischen Bestrahlungsstärke angegeben wird. Es gilt:

$$E = \Phi_p \cdot A^{-1} \cdot h \cdot c \cdot \lambda^{-1}$$

- mit E ... Bestrahlungsstärke in [W/m²]
- mit Φ_p ... Photonenstrom in [1/s]
- mit A ... Fläche in [m²]
- mit h ... Planck'sches Wirkungsquantum mit $6,626 \times 10^{-34}$ Js
- mit c ... Lichtgeschwindigkeit mit 300×10^6 m/s
- mit λ ... Wellenlänge in [m]

Formel 37: Umrechnung des Photonenflusses in die energetische Bestrahlungsstärke

11.4. Benennung der Wellenlängenbereiche

Wellenlängenbereiche werden insbesondere hinsichtlich ihrer optischen und photobiologischen Eigenschaften abgegrenzt und benannt, wobei sich in der Fachliteratur Varianten dieser Benennung und Abgrenzung finden. In der gegenständlichen Arbeit wurden einheitlich die Definitionen laut DIN 5031-7 herangezogen, in der die Wellenlängenbereiche von Strahlung folgendermaßen benannt sind (Tabelle 56):¹¹⁷⁶

Benennung der Strahlung		Spektralbereiche ³⁾					
		Kurzzeichen	Wellenlänge λ nm	Frequenz ν THz	Wellenzahl σ mm ⁻¹	Photonenenergie Q_e eV	
Ultra- violett- strahlung ¹⁾	Vakuum-UV	UV	UV-C < VUV	100 bis 200	3000 bis 1500	10 000 bis 5000	12,4 bis 6,2
	Fernes UV		< FUV	200 bis 280	1500 bis 1070	5 000 bis 3600	6,2 bis 4,4
	Mittleres UV		UV-B	280 bis 315	1070 bis 950	3 600 bis 3200	4,4 bis 3,9
	Nahes UV		UV-A	315 bis 380	950 bis 790	3 200 bis 2600	3,9 bis 3,3
Sichtbare Strahlung, Licht ²⁾		VIS		380 bis 780	790 bis 385	2 600 bis 1300	3,3 bis 1,6
Infrarot- strahlung ²⁾	Nahes IR	IR	NIR < IR-A	780 bis 140·10 ¹	385 bis 215	1 300 bis 700	1,6 bis 0,9
	Mittleres IR		< IR-B	140·10 ¹ bis 300·10 ¹	215 bis 100	700 bis 330	0,9 bis 0,4
	Fernes IR		MIR	300·10 ¹ bis 500·10 ²	100 bis 6	330 bis 20	0,4 bis 0,025
			IR-C < FIR	500·10 ² bis 10 ⁶	6 bis 0,3	20 bis 1	0,025 bis 0,001

¹⁾ Von der Internationalen Beleuchtungskommission (CIE) (Internationales Wörterbuch der Lichttechnik, CIE-Publikation No. 17 (E-1.1) 1970) ist als obere Grenze des Wellenlängenbereichs der Ultraviolettstrahlung 400 nm angegeben. Bei der Verwendung dieser Grenze ergibt sich eine Überlappung zwischen dem Wellenlängenbereich der Ultraviolettstrahlung (UV) und der sichtbaren Strahlung, Licht (VIS).

²⁾ Strahlung in den benachbarten Bereichen der sichtbaren Strahlung kann bei hoher Strahldichte sichtbar sein. Für Farbmessungen sollte daher der Wellenlängenbereich 360 nm bis 830 nm berücksichtigt werden (siehe DIN 5033 Teil 2 – Farbmessung, Normvalenz-Systeme). Bei extrem hohen Strahldichten kann es außerdem notwendig sein, diesen Bereich ins UV-A oder IR-A zu erweitern.

³⁾ Die Bereiche sind durch die angegebenen Grenzwellenlängen festgelegt. Die obere Grenze ist dabei nicht in den Bereich eingeschlossen. Die angegebene Zuordnung von Frequenz, Wellenzahl und Photonenenergie zur Wellenlänge gilt streng nur für Vakuum; gegebenenfalls ist die Brechzahl des Mediums zu berücksichtigen.

Tabelle 56: Benennung der Wellenlängenbereiche laut DIN 5031-7

¹¹⁷⁶ DIN 5031-7 (1982)

11.5. Strahlungsphysik im optischen Bereich - Helligkeitsempfinden

Die menschliche visuelle Wahrnehmung ist für Strahlung unterschiedlicher Wellenlängen verschieden empfindlich. Unter Berücksichtigung der Spezifika des menschlichen Sehapparats wird hinsichtlich dieser Empfindlichkeit unterschieden zwischen photopischem Sehen (Tagsehen, Farbsehen), skotopischem Sehen (Nachtsehen, s/w-Sehen) sowie mesopischem Sehen (Mischform aus beiden).

Für jede dieser drei biologisch determinierten Sehfunktionen lässt sich die Kurve des spektralen Helligkeitsempfindens $V_i(\lambda)$ sowie der Maximalwert des photometrischen Strahlungsäquivalents aufstellen. Durch Bewertung der spektralen Dichten mit einem spektralen Helligkeitsempfindlichkeitsgrad $V_i(\lambda)$, Integration über die Wellenlänge und Multiplikation mit dem Maximalwert des photometrischen Strahlungsäquivalents des werden aus den spektralen strahlungsphysikalischen Größen die korrespondierenden lichttechnischen Größen (Formel 38) errechnet. Es gilt allgemein:

$$X_v = K_m \cdot \int X_{e\lambda} \cdot V_i(\lambda) \cdot d\lambda$$

mit X_v ... lichttechnische Strahlungsgröße

mit X_λ ... spektrale energetische Strahlungsgröße

mit $V_i(\lambda)$... spektraler Helligkeitsempfindlichkeitsgrad

mit K_m ... Maximalwert des photometrischen Strahlungsäquivalents

mit $d\lambda$... differentielles Intervall der Wellenlänge

Formel 38: Berechnung lichttechnischer Größen aus spektralen energetischen Strahlungsgrößen

Die Zahlenwerte des spektralen Helligkeitsempfindens, die $V(\lambda)$ -Kurven sind Gegenstand vielfacher Anstrengung ihrer präzisen Festlegung. ... Der Maximalwert des photometrischen Strahlungsäquivalents für photopisches Sehen (Tagsehen) beträgt 683 lm/W, jener für das skotopisches Sehen (Nachtsehen) 1.699 lm/W.¹¹⁷⁷

Details siehe dazu in der gegenständlichen Arbeit im Kapitel 6.2.

¹¹⁷⁷ DIN 5031-3 (1982)

11.6. Wechselwirkungen zwischen Strahlung und Materie

In der Wechselwirkung zwischen Strahlung und Materie treten die Phänomene der Reflexion, der Absorption, der Transmission und der Brechung auf. Sie werden in ihren Grundzügen nachfolgend beschrieben. Die Erläuterung ihrer konkreten Ausformungen beim Strahlungsdurchgang durch die Atmosphäre und beim Strahlungsdurchgang durch Verglasungen findet sich im Textteil der gegenständlichen Arbeit. Des Weiteren tritt in der Wechselwirkung zwischen Objekten und Strahlung das Phänomen der Beugung auf, das aber für die gegenständliche Arbeit keine Relevanz hat und daher auch nicht näher beschrieben wird.

11.6.1. Reflexion

Reflexion ist das Phänomen, bei dem ein auf eine Oberfläche auftreffendes Strahlenbündel von dieser mehr oder weniger stark und unter einer gesetzmäßigen Richtungsänderung zurückgeworfen wird.¹¹⁷⁸

Die Reflexion an Oberflächen, wie insbesondere etwa Oberflächen von Verglasungen, wird beschrieben durch die dimensionslose Kennzahl des direkten Strahlungsreflexionsgrads ρ , dem Verhältnis zwischen reflektierter und auftreffender Strahlungsintensität. Der Reflexionsgrad ist abhängig von der Wellenlänge der auftreffenden Strahlung und er ist abhängig vom Einfallswinkel der auftreffenden Strahlung. Beide Wechselwirkungen lassen sich theoretisch berechnen, letztere durch die Fresnel'schen Gleichungen.¹¹⁷⁹

In der Wechselwirkung zwischen Strahlung und durchstrahlten, Partikel tragenden Gasen tritt Reflexion an Gasmolekülen und Aerosolen in Form des Phänomens der Streuung auf. Streuung führt zur Ablenkung der auf die streuende Materie auftreffenden Direktstrahlung und somit zur Entstehung von Diffusstrahlung.

Streuung tritt mit steigender Wellenlänge der Strahlung signifikant fallend auf, somit am stärksten im UV- und im Blaubereich der Sonnenstrahlung, worin etwa die blaue Färbung des Taghimmels oder auch die rote Färbung des Morgen- und des Abendhimmels begründet ist.

Abhängig von der konkreten Fragestellung wird der Reflexionsgrad als spektrale Größe $\rho(\lambda)$ oder als energietechnischer Kennwert ρ_e oder als lichttechnischer Kennwert ρ_v verwendet.

¹¹⁷⁸ Nach Bergmann-Schaefer (1966)

¹¹⁷⁹ Augustin Jean Fresnel, französischer Physiker und Ingenieur, 1788–1827

11.6.2. Absorption

Absorption ist das Phänomen der Auslöschung (Extinktion) von Strahlung beim Auftreffen auf Materie. Sie führt gemäß dem Prinzip der Energieerhaltung zur Erwärmung der Materie und – im Gleichgewichtszustand – zur konvektiven Wärmeabgabe.

Die Gesetzmäßigkeit dieser Strahlungsextinktion durch Absorption wird allgemein mit dem Lambert Beer'schen Gesetz (Formel 39) beschrieben. Es gilt:

$$I_1 = I_0 \cdot e^{(-K \cdot l)}$$

mit K: Absorptionskonstante

mit l: Weglänge

mit I_1 : Intensität der transmittierten Strahlung

mit I_0 : Intensität der einfallenden Strahlung

Formel 39: Lambert Beer'sches Gesetz der Strahlungsextinktion, 5. Schreibweise

Das Verhältnis von $I_1/I_0 = \exp(-K \cdot l)$ wird als Absorptionsgrad bezeichnet und wird in der einschlägigen Fachliteratur sowie auch in der ÖNORM EN 410 mit α abgekürzt.¹¹⁸⁰ Es gilt dann (Formel 40):

$$I_1 = I_0 \cdot \alpha$$

mit I_1 : Intensität der transmittierten Strahlung

mit I_0 : Intensität der einfallenden Strahlung

mit α : Absorptionsgrad

Formel 40: Lambert-Beer'sches Gesetz der Strahlungsextinktion, 6. Schreibweise

Wie auch die Reflexion ist die Absorption abhängig von der Wellenlänge und ist über die Weglänge des Strahlungsdurchgangs auch signifikant abhängig vom Einfallswinkel.

Abhängig von der konkreten Fragestellung wird auch der Absorptionsgrad als spektrale Größe $\alpha(\lambda)$ oder als energietechnischer Kennwert α_e oder als lichttechnischer Kennwert α_v verwendet.

¹¹⁸⁰ ÖNORM EN 410 (1998)

11.6.3. Transmission

Transmission ist das Phänomen des Strahlungsdurchtritts durch Materie.

Sie wird mathematisch mit dem Transmissionsgrad τ , als dem Verhältnis zwischen transmittierter und auftreffender Strahlung beschrieben.

Gemäß dem Gesetz der Energieerhaltung ist der Transmissionsgrad stets die Ergänzung auf eins der Summe von Reflexionsgrad und Absorptionsgrad.

Abhängig von der konkreten Fragestellung wird auch der Transmissionsgrad als spektrale Größe $\tau(\lambda)$ oder als energietechnischer Kennwert τ_e oder als lichttechnischer Kennwert τ_v verwendet.

11.6.4. Brechung

Brechung¹¹⁸¹ bezeichnet das Phänomen der Richtungsänderung von Strahlung auf Grund einer lokalen Änderung ihrer Ausbreitungsgeschwindigkeit. Beim Übertritt von einem optisch dünneren in ein optisch dichteres Medium wird ein Strahl demnach zum Lot der Grenzfläche hin gebrochen. Das Maß der Richtungsänderung wird mit dem Snellius'schen Brechungsgesetz (Formel 41) beschrieben.¹¹⁸² Es gilt:

$$\frac{\sin(\delta_1)}{\sin(\delta_2)} = \frac{n_2}{n_1}$$

mit δ_1 : Einfallswinkel der Strahlung zum Lot der Grenzschicht

mit δ_2 : Austrittswinkel der Strahlung zum Lot der Grenzschicht

mit n_1 : Brechzahl des Mediums vor der Grenzschicht

mit n_2 : Brechzahl des Mediums nach der Grenzschicht

Formel 41: Snellius'sches Brechungsgesetz

Die Brechzahl n_i eines Mediums i ist dabei definiert als das Verhältnis zwischen der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum zur Lichtgeschwindigkeit im jeweiligen Medium i .

¹¹⁸¹ Englische Bezeichnung: refraction

¹¹⁸² Willebrord van Roijen Snell, niederländischer Astronom und Mathematiker, 1580-1626

Für den Fall des Übertritts von einem optisch dichteren in ein optisch dünneres Medium gilt das Snellius'schen Brechungsgesetz nur bis zum Grenzwinkel Θ_c (Formel 42), ab dem Totalreflexion des Strahls auftritt. Es gilt:

$$\Theta_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

mit Θ_c : Grenzwinkel der Totalreflexion

mit n_1 : Brechzahl des Mediums vor der Grenzschicht

mit n_2 : Brechzahl des Mediums nach der Grenzschicht

Formel 42: Grenzwinkel der Totalreflexion

Auf Grund ihrer unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten in Medien werden Strahlen unterschiedlicher Wellenlängen verschieden stark gebrochen, was zur spektralen Aufspaltung beim Durchtritt durch Grenzschichten führt.

Beim Durchtritt von Strahlung durch Medien mit planparallelen Oberflächen werden die Effekte der Brechung an den beiden Grenzschichten auf, weshalb das Phänomen der Brechung etwa beim Durchtritt von Licht durch Verglasungen des Bauwesens eine untergeordnete Bedeutung hat.

12. Berechnung des Tageslichtquotienten

12.1. Inhalt

Der Tageslichtquotient wird in Kapitel 8.4 dazu herangezogen, die originären Basismodelle hinsichtlich eines Mindestmaßes an Tageslichtqualität im Sinne der DIN 5034-1 zu überprüfen und sie gegebenenfalls zur Erzielung dieser Mindestqualitäten zu verkürzen.¹¹⁸³

Ergänzend zu den dort dokumentierten Ergebnissen sind im gegenständlichen Anhang die Randbedingungen der ausgeführten Berechnungen dokumentiert.

12.2. Berechnungen

12.2.1. Berechnungsmethode und -werkzeug

Für die Bestimmung des Tageslichtquotienten stehen eine Reihe von Verfahren, von der Messung über die Anwendung von halbempirischer Näherungsformeln bis hin zur Berechnung mit Tageslichtsimulationsprogrammen zur Verfügung.

In der gegenständlichen Arbeit wird das Mittel der Tageslichtsimulation angewandt. Verwendet wird das Softwarepaket RELUX, ein gut validiertes bauphysikalisches Planungstool auf der Basis des Radiocity-Verfahrens.^{1184,1185}

Berechnet wird die Verteilung des Tageslichtquotienten auf einer Ebene in der Höhe von 0,85 m. Nachdem der Tageslichtquotient per Definitionen die Einflüsse direkten Sonnenlichts ausklammert, erübrigt sich eine Untersuchung unterschiedlicher Gebäudeorientierungen.

¹¹⁸³ DIN 5034-1 (1999)

¹¹⁸⁴ Mit dem Begriff Radiocity-Verfahren werden jene Lichtberechnungen zusammengefasst, die von einer rein diffusen Reflexion der Raumboerflächen ausgehen. Sie zeichnen sich bei guter Rechengenauigkeit durch kurze Rechenzeiten bei vertretbarem Eingabeaufwand aus. Einsatzgrenzen ergeben sich aus der systematischen Unmöglichkeit, Effekte der spiegelnden Lichtlenkung abzubilden.

¹¹⁸⁵ RELUX Professional Version 2007-7.1, RELUX Informatik AG 1998-2007, Basel, Bezugsquelle aus dem Internet <http://www.relux.ch> (21.07.2008)

12.2.2. Anforderungen

Mangels vergleichbarer österreichischer Regelwerke wird auf die DIN 5034-1, Tageslicht in Innenräumen zurückgegriffen, in der folgende Anforderungen an den mindestens erforderlichen Tageslichtquotienten in Wohnräumen verankert sind:¹¹⁸⁶

„Die Helligkeit in Wohnräumen, die von dem durch die Fenster eindringenden Tageslicht erzeugt wird, ist im Rahmen ihrer psychischen Bedeutung ausreichend, wenn der Tageslichtquotient (siehe Abschnitt 3) auf einer horizontalen Bezugsebene, gemessen in einer Höhe von 0,85 m über dem Fußboden in halber Raumtiefe und in 1 m Abstand von den beiden Seitenwänden im Mittel wenigstens 0,9% und am ungünstigsten dieser Punkte wenigstens 0,75% beträgt. (...) In Wohnräumen mit Fenstern in zwei aneinander grenzenden Wänden muss der Tageslichtquotient am ungünstigeren Bezugspunkt mindestens 1% betragen.“

Mangels einer expliziten Bestimmung für Räume mit gegenüberliegenden Fenstern wird die Anforderung von $D_L \geq 1\%$ für den ungünstigsten Bezugspunkt in 1 m Abstand von den Seitenwänden auch für die gegenständliche Wohneinheit des Basismodells angewandt.

12.2.3. Geometrische Modellbildung

Es werden die Variationen des Basismodells gemäß der Definition aus Kapitel 8.3 als dreidimensionales Modell im genannten Programm zur Tageslichtberechnung abgebildet. Es sind das die folgenden Typen:

T_GGG_B460_T2850	Typ des Basismodells in der Ausformung mit Glaswand gegen Laubengang, mit Breite der Wohnung von 4,6 m und mit der Tiefe der Wohnung von 28,5 m
T_GGG_B230_T2850	Typ des Basismodells in der Ausformung mit Glaswand gegen Laubengang, mit Breite der Wohnung von 2,3 m und mit der Tiefe der Wohnung von 28,5 m
T_GWG_B460_T1350	Typ des Basismodells in der Ausformung mit opaker Wand gegen Laubengang, mit Breite der Wohnung von 4,6 m und mit der Tiefe der Wohnung von 13,5 m
T_GWG_B230_T1350	Typ des Basismodells in der Ausformung mit opaker Wand gegen Laubengang, mit Breite der Wohnung von 2,3 m und mit der Tiefe der Wohnung von 13,5 m

¹¹⁸⁶ DIN 5034-1 (1999)

In einigen Punkten der Modellbildung musste softwarebedingten Eingabeanforderungen in Abweichung vom konstruktivistischen Raummodell Rechnung getragen werden:

- > Programmtechnisch bedingt musste anstelle der idealtypisch zweidimensionalen Begrenzungsflächen eine Wand- und Deckenstärke von 1 cm berücksichtigt werden. Sie wurde geeignet, nämlich nach außen, in das geometrische Modell integriert, ist so nicht ergebnisrelevant.
- > Die idealtypisch unendliche Erstreckung des Laubengangs kann nicht abgebildet werden und wird daher geeignet angenähert mit einer Länge des Laubengangs von je 20 m in beide Richtungen über die Trennwände der Wohnung hinaus.

Die nachfolgende Abbildung (Abbildung 86) zeigt eines der verwendeten geometrischen Modelle, konkret jenes des Typs T_GGG_B460_T2850.¹¹⁸⁷

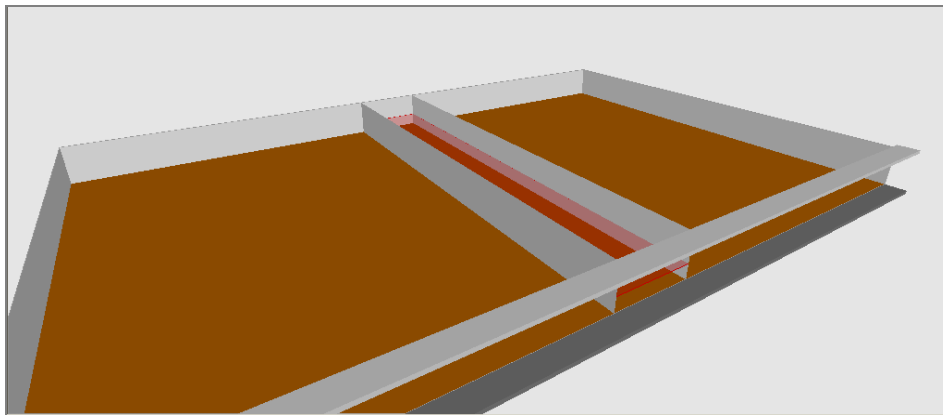


Abbildung 86: Geometriemodell zur Berechnung der Tageslichtquotientenverteilung

12.2.4. Physikalische Modellbildung

12.2.4.1. Lichttransmissionsgrad

Der nominelle Lichttransmissionsgrad der transparenten Flächen wurde bereits in Kapitel 8.3. festgelegt. Es gilt:

Verglasung der Wohnung gegen außen	$T_L=0,80$
Verglasung der Wohnung gegen den Laubengang	$T_L=0,80$
Verglasung des Laubengangs gegen außen	$T_L=0,90$

Zusätzlich wurden in Einklang mit ÖNORM B-8110-6 für nichtnormalen Strahlungseinfall ein Abminderungsfaktor $f_1 = 0,9$ auf den Lichttransmissionsgrad berücksichtigt. Abminderungsfaktoren für den Rahmenanteil und die Scheibenverschmutzung werden dem konstruktivistischen Forschungsansatz entsprechend nicht verwendet.¹¹⁸⁸

¹¹⁸⁷ Abbildung 86: Peter Holzer, 2008, Screenshot aus der Bearbeitung mit der Software RELUX

¹¹⁸⁸ ÖNORM B 8110-6 (2007)

Programmtechnisch bedingt musste die Kombination aus Verglasung der Wohnung gegen den Laubengang und Verglasung des Laubengangs gegen außen als eine einzige Verglasung abgebildet werden, was angenähert wird durch Multiplikation der beiden Lichttransmissionsgrade inklusive der beiden Abminderungsfaktoren für nicht normalen Strahlungsdurchgang.

12.2.4.2. Reflexionsgrad der opaken Flächen

Nichttransparente Flächen werden, als Eigenschaft des Radiocity-Verfahrens der Lichtberechnung als vollständig diffus reflektierend abgebildet. Die Reflexionsgrade werden im Einklang mit DIN 5034-4 mit folgenden Werten berücksichtigt:¹¹⁸⁹

Boden	0,20
Wand	0,60
Decke	0,70
Oberflächen des Laubengangs	0,25

12.2.4.3. Strahlungsbedingungen im Außenraum

In Übereinstimmung mit der einschlägigen Fachliteratur, z.B. DIN 5034 wird der Tageslichtquotient für den bedeckten Himmel nach CIE bestimmt.

Zur Erleichterung der Umrechnung von Innenbeleuchtungsstärken auf den Tageslichtquotienten werden darüber hinaus in den Berechnungen außenräumliche Strahlungsbedingungen eingestellt, die zu einer horizontalen Außenbeleuchtungsstärke von genau 10.000 lx führen, womit der Tageslichtquotient stets als der hunderste Teil der Beleuchtungsstärke in lx abgelesen werden kann.^{1190,1191}

12.2.4.4. Weitere Einstellungen

Als Ergebnis von Sensitivitätsanalysen wurden alle endgültigen Berechnungen mit hochwertigen Einstellungen hinsichtlich Indirektanteil und Rasterabstand durchgeführt.¹¹⁹²

Konkret wurde mit folgenden Einstellungen gearbeitet:

- > Indirektanteil "Mittel"
- > Rasterabstand reduziert von 2,84 m auf 0,5 m
- > Automatische Verfeinerung „hoch“

¹¹⁸⁹ DIN 5034-4 (1994)

¹¹⁹⁰ CIE - Commission Internationale d'Eclairage; Internationale Beleuchtungskommission konstituiert 1931. Die CIE arbeitet an der internationalen Standardisierung und Normierung von Lichttechnischen relevanten Größen.

¹¹⁹¹ In RELUX wird diese Randbedingung erreicht bei Auswertung für den Standort Wien, (16,22° geogr. Länge; 28,13 °N geogr. Breite) für den Termin 21.03. und für die Uhrzeit 08:10.

¹¹⁹² Die verfeinerte Analyse erwies sich als notwendig, nachdem die solcherart ermittelten Ergebnisse gegenüber jenen mit Standardeinstellungen der Software um mehr als 10% abweichen.

13. Berechnung des Durchlichtungsfaktors ©

13.1. Allgemeines

Als Kennzahl zur Beschreibung der Tageslichtqualität in Innenräumen wird die, von den Autoren neu entwickelte Kennzahl des Durchlichtungsfaktors ©¹¹⁹³ herangezogen.

Der Durchlichtungsfaktor [LPF - Light Penetration Factor] wird definiert als jener Anteil des Nettovolumens eines Raumes, der - unter der Voraussetzung eines wolkenlosen Himmels - innerhalb eines Tages zumindest einmal von einem direkten Sonnenstrahl durchlichtet wird.

In den Durchlichtungsfaktor fließen die Geometrie der Sonnenbahn am konkreten Standort und die Raumgeometrie mit der Position, Größe und Orientierung der transparenten Flächen ein.

Das Wesen des Durchlichtungsfaktors ist in Kapitel 8.5 ausführlich beschrieben, weshalb eine weitere diesbezügliche Erläuterung hier entfällt.

13.2. Berechnungsmethode und -randbedingungen

Die Berechnung des LPF erfolgt mit einem computergestützten, geometrischen Verfahren. Die direkte Sonnenstrahlung wird als Feld gerichteter Parallelstrahlen abgebildet und durch die jeweils exponierten transparenten Flächen in das Rauminnere verfolgt. Das Raumvolumen wird in würfelförmige Prüfvolumina von ca. 25 cm Seitenlänge unterteilt. Für den festgelegten Moment werden sodann jene Prüfvolumina ermittelt, die von einem Sonnenstrahl durchdrungen werden. Die Zahl der solcherart durchlichteten Prüfvolumina wird in Bezug gesetzt zur Gesamtzahl der Prüfvolumina des Raumes, woraus sich der durchlichtete Volumensanteil des Raumes ergibt.

Die Berechnungen des Durchlichtungsfaktors werden mit dem Prototyp einer eigens zu diesem Zweck in der Entwicklungsumgebung C++ entwickelten Software, dem LPF-Tool □ durchgeführt.¹¹⁹⁴

13.2.1. Außenklima

Die für die Berechnung des Durchlichtungsfaktors erforderlichen Klimadaten beschränken sich auf Angaben zur Geometrie der Sonnenbahn am jeweiligen Standort, beschrieben mit den Stundenwerten der Sonnenhöhe und des Azimuts.

¹¹⁹³ Der Durchlichtungsfaktor (LPF - Light Penetration Factor) ist eine eigenständige Neuentwicklung der Autoren und ist in diesem Sinne urheberrechtlich geschützt.

¹¹⁹⁴ LPF-Tool (*Light Penetration Factor – Tool*) wurde nach einer Idee von Renate Hammer und Peter Holzer von der Fa. ROCAM entwickelt und wird in der Forschungsarbeit „Zuviel Licht“ erstmals im Rahmen einer Forschungsarbeit eingesetzt. Auch für dieses Tool gilt explizit der Schutz durch das Urheberrecht.

Als Quellen für die Stundenwerte dieses Wertepaars werden sowohl die internationale Klimadatenbank METEONORM als auch der Formelsatz aus der Forschungsarbeit von Walter Heindl und Harald A. Koch herangezogen.^{1195,1196}

13.2.2. Nutzungsprofil

Bei der Berechnung des Durchlichtungsfaktors spielt das Nutzungsprofil keine Rolle. Es wird daher hier nicht weiter erörtert.

13.2.3. Bauteileigenschaften

Die für die Berechnung des Durchlichtungsfaktors erforderlichen Angaben zu Beurteilungseigenschaften beschränken sich auf die Information, ob ein Bauteil transparent oder opak ist. Nachdem der Durchlichtungsfaktor keine quantitative Aussage über Bestrahlungsstärken macht, erübrigen sich darüber hinaus gehende Angaben, wie etwa jene des Lichtdurchlassgrades von transparenten Flächen.

13.2.4. Raumgeometrie

Den Berechnungen werden jene Raumgeometrien zugrunde gelegt, wie sie in den Kapiteln 8.3. und 8.4. beschrieben werden. Sie werden mit den Mitteln des LPF-Tools mit ausreichender Genauigkeit abgebildet. Softwarebedingt musste anstelle der idealtypisch zweidimensionalen Begrenzungsflächen eine Wand- und Deckenstärke von 10 cm berücksichtigt werden. Sie wurde geeignet in das geometrische Modell integriert.

Die idealtypisch unendliche Erstreckung des Laubengangs wurde angenähert mit einer Länge des Laubengangs von je 10 m in beide Richtungen über die Trennwände der Wohnung hinaus.

¹¹⁹⁵ METEONORM 5.1; global meteorological database for applied climatology; Jan Remund und Stefan Kunz; METEOTEST GmbH, Bern; 2004

¹¹⁹⁶ Heindl (1976)

Die nachfolgende Abbildung (Abbildung 87) zeigt das zur Untersuchung des Tageslichtquotienten verwendete geometrische Modell.¹¹⁹⁷

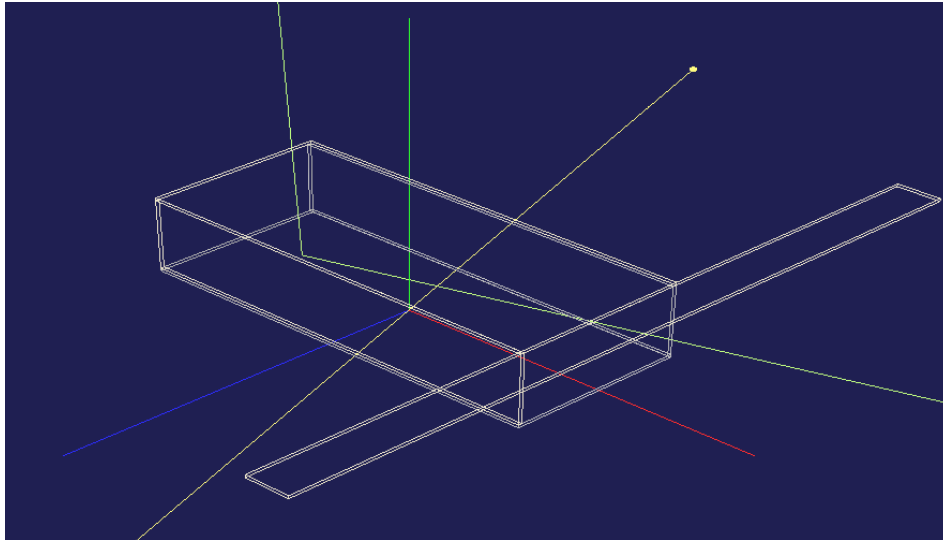


Abbildung 87: Geometriemodell zur Berechnung des Durchlichtungsfaktors

13.3. Auswertungsmethode

Die Auswertung kann sowohl als axometrische Darstellung als auch als Einzahlangabe in Prozent durchlichteten Raumvolumens erfolgen.

Ausgewertet wird einerseits der Durchlichtungsfaktor für jeden 15. Tag eines Monats in seiner eigentlichen Definition, als der innerhalb eines konkreten Tages durchlichtbare Volumensanteil des Raumes oder Raumverbandes.

Darüber hinaus wird der Jahresmittelwert dieser Monatsauswertungen gebildet.

Und es wird, nachdem für den architektonischen Entwurf der Tagesverlauf des Durchlichtungspotentials eine entscheidende Rolle spielt, die Untersuchung ausgeweitet um Ermittlung des Verlaufs des stündlichen Momentanwerts des Durchlichtungsfaktors, als somit jener Anteile des Nettovolumens eines Raumes, die - unter der Voraussetzung eines wolkenlosen Himmels - zu diesen konkreten Stunden von einem direkten Sonnenstrahl durchlichtet werden.

¹¹⁹⁷ Abbildung 50: Peter Holzer, 2008, Screenshot aus der Bearbeitung mit der Software LPF-Tool

Die axonometrische Ergebnisdarstellung des Durchlichtungsfaktors über einen Tag zeigt die folgende Abbildung, exemplarisch für das Basismodell T_GGG_B460_T1400_A60. (Diagramm 143).¹¹⁹⁸

Die Auswertung des Verlaufs des stündlichen Momentanwerts des Durchlichtungsfaktors zeigt das darauf folgende Diagramm, wieder exemplarisch für den 15. März und für das Basismodell T_GGG_B460_T1400_A60. (Abbildung 88)¹¹⁹⁹

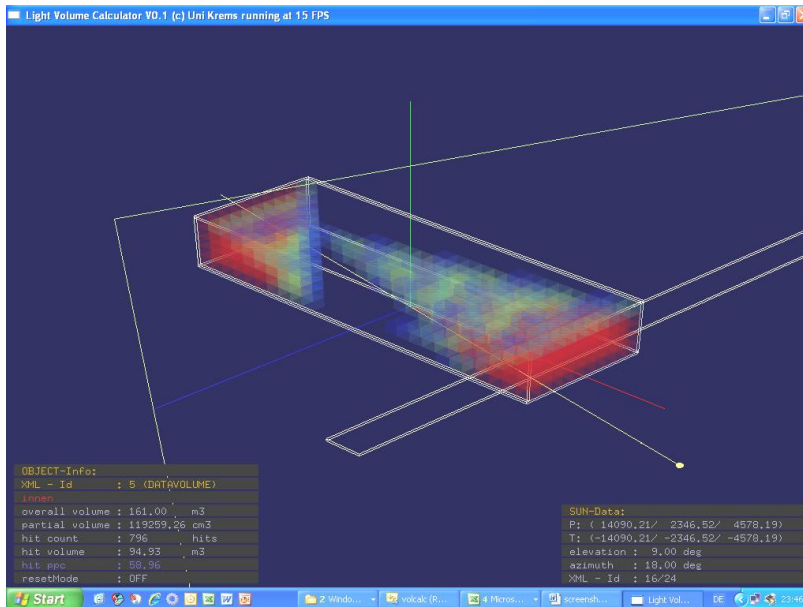


Abbildung 88: Axonometrische Ergebnisdarstellung des LPF für das Basismodell T_GGG_B460_T1400_A60 am 21. März

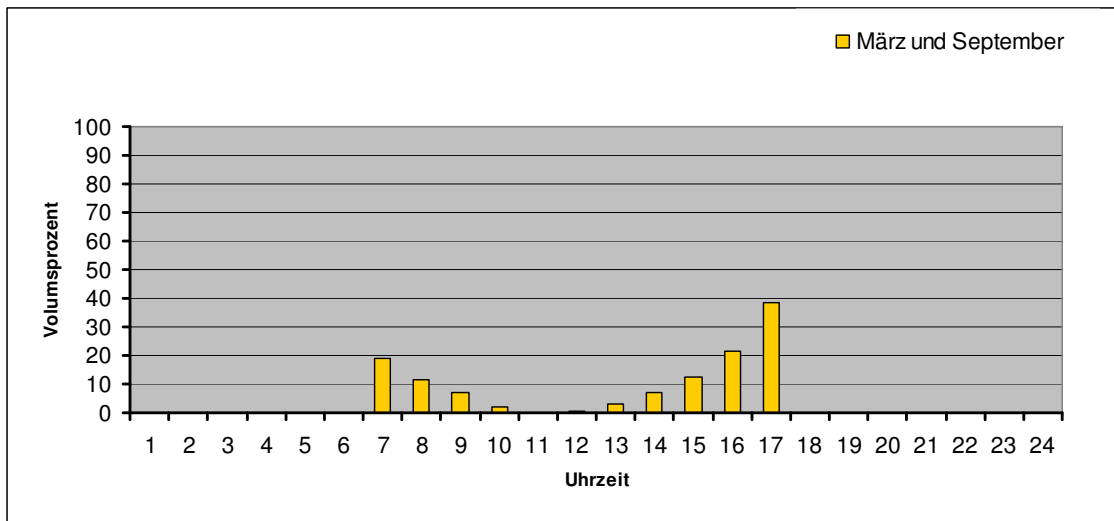


Diagramm 143: Tagesverlauf der Momentanwerte des LPF für das Basismodell T_GGG_B460_T1400_A60 am 21. März

¹¹⁹⁸ Diagramm 143: Peter Holzer, 2009, Auswertung aus der Bearbeitung mit der Software LPF-Tool

¹¹⁹⁹ Abbildung 88: Peter Holzer, 2009, screenshot aus der Bearbeitung mit der Software LPF-Tool

14. Berechnung des Heizwärme- und des Kühlbedarfs

14.1. Allgemeines

Der Heizwärmebedarf ist definiert in der ÖNORM B 8110-1 als "Wärmemenge, die den konditionierten Räumen zugeführt werden muss, um deren vorgegebene Solltemperatur einzuhalten."¹²⁰⁰ Der Heizwärmebedarf ist die Differenz zwischen den Wärmeverlusten und den internen wie den solaren Wärmegewinnen. Er bildet somit in geeigneter Weise die Qualität eines Raumes ab, passiv solare Wärmegewinne zu nutzen. Wobei gilt: Je kleiner der Heizwärmebedarf, desto größer das passiv solare Gewinnpotential. Zu präzisieren ist dabei, dass es sich genau genommen um jene Wärmemenge handelt, die der Luft in den konditionierten Räumen zuzuführen ist. Demgemäß wird auch in den Simulationsrechnungen eine vollständig konvektive Wärmezufuhr modelliert.

Analog ist der Kühlbedarf jene Wärmemenge, die aus den konditionierten Räumen abgeführt werden muss, um deren vorgegebene Solltemperatur einzuhalten. Im Sinne der ÖNORM B 8110-6 bildet der Kühlbedarf somit die nicht nutzbaren solaren und inneren Wärmegewinne ab.¹²⁰¹

14.2. Berechnungsmethode

Im gegenständlichen Forschungsvorhaben werden der Heizwärmebedarf und der Kühlbedarf unter Verwendung dynamischer thermischer Gebäudesimulation ermittelt. Bei diesem Verfahren wird die Wärmebilanz des Gebäudes aufeinander folgend in Zeitschritten von zwei Minuten berechnet und die relevanten Energieströme aufsummiert. Veränderliche klimatische Randbedingungen werden in Stundenschritten eingelesen. Berücksichtigt werden somit mit großer Genauigkeit die Effekte zeitlich veränderlicher außenräumlicher Randbedingungen und zeitlich veränderlicher Nutzung. Berücksichtigt werden ferner auch Effekte der Wärmespeicherung.

Als Rechenwerkzeug wird das Softwarepaket TAS des englischen Herstellers EDSL in seiner Version 9.0.9d eingesetzt, ein leistungsfähiges und bestens validiertes Programmpaket.¹²⁰²

In Abweichung der ÖNORM B 8110-6 werden der Heizwärmebedarf und der Kühlbedarf in der gegenständlichen Arbeit immer für das gesamte Jahr, ohne Berücksichtigung einer Heizgrenz- oder einer Kühlgrenztemperatur berechnet.¹²⁰³

Der Heizwärmebedarf und der Kühlbedarf werden bezogen auf einen Quadratmeter beheizter Nettogrundfläche im Sinne der ÖNORM B 1800.¹²⁰⁴

¹²⁰⁰ ÖNORM B 8110-1 (2007)

¹²⁰¹ ÖNORM B 8110-6 (2007)

¹²⁰² TAS - Thermal Analysis System 9.0.9d by EDSL - Environmental Design Solutions Limited; Milton Keynes, GB; 2007

¹²⁰³ ÖNORM B 8110-6 (2007)

¹²⁰⁴ ÖNORM B 1800 (2002)

14.3. Randbedingungen

14.3.1. Raumgeometrie

Den Berechnungen werden die Raumgeometrien der verkürzten Basismodelle zugrunde gelegt, wie sie im Kapitel 8.4. beschrieben werden. Sie werden mit den Mitteln des Softwarepakets TAS mit ausreichender Genauigkeit abgebildet.

Softwarebedingt müssen anstelle der idealtypisch nur zweidimensionalen Begrenzungsflächen Wand- und Deckenstärken von jeweils 5 cm berücksichtigt werden. Sie wurden derart in das geometrische Modell integriert, als die Abmaße des Raumes laut Kapitel 8.4. stets als Innenmaße abgebildet werden und dass die Breite des Laubengangs als Außenmaß, von der, der Wohnung zugewandten, Seite der Trennwand zwischen Laubengang und Wohnung bis zur Außenseite der Laubengangfassade verstanden wird. Mit diesen beiden Festlegungen wird thermisch und auch verschattungstechnisch eine größtmögliche Übereinstimmung mit dem konstruktivistischen Basismodell erreicht.

Die idealtypisch unendliche Längenerstreckung des Laubengangs wurde angenähert mit einer Länge des Laubengangs von zumindest je zweifacher Wohnungsbreite in beide Richtungen über die Trennwände der Wohnung hinaus. Der Zweck der Annahme unendlicher Erstreckung, nämlich die Beschattungswirkung auch bei schleifend einfallendem Sonnenlicht wird somit erreicht.

Die Wohnung wird thermisch als eine zusammenhängende Zone betrachtet. Der Laubengang wird als eigene, vorgelagerte Raumzelle und eigene thermische Zone modelliert.

Auch die Fenstergeometrien werden entsprechend den Vorgaben aus den Kapiteln 8.4. abgebildet, also als Vollverglasungen der betreffenden Fassaden. Softwarebedingt sind unverglaste Restflächen von bis zu 3% der jeweiligen Fassadenfläche unvermeidbar. Sie werden nicht kompensiert.

Die nachfolgende Abbildung 52 (Abbildung 89) zeigt das zur Berechnung des HWB und des KB verwendete geometrische Modell. Erkennbar sind das rot gefärbte Volumen der Wohnung des Basismodells und das blassgelb gefärbte Volumen des zugeordneten Laubengangs. Die umliegenden Wohnungen dienen nur exemplarisch der Veranschaulichung der übergeordneten Raumstruktur.¹²⁰⁵

¹²⁰⁵ Abbildung 52: Peter Holzer, Darstellung aus der Bearbeitung mit der Software TAS

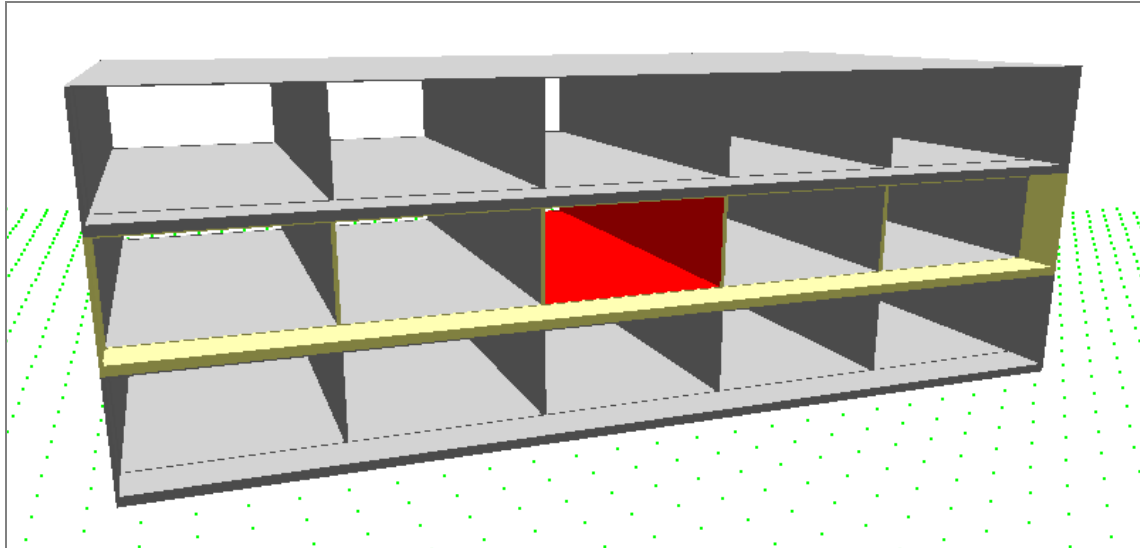


Abbildung 89: Geometrisches Modell zur Berechnung des Heizwärme- und des Kühlbedarfs

14.3.2. Außenklima

Zur Beschreibung des Außenklimas wird ein Referenz-Klimatensatz für den Standort Wien mit Stundenwerten der Außenlufttemperatur, relativer Feuchtigkeit, Niederschlag, Globalstrahlung, Himmelsstrahlung, Luftdruck, Windgeschwindigkeit und Windrichtung herangezogen.

Der nämliche Klimatensatz ist ein Halbsynthetischer Klimatensätze, erstellt und zur Verfügung gestellt von ao.Univ.Prof. Dr. Klaus Kreč.¹²⁰⁶ Der Klimatensatz erfüllt für alle der genannten Parameter den langjährigen Durchschnitt der gemessenen Monatsmittelwerte, gültig für den Beobachtungszeitraum 1976 bis 2005 und bildet darüber hinaus charakteristische dynamische Verläufe der genannten Parameter, also auch sommerliche oder winterliche Extremsituationen, in realistischer Weise auf Basis gemessener Daten ab.

14.3.3. Bauteileigenschaften

Die Bauteile werden entsprechend den Festlegungen des Basismodells aus Kapitel 8.4.7 abgebildet. Die Trennbauteile gegen die ebenfalls beheizten umliegenden Wohnungen werden entsprechend der Typologie des mehrgeschossigen Wohnbaus definiert. Folgende Bauteile werden in der Simulationsrechnung verwendet:

¹²⁰⁶ W. Heindl, T. Kornicki, A. Sigmund, „Erstellung halbsynthetischer Klimatensätze für meteorologische Messstationen“, Forschungsbericht im Auftrag des Bundesministeriums für Wissenschaft und Forschung (GZ. 70.630/18-25/88) und des Amtes der NÖ Landesregierung (Zl. NC 23-1988/1989), Wien (1990)

14.3.3.1. Verglasung gegen direkt Außen und gegen den Laubengang

$$U_w = 1,30 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$$

$$U_g = 1,20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$$

$$g = 0,62$$

$$T_L = 0,80$$

14.3.3.2. Verglasung des Laubengangs gegen Außen

$$U_w = 5,60 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$$

$$U_g = 5,60 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$$

$$g=0,84$$

$$T_L=0,90$$

14.3.3.3. Wohnungstrennwand

Die Wohnungstrennwände werden im Einklang mit der Wiener Bauordnung und entsprechend der Typologie des mehrgeschossigen Wohnbaus abgebildet mit den thermischen Eigenschaften einer doppelten Betonscheibe von je 12cm Stahlbeton mit 3cm Mineralwoll-Einlage, beidseitig verspachtelt.

Wirksame Speichermasse: 530 kg/m²,

$$U = 0,85 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$$

14.3.3.4. Trenndecke

Die Trenndecken werden, wie die Wohnungstrennwände, entsprechend den Anforderungen der Wiener Bauordnung und der Typologie des mehrgeschossigen Wohnbaus mit den thermischen Eigenschaften einer 20cm starken, an der Unterseite mit 0,4cm Schichtstärke verspachtelten, Stahlbetonplatte mit 3,2cm Trittschalldämmung, 5cm Estrich und 2cm Holzboden abgebildet.

Wirksame Speichermasse nach oben: 150 kg/m²

Wirksame Speichermasse nach unten: 530 kg/m²

$$U = 0,86 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$$

14.3.3.5. Außenwand

Die Außenwand wird wieder entsprechend den Anforderungen der OENORM B 8110-1 und der Typologie des mehrgeschossigen Wohnbaus mit den thermischen Eigenschaften einer 20cm starken, innen verspachtelten Stahlbetonscheibe mit 12cm Polystyrol Wärmedämmung, dünn verputzt, abgebildet.

Wirksame Speichermasse: 530 kg/m².

$$U = 0,30 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$$

14.3.4. Nutzungsprofil

14.3.4.1. Innenraumtemperaturen

Im Einklang mit dem Nutzungsprofil für Mehrfamilienhäuser laut ÖNORM B 8110-5 wird die Lufttemperatur im Innenraum mit 20°C festgelegt und die Heizung auf diesen Sollwert geregelt.¹²⁰⁷ Als Obergrenze der Lufttemperatur im Innenraum wird in Anlehnung an ÖNORM B 8110-3 der Wert von 27°C festgelegt.¹²⁰⁸

Für die angrenzenden Wohneinheiten wird angenommen, dass in ihnen stets dieselben Innentemperaturen herrschen wie in der untersuchten Wohneinheit.

14.3.4.2. Innere Wärmelasten

Im Einklang mit dem Nutzungsprofil für Mehrfamilienhäuser laut ÖNORM B 8110-5 herangezogen werden nutzflächenbezogene innere Wärmelasten von 3,75 W/m² berücksichtigt.¹²⁰⁹

14.3.4.3. Luftwechsel

In der Wohneinheit wird, wieder im Einklang mit dem Nutzungsprofil für Mehrfamilienhäuser laut ÖNORM B 8110-5, eine konstante Luftwechselrate von 0,4 1/h berücksichtigt.

Im Laubengang wird eine permanente Öffnung der Verglasung gegen Außen im Ausmaß von 5% der gesamten Fassadenfläche zugrunde gelegt, was in temperatur- und windabhängigen Luftwechselraten in der Größenordnung von 0,2 1/h bis zu (kurzfristig) 1 1/h und darüber resultiert.

14.4. Auswertung

Mittels Simulationsläufen über jeweils ein ganzes Jahr wird für jede Orientierung der vier Basismodelle der resultierende Heizwärme- und Kühlbedarf berechnet. Beide Kennzahlen werden auf die beheizte Grundfläche bezogen, wobei sich angesichts der idealtypisch verschwindenden Wandstärken die Frage nach Brutto- oder Nettofläche erübrigt.

¹²⁰⁷ ÖNORM B 8110-5 (2007)

¹²⁰⁸ ÖNORM B 8110-3 legt den Wert von 27°C operativer Temperatur als Obergrenze für die Sommertauglichkeit von Wohnräumen fest, geht aber dabei per definitionem von nicht gekühlten Räumen aus.

¹²⁰⁹ In der ÖNORM B 8110-5 ist diese Innere Wärmelast nur für den Heizfall definiert, da bei Wohngebäuden normgemäß kein Kühlfall auftreten darf. Für die gegenständliche Arbeit wurde daher im Analogieschluss die Definition der inneren Last auch auf die Kühlperiode angewandt.

15. Berechnung der terrestrischen Sonnenstrahlung

Das gegenständliche Kapitel dokumentiert die Eingabegrößen in das Softwareprogramm SMARTS 2 zur Berechnung der terrestrischen Sonnenstrahlung zu den festgelegten Referenzzeitpunkten:

Die Grundzüge der in diesem Programm verwendeten Algorithmen finden sich bereits im angesprochenen Kapitel 4.4. der gegenständlichen Arbeit.

Die Dokumentation der Eingabegrößen erfolgt in der Reihenfolge der softwarespezifischen Abfragen von SMARTS 2 und gliedert sich in jeder Eingabegröße nach der Reihenfolge von 1. Nennung der erforderlichen Eingabe, 2. Nennung der vom Programm angebotenen Möglichkeiten und 3. Nennung der gewählten Eingabegröße. Die herangezogenen Quellen werden angegeben und die verwendeten Werte deklariert. Die Angabe der nummerierten „Cards“ bezieht sich auf die Eingabesystematik von SMARTS.

15.1. Luftdruck und Meereshöhe (Card 2)

Erforderlich ist die Eingabe von Luftdruck und Meereshöhe, die insbesondere Eingangsgröße für die Berechnung spezifischer, druckabhängiger Extinktionskoeffizienten sind.

SMARTS 2 bietet die Abfrage von Luftdruck und Meereshöhe des Standorts. Ergänzend könnte auch gegebenenfalls die Höhe des Messpunkts über dem Boden angegeben werden oder besteht die Funktionalität, den Luftdruck mit Näherungsformeln aus der Angabe der geografischen Breite zu errechnen.

Für die gegenständlichen Berechnungen wird die Eingabe von Luftdruck und Meereshöhe des Standorts gewählt und wird der Luftdruck am Standort Wien für alle vier Referenzzeitpunkte konstant mit 992 mbar festgelegt. Dieser Wert entspricht dem Jahresmittelwert der monatlichen Normalwerte am Standort Wien, ihrerseits die langjährigen Monatsmittel der Jahre 1961 – 1990, gemessen und veröffentlicht von der ZAMG – Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik in Wien.¹²¹⁰

Als Seehöhe wird aus derselben Quelle ein Wert von 202 m festgelegt.

¹²¹⁰ Online-Publikation von Klimainformationen der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien, aus dem Internet
<http://www.zamg.ac.at/produkte/thema/klimainformation/zusammenstellungen/klimatabelle/>
(03.12.2008)

15.2. Atmosphärentyp (Card 3)

Als Eingabe abgefragt wird eine Definition der Atmosphäre hinsichtlich der vertikalen Profile von Temperatur, Druck und der Konzentrationen der wesentlichen Atmosphärenbestandteile. Das Softwarepaket SMARTS 2 bietet alternativ die Auswahl einer von zehn Referenzatmosphären oder die Eingabe der Werte von momentaner Lufttemperatur, relativer Luftfeuchte, Tagesmitteltemperatur sowie eine Angabe zur Saison, aus denen das Softwarepaket die erforderlichen Informationen errechnet. Für die gegenständlichen Berechnungen wurde der zweite Weg, also jener der Eingabe der realen Standortgrößen gewählt, was die Angabe folgender weiterer Eingaben erfordert:

15.2.1. Lufttemperatur am Standort

Die Lufttemperatur am Standort wird spezifisch für die vier Referenztage entnommen aus dem Klimadatensatz nach ÖNORM B 8110-5¹²¹¹ und ÖNORM H 5056¹²¹². In ersterer ÖNORM sind die Monatsmitteltemperaturen festgelegt. In zweiter die mittlere monatliche Amplitude des Tagesverlaufs der Außentemperatur, bei einer Zeitverschiebung des Temperaturminimums von zwei Stunden von Mitternacht.

Die folgende Tabelle (Tabelle 57) zeigt die Monatsmittel, die mittlere Tagesamplitude und die Stundenmittel der Lufttemperatur, laut ÖNORM B 8110-5 und ÖNORM H 5056. Markiert sind jene Werte, welche als Eingabegrößen bzw. zu ihrer Herleitung verwendet werden.

	Jänner	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember
Tagesmittel	-1,64	0,33	4,30	9,17	13,85	16,97	18,65	18,19	14,51	9,18	3,95	0,32
Amplitude	3,40	4,70	6,60	8,30	8,90	8,50	8,80	8,50	8,30	6,00	3,70	2,80
Verschiebung	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00

Uhrzeit	Temp [°C]	Temp [°C]	Temp [°C]	Temp [°C]	Temp [°C]	Temp [°C]	Temp [°C]	Temp [°C]	Temp [°C]	Temp [°C]	Temp [°C]	Temp [°C]
0	-4,58	-3,74	-1,42	1,98	6,14	9,61	11,03	10,83	7,32	3,98	0,75	-2,10
1	-4,92	-4,21	-2,08	1,15	5,25	8,76	10,15	9,98	6,49	3,38	0,38	-2,38
2	-5,04	-4,37	-2,30	0,87	4,95	8,47	9,85	9,69	6,21	3,18	0,25	-2,48
3	-4,92	-4,21	-2,08	1,15	5,25	8,76	10,15	9,98	6,49	3,38	0,38	-2,38
4	-4,58	-3,74	-1,42	1,98	6,14	9,61	11,03	10,83	7,32	3,98	0,75	-2,10
5	-4,04	-2,99	-0,37	3,30	7,56	10,96	12,43	12,18	8,64	4,94	1,33	-1,66
6	-3,34	-2,02	1,00	5,02	9,40	12,72	14,25	13,94	10,36	6,18	2,10	-1,08
7	-2,52	-0,89	2,59	7,02	11,55	14,77	16,37	15,99	12,36	7,63	2,99	-0,40
8	-1,64	0,33	4,30	9,17	13,85	16,97	18,65	18,19	14,51	9,18	3,95	0,32
9	-0,76	1,55	6,01	11,32	16,15	19,17	20,93	20,39	16,66	10,73	4,91	1,04
10	0,06	2,68	7,60	13,32	18,30	21,22	23,05	22,44	18,66	12,18	5,80	1,72
11	0,76	3,65	8,97	15,04	20,14	22,98	24,87	24,20	20,38	13,42	6,57	2,30
12	1,30	4,40	10,02	16,36	21,56	24,33	26,27	25,55	21,70	14,38	7,15	2,74
13	1,64	4,87	10,68	17,19	22,45	25,18	27,15	26,40	22,53	14,98	7,52	3,02
14	1,76	5,03	10,90	17,47	22,75	25,47	27,45	26,69	22,81	15,18	7,65	3,12
15	1,64	4,87	10,68	17,19	22,45	25,18	27,15	26,40	22,53	14,98	7,52	3,02
16	1,30	4,40	10,02	16,36	21,56	24,33	26,27	25,55	21,70	14,38	7,15	2,74
17	0,76	3,65	8,97	15,04	20,14	22,98	24,87	24,20	20,38	13,42	6,57	2,30
18	0,06	2,68	7,60	13,32	18,30	21,22	23,05	22,44	18,66	12,18	5,80	1,72
19	-0,76	1,55	6,01	11,32	16,15	19,17	20,93	20,39	16,66	10,73	4,91	1,04
20	-1,64	0,33	4,30	9,17	13,85	16,97	18,65	18,19	14,51	9,18	3,95	0,32
21	-2,52	-0,89	2,59	7,02	11,55	14,77	16,37	15,99	12,36	7,63	2,99	-0,40
22	-3,34	-2,02	1,00	5,02	9,40	12,72	14,25	13,94	10,36	6,18	2,10	-1,08
23	-4,04	-2,99	-0,37	3,30	7,56	10,96	12,43	12,18	8,64	4,94	1,33	-1,66
24	-4,58	-3,74	-1,42	1,98	6,14	9,61	11,03	10,83	7,32	3,98	0,75	-2,10

Tabelle 57: Stundenwerte der Lufttemperatur am Standort Wien nach ÖNORM B 8110-5 und ÖNORM H 5056

¹²¹¹ ÖNORM B 8110-5 (2007)

¹²¹² ÖNORM H 5056 (2007)

15.2.2. Relative Luftfeuchte am Standort

Die relative Luftfeuchte am Standort zum Referenzzeitpunkt wird mit Hilfe des hx-Diagramms feuchter Luft errechnet aus der absoluten Luftfeuchte und der Lufttemperatur zum Referenzzeitpunkt. Wobei die absolute Luftfeuchte entnommen wird aus Messungen der ZAMG¹²¹³, publiziert in der internationalen Klimadatendatenbank METEONORM¹²¹⁴.

Die folgende Tabelle (Tabelle 58) und das nachfolgende Diagramm (Diagramm 144) zeigen den aus den genannten Quellen ermittelten Verlauf der Monatsmittelwerte der relativen und der absoluten Luftfeuchte am Standort Wien, Hohe Warte.¹²¹⁵

Monat	rel. F. [%]	abs. F. [g/kg]
Jan	80	2,5
Feb	72	3,25
Mar	69	4,25
Apr	64	5,5
Mai	65	8
Jun	66	9,5
Jul	68	10,75
Aug	68	10,75
Sep	73	8,5
Okt	78	6,75
Nov	80	4,75
Dez	80	3,25
Jahr	71	6,5

Tabelle 58: Langjährige Monatsmittel der Luftfeuchte in Wien

¹²¹³ ZAMG – Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien

¹²¹⁴ METEONORM 6.0 – Internationale Klimadatendatenbank, Meteotest, Schweiz, Bezugsquelle im Internet: <http://www.meteotest.ch> (04.02.2009)

¹²¹⁵ Tabelle 58 und Diagramm 144: Peter Holzer, 2008, aus Berechnungen mit METEONORM

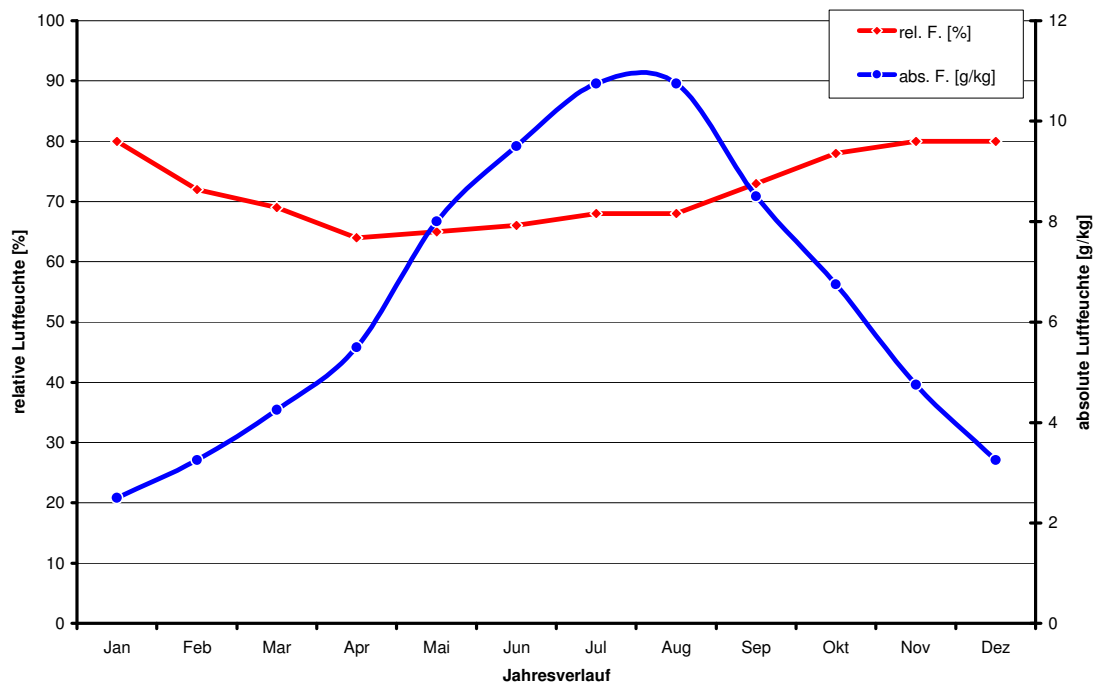


Diagramm 144: Langjährige Monatsmittel der Luftfeuchte in Wien

Zu den Referenzzeitpunkten errechnen sich demnach folgende Werte der relativen Luftfeuchte:

- > 15. März, 12:00: 55%
- > 15. Juni, 12:00: 45%
- > 15. September: 50%
- > 15. Dezember: 70%

15.2.3. Jahreszeit/Saison

Die Algorithmen von SMARTS 2 zur Beschreibung der Atmosphäre bedürfen einer Angabe der Saison, mit der Wahlmöglichkeit Winter oder Sommer. Im Einklang mit dem Users Manual wird für die Referenztage im März und im Juli die Einstellung Sommer sowie für September und Dezember die Einstellung Winter gewählt.

15.3. Wasserdampf (Card 4)

Als Eingabegröße ist eine geeignete Angabe der Wasserdampfmenge in der Atmosphäre erforderlich, als wichtigste Ursache für Absorption.

SMARTS 2 bietet dafür mehrere Optionen: Entweder die Eingabe der Niederschlags verfügbaren Wasserdampfmenge¹²¹⁶ direkt einzugeben, definiert als die Höhe der Wassersäule, die sich bei ideal vollständiger Kondensation allen atmosphärischen Wasserdampfs in einer Säule gleich bleibenden Querschnitts ergeben würde.¹²¹⁷ Oder auch die Funktionalität, dieselbe aus der Angabe von Lufttemperatur und relativer Luftfeuchte am Standort zu berechnen.

Die Niederschlags verfügbare Wasserdampfmenge ist jahreszeitlich stark veränderlich, mit einem Minimum im Winter und einem Maximum im Sommer, sowie regional außerordentlich heterogen, d.h. groß in warm-feuchten, etwa äquatorialen, Klimaten und verschwindend klein über der Antarktis. Im globalen Durchschnitt beträgt die Niederschlags verfügbare Wasserdampfmenge bei insgesamt 12.900 km³ Wasserdampf in der Atmosphäre etwa 25 mm. In äquatorialen Klimaten ist die Niederschlags verfügbare Wasserdampfmenge wenigstens doppelt so groß.

Messergebnisse zur Niederschlags verfügbaren Wasserdampfmenge stehen aus dem NASA-Projekt NVAP – NASA Water Vapor Project zur Verfügung.^{1218,1219}

Über den Projektzeitrahmen von 1988 bis 2001 wurden darin die weltweiten Verteilungen der Niederschlags verfügbaren Wasserdampfmenge mit drei einander ergänzenden Verfahren gemessen und detailliert ausgewertet. Die Projektergebnisse sind ein international anerkannter Beitrag zum World Climate Research Programme (WCRP).¹²²⁰ Die nachfolgende Grafik (Abbildung 90) zeigt aus den Ergebnissen von NVAP exemplarisch den Zweijahresmittelwert 2000 bis 2001 der weltweiten Verteilung der Niederschlags verfügbaren Wasserdampfmenge.¹²²¹ Erkennbar ist der Zusammenhang zwischen Jahresmitteltemperatur eines Standorts und der dort vorliegenden Niederschlags verfügbaren Wasserdampfmenge: Neben der prinzipiellen Anordnung der Höchstwerte der Niederschlags verfügbaren Wasserdampfmenge in der äquatorialen Zone sind deutlich die markanten Gebiete von äußerst niedriger Niederschlags verfügbarer Wasserdampfmenge über dem tibetischen Hochland oder dem Eisschild von Grönland zu erkennen.¹²²²

¹²¹⁶ Englische Bezeichnung: Precipitable Water

¹²¹⁷ Gueymard (2004) S.245

¹²¹⁸ NVAP - NASA Water Vapor Project, Onlinepublikation von Messdaten aus dem Internet http://eosweb.larc.nasa.gov/PRODOCS/nvap/table_nvap.html (05.12.2008)

¹²¹⁹ NVAP - NASA Water Vapor Project, Generelle Projektbeschreibung, aus dem Internet http://eosweb.larc.nasa.gov/GUIDE/campaign_documents/nvap_project.html (05.12.2008)

¹²²⁰ WCRP - World Climate Research Programme, Website <http://wcrp.wmo.int/wcrp-index.html> (05.12.2008)

¹²²¹ Englische Bezeichnung: TCWV - Total Column Water Vapor Field

¹²²² Abbildung 90: entnommen aus NVAP - NASA Water Vapor Project

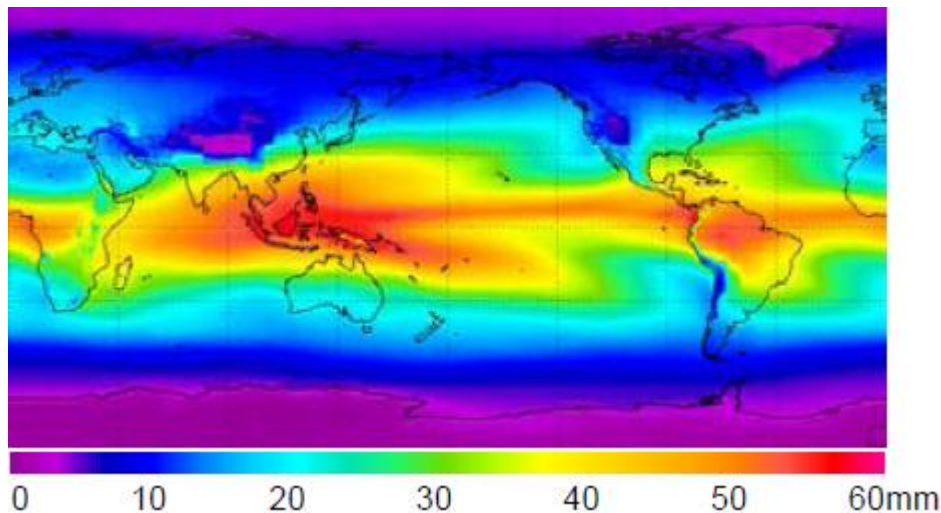


Abbildung 90: Zweijahresmittelwert der weltweiten Verteilung der Niederschlags verfügbaren Wasserdampfmenge

Für die gegenständlichen Berechnungen wird die Funktionalität des Softwarepakets SMARTS genutzt, die Niederschlags verfügbare Wasserdampfmenge aus den Angaben der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte am Standort zu berechnen. Quellenangaben für diese beiden Größen siehe voriges Kapitel Atmosphärentyp (Card 3).

15.4. Totale Ozonsäulenmenge (Card 5)

Als Eingabegröße erforderlich ist eine geeignete Angabe der Ozonmenge in der Atmosphäre, als wichtigste Ursache für Absorption im UV-Bereich und kurzwelligen sichtbaren Bereich der Sonnenstrahlung.

Von SMARTS 2 wird dazu die totale Ozonsäulenmenge¹²²³ am Standort abgefragt. Sie quantifiziert den gesamten Ozongehalt in der Atmosphäre, dargestellt als die Dicke des Ozonfilms in einer Säule gleich bleibenden Durchmessers unter der Annahme einer Temperatur von 0°C und einem Druck von 1 atm. Einheit der totalen Ozonsäulenmenge ist DU (Dobson Unit) oder mm, wobei 1 DU einer Säulenhöhe von 0,01 mm entspricht. Die real auftretende Bandbreite der totalen Ozonsäulenmenge beträgt etwa 0,2 bis 0,5 cm oder 200 bis 500 DU.¹²²⁴

¹²²³ Englische Bezeichnung: Total Column Ozone Amount oder Columnar Ozone Abundance

¹²²⁴ Handbuch der Software SMARTS - Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine, Gueymard C., 1994 bis 2005, NREL - National Renewable Energy Laboratory, U.S.A, Golden, Colorado, Seite 10, Bezugsquelle im Internet <http://www.nrel.gov/rredc/smarts/> (02.01.2009)

Für die gegenständlichen Berechnungen herangezogen werden die langjährigen, über ein 5°-Band der nördl. Breitengrade 45 bis 50 gemittelten Monatsmittelwerte der totalen Ozonsäulenmenge aus dem internationalen Forschungsprogramm der NASA „MACUV – Measurements of Atmospheric Composition in the Ultraviolet and Visible“, welches aus dem Programm „TOMS – Total Ozone Spectrometer“, ebenfalls der NASA, hervorgegangen ist.¹²²⁵

Die nachfolgende Tabelle (Tabelle 59) zeigt die genannten Monatsmittelwerte. Markiert wurden jene Werte, die als Eingabegrößen verwendet werden. Das darauf folgende Diagramm (Diagramm 145) zeigt den Jahresgang der totalen Ozonsäulenmenge aus derselben Quelle.¹²²⁶

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1996								301	300	293		324
1997	360	367	369	364	347	343	323	306	298	297	307	336
1998	372	385	396	384	370	355	330	315	303	298	315	329
1999	346	369	389	377	365	346	323	307	300	296	304	331
2000	354	374	378	368	358	338	320	305	297	297	313	349
2001	365	387	390	382	368	348	326	310	301	300	303	333
2002	343	352	376	373	369	351	327	312	300	301	318	349
2003	371	394	398	384	368	349	333	319	304	297	310	323
2004	354	375	381	376	364	347	327	318	299	290	297	318
2005	347	374	385	374	367	345	325	311	299	289	298	
<i>Mittelwert</i>	357	375	385	376	364	347	326	310	300	296	307	332

Tabelle 59: Langjähriger Jahresverlauf der zonalen Monatsmittel der totalen Ozonsäulenmenge für 45 bis 50° nördl. Breite

¹²²⁵ Website des Projekts MACUV – Measurements of Atmospheric Composition in the Ultraviolet and Visible, aus dem Internet <http://macuv.gsfc.nasa.gov> (06.12.2008)

¹²²⁶ Tabelle 59 und Diagramm 145: Peter Holzer, 2008, Daten aus NASA MACUV

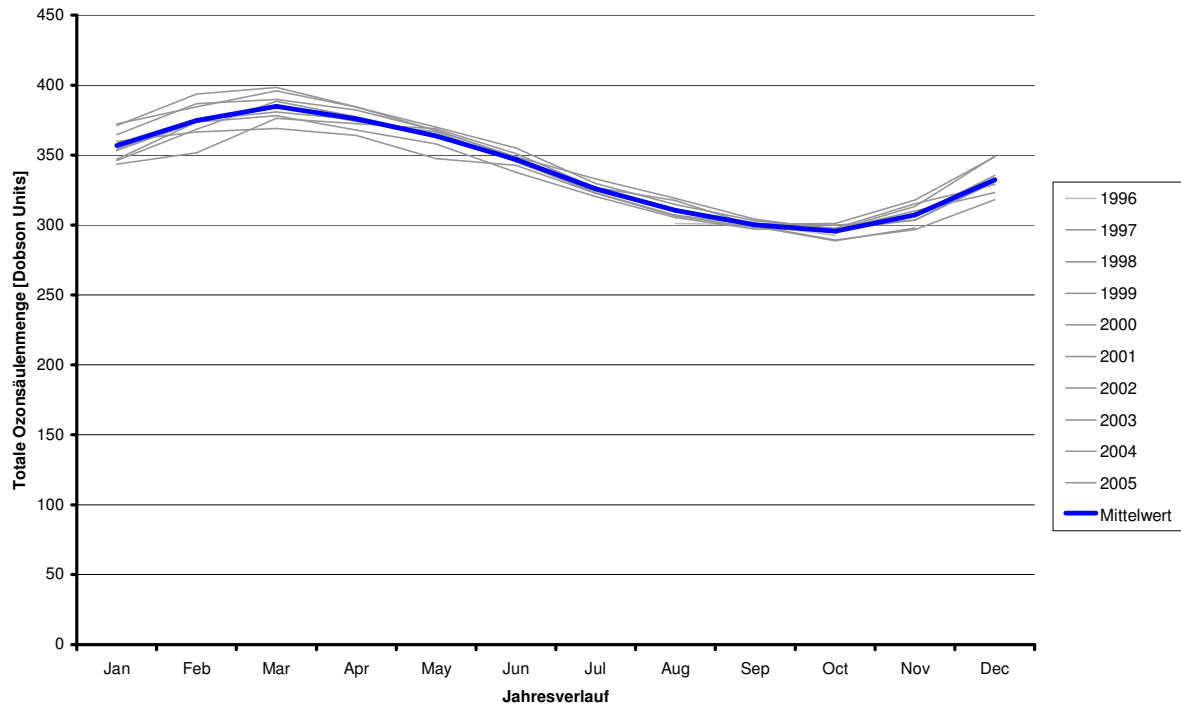


Diagramm 145: langjähriger Jahresverlauf der zonalen Monatsmittel der totalen Ozonsäulenmenge für 45 bis 50° nördl. Breite, laut NASA TOMS Earth Probe

15.5. Gasabsorption und Luftverschmutzung (Card 6)

Als Eingabe erforderlich ist eine Angabe zur Gaskonzentration in der Atmosphäre.

SMARTS 2 stellt dazu vier charakteristische Zustände der Luftverschmutzung (von unberührt bis stark verschmutzt) zur Auswahl.

Für die gegenständlichen Berechnungen wird die zweite Stufe „Light Pollution“ gewählt.

15.6. Kohlendioxid (Card 7)

Abgefragt wird als Eingangsgröße die Kohlendioxidkonzentration.

Als Quelle herangezogen wird der 4. Assessment Report des IPCC, der mit Stand 2005 einen weltweiten Mittelwert von 379 ppm publiziert hat.¹²²⁷

Für die gegenständlichen Berechnungen wird mit einer CO₂-Konzentration von 379 ppm gerechnet.

¹²²⁷ IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change, Fourth Assessment Report, Climate Change 2007: Synthesis Report, Summary for Policymakers, aus dem Internet <http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-syr.htm> (04.01.2009)

15.7. Extraterrestrial Spectrum (Card 7a)

Als extraterrestrisches solares Spektrum wird jenes nach Gueymard, 2004, verwendet, welches als Synthese aus mehreren aktuellen Quellen ermittelt wurde und in der aktuellen Version des Softwarepakets SMARTS 2 zur Anwendung empfohlen wird. Das Spektrum bildet den spektralen Bereich von 0,5 nm bis 1.000 μm ab und integriert zur Solarkonstante von 1.366,1 W/m^2 .

15.8. Aerosol Model (Card 8)

Eine Eingabe ist erforderlich zur Beschreibung der vertikalen Schichtung und der Größe der maßgeblichen Aerosole.

In SMARTS 2 werden dafür vier Modelle zur Auswahl angeboten, basierend auf den Arbeiten von Eric P. Shettle und Robert W. Fenn, die 1979 ein von der Luftfeuchte abhängiges Modell entwickelt haben, unterteilt in die Kategorien "rural", "urban", "maritime" und "tropospheric".¹²²⁸

Für die gegenständlichen Berechnungen wird die Kategorie "urban" gewählt.

15.9. Atmosphärische Trübung (Card 9)

Zusätzlich zu den Aerosolmodellen ist als Eingabegröße die optische Dicke durch Aerosole erforderlich. eSMARTS akzeptiert dazu sechs verschiedene Eingabevarianten: AOD bei 550 oder bei 550 nm, den Ångström-Koeffizienten β , den Trübungsfaktor nach Schüepp, oder auch die Sichtweite.

Für die gegenständlichen Berechnungen wird auf AOD 500, die Aerosol optische Dicke bei einer Wellenlänge von 500 nm zurückgegriffen.

Daten für diese werden bezogen aus dem Projekt AERONET Aerosol Robotic Network des NASA Goddard Space Flight Center.¹²²⁹

Zugegriffen wird konkret auf die in dem genannten Netzwerk publizierten Monatsmittelwerte der Jahre 2001, 2002 und 2007 der Messreihe an der Universität München als einer hinsichtlich des Klimas und der Luftqualität vergleichbaren mitteleuropäischen Stadt. (Data -> Climatology Tables -> Munich University) mit Werten von 0,08 im Jänner bis 0,21 im Juni.

¹²²⁸ Shettle und Fenn (1979)

¹²²⁹ Website des Projekts AERONET - Aerosol Robotic Network, NASA, Goddard Space Flight Center, aus dem Internet <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/> (03.01.2009)

Die folgende Tabelle (Tabelle 60) stellt die Aerosol Optical Depth bei 500 nm dar, gemessen am Standort Universität München, Monatsmittelwerte gemittelt aus den Jahren 2001, 2002 und 2007. Fett und blau dargestellt sind die vier Monate, für jene die Referenzauswertungen vorgenommen wurden.¹²³⁰

Monate	AOD 500
JAN	0,08
FEB	0,15
MAR	0,21
APR	0,19
MAY	0,18
JUN	0,21
JUL	0,14
AUG	0,17
SEP	0,15
OCT	0,18
NOV	0,14
DEC	0,12
YEAR	0,16

Tabelle 60: Monatsmittelwerte des AOD 500, Univ. München 2001, 2002, 2007

15.10. Neigung und Albedo (Card 10)

Erforderlich ist die Eingabe der Bodenreflexion in Form der Albedo und die Ausrichtung einer geneigten Erntefläche.

SMARTS bietet eine Anzahl von 64 gemessenen material- bzw. oberflächenspezifischen Datenreihen für die Albedo über der Wellenlänge an. Einige dieser Datenreihen sind modelliert aus der parallelen Messung der Reflexion von direkter Strahlung und Himmelsstrahlung und bilden somit auch nicht Lambert'sche Strahler ab. Darüber hinaus bietet SMARTS 2 sogar die Möglichkeit, den Local Albedo, gültig für eine Region von 10 bis 100 km², unterschiedlich vom Regional Albedo, gültig für eine Fläche von 0,1 bis 1 km², gesondert festzulegen.

Für die gegenständlichen Berechnungen wird eine fixe Albedo von 0,20 berücksichtigt. Die Erntefläche wird definiert als vertikal und südorientiert.

¹²³⁰ AERONET Climatology, Level 2.0 - Quality Assured Data, Munich_University, aus dem Internet http://aeronet.gsfc.nasa.gov/new_web/V2/climo_new/Munich_University_500.html (22.05.2008)

15.11. Solarkonstante und Sonnen-Erde-Abstandskorrektur

Erforderlich ist die Eingabe der Solarkonstante und Angaben zur Ermittlung der Sonnen-Erde Abstandskorrektur.

SMARTS 2 bietet die Möglichkeit, die Solarkonstante als Zahlenwert direkt einzugeben. Für die Sonne-Erde-Abstandskorrektur besteht im Programm die Funktionalität, diese aus der Standort-, Datums- und Uhrzeitangabe berechnen zu lassen.

Die Solarkonstante wird in Übereinstimmung mit dem gewählten extraterrestrischen Spektrum mit 1.366,1 festgelegt. Für die Ermittlung der Sonne-Erde-Abstandskorrektur wird die beschriebene Funktionalität des Programms zu deren selbständiger Berechnung genutzt.

15.12. Sonnenposition bzw. relative Luftmasse

Als Eingabegröße erforderlich ist die Sonnenposition und aus ihr abgeleitet die atmosphärische Masse.

Sonnenazimut und Sonnenhöhe wurden mit dem Software-Paket SolRad 3¹²³¹ für den geografischen Standort 48° nördlicher Breite und 15° östlicher Länge und für die wahre Ortszeit berechnet und als Zahlenwerte direkt in das Softwarepaket SMARTS 2 übertragen.¹²³²

SMARTS 2 errechnet aus diesen Angaben die optische Masse, wobei die im Hauptteil der gegenständlichen Arbeit erläuterte Näherungsformel angewandt wird, mit spezifisch unterschiedlichen Konstanten zur Berücksichtigung der unterschiedlichen vertikalen Schichtungen der einzelnen absorbierenden oder streuenden Atmosphärenbestandteile.

In Übereinstimmung mit der Definition der Referenzzeitpunkte werden die Untersuchungen für jeweils den 15. März, Juni, September und Dezember, um jeweils 12:00 wahrer mittlerer Ortszeit durchgeführt.

Ergänzende Untersuchungen werden, speziell zur Beurteilung der Melatonin Suppression, ebenfalls für jeweils den 15. März, Juni, September und Dezember, um 07:00 und 17:00 durchgeführt.

Die geografische Position des Standorts Wien wird angenähert mit 48° nördlicher Breite und 15° östlicher Länge festgelegt.

¹²³¹ SolRad 3, Version 3.1.155, Softwarepaket zur Berechnung der Bestrahlungsrichtung und -stärke auf beliebigen Standorten auf orientierte Flächen

¹²³² Die Abweichung insbesondere des Längengrades von der tatsächlichen Position 16° wurde gewählt, um in der Anwendung mehrerer unterschiedlicher Softwarepakete Schwierigkeiten und Rechenfehler aufgrund des Unterschieds zwischen wahrer und scheinbarer Ortszeit von vornherein auszuschließen.

15.13. Trübungsfaktor nach Linke, Diffusstrahlungsfaktor nach Reitz

Der Trübungsfaktor nach Linke und der Diffusstrahlungsfaktor nach Reitz werden aus den Berechnungsergebnissen aus SMARTS 2 unter Anwendung des Formelsatzes nach Heindl und Koch, 1976 berechnet.^{1233,1234} Es gilt (Formel 43):

$$I_1 = I_0 \cdot \exp(-T_L \cdot \tau_C \cdot m)$$

mit I_1 : Intensität der transmittierten Strahlung

mit I_0 : Intensität der einfallenden Strahlung

mit m : Atmosphärische Masse

mit τ_C : optische Dicke der Referenzatmosphäre bei vertikalem Strahlungseinfall

mit T_L : Trübungsfaktor nach Linke

Formel 43: Lambert-Beer'sches Gesetz, Schreibweise mit Linke-Faktor

τ_C ist abhängig von der durchstrahlten Luftmasse m und lässt sich nach der Formel von F. Kasten¹²³⁵ (Formel 44) parametrisiert berechnen zu:

$$\tau_C = (6,6296 + 1,7513m - 0,1202m^2 + 0,0065m^3 - 0,00013m^4)^{-1}$$

Formel 44: Optische Dicke der Referenzatmosphäre bei vertikalem Strahlungseinfall

15.14. Ergebnisdarstellung

Als Eingabe erforderlich ist die Definition des Auswertungsbereichs und der Auflösung hinsichtlich der Wellenlänge.

SMARTS 2 bietet als maximalen Auswertungsbereich jenen von 280 bis 4.000 nm und als maximale Auflösung eine von 1 nm bis zu einer Wellenlänge von 1.700 nm und eine von 5 nm bei darüber liegenden Wellenlängen.

In der gegenständlichen Arbeit wird hinsichtlich des ausgewerteten Bereichs der Wellenlänge das programmtechnische Maximum von 280 bis 4.000 nm genutzt und wird als Auflösung jene von 5 nm gleichbleibend über den gesamten Bereich der Wellenlänge gewählt.

¹²³³ Heindl (1976)

¹²³⁴ Linke (1922)

¹²³⁵ Kasten (1996)

15.15. Zusammenfassung der Eingabedaten der Referenzpunkte

Die folgende Tabelle (Tabelle 61) fasst die vorab beschriebenen Eingabedaten zu den Referenzzeitpunkten 12:00 zusammen. Für die speziellen Berechnungen zu den Referenzzeitpunkten 07:00 und 17:00 wurden die Parameter des Atmosphärenzustands des jeweiligen Referenzzeitpunkts 12:00 beibehalten. Variiert wurde nur die Sonnengeometrie.

Eingabegröße	März	Juni	Sept	Dez
Luftdruck [°C]	992	992	992	992
Seehöhe [m]	202	202	202	202
Lufttemperatur [°C]	10,0	24,3	21,7	2,7
Relative Luftfeuchte [%rF]	55	45	50	70
Tagesmittel der Lufttemp. [°C]	4,3	17,0	14,5	0,3
Saison [Kategorie]	Sommer	Sommer	Winter	Winter
Totale Ozonsäulenmenge [cm]	0,385	0,347	0,300	0,332
Verschmutzung [Kategorie]	Light Pollution	Light Pollution	Light Pollution	Light Pollution
Kohlendioxidkonzentration [ppm]	379	379	379	379
Extraterrestrisches Spektrum [Typ]	Gueymard 2004	Gueymard 2004	Gueymard 2004	Gueymard 2004
Aerosol Model [Typ]	Urban	Urban	Urban	Urban
Trübung durch Aerosole [AOD 500 nm]	0,21	0,21	0,15	0,12
Albedo [1/1]	0,20	0,20	0,20	0,20
Azimut 07:00	103° east	84° east	99° east	--
Azimut 12:00	180° south	180° south	180° south	180° south
Azimut 17:00	257° west	276° west	261° west	--
Tilt	90° vertical	90° vertical	90° vertical	90° vertical
Wellenlängenbereich [nm]	280 - 4.000	280 - 4.000	280 - 4.000	280 - 4.000
Solarkonstante [W/m ²]	1.366,1	1.366,1	1.366,1	1.366,1

Tabelle 61: Eingabedaten zur Berechnung der terrestrischen Sonnenstrahlung zu den Referenzzeitpunkten

Die folgende Tabelle (Tabelle 62) fasst die mit SolRad berechneten Eingabedaten der Sonnengeometrie zusammen:

Eingabedaten der Sonnengeometrie
 Standort 48° Nord, 15° Ost
 wahre mittlere Ortszeit
 Daten aus SolRad3, Version 3.1.155

	15.Mär	15.Jun	15.Sep	15.Dez
07:00				
Azimut [°, im UZS, von O° Nord]	102,8	84,3	99,1	--
Sonnenhöhe [°, gegen Horizont]	8,3	27	12,5	--
12:00				
Azimut [°, im UZS, von O° Nord]	180	180	180	180
Sonnenhöhe [°, gegen Horizont]	39,6	65,3	45,2	18,8
17:00				
Azimut [°, im UZS, von O° Nord]	257,2	275,7	260,9	--
Sonnenhöhe [°, gegen Horizont]	8,3	27	12,5	--

Tabelle 62: Sonnengeometrische Eingabedaten der Referenzzeitpunkte

16. Berechnung des mindest erforderlichen Wärmeschutzes

16.1. Inhalt

Im Kapitel 8.3 wird der mindest erforderliche Wärmeschutz der Bauteile des Basismodells bzw. der übergeordneten Raumstruktur festgeschrieben. Rahmenbedingungen dieser Festschreibung sind die Bestimmungen der ÖNORM B 8110-6 und der Wiener Bauordnung.^{1236,1237} In beiden Regelwerken werden mindest erforderliche Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) definiert und werden darüber hinaus auch Anforderungen über ergebnisbezogene Energiekennzahlen definiert: In der ÖNORM B 8110-6 sind Mindestanforderungen für den Heizwärmebedarf am Referenzstandort angegeben. Die Wiener Bauordnung formuliert Mindestanforderungen für den spezifischen, Volumens bezogenen Transmissions-Wärmeverlust. Beide Anforderungen sind im Kapitel 8.3 detailliert erläutert.

Im gegenständlichen Anhang werden die Berechnungen des spezifischen Transmissions-Wärmeverlusts und des Heizwärmebedarfs der übergeordneten Raumstruktur vorgenommen. Die Berechnungsergebnisse werden in Bezug gesetzt zu den Anforderungen der ÖNORM B 8110-6 und der Wiener Bauordnung und daraus der mindest erforderliche Wärmeschutz der Bauteile der Basismodelle abgeleitet.

16.2. Methodik

Für die in Kapitel 8.3 geometrisch definierten Basismodelle bzw. übergeordneten Raumstrukturen wird der Wärmeschutz der Außenbauteile zunächst im mindest erforderlichen Niveau, unter Anwendung der U-Wert-Listen der ÖNORM B 8110-6 und der Wiener Bauordnung festgeschrieben.

Für die solcherart definierten übergeordneten Raumstrukturen werden die beiden Kennzahlen des spezifischen Transmissions-Wärmeverlusts und des Heizwärmebedarfs errechnet und mit den diesbezüglichen Anforderungen verglichen.

Gegebenenfalls wird der Wärmeschutzstandard der Bauteile angehoben, wobei das Optimierungsziel im Sinne des erläuterten konstruktivistischen Ansatzes darauf beschränkt bleibt, jede der Anforderungen gerade noch zu erfüllen.

Aus dieser Herangehensweise ergeben sich die Festlegungen der Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) der Außenbauteile der übergeordneten Raumstruktur.

¹²³⁶ Bauordnung für Wien, 2007,
<http://www.wien.gv.at/recht/landesrecht-wien/rechtsvorschriften/html/b0200000.htm>
(04.08.2007)

¹²³⁷ ÖNORM B 8110-1 (2007)

Mit der Verkürzung der Basismodelle in Kapitel 8.4 verändert sich auch die Geometrie der übergeordneten Raumstruktur und verändern sich sowohl die Anforderungen als auch die beiden Kennzahlen des spezifischen Transmissions-Wärmeverlusts und des Heizwärmebedarfs. Die genannten Berechnungen und Optimierungen werden daher in einem vollständigen zweiten Berechnungsdurchgang auf diese veränderten übergeordneten Raumstrukturen angewandt. Es ergeben sich neuerlich die Festlegungen der Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) der Außenbauteile der übergeordneten Raumstruktur, die schließlich der detaillierten Untersuchung des Basismodells in Kapitel 8.5 zugrunde gelegt werden.

16.2.1. Definition des spezifischen Transmissions-Wärmeverlusts

Der spezifische Transmissions-Wärmeverlust ist in der ÖNORM B 8110-6 sowie präzisierend in der Richtlinie der MA 25 für die Berechnung von Energiekennzahlen als das Verhältnis von Transmissions-Leitwert der thermisch relevanten Gebäudehülle und beheiztem Bruttovolumen definiert. In beiden Regelwerken wird allerdings in Abweichung von der Wiener Bauordnung der Begriff „Volumen bezogener Transmissions-Leitwert“ verwendet.^{1238,1239} Der spezifische, Volumen bezogene Transmissions-Leitwert wird mit dem Formelzeichen $L_{T,V}$ bezeichnet und in der Einheit $W/(m^3K)$ angegeben.

Die folgend dokumentierten Grundlagen zur Berechnung des Volumen bezogenen Transmissions-Leitwerts (Formel 45) werden der ÖNORM B 8110-6, Kap. 5.1, S. 9 entnommen:

$L_T = L_e + L_u + L_g + L_\psi + L_\chi$	(2)
Es bedeutet:	
L_T	Transmissions-Leitwert eines Gebäudes, in W/K
L_e	thermischer Leitwert für alle Bauteile, die den konditionierten Innenraum und die Außenluft thermisch verbinden, in W/K
L_u	thermischer Leitwert für Bauteile, die den konditionierten Innenraum über unkonditionierte Räume mit der Außenluft verbinden, in W/K
L_g	thermischer Leitwert für Bauteile, die den konditionierten Innenraum über den Boden mit dem Außenraum thermisch verbinden, in W/K
L_ψ	Leitwertzuschlag für zweidimensionale Wärmebrücken, in W/K
L_χ	Leitwertzuschlag für dreidimensionale Wärmebrücken, in W/K

Formel 45: Transmissions-Leitwert eines Gebäudes nach ÖNORM B 8110-6

¹²³⁸ ÖNORM B 8110-6 (2007)

¹²³⁹ Richtlinie der MA 25 für die Berechnung von Energiekennzahlen, Ausgabe 1. Jänner 2007, aus dem Internet <http://www.wien.gv.at> (21.06.2007)

Im Einklang mit der Richtlinie der MA 25 für die Berechnung von Energiekennzahlen, Kap. 5.2 und 5.3, S. 12 wird die vereinfachte Berechnung mit Temperaturkorrekturfaktoren (Formel 46) gemäß ÖNORM B 8110-6, Kap. 5.3, S. 20 angewandt:

$$L_T = \begin{cases} \sum_i f_{i,h} \cdot A_i \cdot U_i + L_\psi + L_\chi & \text{im Heizfall} \\ \sum_i f_{i,c} \cdot A_i \cdot U_i + L_\psi + L_\chi & \text{im Kühlfall} \end{cases} \quad (19)$$

Es bedeutet:

L_T	Transmissions-Leitwert, in W/K
$f_{i,h}$	Temperaturkorrekturfaktoren der Bauteile gemäß Tabellen 8, Tabelle 9 und Tabelle 10 im Heizfall
$f_{i,c}$	Temperaturkorrekturfaktoren der Bauteile gemäß Tabellen 8, Tabelle 9 und Tabelle 10 im Kühlfall
A_i	Fläche des Bauteils i der Gebäudehülle, in m^2
U_i	Wärmedurchgangskoeffizient des Bauteils i , in $W/(m^2 \cdot K)$
L_ψ	Leitwertzuschlag für zweidimensionale Wärmebrücken, in W/K
L_χ	Leitwertzuschlag für dreidimensionale Wärmebrücken, in W/K

Formel 46: Transmissions-Leitwert eines Gebäudes mit Temperaturkorrekturfaktoren nach ÖNORM B 8110-6

Und es wird gemäß Richtlinie der MA 25, Kap 5.2 und 5.3, S 12 die pauschale Berücksichtigung von Wärmebrücken (Formel 47) angewandt.

b) Entsprechend dem vereinfachten Ansatz

$$L_\psi + L_\chi = 0,2 \times \left(0,75 - \frac{L_e + L_u + L_g}{A_B} \right) \times (L_e + L_u + L_g) \geq 0 \dots \text{ in W/K}$$

Formel 47: Pauschale Berücksichtigung von Wärmebrücken

16.2.2. Definition des Heizwärmebedarfs

Der Heizwärmebedarf ist definiert in der ÖNORM B 8110-6 als „rechnerisch ermittelte Wärmemenge (Nutzenergie), die zur Aufrechterhaltung einer vorgegebenen Innentemperatur benötigt wird“¹²⁴⁰. Der Heizwärmebedarf wird mit dem Formelzeichen HWB bezeichnet und in der Einheit kWh/m² angegeben. Als Bezugsfläche ist die beheizte Bruttogrundfläche heranzuziehen, wobei sich im gegenwärtigen Modell, unter der konstruktivistischen Annahme verschwindender Wandstärken, die Abgrenzung der Bruttogrundfläche von der Nettofläche erübrigt.

¹²⁴⁰ ÖNORM B 8110-6 (2007)

Die Berechnung des Heizwärmebedarfs ist zentraler Gegenstand der ÖNORM B 8110-6 und wird dort detailliert beschrieben.

Für die gegenständlichen Berechnungen wird die in der genannten Norm festgeschriebene Option des Quasi-stationären Monats-Bilanzverfahren angewandt. In dem dort festgeschriebenen Berechnungsverfahren werden die Wärmeverluste aus Transmission und Lüftung gegen die Wärmegewinne aus inneren Lasten und solaren Einträgen bilanziert. Als deren Differenz innerhalb der Heizperiode wird der Heizwärmebedarf errechnet.

Das Standortklima wird mit den Monatsmitteln der Außentemperatur und den Monatssummen der Globalstrahlung berücksichtigt. Die Transmissions-Wärmeverluste werden aus den Leitwerten der Hüllbauteile, mit einer Reihe von Näherungsverfahren zur Berücksichtigung von etwa dem Wärmefluss gegen Erdreich, unbeheizte Gebäudeteile oder Wärmefluss an Wärmebrücken berechnet. Standardisierte Nutzungsannahmen liegen der Berechnung der Lüftungswärmeverluste und der inneren Gewinne und schließlich auch der Festlegung der Innentemperatur zugrunde.

16.2.3. Wahl des Berechnungswerkzeugs

Zur Berechnung des Heizwärmebedarfs wurde, ebenso wie für den spezifischen Transmissions-Wärmeverlust, das Excel-Tool des Österreichischen Instituts für Bautechnik (OIB) zur Berechnung von Energiekennzahlen in seiner Version hwb02h verwendet.¹²⁴¹

16.2.4. Definition der Anforderungen

16.2.4.1. Anforderungen an den spezifischen Transmissions-Wärmeverlust

Die Anforderungen für den spezifischen Transmissions-Wärmeverlust sind in der Wiener Bauordnung in Abhängigkeit von einer Anforderungsklasse festgeschrieben, die ihrerseits wiederum durch das beheizte Gebäudevolumen bestimmt wird. Es gelten laut Wiener Bauordnung, 10. Abschnitt: „Vorschriften, die hauptsächlich die Konstruktion betreffen“, Unterabschnitt „Baulicher Wärmeschutz“ für Neubauten mit Wohnnutzung, folgende höchstzulässige Werte des spezifischen Transmissions-Wärmeverlustes:

"§ 97a. (1) Neubauten mit Wohnungen oder sonstigen Aufenthaltsräumen müssen einen baulichen Wärmeschutz aufweisen, der der festgelegten höchstzulässigen energetischen Kennzahl „spezifischer Transmissions-Wärmeverlust“ entspricht; bei Zubauten, Umbauten und baulichen Änderungen genügt die Einhaltung des Abs. 6.

(2) Der spezifische Transmissions-Wärmeverlust $W/(m^3K)$ ist der rechnerische Wärmeleistungsbedarf in Watt je Kubikmeter des beheizten Volumens und je Kelvin Temperaturdifferenz zwischen der Außentemperatur und der Raumtemperatur.

¹²⁴¹ OIB, Tabellenkalkulationsprogramm für die Berechnung von Energiekennzahlen, Version hwb02h, aus dem Internet <http://www.wien.gv.at/ma25/download.htm#w1> (03.08.2008)

(3) Mit den Anforderungsklassen wird der unterschiedlichen Begrenzung der Anforderungen nach dem beheizten Volumen Rechnung getragen. Das beheizte Volumen V_B in m^3 ist die Summe der Brutto-Rauminhalte aller beheizten Räume des Gebäudes. Beheizte Räume sind alle Räume von Wohnungen sowie sonstige Aufenthaltsräume. Verkaufsräume, Gaststätten und Räume mit ähnlicher Funktion müssen in die Summe der Brutto-Rauminhalte aller beheizten Räume des Gebäudes nicht eingerechnet werden.

(4) Es gibt folgende Anforderungsklassen: A: beheiztes Volumen $\leq 500 m^3$;
B: beheiztes Volumen $\leq 1.000 m^3$; C: beheiztes Volumen $\leq 1.500 m^3$;
D: beheiztes Volumen $\leq 2.200 m^3$; E: beheiztes Volumen $\leq 3.000 m^3$;
F: beheiztes Volumen $\leq 4.500 m^3$; G: beheiztes Volumen $\leq 6.000 m^3$;
H: beheiztes Volumen $\leq 8.000 m^3$; I: beheiztes Volumen $> 8.000 m^3$.

(5) Der spezifische Transmissions-Wärmeverlust darf bei Gebäuden der Anforderungsklasse A den Wert von $0,36 W/(m^3K)$, B den Wert von $0,34 W/(m^3K)$, C den Wert von $0,32 W/(m^3K)$, D den Wert von $0,30 W/(m^3K)$, E den Wert von $0,28 W/(m^3K)$, F den Wert von $0,26 W/(m^3K)$, G den Wert von $0,24 W/(m^3K)$, H den Wert von $0,22 W/(m^3K)$ und I den Wert von $0,20 W/(m^3K)$ nicht überschreiten. Zwischenwerte sind durch lineare Interpolation einzuschalten.

(...)

(7) Bei Glasvorbauten darf bei der Ermittlung des spezifischen Transmissions-Wärmeverlustes der Wärmedurchgangskoeffizient der angrenzenden Bauteile des Gebäudes mit seinem halben Wert in Rechnung gestellt werden. Glasvorbauten (wie Wintergärten und Innenhöfe mit Glasüberdachung) sind geschlossene, nicht unmittelbar beheizte Räume unter konstruktiver Durchbildung nach den Erfahrungen der technischen Wissenschaften¹²⁴².

Die übergeordneten Raumstrukturen in ihrer ursprünglichen, unverkürzten Version, sind in beiden Ausformungen (GGG und GWG) der Anforderungsklasse I zuzuordnen und müssen somit den maximalen spezifischen Transmissions-Wärmeverlust von $0,20 W/(m^3K)$ einhalten.

16.2.4.2. Anforderungen an den Heizwärmebedarf

Die Anforderungen an den Heizwärmebedarf sind in der ÖNORM B 8110-1, Kapitel 7.2.1, festgeschrieben. Demnach darf für Wohngebäude, Neubau am Referenzstandort jener Wert des HWB nicht überschritten werden, der sich aus unten stehender Formel (Formel 48) ergibt.

$$HWB_{BGF,WG,Ref} = 26 \times (1+2/l_c)$$

$$\text{mit } HWB_{BGF,WG,Ref,max} = 78,0 \text{ kWh}/(m^2a)$$

mit HWB ... Anforderung HWB am Referenzstandort, Wohngebäude, Neubau
[kWh/m²]

l_c ... charakteristische Länge [m]

¹²⁴² Bauordnung für Wien, 2007,
<http://www.wien.gv.at/recht/landesrecht-wien/rechtsvorschriften/html/b0200000.htm>
(04.08.2007)

Die übergeordneten Raumstrukturen in ihrer ursprünglichen, unverkürzten Version, weisen in der Ausformung GGG eine charakteristische Länge von 5,70 m und in der Ausformung GWG eine von 3,94 m auf. Demnach ist für die Ausformung GGG ein Grenzwert des HWB von 35,1 kWh/(m²a) einzuhalten und für die Ausformung GWG ein solcher von 39,2 kWh/(m²a).

16.2.5. Anforderungen an die Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte)

In Anwendung der Wiener Bauordnung haben die Bauteile der übergeordneten Raumstruktur folgende Obergrenzen einzuhalten.

Wand direkt gegen außen	U = 0,50 W/(m ² K)
Trennwand gegen Laubengang	U = 0,90 W/(m ² K)
Fenster gegen außen sowie gegen Laubengang ¹²⁴³	U = 1,9 W/(m ² K)

In Anwendung der ÖNORM B 8110-1 haben die Bauteile der übergeordneten Raumstruktur folgende Obergrenzen einzuhalten.

Wände gegen Außenluft	U = 0,35 W/(m ² K)
Innendecken gegen unbeheizte Gebäudeteile	U = 0,40 W/(m ² K)
Wände gegen unbeheizte, frostfrei zu haltende Gebäudeteile	U = 0,60 W/(m ² K)
Fenster gegen (...) unbeheizte Gebäudeteile	U = 2,50 W/(m ² K)
Fenster (...) in Wohngebäuden gegen Außenluft	U = 1,40 W/(m ² K)

Nachdem bei einem geschlossenen Laubengang normalerweise Frostfreiheit nicht vorliegt, sind die Bestimmungen für Bauteile gegen Außenluft anzuwenden, ist also für die Wand gegen den Laubengang der U-Wert von 0,35 W/(m²K) einzuhalten und für Fenster gegen den Laubengang ein U-Wert von 1,4 W/(m²K).

Für die Verglasung vom Laubengang gegen außen ist in der ÖNORM B 8110-1 keine Anforderung festgeschrieben.

¹²⁴³ Eine diesbezügliche Anfrage bei Dr. Irmgard Eder, MA37, vom 15.08.07 zeigte Interpretationsspielraum auf hinsichtlich der Frage, ob von allen Elementen in Trennwänden, mit Ausnahme von Wohnungseingangstüren, der U-Wert von 0,9 W/(m²K) einzuhalten sei. Diese Interpretation würde nach sich ziehen, dass Fenster gegen einen Laubengang ebenfalls U = 0,9 W/(m²K) unterschreiten müssten, also einen höheren Wärmeschutz als Fenster gegen außen aufweisen müssten. Nachdem das ein Paradoxon darstellen würde und nachdem diese Interpretation aus der Bauordnung nicht abzulesen ist, wurde auch gegen den Laubengang an der Mindestanforderung für Fenster von U = 1,9 W/(m²K) festgehalten.

Es ergeben sich demnach die folgenden in der Tabelle (Tabelle 63) zusammengefassten mindest erforderlichen U-Werte.

	GGG_B460_T2850	GGG_B230_T2850	GWG_B460_T1350	GWG_B230_T1350
Wand geg. Außen	0,35 W/(m ² K)	0,35 W/(m ² K)	0,35 W/(m ² K)	0,35 W/(m ² K)
Wand geg. Laubengang	0,35 W/(m ² K)	0,35 W/(m ² K)	0,35 W/(m ² K)	0,35 W/(m ² K)
Decke geg. Keller	0,40 W/(m ² K)	0,40 W/(m ² K)	0,40 W/(m ² K)	0,40 W/(m ² K)
Dach	0,20 W/(m ² K)	0,20 W/(m ² K)	0,20 W/(m ² K)	0,20 W/(m ² K)
Fenster geg. Außen	1,40 W/(m ² K)	1,40 W/(m ² K)	1,40 W/(m ² K)	1,40 W/(m ² K)
Fenster geg. Laubeng.	1,40 W/(m ² K)	1,40 W/(m ² K)	1,40 W/(m ² K)	1,40 W/(m ² K)

Tabelle 63: Mindest erforderliche U-Werte der übergeordneten Raumstrukturen

16.2.6. Eingabeparameter der Berechnung

Nachfolgend sind zentrale Eingabeparameter der Berechnung dargestellt. Nicht genannte Parameter werden im Einklang mit den bereits mehrfach genannten Regelwerken gewählt.^{1244,1245}

16.2.6.1. Geometrie

In Kapitel 8.3 wurden die Geometrien der Basismodelle und der übergeordneten Raumstrukturen festgelegt. Die Ergebnisse dieser Festlegung sind nachfolgend zusammengefasst:

Parallel angeführt werden stets die beiden Ausformungen: GGG (Glas-Glas-Glas), mit beidseitiger Vollverglasung der Wohnung, demnach auch gegen den Laubengang, sowie GWG (Glas-Wand-Glas), mit opaker Begrenzungswand der Wohnung gegen den Laubengang.

Und parallel angeführt (Tabelle 64) werden stets die beiden Wohnungsbreiten, also B460 und B230, womit sich stets vier Varianten der Basismodelle und daraus abgeleitet auch Varianten der übergeordneten Raumstruktur (Tabelle 65) ergeben.

	GGG_B460_T2850	GGG_B230_T2850	GWG_B460_T1350	GWG_B230_T1350
Tiefe	29,7 m	29,7 m	14,7m	14,7m
Teiltiefe Wohnung	28,5 m	28,5 m	13,5m	13,5m
Teiltiefe Laubengang	1,2 m	1,2 m	1,2 m	1,2 m
Breite	4,6 m	78,2 m	78,2m	78,2m
Höhe	2,5 m	2,5 m	2,5 m	2,5 m

Tabelle 64: Geometrie der Basismodelle

¹²⁴⁴ ÖNORM B 8110-6 (2007)

¹²⁴⁵ Richtlinie der MA 25 für die Berechnung von Energiekennzahlen, Ausgabe 1. Jänner 2007, aus dem Internet <http://www.wien.gv.at> (21.06.2007)

	GGG_B460_T2850	GGG_B230_T2850	GWG_B460_T1350	GWG_B230_T1350
Tiefe	29,7 m	29,7 m	14,7m	14,7m
Teiltiefe Wohnung	28,5 m	28,5 m	13,5m	13,5m
Teiltiefe Laubengang	1,2 m	1,2 m	1,2 m	1,2 m
Breite	78,2 m	78,2 m	78,2m	78,2m
Höhe	25 m	25 m	25m	25m
Beheiztes Volumen	55.718 m ³	55.718 m ³	26.393m ³	26.393m ³
Fläche der Gebäudehülle	9.792 m ²	9.792 m ²	6.696m ²	6.696m ²
Charakteristische Länge	5,70 m	5,70 m	3,94m	3,94m
beheizte Bruttogrundfläche	22.287 m ²	22.287 m ²	10.557 m ²	10.557 m ²

Tabelle 65: Geometrie der übergeordneten Raumstrukturen

16.2.6.2. Temperaturkorrekturfaktoren

Es sind die Temperaturkorrekturfaktoren zur vereinfachten Berechnung des Transmissions-Leitwerts (Tabelle 66) gegen unbeheizte Gebäudeteile sowie von erdberührten Bauteilen festzulegen. Diesbezügliche Quelle sind die OENORM B 8110-6, Kap 5.3.1, S 21-22 und die Richtlinie der MA 25 für die Berechnung von Energiekennzahlen, Kap 11, S 20.

Die Werte der OENORM B 8110-6:

Bauteile, die an unkonditionierte Räume grenzen	$f_{i,h}$	$f_{i,c}$
Wand zu unkonditioniertem geschlossenen Dachraum	0,90	0,00
Decke zu unkonditioniertem geschlossenen Dachraum	0,90	0,00
Wand zu geschlossener Tiefgarage	0,80	0,80
Decke zu geschlossener Tiefgarage	0,80	0,80
Wand zu unkonditioniertem Wintergarten mit folgender Außenverglasung des Wintergartens		
– Einfachverglasung $U > 2,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	0,80	0,00
– Isolierglas $U \leq 2,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	0,70	0,00
– Wärmeschutzglas $U \leq 1,6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	0,60	0,00

Bauteile, die an unkonditionierte Räume grenzen	$f_{i,h}$	$f_{i,c}$
Wand zu unkonditioniertem ungedämmten Keller	0,70	0,70
Decke zu unkonditioniertem ungedämmten Keller	0,70	0,70
Wand zu unkonditioniertem gedämmten Keller ^a	0,50	0,50
Decke zu unkonditioniertem gedämmten Keller ^a	0,50	0,50
Wand zu unkonditioniertem außenluftexponierten Stiegenhaus	0,70	0,70
Wand zu Innenhof mit Glasüberdachung (Atrium)	0,70	0,00
Wand zu sonstigem Pufferraum	0,70	0,70
Decke zu sonstigem Pufferraum		
– nach oben	0,70	0,70
– nach unten	0,70	0,70

^a Als gedämmt gilt ein Keller, dessen Wände und Fußböden einen U -Wert von $0,35 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ unterschreiten.

Bodenberührte Bauteile	$f_{i,h}$	$f_{i,c}$
erdanliegende Wand ($\leq 1,5$ m unter Erdoberfläche)	0,80	0,80
erdanliegender Fußboden ($\leq 1,5$ m unter Erdoberfläche)	0,70	0,70
erdanliegende Wand ($>1,5$ m unter Erdoberfläche)	0,60	0,60
erdanliegender Fußboden ($>1,5$ m unter Erdoberfläche)	0,50	0,50

Tabelle 66: Temperaturkorrekturfaktoren zur vereinfachten Berechnung des Transmissionsleitwertes nach OENORM B 8110-6

Die Werte der Richtlinie der MA 25 (Tabelle 67):

Tab. 1: Wärmeübergangswiderstände und Temperaturkorrekturfaktoren von Bauteilen

Wärmestrom nach außen über	Wärmeübergangswiderstand in $m^2 \cdot K/W$			Temperaturkorrekturfaktor f_i
	R_{sl}	R_{se}	$R_{sl} + R_{se}$	
Bauteile, die an Außenluft grenzen				
Außenwand				
nicht hinterlüftet	0,13	0,04	0,17	1,0
hinterlüftet	0,13	0,13	0,26	1,0
Außendecke				
nach oben:				
nicht hinterlüftet	0,10	0,04	0,14	1,0
hinterlüftet	0,10	0,10	0,20	1,0
nach unten:				
nicht hinterlüftet	0,17	0,04	0,21	1,0
hinterlüftet	0,17	0,17	0,34	1,0
Dachschräge				
nicht hinterlüftet	0,10	0,04	0,14	1,0
hinterlüftet	0,10	0,10	0,20	1,0
Bauteile, die an unbeheizte Räume grenzen				
Wand zu unbeheiztem Dachraum	0,13	0,13	0,26	0,9
Decke zu unbeheiztem Dachraum	0,10	0,10	0,20	0,9
Wand zu Tiefgarage	0,13	0,13	0,26	0,8
Decke zu Tiefgarage	0,17	0,17	0,34	0,8
Wand zu unbeheiztem Wintergarten mit folgender Außenverglasung des Wintergartens:	0,13	0,13	0,26	
Einfachverglasung $U > 2,5 \text{ W}/(m^2 \cdot K)$				0,7
Isolierglas $U \leq 2,5 \text{ W}/(m^2 \cdot K)$				0,6
Wärmeschutzglas $U \leq 1,6 \text{ W}/(m^2 \cdot K)$				0,5
Wand zu unbeheiztem Keller	0,13	0,13	0,26	0,5
Decke zu unbeheiztem Keller	0,17	0,17	0,34	0,5
Wand zu unbeheiztem, außenluftexponiertem Stiegenhaus	0,13	0,13	0,26	0,5
Wand zu Innenhof mit Glasüberdachung (Atrium)	0,13	0,13	0,26	0,5
Wand zu sonstigem Pufferraum	0,13	0,13	0,26	0,5
Decke zu sonstigem Pufferraum				
nach oben	0,10	0,10	0,20	0,5
nach unten	0,17	0,17	0,34	0,5
Bodenberührte Bauteile				
erdanliegende Wand	0,13	-	0,13	0,6
erdanliegender Fußboden	0,17	-	0,17	0,5

Tabelle 67: Temperaturkorrekturfaktoren zur vereinfachten Berechnung des Transmissionsleitwertes nach den Richtwerten der MA 25

Die Wiener Bauordnung legt darüber hinaus fest:

„Bei Glasvorbauten darf bei der Ermittlung des spezifischen Transmissions-Wärmeverlustes der Wärmedurchgangskoeffizient der angrenzenden Bauteile des Gebäudes mit seinem halben Wert in Rechnung gestellt werden. Glasvorbauten (wie Wintergärten und Innenhöfe mit Glasüberdachung) sind geschlossene, nicht unmittelbar beheizte Räume unter konstruktiver Durchbildung nach den Erfahrungen der technischen Wissenschaften¹²⁴⁶.“

Hier präzisiert die Wiener Bauordnung die, in der im Kapitel 11, Tabelle 1, der Temperaturkorrekturfaktor für eine Wand zu unbeheiztem Wintergarten gestaffelt nach der Verglasung des Wintergartens mit 0,5 bis 0,7W/(m²K) angegeben wird.

Es werden demnach folgende Temperaturkorrekturfaktoren (Tabelle 68) gegen unbeheizte Nachbarräume verwendet:

Kellerdecke	0,5
Fenster gegen Laubengang	0,5
Wand gegen Laubengang	0,5

Tabelle 68: Temperaturkorrekturfaktoren gegen unbeheizte Nachbarräume

16.2.6.3. Strahlungstransmissionsgrade der Fenster

In den HWB gehen die solaren Wärmegewinne ein, weshalb der Strahlungstransmissionsgrad der Gläser festzulegen ist.

Für die Verglasung der Wohnung gegen außen und gegen den Laubengang werden aus dem Fenster U-Wert von $U_w = 1,4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ gemäß Anforderung der ÖNORM B 8110-1 folgende strahlungstechnische Kennwerte abgeleitet:

$g = 0,62$ abgeleitet aus Produktdaten und Modellrechnungen

$T_L = 0,80$ abgeleitet aus Produktdaten und Modellrechnungen

Für die Verglasung des Laubengangs gegen außen besteht keine wärmeschutztechnische Anforderung. Es wurde daher unter Abbildung der Baupraxis von einer Zweischeiben-Verbundsicherheitsverglasung ausgegangen. Wärmebrückeneffekte treten angesichts des hohen Glas U-Wertes in den Hintergrund und werden daher vernachlässigt.

$U_w = 5,6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ bei Annahme eines Zweischeiben-Verbundsicherheitsglases

$U_g = 5,6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

$g = 0,84$ abgeleitet aus Produktdaten und Modellrechnungen

$T_L = 0,90$ abgeleitet aus Produktdaten und Modellrechnungen

¹²⁴⁶ Bauordnung für Wien, 2007,
<http://www.wien.gv.at/recht/landesrecht-wien/rechtsvorschriften/html/b0200000.htm> (04.08.2007)

16.2.6.4. Sonderlösung hinsichtlich solarer Wärmegewinne

Es tritt ein Sonderfall auf hinsichtlich der solaren Wärmegewinne: Nachdem es ein zentrales Element der Parameterstudie ist, die Raumstruktur des Basismodells in unterschiedlichen Orientierungen zu untersuchen, ergibt sich die Situation, dass eine allgemein gültige Vorab-Berechnung des Heizwärmebedarfs an der Nicht-Definierbarkeit der Orientierung scheitert.

Eine Vernachlässigung der solaren Gewinne verbietet sich angesichts der großen verglasten Flächen. Es wird daher auf Basis einer Vorstudie festgelegt, alle Berechnungen des HWB in diesem Kapitel mit der Ausrichtung der Laubengangfassade nach Westen vorzunehmen. Diese Festlegung ist hinsichtlich des HWB jedenfalls auf der sicheren Seite.

16.2.6.5. Sonstige Festlegungen

Eine Festlegung der Wärmebrückenzuschlagskoeffizienten erübrigt sich, weil die Wärmebrücken, wie erwähnt, pauschaliert berücksichtigt werden.

16.3. Ergebnisse

16.3.1. Ergebnisse der originären, unverkürzten Raumstrukturen

Die Berechnung der originären, in Kapitel 8.3 festgeschriebenen Raumstruktur liefert die nachfolgend dokumentierten Ergebnisse (Tabelle 69).

Die Anforderungen an den spezifischen Transmissions-Wärmeverlust und an den Heizwärmebedarf werden demnach mit dem mindest erforderlichen Wärmeschutz der Bauteile erfüllt.

Hinzuweisen ist auf die zunächst paradox anmutenden Ergebnisse, wonach der HWB der schmälere übergeordneten Raumstruktur sogar noch knapp unter jenem der kompakteren Variante liegt. Der Sachverhalt wurde überprüft und kann bestätigt werden. Die Ursache liegt darin, dass die Verkleinerung der Gebäudehüllfläche nur zu Lasten der opaken, rein als Verlustflächen wirkenden Hüllteile geht, während die großen solaren Gewinnflächen ohne Flächenreduktion beibehalten werden.

	GGG_B460_T2850	GGG_B230_T2850	GWG_B460_T1350	GWG_B230_T1350
Spezifischer Transmissions-Leitwert [W/(m ³ K)]	0,102	0,102	0,182	0,182
Heizwärmebedarf [kWh/(m ² a)]	10,01	10,01	9,45	9,45

Tabelle 69: Geometrie der Basismodelle

16.3.2. Ergebnisse der verkürzten Raumstrukturen

16.3.3. Überprüfung und Anpassung des mindest erforderlichen Wärmeschutzes

Mit der Verkürzung der Basismodelle und der übergeordneten Raumstrukturen verändern sich auch die Grundlagen zur Erfüllung des mindest erforderlichen Wärmeschutzes. Es wird daher überprüft, ob die Annahme der gerade noch normgerechten U-Werte laut ÖNORM B 8110-1 auch für die verkürzten Raumstrukturen tatsächlich weiterhin alle diesbezüglichen Anforderungen der Wiener Bauordnung und der ÖNORM erfüllt.¹²⁴⁷¹²⁴⁸

Nachdem die Hintergründe der Anforderungen und Berechnungen bereits in Kapitel .3 ausreichend dargestellt sind, erübrigt sich an dieser Stelle eine weitere Erläuterung.

Die Berechnungen des spezifischen Transmissions-Leitwerts und des Heizwärmebedarfs der verkürzten Typen zeigen erwartungsgemäß, dass für die solcherart verkleinerten Baukörper mit den bislang angesetzten U-Werten die Anforderungen an den spezifischen Transmissions-Leitwert nicht mehr für alle Typen erfüllt werden.

Es werden demnach verbesserte U-Werte festgelegt. Wieder wird die Verbesserung derartig moderat ausgeführt, dass die Anforderungen gerade erfüllt werden. Hinsichtlich der Frage, in welcher Weise die theoretisch beliebige Verbesserung der einzelnen Bauteile relativ zueinander erfolgen soll, wird Weg einer baupraktisch realistischen Vorgehensweise gewählt.

Die Verbesserung der Außenwand erfolgte von $U = 0,35 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ auf $U = 0,30 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Die Verbesserung der Kellerdecke erfolgte von $U = 0,40 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ auf $U = 0,35 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Die Verbesserung der Fenster erfolgte von $U = 1,40 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ auf $U = 1,30 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, unter der Annahme verbesserten Abstandhalters und verbesserten Rahmens, aber unter Beibehaltung der Verglasung selbst mit $U_g = 1,2 \text{ W}/\text{m}^2/\text{K}$.¹²⁴⁹

Das Dach wurde nicht verbessert.

Alle Raumgeometrien erfüllen unter diesen Voraussetzungen die Anforderungen der Wiener Bauordnung und der ÖNORM B 8110-1.

16.3.4. Bauphysikalische Kennwerte der verkürzten Basismodelle

Es ergeben sich zusammengefasst für die verkürzten Basismodelle und übergeordneten Raumstrukturen die folgenden bauphysikalischen Kennwerte der Hüllbauteile. Diese

¹²⁴⁷ ÖNORM B 8110-1 (2007)

¹²⁴⁸ Bauordnung für Wien, 2007,
<http://www.wien.gv.at/recht/landesrecht-wien/rechtvorschriften/html/b0200000.htm>
(04.08.2007)

¹²⁴⁹ Die Geringfügigkeit dieser Verbesserung begründet sich vor dem Hintergrund, die grundsätzliche Typologie der Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung mit den zugeordneten Gesamtenergiedurchlassgrad und Lichttransmissionsgrad beibehalten zu können.

Werte (Tabelle 37) werden im Folgenden für die detaillierten Analysen aus Kapitel 8.5 herangezogen.

	U-Wert [W/(m ² K)]	g-Wert [-]	T-Wert [-]
Wand gegen außen	0,30		
Wand gegen Laubengang	0,30		
Decke gegen Keller	0,35		
Dach	0,20		
Fenster gegen außen	1,30	0,62	0,80
Fenster gegen Laubengang	1,30	0,62	0,80
Glas Laubengang gegen außen	5,6	0,84	0,90

Tabelle 70: Bauphysikalische Kennwerte der Hüllbauteile der verkürzten Raumstrukturen

17. Berechnung der Bestrahlungsstärke in der Raumtiefe

17.1. Inhalt

In Kapitel 7.7 werden Vergleiche gezogen zwischen der Vertikalbeleuchtungsstärke direkt hinter den technischen Funktionsgläsern und jener in zunehmender Raumtiefe. Der gegenständliche Anhang dokumentiert die dazu angestellten Berechnungen.

17.2. Methodik

17.2.1. Modellbildung

Es wird ein einfaches Raummodell definiert, das sich in seiner Geometrie weitgehend an jenes aus der vergleichenden Potentialstudie „Thermische und photobiologische Optimierung“ anlehnt, das aber in Abweichung zu diesem nur an einer der beiden Fassaden verglast ist und das keinen Laubengang aufweist (Abbildung 91).

- > Die Abmaße betragen $L \times B \times H = 12,50 \text{ m} \times 4,60 \text{ m} \times 2,50 \text{ m}$. Sämtliche Bauteile werden idealisiert mit verschwindender Bauteildicke angenommen.
- > Die Reflexionskoeffizienten werden im Einklang mit DIN 5034-4 angenommen. Sie betragen demnach: Boden 20%, Wand 60%, Decke 70%. Sämtliche Flächen werden als vollständig diffus reflektierend angenommen.
- > Eine der beiden kleineren Fassaden wird als vollständig verglast angenommen, mit einem Zweischeiben-Wärmeschutzglas, Lichttransmissionsgrad 80%. Die Winkelabhängigkeit des Transmissionsgrades wurde näherungsweise laut ÖNORM B 8110-6 mit einem Abminderungsfaktor von 0,9 und die Verschmutzung mit einem Faktor von 0,98 berücksichtigt.¹²⁵⁰ Ein Rahmenanteil wird nicht berücksichtigt.
- > Es werden vertikale, Raumquerschnitt füllende, zum Fenster parallele Messebenen definiert: Eine im ungestörten Außenraum, eine unmittelbar innerhalb der Verglasung und sechs weitere in einem Abstand von je zusätzlich 1,5 m ab der Fassade.

17.2.2. Berechnungseinstellungen

Die Berechnungen werden vorgenommen

- > für exemplarisch das Datum des 21.03.,
- > für die Uhrzeit (wahre Ortszeit) von 12:00,
- > für den Standort Wien (angenähert) mit 48° nördliche Breite und 15° östliche Länge
- > für alternativ bedeckten und klaren Himmel.

Die Auswertung der Beleuchtungsstärken in lx wird vorgenommen für den Mittelpunkt der jeweiligen Messebenen, demnach für eine Höhe von 1,25m.

¹²⁵⁰ ÖNORM B 8110-6 (2007)

Als Berechnungswerkzeug wird das Softwarepaket RELUX Professional in seiner Version 2007-7.1 angewandt, ein gut validiertes Lichtplanungsprogramm auf Basis des Radiosity-Verfahrens.¹²⁵¹ Die programminternen Einstellungen werden auf mittlere Rechengenauigkeit eingestellt, also mittlerer Indirektanteil, reduzierter Rasterabstand von 0,5 und automatische Rasterverfeinerung „fein“.

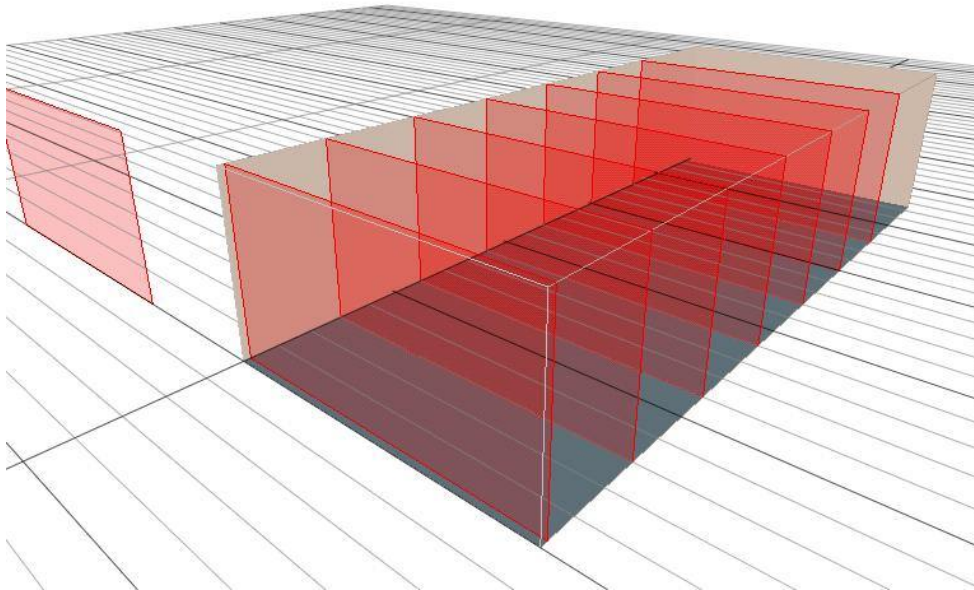


Abbildung 91: perspektivische Darstellung des Raummodells zur Berechnung der Bestrahlungsstärke in der Raumtiefe

17.3. Ergebnisse

Die Ergebnisse der beschriebenen Berechnungen sind nachfolgend tabellarisch und als Liniendiagramm dargestellt. Die Tabelle (Tabelle 71) beinhaltet die Zahlenwerte der Vertikalbeleuchtungsstärke auf die Messebenen.

Abstand von Fassade in m	0	0	1,5	1,5	3	4,5	6	7,5	9
E ind lx bei bedecktem Himmel	5.830	4.390	2.500	2.500	1.200	680	400	260	180
E ind lx bei klarem Himmel	64.800	47.500	46.000	9.200	6.880	4.170	2.380	1.480	980

Tabelle 71: Vertikalbeleuchtungsstärken in der Raumtiefe

Das nachfolgende Liniendiagramm (Diagramm 146) stellt exemplarisch für die festgelegten Bedingungen den Verlauf der Beleuchtungsstärke in der Raumtiefe dar. Die blaue Linie gilt für den klaren Tag, die rote für den bedeckten Tag.

¹²⁵¹ RELUX Professional Version 2007-7.1, RELUX Informatik AG 1998-2007, Basel, Bezugsquelle aus dem Internet <http://www.relux.ch> (21.07.2008)

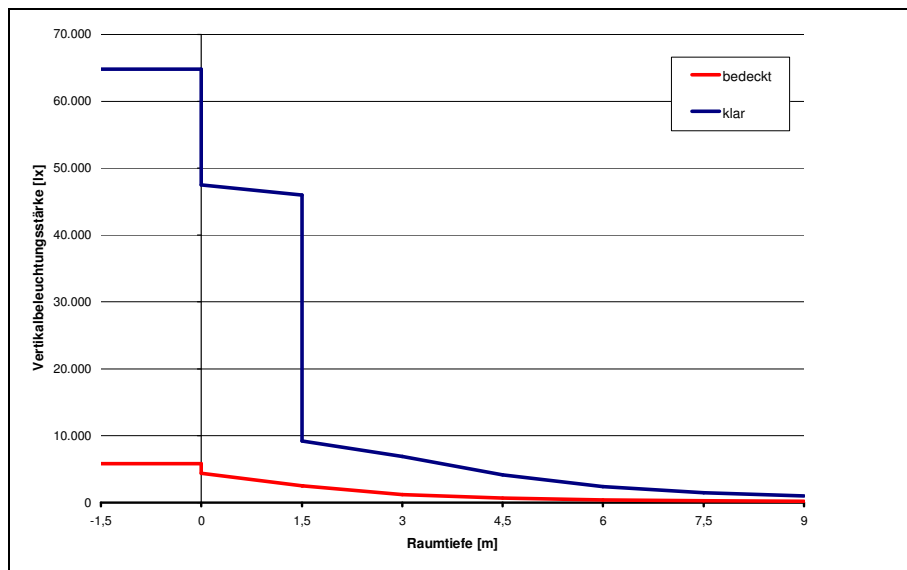


Diagramm 146: Verlauf der Vertikalbeleuchtungsstärke in der Raumtiefe

17.4. Schlussfolgerungen

Es lässt sich aus den Ergebnissen ablesen:

Innerhalb des direkten Sonnenlichts verringert sich die Strahlungsintensität mit der Raumtiefe nur geringfügig. (Siehe blaue Linie an 1,5 m Raumtiefe). Wird der Betrachtungspunkt aus dem Lichtstrahl heraus verschoben, verringert sich die Strahlungsintensität schlagartig und klingt mit zunehmender Raumtiefe erwartungsgemäß weiter ab. (Siehe blaue Linie an 1,5 m Raumtiefe).

Bei bedecktem Himmel ist das Ausgangsniveau der Bestrahlungsstärke erwartungsgemäß deutlich niedriger, während sie im Rauminnen ein kontinuierliches Abklingverhalten zeigt.

Es kann also festgehalten werden, dass die errechneten Werte der photophysiologicalen Wirkpotentiale in guter Näherung ihre Gültigkeit behalten, sofern die Messebene oder der betroffene Mensch im Wortsinn im direkten Sonnenlicht steht. Die Entfernung von der Glasscheibe ist dabei von sekundärer Bedeutung. Außerhalb des direkten Sonnenlichts sind strahlungstechnische und in erster Näherung auch photophysiologicalhe Intensitäten um ca. einen Faktor drei niedriger und klingen mit der Raumtiefe weiter ab.

18. Berechnung der Schwell- und Grenzwerte der Melatonin Suppression

18.1. Hintergrund

In der medizinischen Fachliteratur wird Melatonin Suppression als direkte Folge von Lichtexposition beschrieben und nachgewiesen. Siehe in der gegenständlichen Arbeit Kapitel 6.2.3.

Von Zeitzer werden Zusammenhänge zwischen der Beleuchtungsstärke einer hellweißen Fluoreszenzlampe und der Melatonin Suppression dokumentiert.¹²⁵²

Von Brainard werden dieselben Zusammenhänge unter monochromatischem Licht unterschiedlicher Wellenlängen untersucht.¹²⁵³

Gall, aufbauend auf Brainard und Thapan, quantifiziert schließlich die Zusammenhänge zwischen der spektralen Bestrahlungsstärke und der Melatonin Suppression in Form einer Wirkungs-Kurve.^{1254,1255,1256}

Ebenfalls von Zeitzer wird die Dosis-Wirkungs-Kurve mit wiederum einer hellweißen Fluoreszenzlampe der Zusammenhang zwischen der Beleuchtungsstärke auf die Netzhaut und der Verschiebung des circadianen Rhythmus erforscht und publiziert.¹²⁵⁷

Cajochen schließlich publiziert in Form einer weiteren Dosis-Wirkungs-Kurve mit wiederum einer hellweißen Fluoreszenzlampe den Zusammenhang zwischen der Beleuchtungsstärke auf die Netzhaut und der subjektiven Munterkeit.¹²⁵⁸

18.2. Fragestellung

Nachdem die genannten Studienergebnisse mit unterschiedlichen Lichtquellen ermittelt wurden, besteht die Notwendigkeit, die Ergebnisse zueinander in Bezug zu setzen. Ziel ist es, belastbare Grenz- und Schwellenwerte für die Melatonin Suppression, die Verschiebung des circadianen Rhythmus und die Beeinflussung der subjektiven Munterkeit zu ermitteln.

¹²⁵² Zeitzer (2000)

¹²⁵³ Brainard (2001)

¹²⁵⁴ Gall (2004)

¹²⁵⁵ Brainard (2001)

¹²⁵⁶ Thapan (2001)

¹²⁵⁷ Zeitzer (2000)

¹²⁵⁸ Cajochen (2007)

18.3. Berechnungen und Ergebnisse

18.3.1. Circadiane Bestrahlungsstärke

Gall definiert die spektrale Wirkungs-Kurve der relativen Melatonin Suppression dimensionslos mit einer maximalen Empfindlichkeit von eins bei der Wellenlänge von 450 nm. Durch spektrale Faltung mit der Bestrahlungsstärke und Integration über die Wellenlänge lässt sich somit eine circadian wirksame Bestrahlungsstärke ermitteln, die fortan mit dem Formelzeichen I_{bio} in der Einheit W/m^2 bezeichnet wird.¹²⁵⁹

18.3.2. Schwell- und Grenzwert der Melatonin Suppression

18.3.2.1. Umrechnung Photonenstrom in circadiane Bestrahlungsstärke

Brainard dokumentiert die Melatonin Suppression auf einer Prozentskala über der Bestrahlungsstärke monochromatischen Lichts unterschiedlicher Wellenlängen. Er ermittelt maximale Sensitivität bei einem Licht der Wellenlänge um 470 nm. Als Grenzwert der Bestrahlungsstärke, über jenem keine Verstärkung der Wirkung mehr eintritt, ermittelt er bei Bestrahlung mit dieser Wellenlänge einen Photonenstrom von ca. 10^{14} Photonen pro Quadratcentimeter und Sekunde.¹²⁶⁰

Die Bestrahlungsstärke dieses Photonenstroms beträgt $42 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ bzw. $0,42 \text{ W}/\text{m}^2$.¹²⁶¹

Die Anwendung der circadianen Wirkungs-Kurve von Gall auf diesen Grenzwert ergibt auch für die circadian wirksame Bestrahlungsstärke den identischen Grenzwert von $42 \mu\text{W}/\text{cm}^2$. Monochromatisches Licht dieser Bestrahlungsstärke würde gemäß der $V(\lambda)$ -Kurve eine Beleuchtungsstärke von etwa 26 lx auslösen.^{1262,1263}

18.3.2.2. Umrechnung von Beleuchtungsstärke in circadiane Bestrahlungsstärke

Zeitzer ermittelt seine Ergebnisse mit einer hellweißen Lichtquelle unter variabler Beleuchtungsstärke.¹²⁶⁴

Zur Umrechnung seiner Ergebnisse in circadiane Bestrahlungsstärken wird exemplarisch das Emissionsspektrum der hellweißen Fluoreszenzlampe OSRAM Lumilux 840 zugrunde gelegt. Mit Faltung dieser Strahlung mit einerseits der $V(\lambda)$ und andererseits der $c(\lambda)$ -Kurve wird für eine Strahlung dieses Spektrums die korrelierende photometrische und circadiane Bestrahlungsstärke ermittelt.

¹²⁵⁹ Gall (2004)

¹²⁶⁰ Brainard (2001)

¹²⁶¹ Die Umrechnung zwischen den Einheiten des Photonenflusses und der Bestrahlungsstärke erfolgt über den Zusammenhang $E = f_{\text{Photon}} \times h \times c / \lambda$, mit E ... Bestrahlungsstärke in $[\text{W}/\text{m}^2]$, f_{Photon} ... Photonenfrequenz in $[1/\text{s}]$, h ... Planck'sches Wirkungsquantum mit $6,626 \times 10^{-34} \text{ Js}$, c ... Lichtgeschwindigkeit mit $300 \times 10^6 \text{ m/s}$, λ ... Wellenlänge in $[\text{m}]$.

¹²⁶² Gall (2004)

¹²⁶³ Die Beleuchtungsstärke ergibt sich aus der Faltung der Bestrahlungsstärke von $0,42 \text{ W}/\text{m}^2$ mit der $v(\lambda)$ -Kurve, demnach $E = 0,42 \text{ W}/\text{m}^2 \times 0,09098 \times 683 \text{ lm/W} = 26 \text{ lx}$

¹²⁶⁴ Zeitzer (2000)

Die folgenden beiden Abbildungen (Abbildung 92, Abbildung 93) zeigen dieses Emissionsspektrum.^{1265,1266,1267,1268}

a

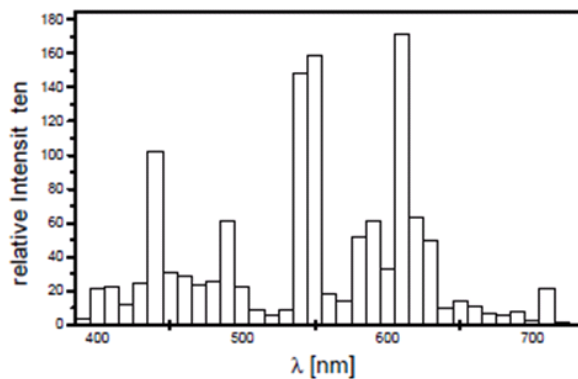


Abbildung 92: Emissionsspektrum OSRAM Lumilux 840

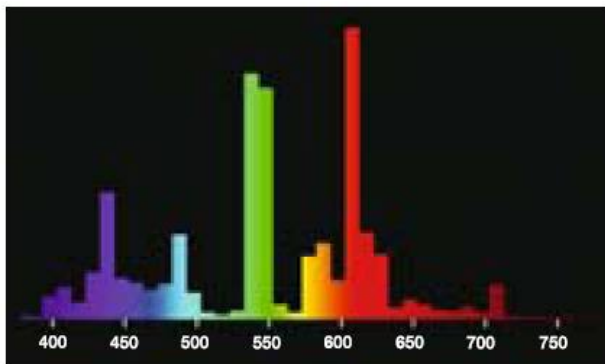


Abbildung 93: Emissionsspektrum OSRAM Lumilux 840

Mit diesem Ansatz ergibt sich für den von Zeitzer ermittelten oberen Grenzwert der Melatonin Suppression eine korrelierende photometrische Bestrahlungsstärke von $2,9 \text{ W/m}^2$ und eine circadian wirksame Bestrahlungsstärke von $0,8 \text{ W/m}^2$. Letzterer Wert übersteigt den von Brainard ermittelten Wert um fast 100%. Zwei Erklärungen gibt es für diese Abweichung: Erstens ist die Annahme eines konkreten, dreibandigen Emissionsspektrums der hellweißen, bei Zeitzer nicht näher dokumentierten Lichtquelle von Unsicherheiten behaftet und gleichzeitig höchst ergebnissensitiv. Zweitens hat Brainard seine Versuche mit monochromatischem Licht gemacht, was angesichts des bekannten Effekts der nicht-additiven Qualität unterschiedlicher Wellenlängen einen niedrigeren Schwellwert plausibel erscheinen lässt.

¹²⁶⁵ OSRAM Lumilux 840, Farbwiedergabeindex 80 bis 89%, Farbtemperatur 4.000 K, Lichtausbeute 63 lm/W, aus dem Internet www.osram.at, Abfrage vom 21.03.2009.

¹²⁶⁶ Steigerwald K (2006)

¹²⁶⁷ Lode U.S: (1998)

¹²⁶⁸ Aus dem Internet www.osram.at vom 21.03.2009

19. Berechnung langjähriger mittlerer Strahlungssummen

19.1. Inhalt

In Kapitel 7.8 werden Vergleiche angestellt zwischen den Stundensummen der Globalstrahlung unter Referenzbedingungen, also insbesondere bei wolkenlosem Himmel, und den Stunden- sowie den Tagessummen unter Berücksichtigung statistisch auftretender Bewölkung. Der gegenständliche Anhang dokumentiert die dazu ausgeführten Berechnungen.

19.2. Methodik

Es wird in drei Schritten vorgegangen:

19.2.1. Ermittlung langjähriger mittlerer Strahlungssummen auf die Horizontale

Erstens werden aus dem Österreichischen Klimadatenkatalog für den konkreten Standort Wien die langjährigen mittleren monatlichen Tagessummen der Globalstrahlung auf die Horizontale, getrennt nach Direkt- und Diffusstrahlung, erhoben.^{1269,1270}

19.2.2. Ermittlung langjähriger mittlerer Trübungsfaktoren

Zweitens werden aus diesen langjährigen mittleren monatlichen Tagessummen der Sonnenstrahlung, unter Kenntnis der extraterrestrischen Strahlungsintensität und der Himmelsgeometrie für den jeweils 15. Tag jedes Monats, die langjährigen mittleren monatlichen Trübungsfaktoren nach Linke und Reitz berechnet. Diese Berechnung erfolgt nach dem Formelsatz von Kreč.¹²⁷¹

19.2.3. Berechnung der Strahlungssummen auf die konkreten Messflächen

Schließlich werden, wieder unter Anwendung des Formelsatzes von Kreč (1995) und unter Anwendung der ermittelten langjährigen mittleren monatlichen Trübungsfaktoren nach Linke und Reitz, die Stunden- und Tagessummen der Globalstrahlung auf die jeweils vertikalen Messflächen zu den relevanten Referenzzeitpunkten berechnet.

Die solcherart errechneten Strahlungssummen werden in Bezug gesetzt zu den Stundensummen der Globalstrahlung auf die vertikalen Messflächen, wie sie für den wolkenlosen Himmel errechnet und der Potentialstudie „Physiologie im Innenraum“, Kapitel 7, zugrunde gelegt sind.

¹²⁶⁹ Heindl (1984)

¹²⁷⁰ Nachdem die Referenztage stets als der 15. Tag eines Monats definiert sind, sind die solcherart erhobenen langjährigen mittleren monatlichen Tagessummen ohne weitere Anpassung auf die Referenztage anwendbar.

¹²⁷¹ Kreč, K., (1995)

19.3. Ergebnisse

Die nachfolgende Tabelle (Tabelle 72) dokumentiert die langjährigen mittleren monatlichen Tagessummen der Globalstrahlung für den Standort Wien, auf die Horizontale, getrennt nach Direkt- und Diffusstrahlung, in Wh/m², ganzzahlig gerundet.^{1272,1273}

	Jän	Feb	März	April	Mai	Juni
Globalstrahlung [Wh/m ²]	879	1.542	2.615	3.777	4.660	5.073
Diffusstrahlung [Wh/m ²]	627	1.048	1.584	2.310	2.669	2.762
	Juli	Aug	Sept	Okt	Nov	Dez
Globalstrahlung [Wh/m ²]	4.973	4.279	3.093	1.837	978	682
Diffusstrahlung [Wh/m ²]	2.497	2.082	1.690	915	609	437

Tabelle 72: Langjährige monatliche Tagessummen der Globalstrahlung für den Standort Wien

Die folgende Tabelle (Tabelle 73) enthält die langjährigen mittleren monatlichen Trübungsfaktoren nach Linke und Reitz für den jeweils 15. Tag des Monats und für den konkreten Standort Wien. Sie ergeben sich aus den oben angegebenen Tagessummen der Globalstrahlung, unter Anwendung des Formelsatzes von Kreč (1995).

¹²⁷² Heindl (1984)

¹²⁷³ Nachdem die Referenztage stets als der 15. Tag eines Monats definiert sind, sind die solcherart erhobenen langjährigen mittleren monatlichen Tagessummen ohne weitere Anpassung auf die Referenztage anwendbar.

	Jän	Feb	März	April	Mai	Juni
Trübungsfaktor nach Linke	8,8907	10,0679	10,7370	12,3775	12,5837	12,3674
Diffusstrahlungsfaktor nach Reitz	0,2441	0,2718	0,2849	0,3078	0,3034	0,2970

	Juli	Aug	Sept	Okt	Nov	Dez
Trübungsfaktor nach Linke	11,4016	10,5505	10,5774	8,8513	8,8079	7,7989
Diffusstrahlungsfaktor nach Reitz	0,2852	0,2756	0,2732	0,2126	0,2069	0,2008

Tabelle 73: Langjährige mittlere Trübungsfaktoren für den 15. Tag des Monats am Standort Wien

Mit den oben dokumentierten Vorarbeiten errechnen sich die langjährigen mittleren Stunden- und Tagessummen der Globalstrahlung am jeweils 15. März, Juni, September und Dezember, wie in den folgenden Tabelle (Tabelle 74) dokumentiert. Mit dokumentiert sind auch die Orientierungen der vertikalen Messebenen, angegeben als die Richtung des Flächennormalvektors, in Uhrzeigerrichtung von Norden. Und mit dokumentiert sind die Stundensummen der Globalstrahlung auf dieselbe Fläche unter wolkenlosen Referenzbedingungen, wie sie der Potentialstudie „Physiologie im Innenraum“, Kapitel 7, zugrunde gelegt sind.

07:00	Wh/m ² März	Wh/m ² Juni	Wh/m ² Sept
Azimut der Flächennormale	103	84	99
Stundensumme Referenz unbewölkt	357	697	520
Stundensumme langjährig bewölkt	46	216	84
Tagessumme langjährig bewölkt	1.615	2.658	1.846

12:00	Wh/m ² März	Wh/m ² Juni	Wh/m ² Sept	Wh/m ² Dez
Azimut der Flächennormale	180	180	180	180
Stundensumme Referenz unbewölkt	749	523	726	713
Stundensumme langjährig bewölkt	373	351	390	244
Tagessumme langjährig bewölkt	2.304	2.754	2.551	1.094

17:00	Wh/m ² März	Wh/m ² Juni	Wh/m ² Sept
Azimut der Flächennormale	257	276	261
Stundensumme Referenz unbewölkt	357	697	520
Stundensumme langjährig bewölkt	46	216	84
Tagessumme langjährig bewölkt	1.618	2.659	1.843

Tabelle 74: Bestrahlungssummen unter Referenzbedingungen und im langjährigen Mittel

Denselben Zusammenhang veranschaulichen die folgenden Säulendiagramme (Diagramm 147, Diagramm 148, Diagramm 149). Dargestellt ist für jeden Referenzzeitpunkt, bestehend aus Datum und Uhrzeit, eine Säulengruppe, bestehend aus der Stundensumme der Globalstrahlung bei klarem Himmel, der Stundensumme der Globalstrahlung langjährig charakteristischer Bewölkung und die Tagessumme der Globalstrahlung bei ebenfalls langjährig charakteristischer Bewölkung.

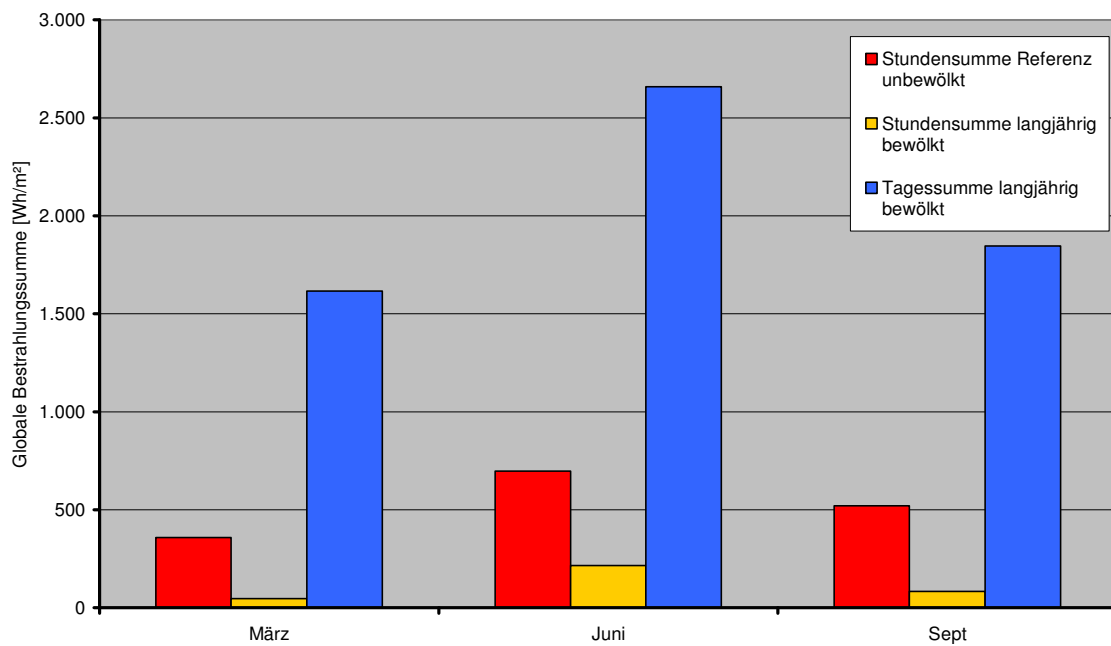


Diagramm 147: Strahlungssummen unter Referenzbedingungen und im langjährigen Mittel, 07:00

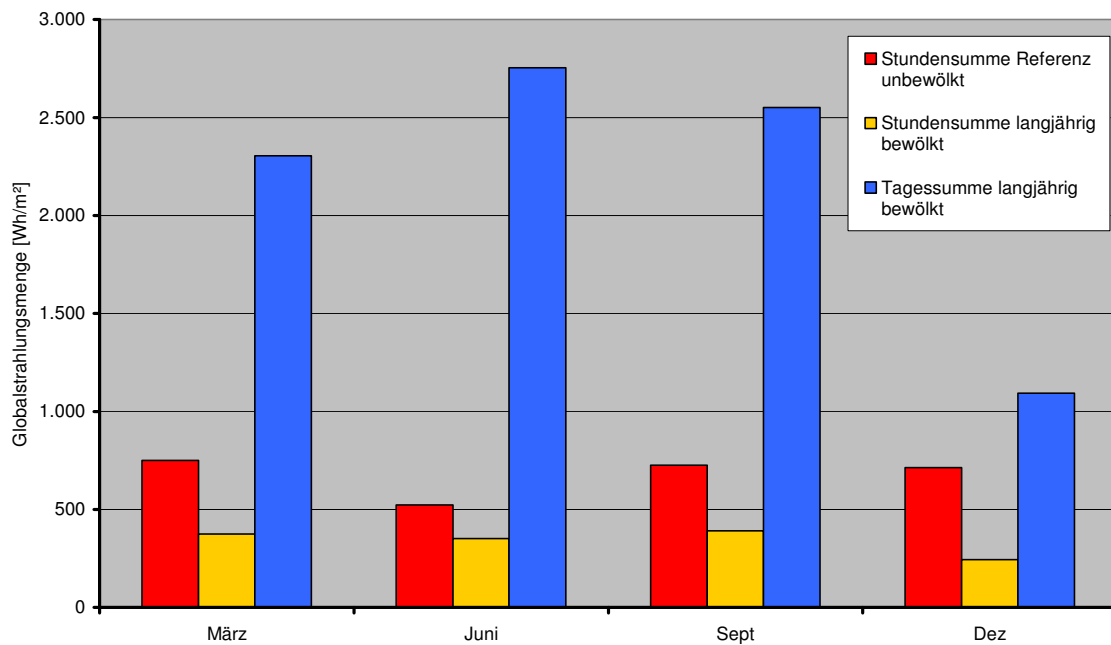


Diagramm 148: Strahlungssummen unter Referenzbedingungen und im langjährigen Mittel, 12:00

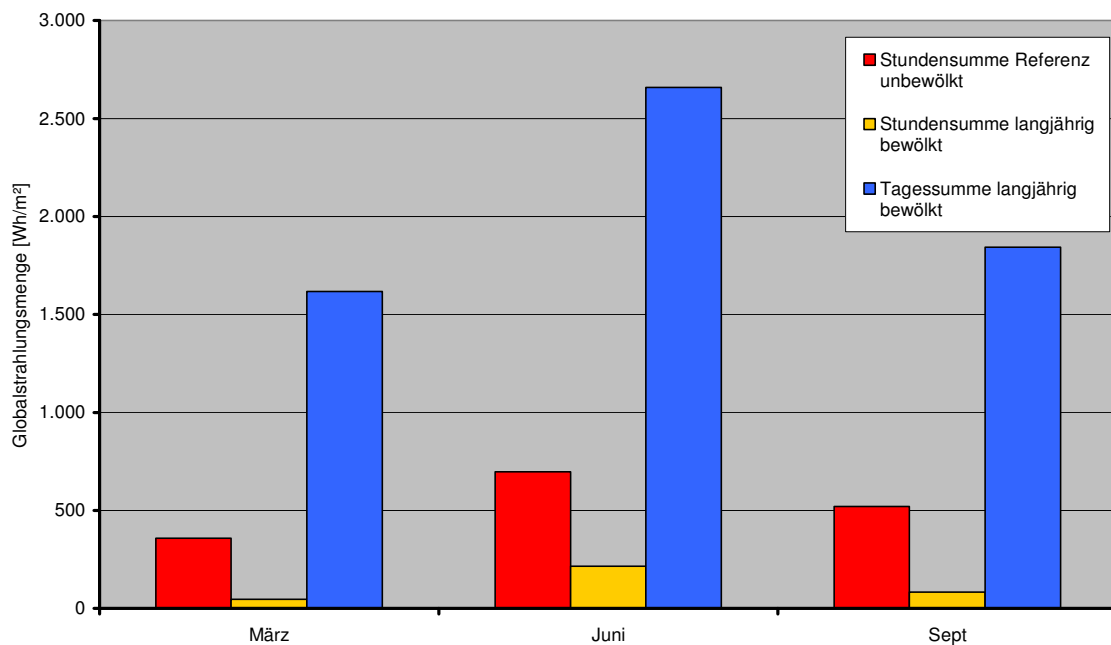


Diagramm 149: Strahlungssummen unter Referenzbedingungen und im langjährigen Mittel, 12:00

Es zeigt sich demnach, dass die stündlichen Strahlungsmengen während der Mittagsstunden unter wolkenlosen Referenzbedingungen von den stündlichen

Strahlungsmengen im langjährigen Mittel um 25% bis 75% unterschritten werden, mit geringster Unterschreitung im Sommer und höchster im Winter.

Es zeigt sich weiters, dass die stündlichen Strahlungsmengen während der Mittagsstunden unter wolkenlosen Referenzbedingungen bereits 20% bis 65% der langjährigen täglichen Strahlungsmengen auf dieselben, vertikal südorientierten Messebenen betragen, mit den kleineren Werten im Sommer und den größeren im Winter.

20. Datenblätter zur Potentialstudie „Licht und Thermische Optimierung“

Die Ergebnisse der Potentialstudie „Licht und Thermische Optimierung“ werden unter anderem in Datenblättern dokumentiert. Jedes Datenblatt enthält:

- > Codierung des jeweiligen Typs des Basismodells in der Titelzeile
- > Ergebnistabelle mit jeweils zwölf Monatswerten für HWB, KB und LPF sowie Jahressummen für HWB und KB und Jahresdurchschnitt für LPF
- > Ergebnisdiagramm mit jeweils zwölf Monatswerten für HWB, KB und LPF
- > Drei perspektivische Darstellungen des Durchlichtungsfaktors, jeweils exemplarisch zur Winter- und Sommersonnenwende sowie zur Tag-Nacht-Gleiche
- > Drei Säulendiagramme mit den stündlichen Momentanwerten des Durchlichtungsfaktors, jeweils exemplarisch zur Winter- und Sommersonnenwende sowie zur Tag-Nacht-Gleiche

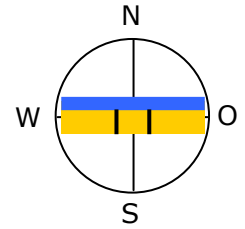
Dargestellt werden je 12 Datenblätter zu jeder der vier untersuchten Ausformungen des Basismodells:

- > GGG_B460_T1400
- > GGG_B230_T1100
- > GWG_B460_T1150
- > GWG_B230_T900

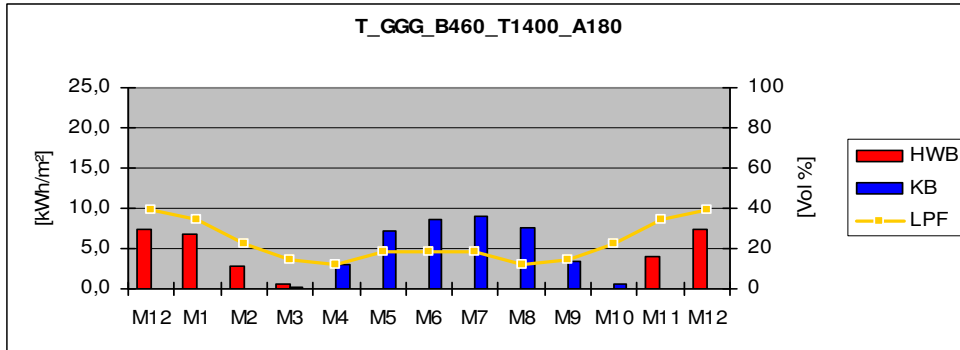
Detaillierte Erläuterungen sowie exemplarisch die Datenblätter eines einzigen Typs des Basismodells finden sich im Kapitel 8.6. Im gegenständlichen Kapitel werden sämtliche Datenblätter dokumentiert.

20.1. Datenblätter zum Basismodell GGG_B460_T1400

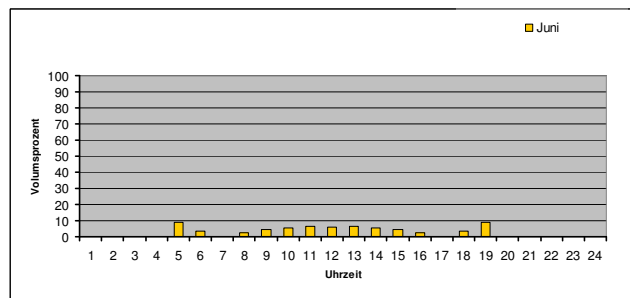
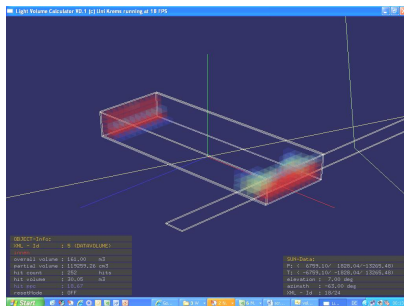
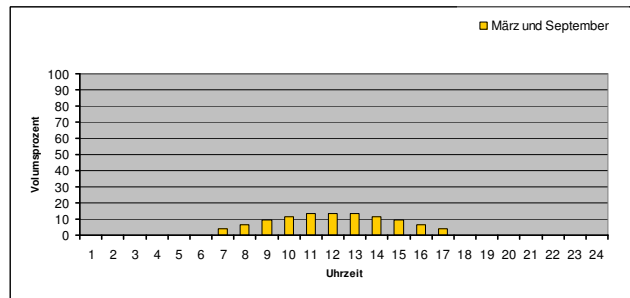
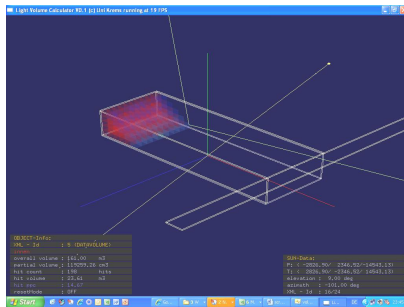
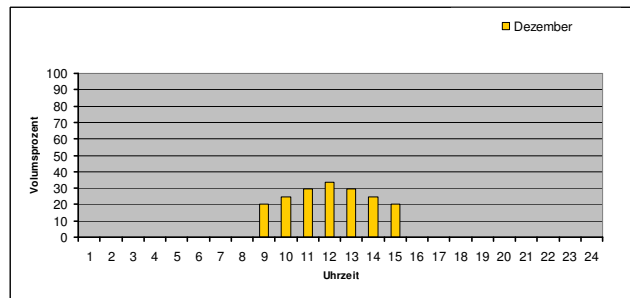
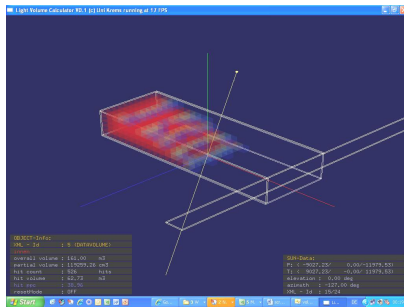
Datenblatt Typ T_GGG_B460_T1400_A180



T_GGG_B460_T1400_A180														
	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	Sum/Average
LPF	39	34	22	15	12	19	19	19	12	15	22	34	39	22 %
HWB	7,4	6,8	2,8	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,1	7,4	22 kWh/m ²
KB	0,0	0,0	0,0	0,2	3,1	7,1	8,6	9,0	7,7	3,4	0,6	0,0	0,0	40 kWh/m ²

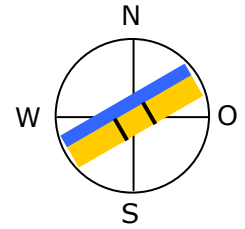


Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]

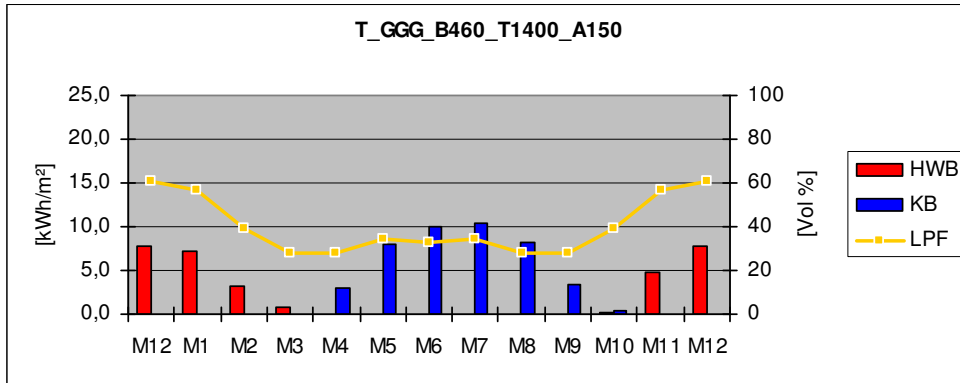


Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

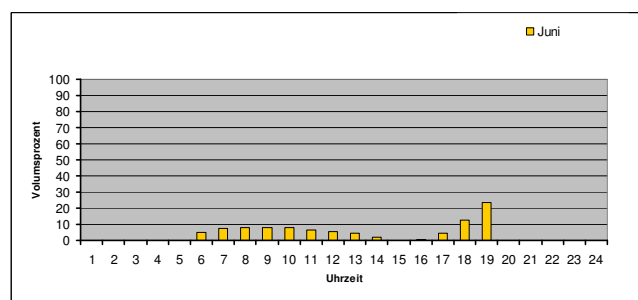
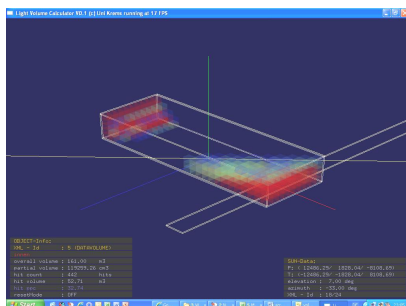
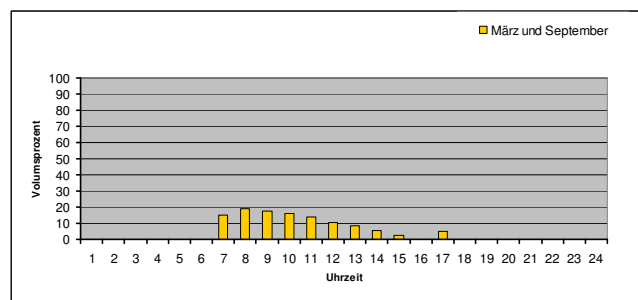
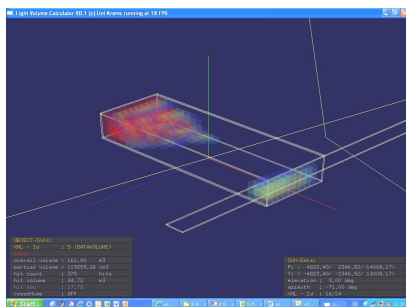
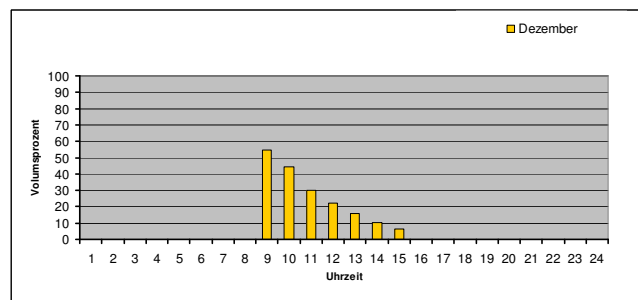
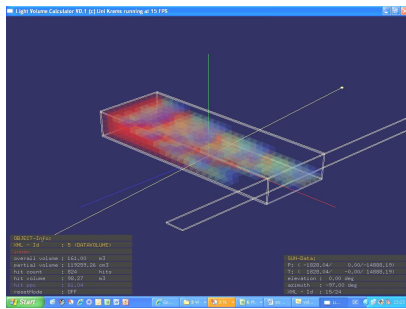
Datenblatt Typ T_GGG_B460_T1400_A150



T_GGG_B460_T1400_A150														
	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	Sum/Average
LPF	61	57	39	28	28	34	33	34	28	28	39	57	61	39 %
HWB	7,8	7,2	3,2	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	4,7	7,8	24 kWh/m ²
KB	0,0	0,0	0,0	0,1	3,0	8,0	10,1	10,4	8,2	3,3	0,4	0,0	0,0	43 kWh/m ²

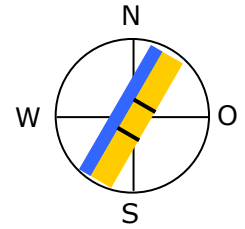


Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]

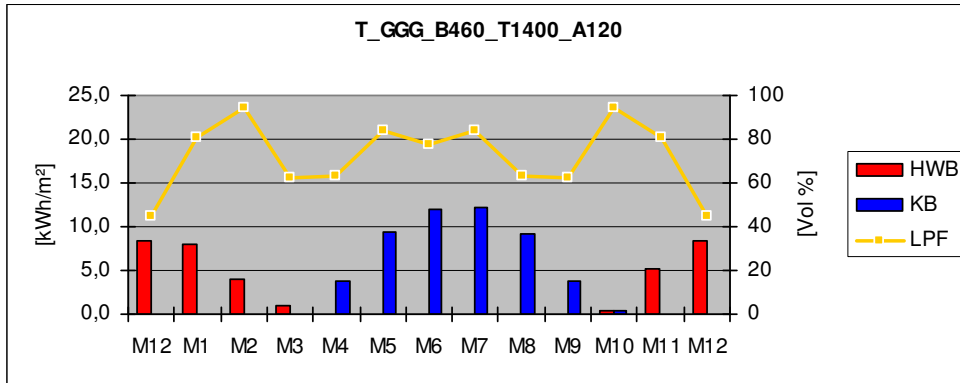


Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

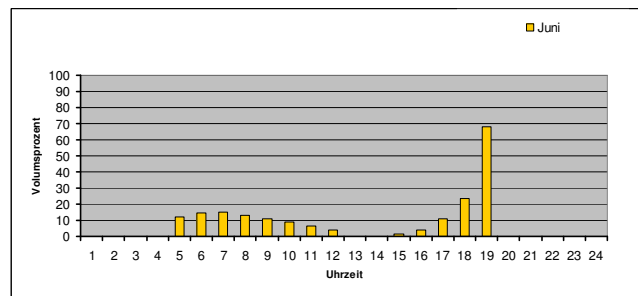
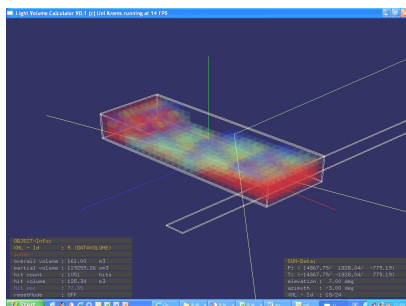
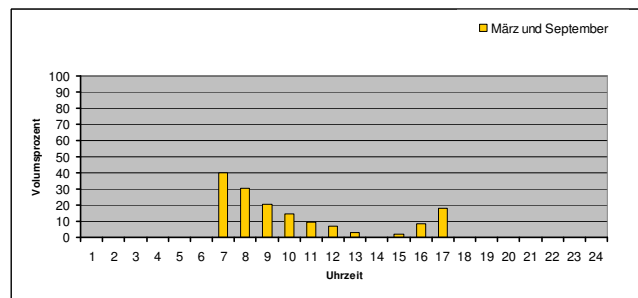
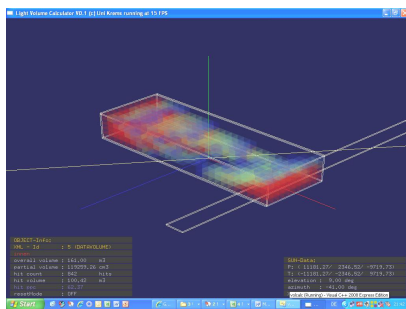
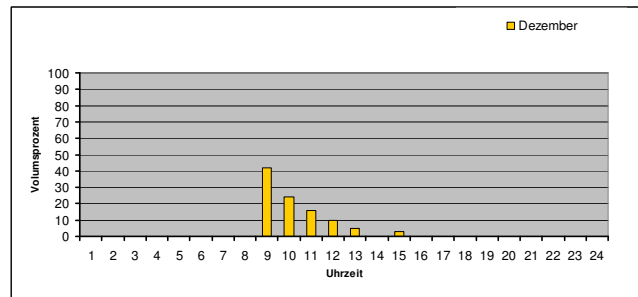
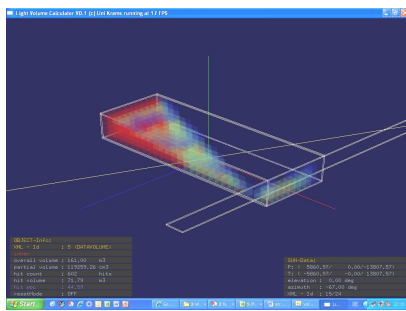
Datenblatt Typ T_GGG_B460_T1400_A120



T_GGG_B460_T1400_A120														
	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	Sum/Average
LPF	45	81	94	62	63	84	78	84	63	62	94	81	45	74 %
HWB	8,4	8,0	4,1	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	5,1	8,4	27 kWh/m ²
KB	0,0	0,0	0,0	0,0	3,9	9,5	12,0	12,2	9,2	3,8	0,4	0,0	0,0	51 kWh/m ²

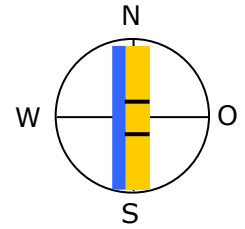


Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]

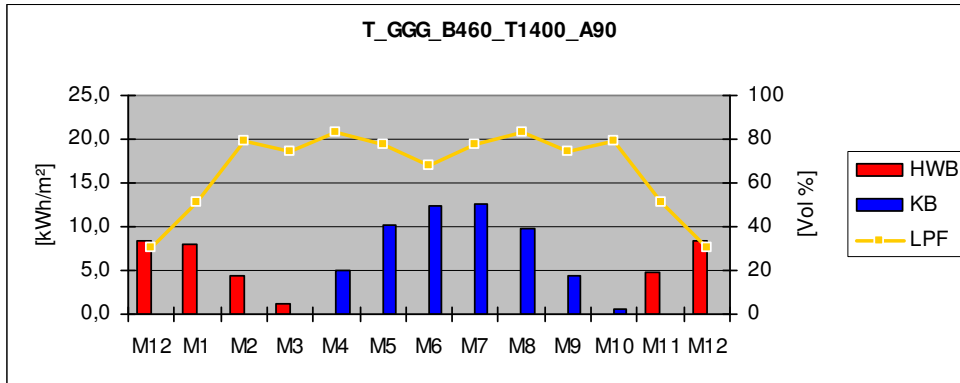


Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

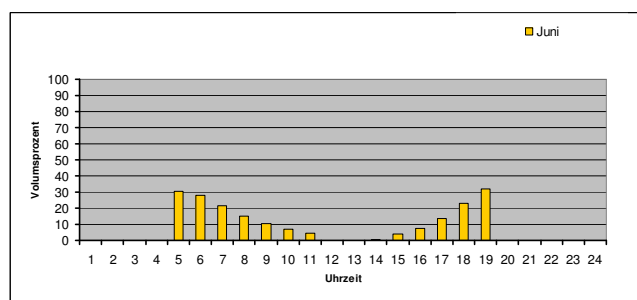
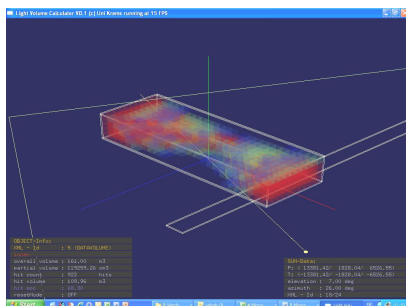
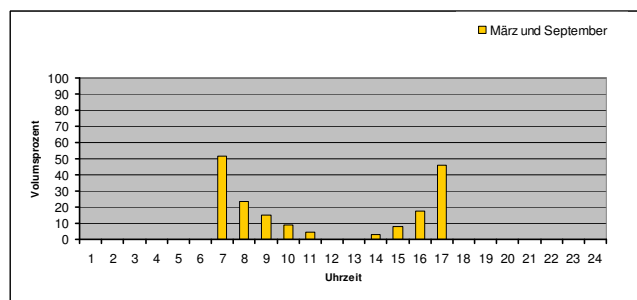
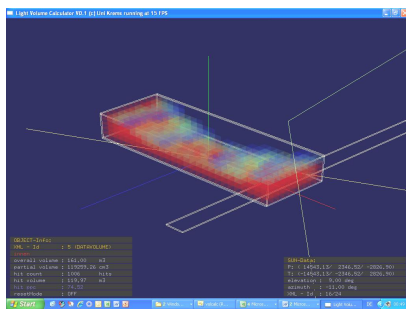
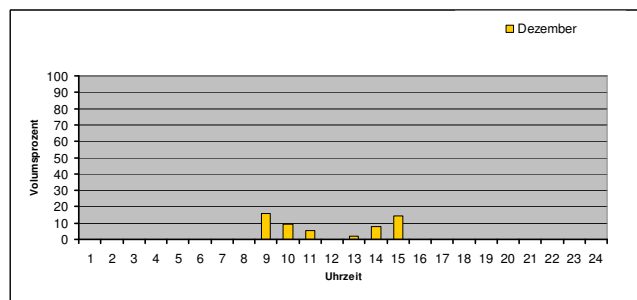
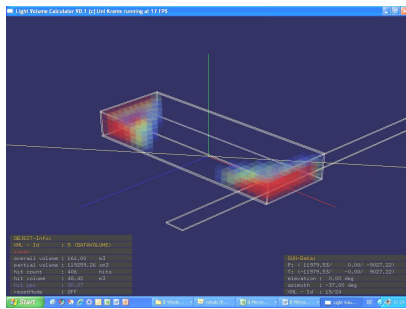
Datenblatt Typ T_GGG_B460_T1400_A90



T_GGG_B460_T1400_A90														
	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	Sum/Average
LPF	30	51	79	75	83	77	68	77	83	75	79	51	30	69 %
HWB	8,3	8,1	4,4	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0			0,1	4,8	8,3	27 kWh/m ²
KB	0,0	0,0	0,0	0,1	4,9	10,3	12,5	12,7	9,9	4,3	0,6	0,0	0,0	55 kWh/m ²

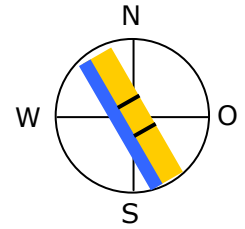


Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]

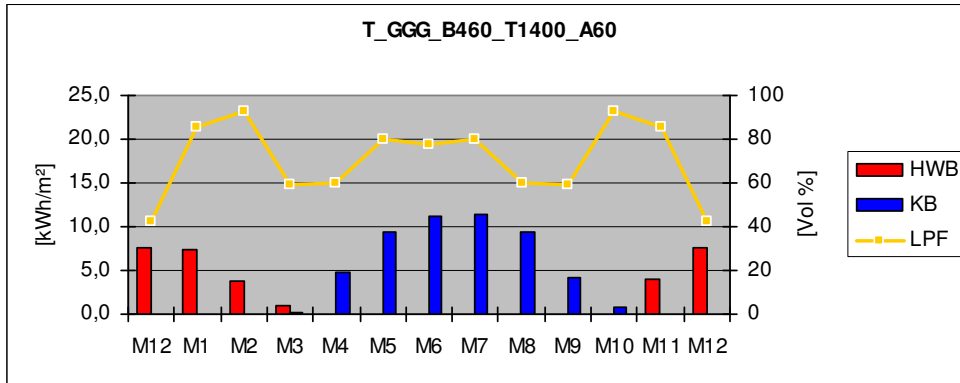


Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

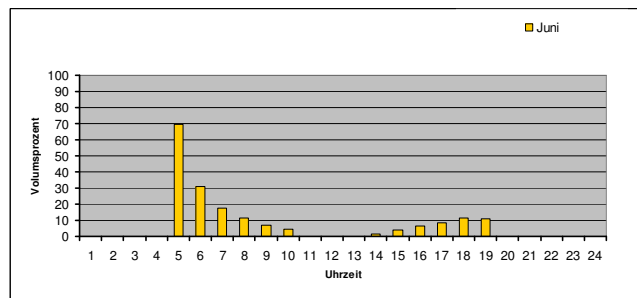
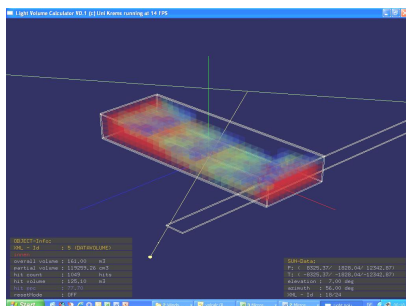
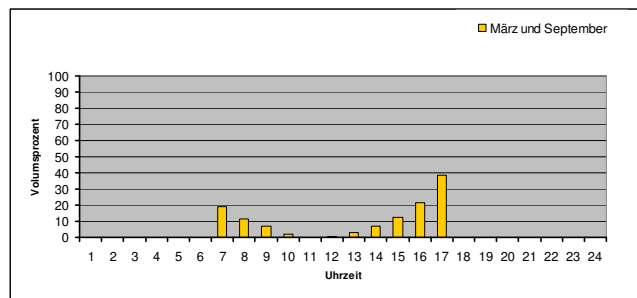
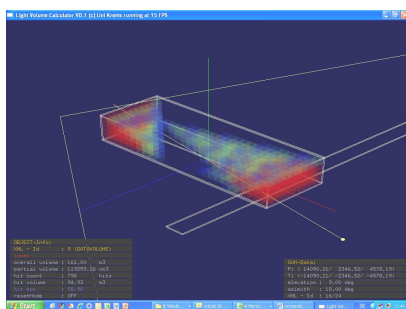
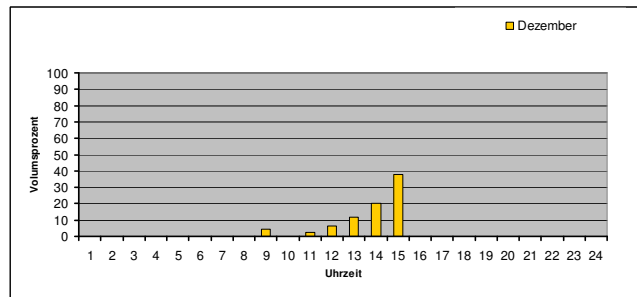
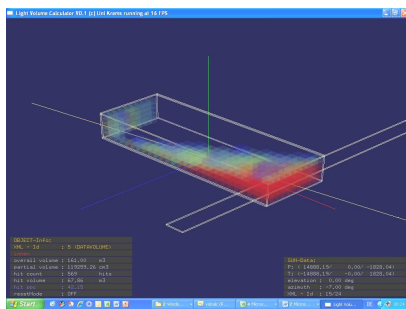
Datenblatt Typ T_GGG_B460_T1400_A60



T_GGG_B460_T1400_A60													Sum/Average	
LPF	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	73 %
HWB	42	86	93	59	60	80	78	80	60	59	93	86	42	24 kWh/m ²
KB	7,5	7,3	3,8	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,9	7,5	0,0	51 kWh/m ²
KB	0,0	0,0	0,0	0,2	4,9	9,4	11,1	11,4	9,3	4,3	0,8	0,0	0,0	

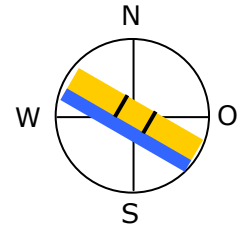


Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]

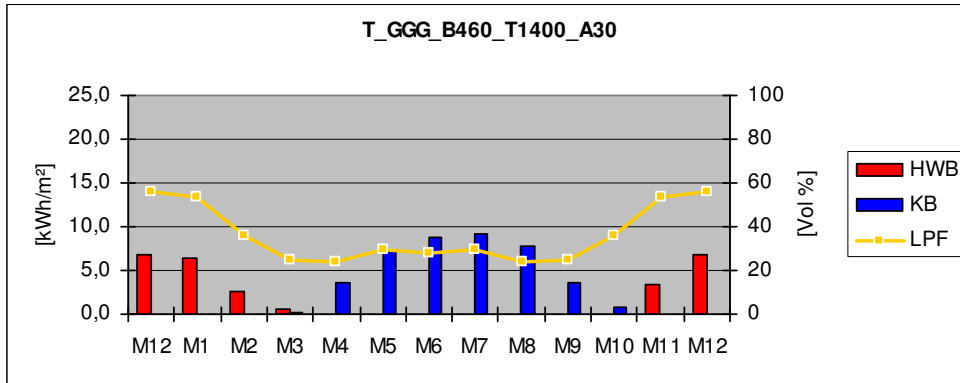


Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

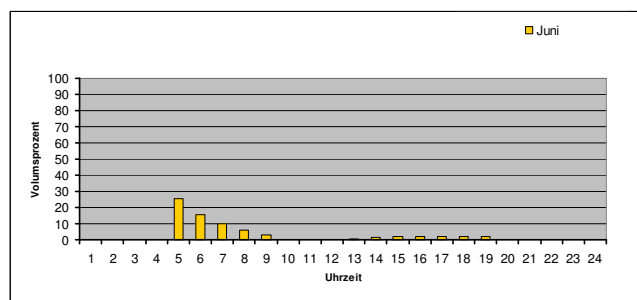
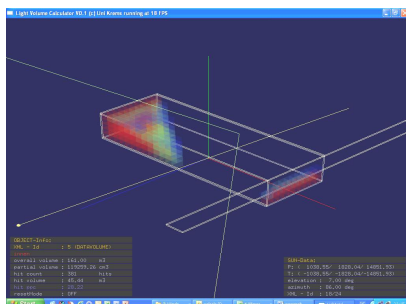
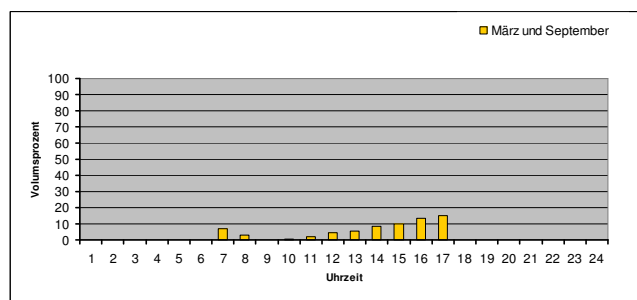
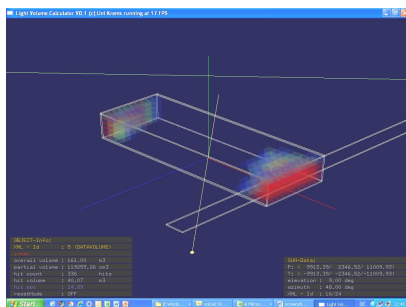
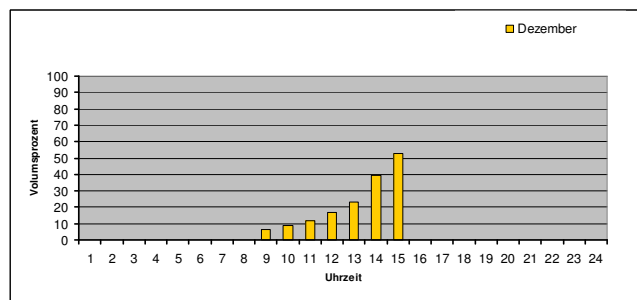
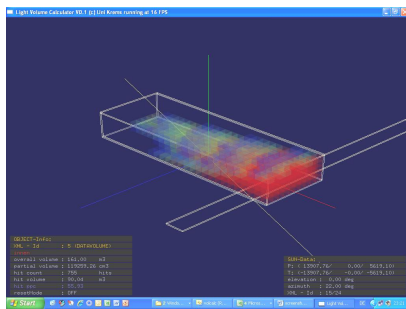
Datenblatt Typ T_GGG_B460_T1400_A30



T_GGG_B460_T1400_A30													Sum/Average	
LPF	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	35 %
HWB	6,9	6,3	2,7	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,4	6,9	20 kWh/m ²	
KB	0,0	0,0	0,0	0,3	3,6	7,3	8,8	9,2	7,8	3,5	0,8	0,0	41 kWh/m ²	

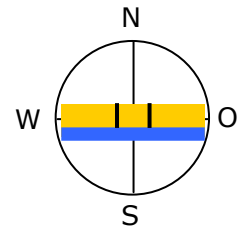


Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]

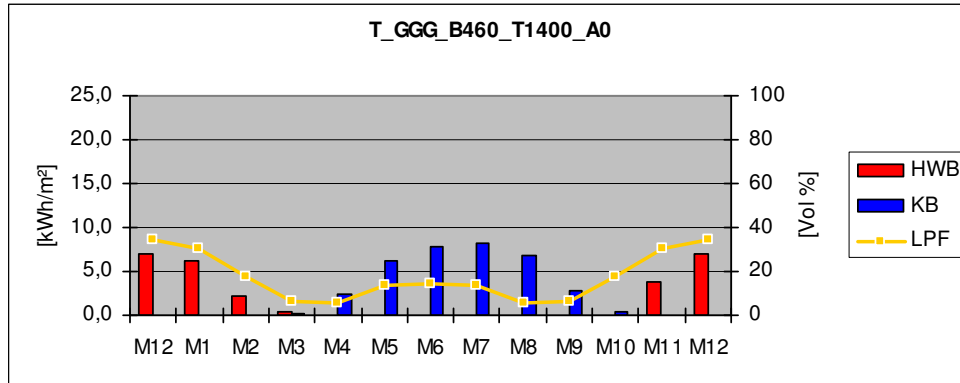


Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

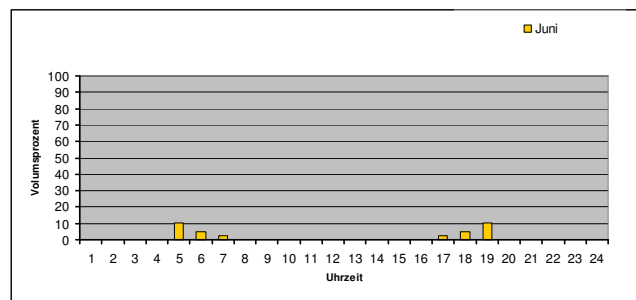
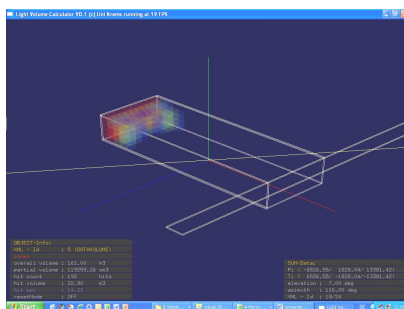
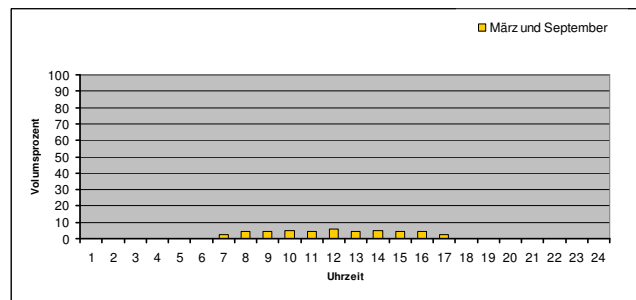
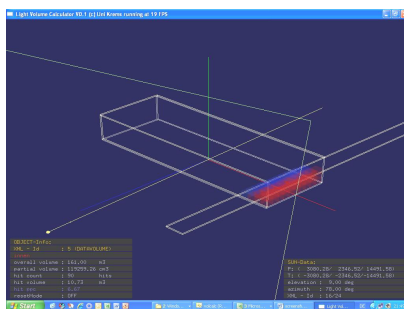
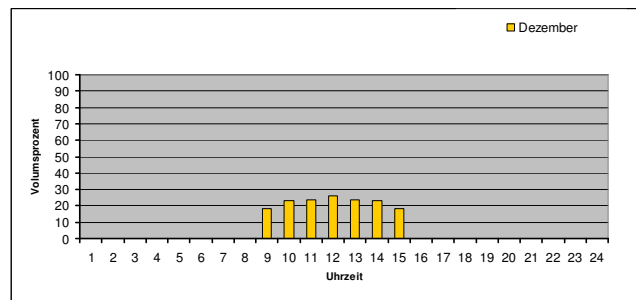
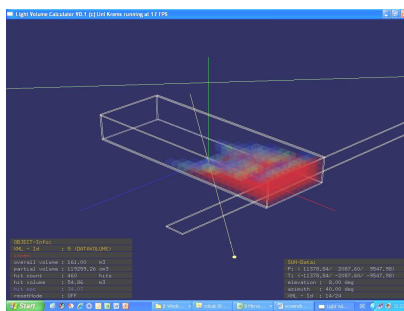
Datenblatt Typ T_GGG_B460_T1400_A0



T_GGG_B460_T1400_A0													Sum/Average	
LPF	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	16 %
HWB	6,9	6,1	2,2	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,8	6,9	20 kWh/m ²
KB	0,0	0,0	0,0	0,2	2,5	6,2	7,9	8,3	6,8	2,9	0,5	0,0	0,0	35 kWh/m ²

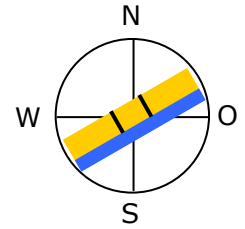


Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]

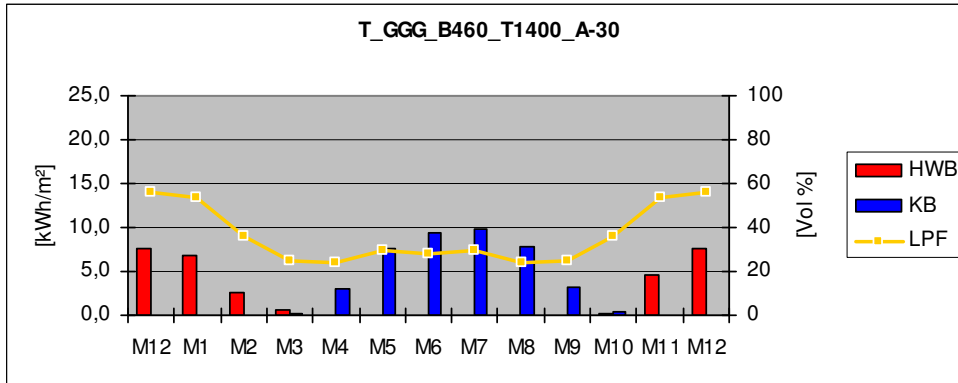


Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

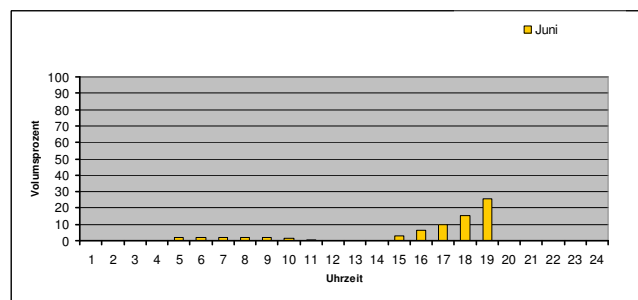
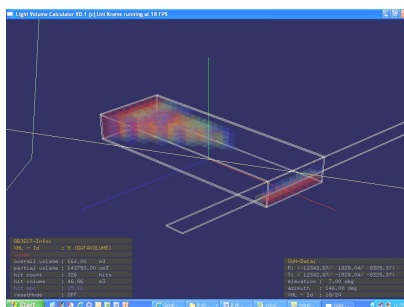
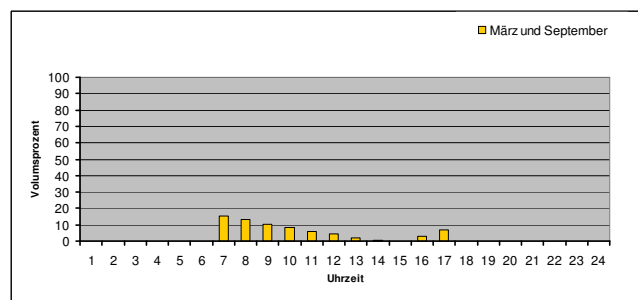
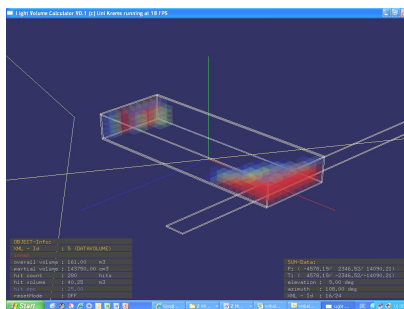
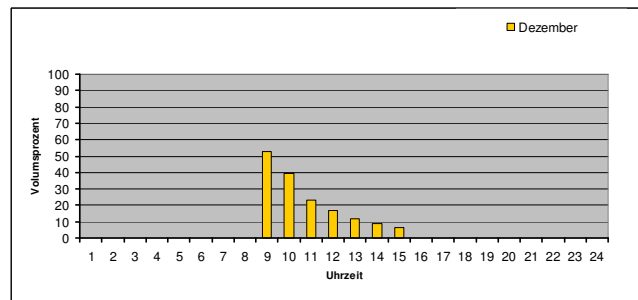
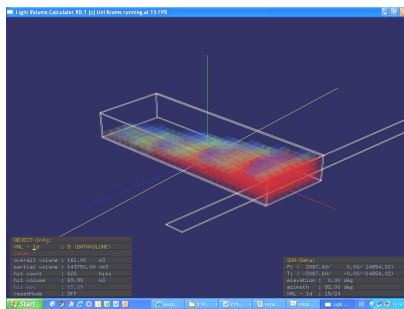
Datenblatt Typ T_GGG_B460_T1400_A-30



T_GGG_B460_T1400_A-30													Sum/Average	
LPF	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	35 %
HWB	7,7	6,9	2,7	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	4,7	7,7	23 kWh/m ²
KB	0,0	0,0	0,0	0,1	2,9	7,5	9,4	9,8	7,7	3,2	0,3	0,0	0,0	41 kWh/m ²

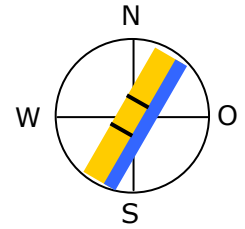


Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]

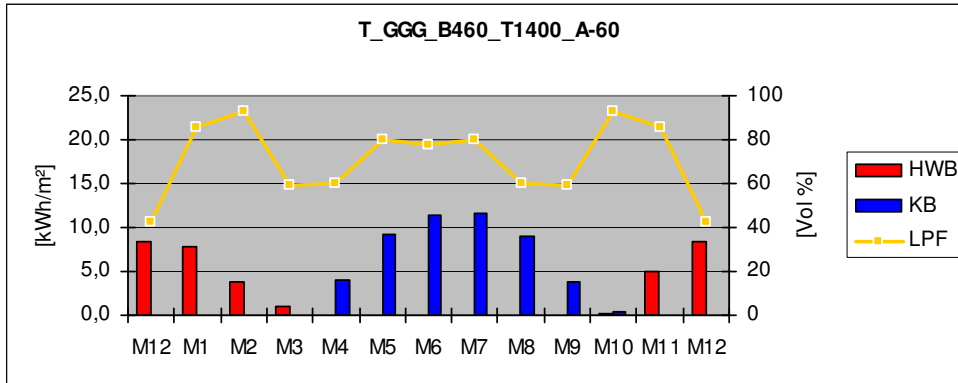


Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

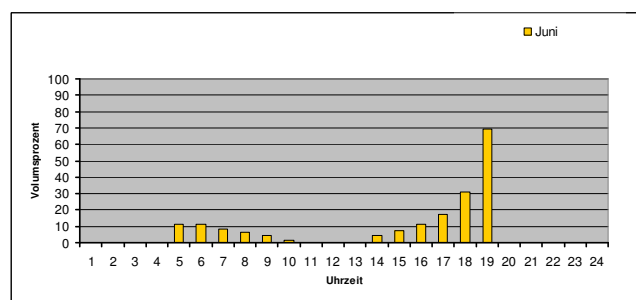
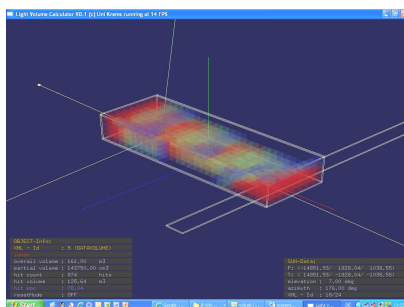
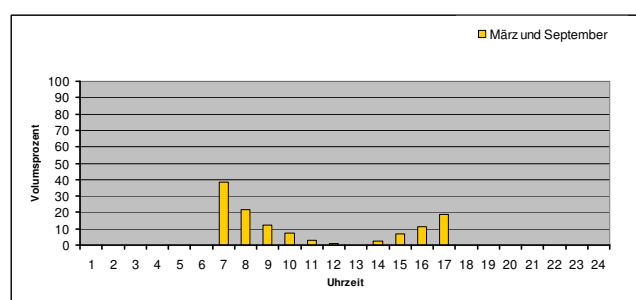
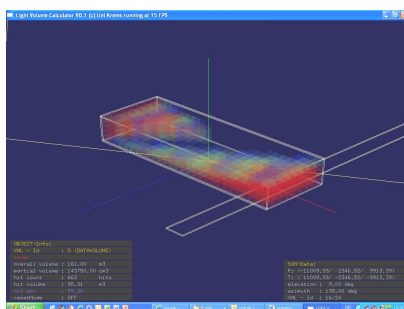
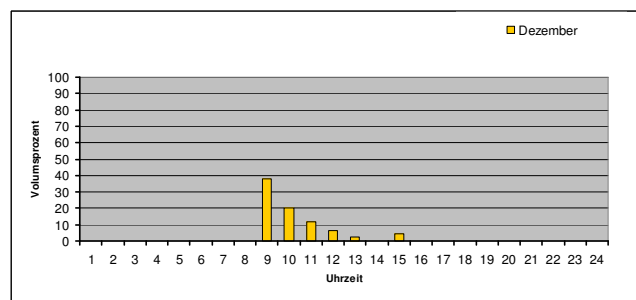
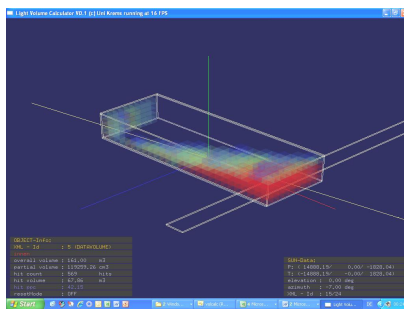
Datenblatt Typ T_GGG_B460_T1400_A-60



T_GGG_B460_T1400_A-60													Sum/Average	
LPF	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	73 %
HWB	8,4	7,9	3,8	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	5,1	8,4	26 kWh/m ²
KB	0,0	0,0	0,0	0,1	3,9	9,2	11,4	11,7	9,1	3,7	0,4	0,0	0,0	49 kWh/m ²

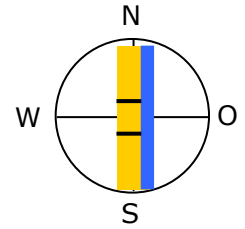


Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]

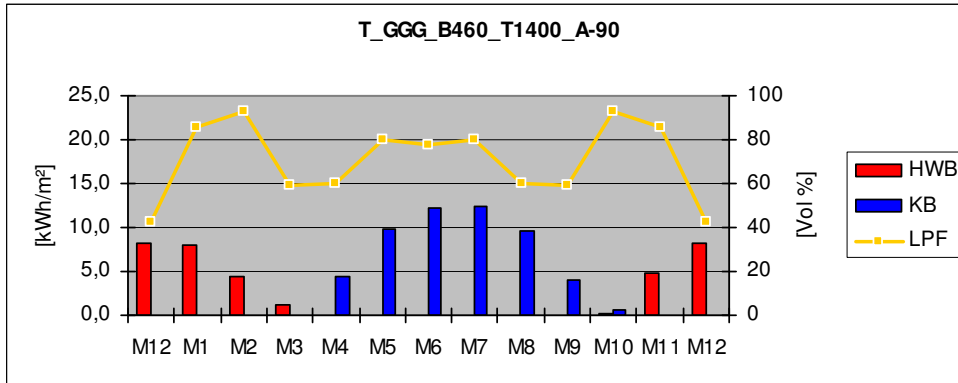


Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

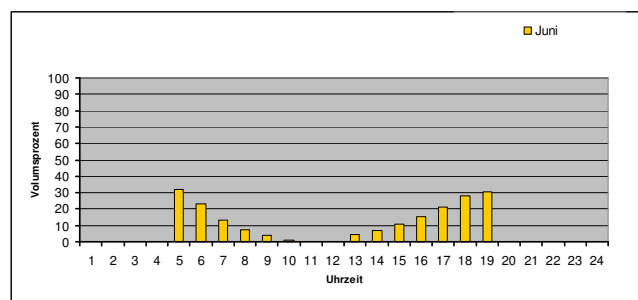
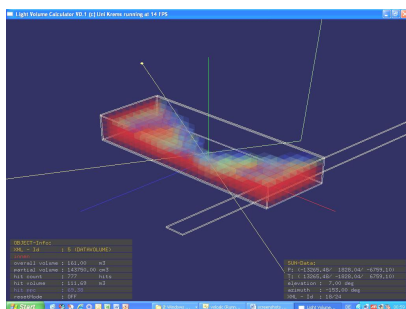
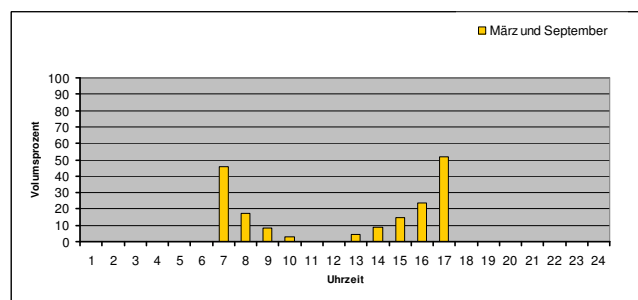
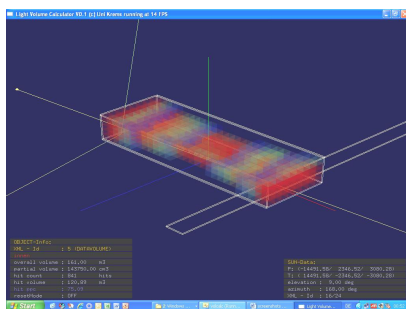
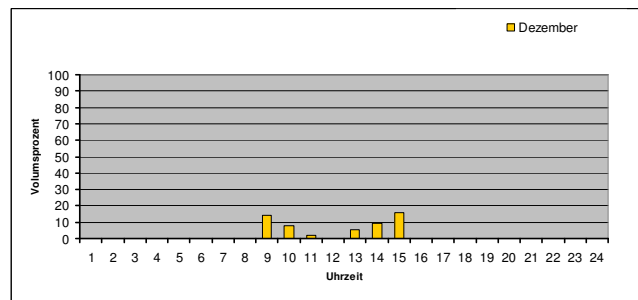
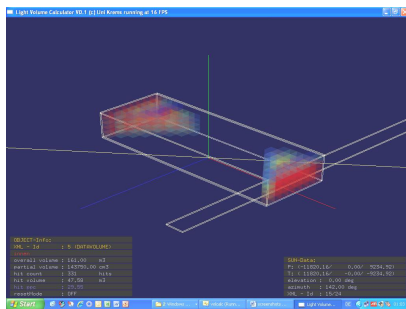
Datenblatt Typ T_GGG_B460_T1400_A-90



T_GGG_B460_T1400_A-90													Sum/Average	
LPF	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	69 %
HWB	8,3	8,0	4,4	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	4,9	8,3	27 kWh/m ²
KB	0,0	0,0	0,0	0,1	4,3	9,8	12,1	12,4	9,7	4,0	0,5	0,0	0,0	53 kWh/m ²

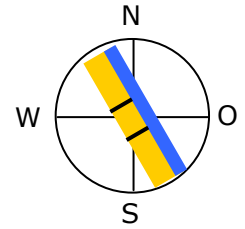


Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]

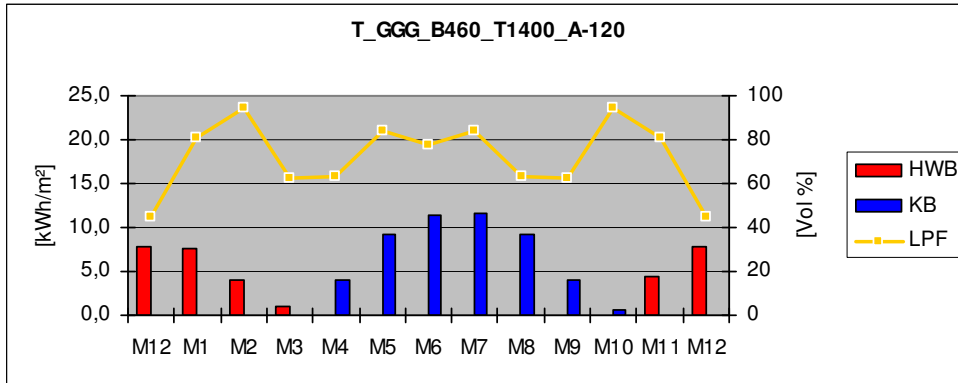


Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

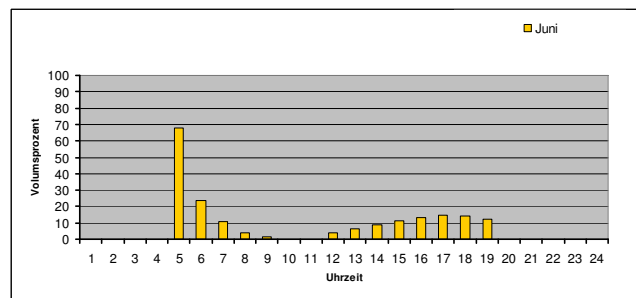
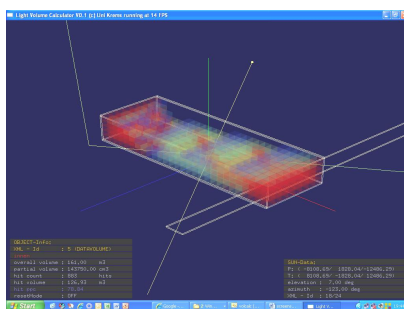
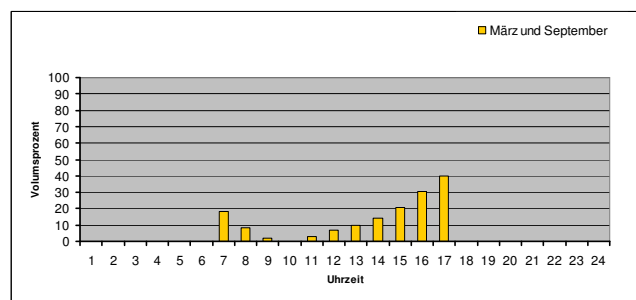
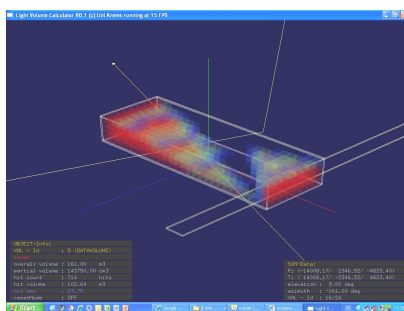
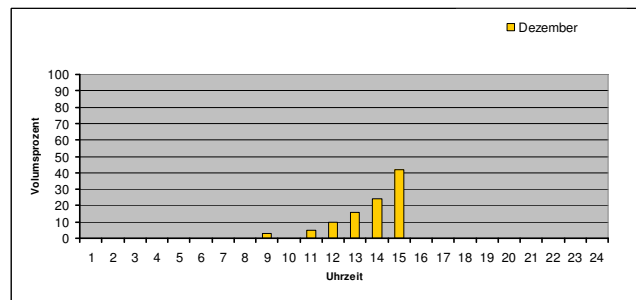
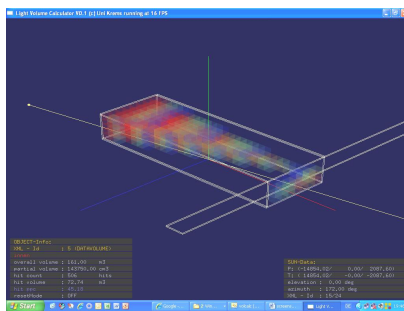
Datenblatt Typ T_GGG_B460_T1400_A-120



T_GGG_B460_T1400_A-120													Sum/Average	
LPF	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	74 %
HWB	7,8	7,5	4,0	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,3	7,8	25 kWh/m ²
KB	0,0	0,0	0,0	0,1	4,1	9,2	11,4	11,6	9,3	4,0	0,6	0,0	0,0	50 kWh/m ²

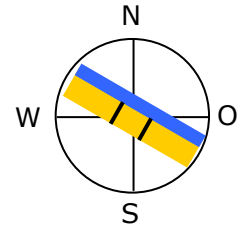


Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]

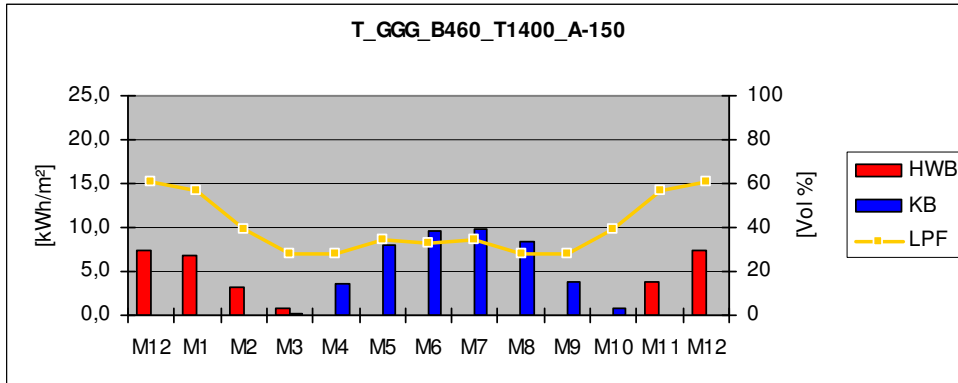


Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

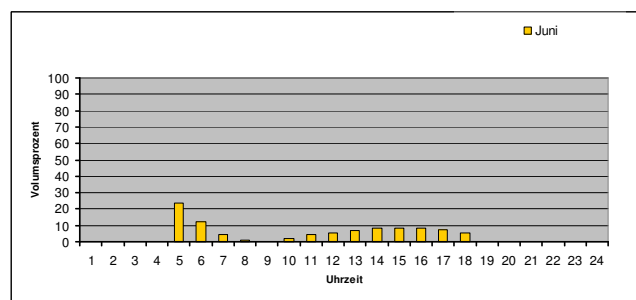
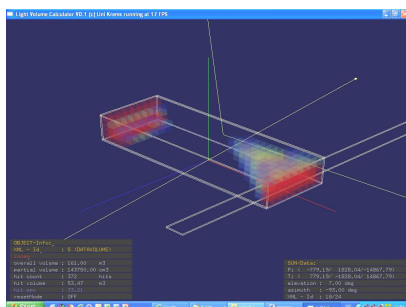
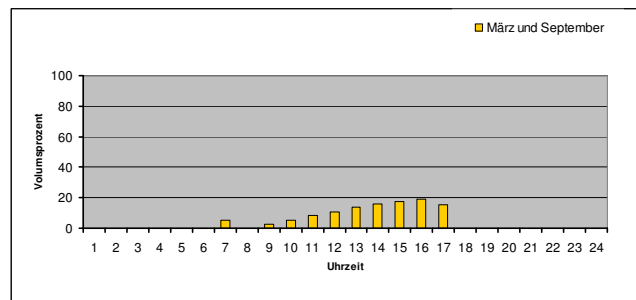
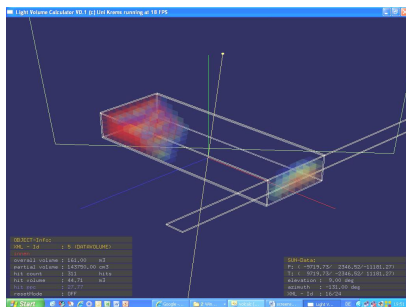
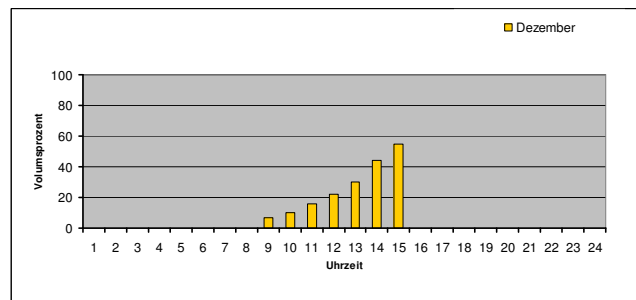
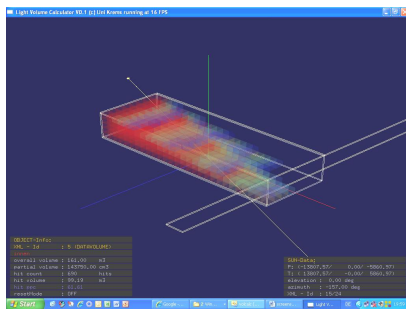
Datenblatt Typ T_GGG_B460_T1400_A-150



T_GGG_B460_T1400_A-150													Sum/Average	
LPF	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	39 %
HWB	7,4	6,9	3,2	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,9	7,4	22 kWh/m ²
KB	0,0	0,0	0,0	0,2	3,6	8,0	9,5	9,9	8,4	3,8	0,7	0,0	0,0	44 kWh/m ²



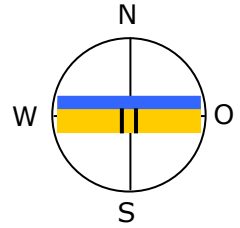
Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]



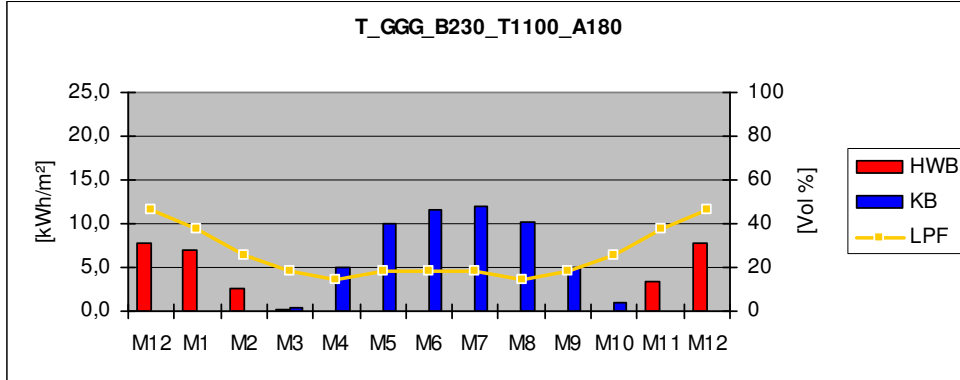
Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

20.2. Datenblätter zum Basismodell GGG_B230_T1100

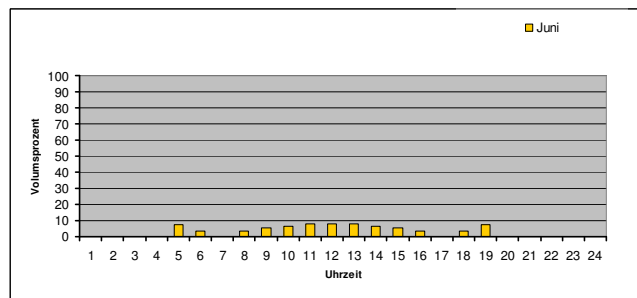
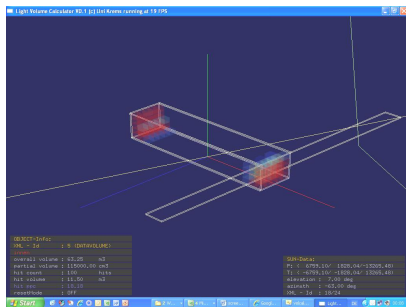
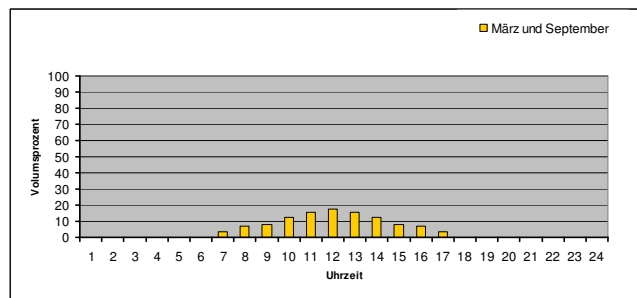
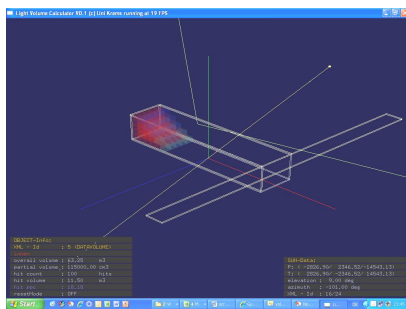
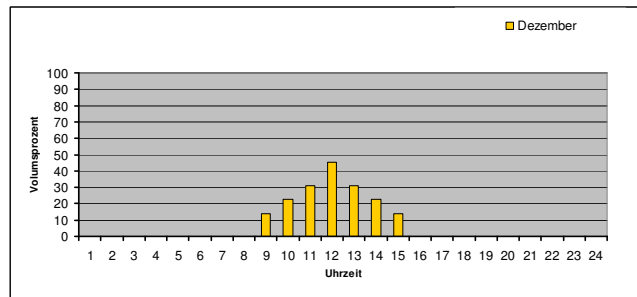
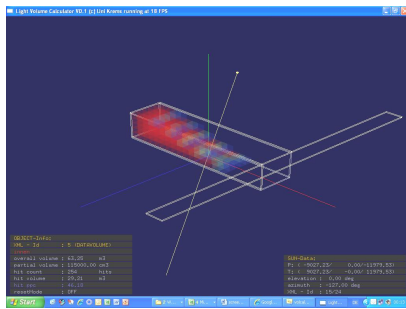
Datenblatt Typ T_GGG_B230_T1100_A180



T_GGG_B230_T1100_A180													Sum/Average	
LPF	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	24,46 %
HWB	46	38	26	18	15	18	18	18	15	18	26	38	46	21,10 kWh/m ²
KB	7,9	7,1	2,5	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,4	7,9	55,16 kWh/m ²
KB	0,0	0,0	0,0	0,3	5,0	9,9	11,6	12,0	10,3	4,9	1,1	0,0	0,0	

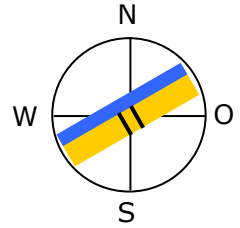


Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]

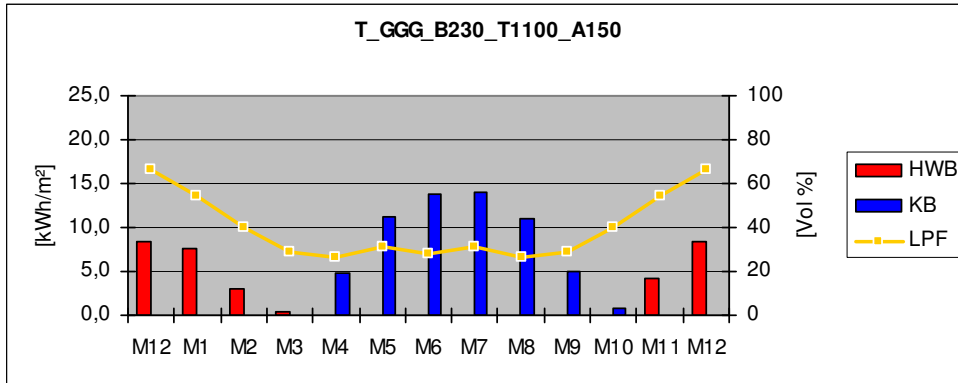


Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

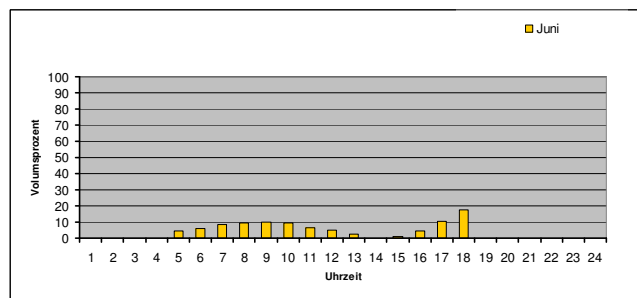
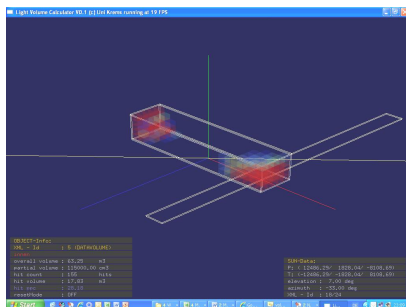
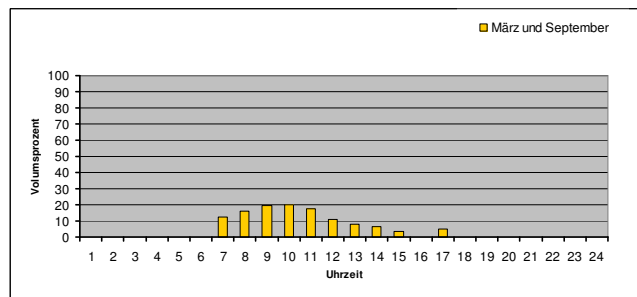
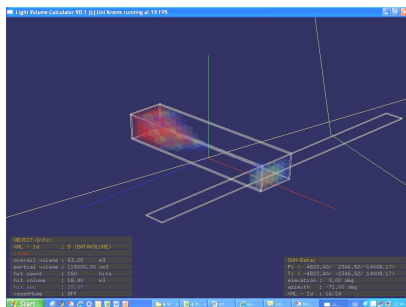
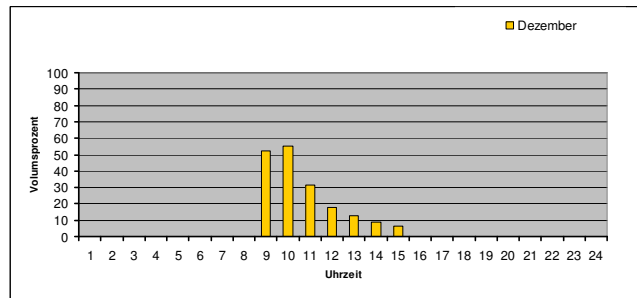
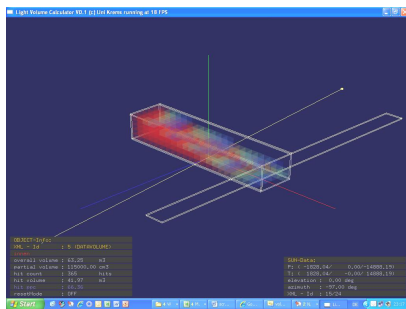
Datenblatt Typ T_GGG_B230_T1100_A150



T_GGG_B230_T1100_A150														
	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	Sum/Average
LPF	66	55	40	29	27	31	28	31	27	29	40	55	66	38,21 %
HWB	8,4	7,6	2,9	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,3	8,4	23,65 kWh/m ²
KB	0,0	0,0	0,0	0,1	4,9	11,1	13,7	14,0	11,0	4,9	0,7	0,0	0,0	60,42 kWh/m ²

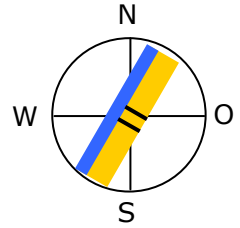


Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]

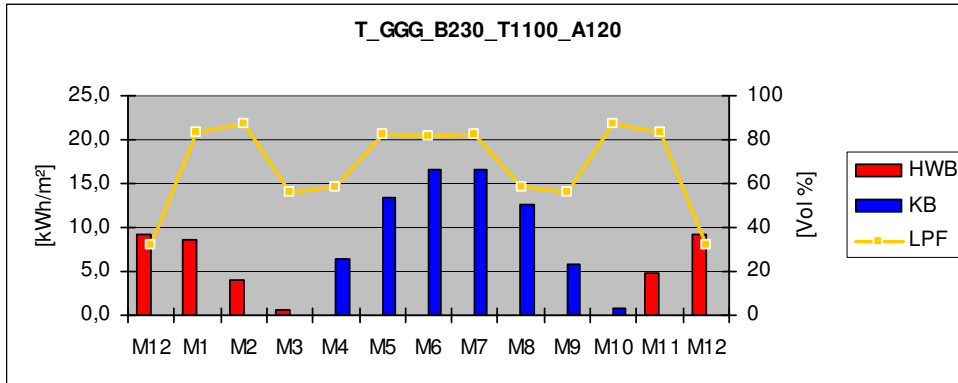


Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

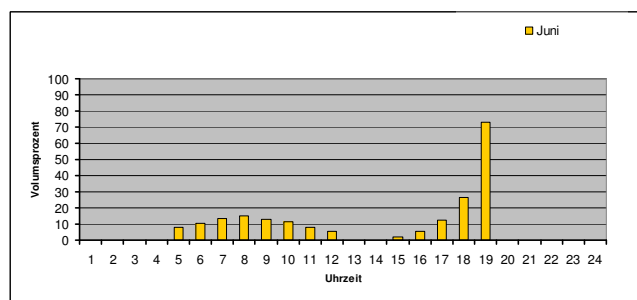
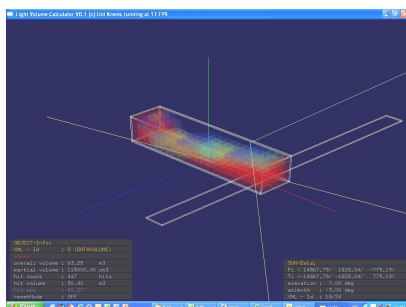
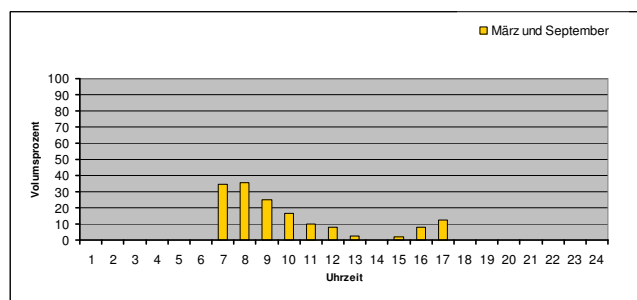
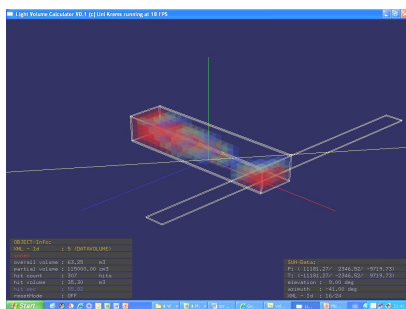
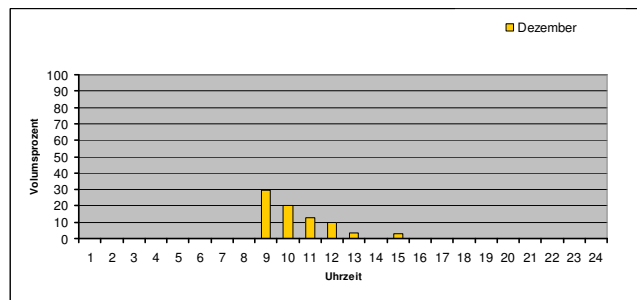
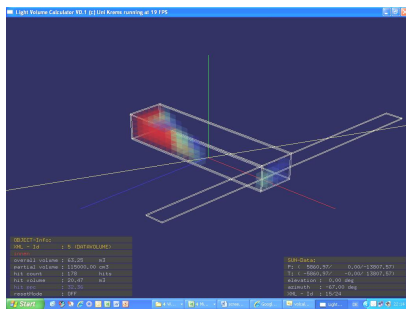
Datenblatt Typ T_GGG_B230_T1100_A120



T_GGG_B230_T1100_A120													Sum/Average	
LPF	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	70,59 %
HWB	9,2	8,6	3,9	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,8	9,2	27,11 kWh/m ²	
KB	0,0	0,0	0,0	0,1	6,4	13,5	16,5	16,5	12,7	5,8	0,8	0,0	72,18 kWh/m ²	

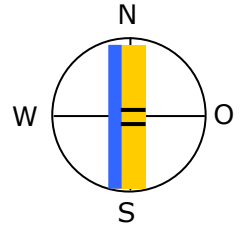


Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]

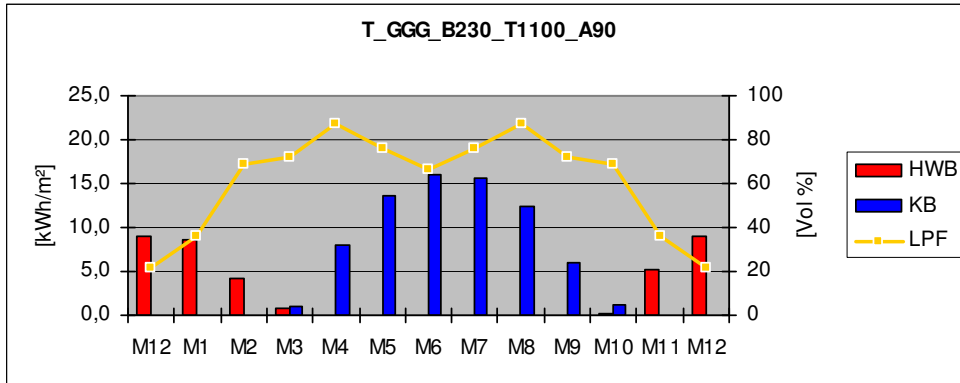


Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

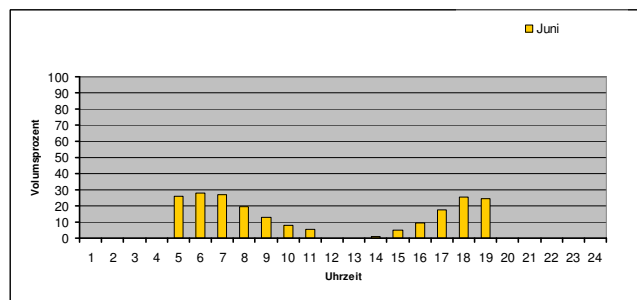
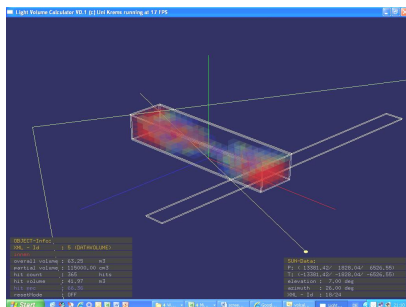
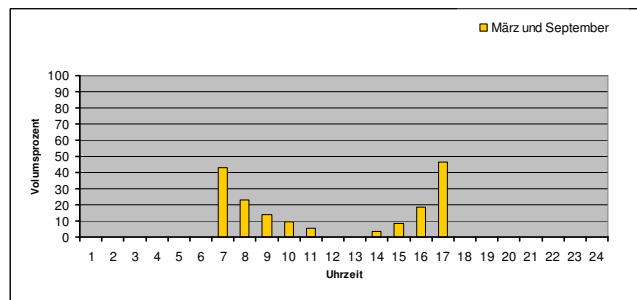
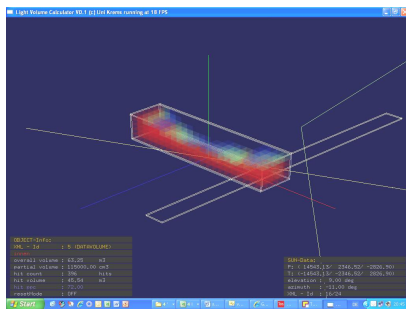
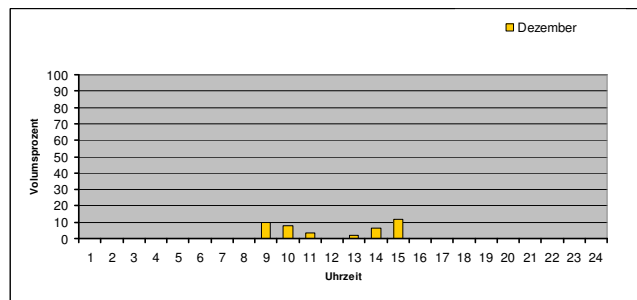
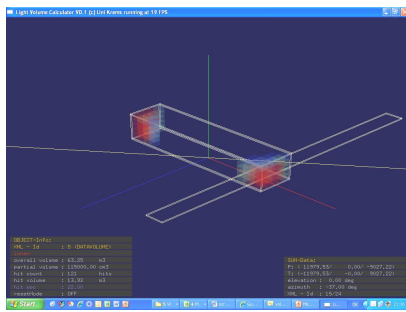
Datenblatt Typ T_GGG_B230_T1100_A90



T_GGG_B230_T1100_A90														
	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	Sum/Average
LPF	22	36	69	72	87	76	66	76	87	72	69	36	22	64,09 %
HWB	9,1	8,6	4,2	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	5,2	9,1	28,28 kWh/m ²
KB	0,0	0,0	0,0	0,9	8,0	13,6	16,0	15,7	12,3	6,1	1,2	0,0	0,0	73,84 kWh/m ²

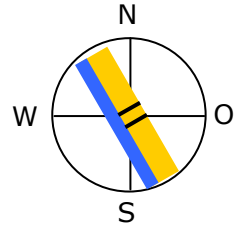


Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]

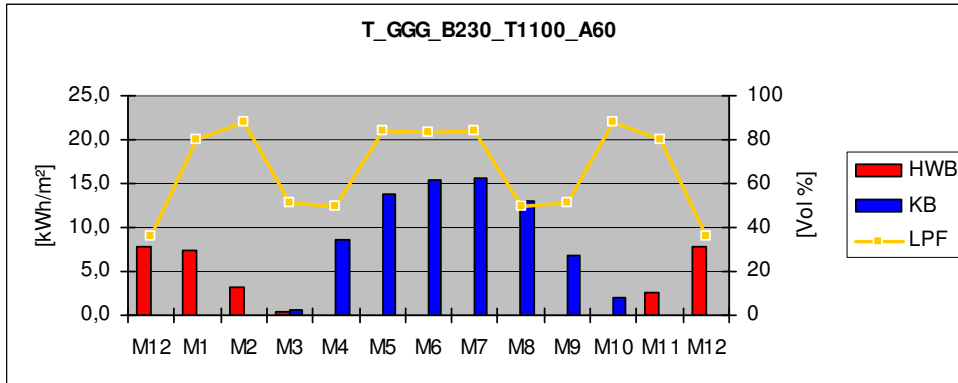


Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

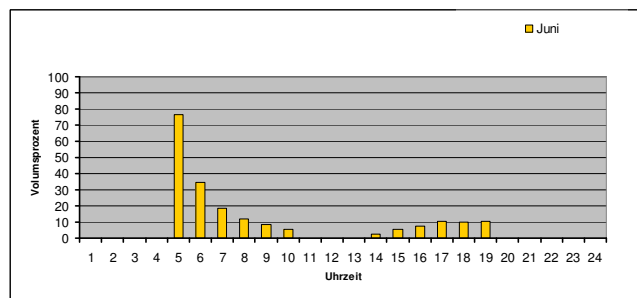
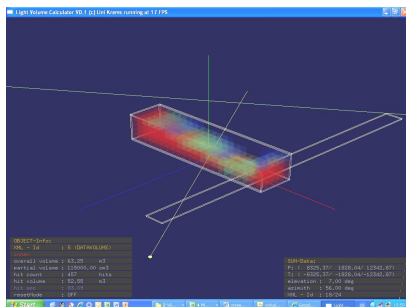
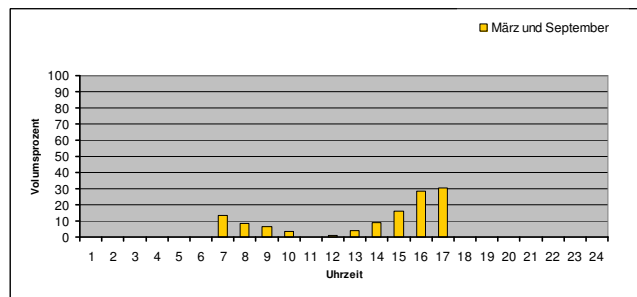
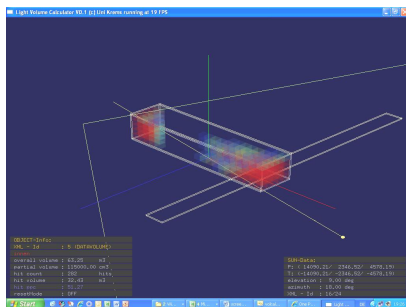
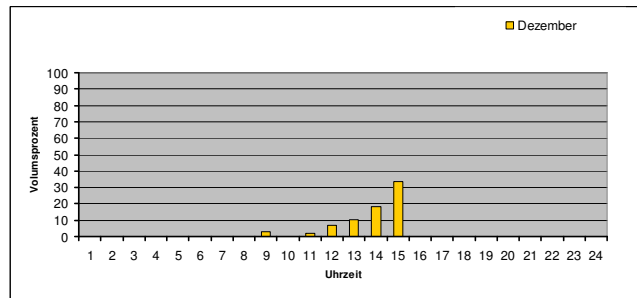
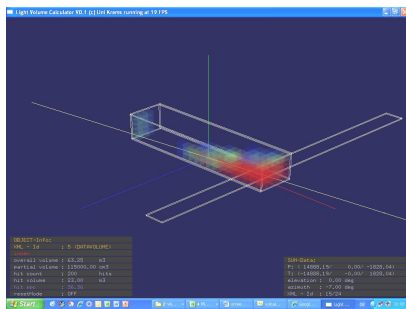
Datenblatt Typ T_GGG_B230_T1100_A60



T_GGG_B230_T1100_A60														
	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	Sum/Average
LPF	36	80	88	51	50	84	83	84	50	51	88	80	36	68,71 %
HWB	7,8	7,4	3,2	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,7	7,8	21,62 kWh/m ²
KB	0,0	0,0	0,0	0,7	8,6	13,8	15,5	15,6	13,0	6,8	2,1	0,0	0,0	76,02 kWh/m ²

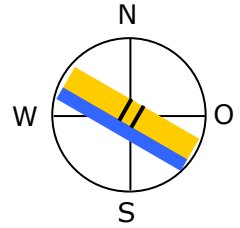


Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]

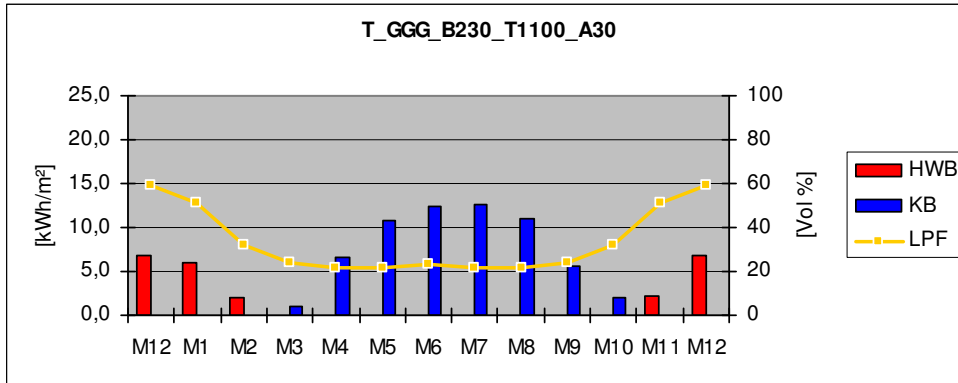


Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

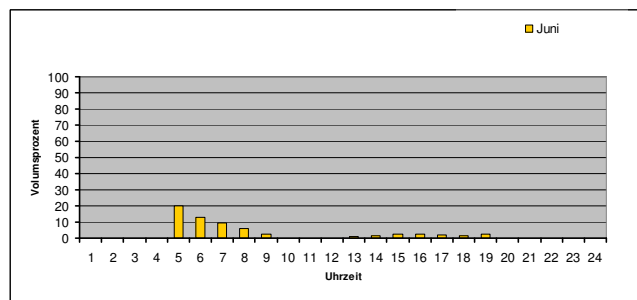
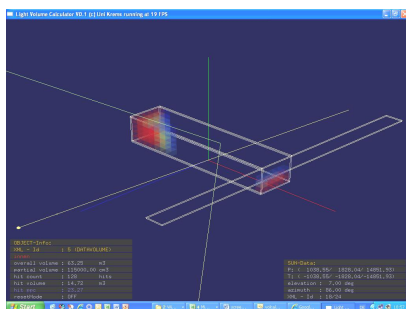
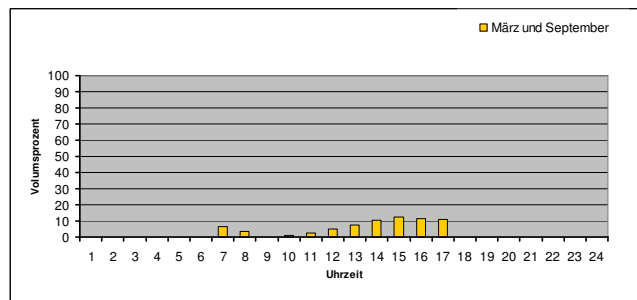
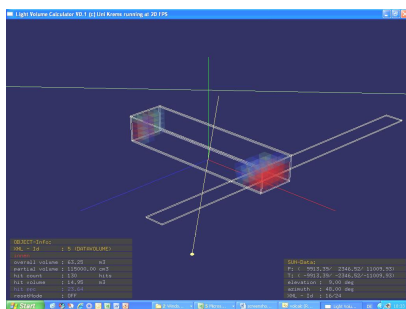
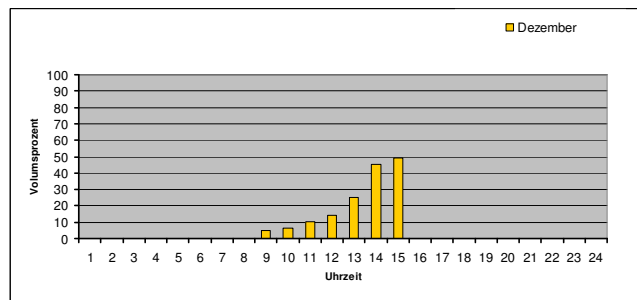
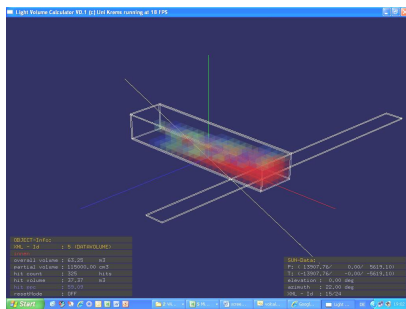
Datenblatt Typ T_GGG_B230_T1100_A30



T_GGG_B230_T1100_A30													Sum/Average	
LPF	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	31,77 %
HWB	6,8	6,0	1,9	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,2	6,8	16,97 kWh/m ²	
KB	0,0	0,0	0,0	1,0	6,7	10,8	12,3	12,6	10,9	5,7	2,0	0,0	62,09 kWh/m ²	

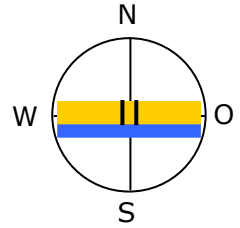


Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]

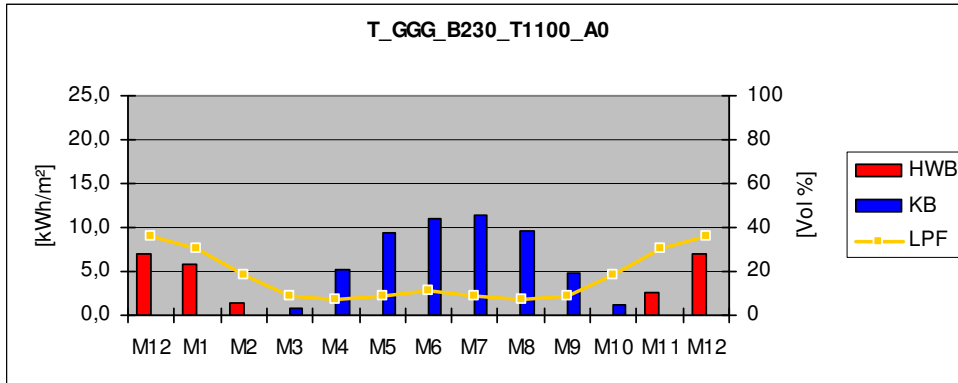


Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

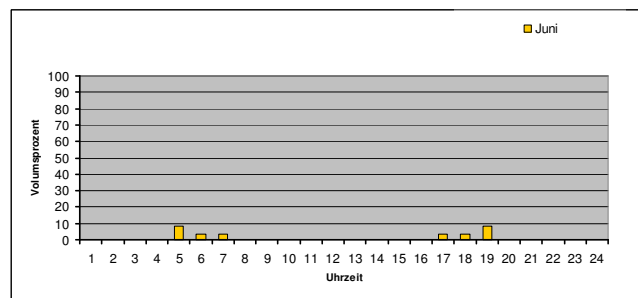
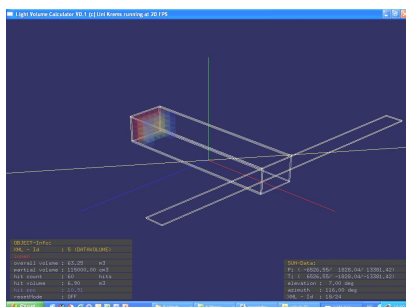
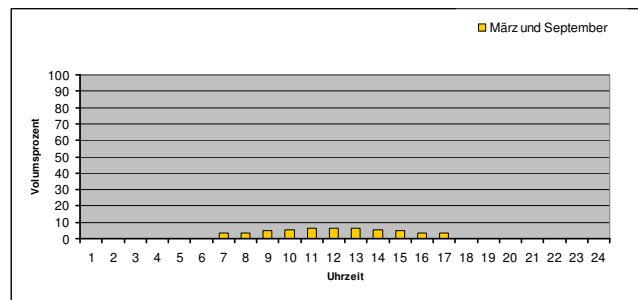
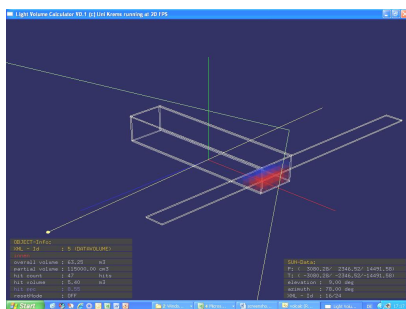
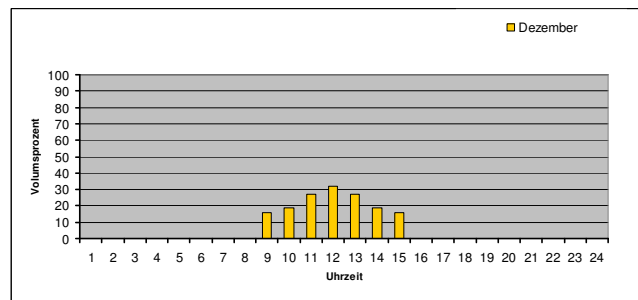
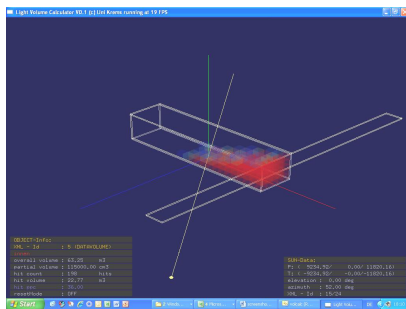
Datenblatt Typ T_GGG_B230_T1100_A0



T_GGG_B230_T1100_A0													Sum/Average	
LPF	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	16,21 %
HWB	6,9	5,7	1,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,6	6,9	16,67 kWh/m ²
KB	0,0	0,0	0,0	0,9	5,2	9,4	11,0	11,4	9,7	4,8	1,3	0,0	0,0	53,56 kWh/m ²

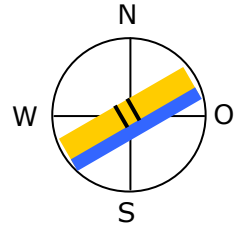


Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]

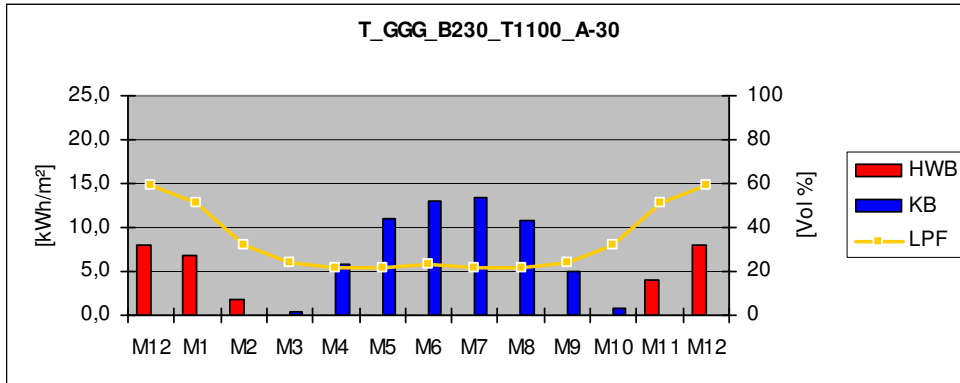


Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

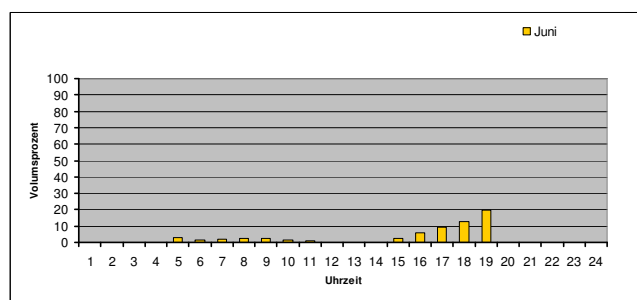
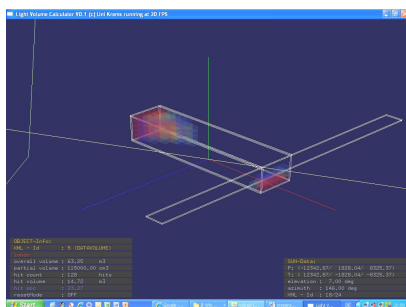
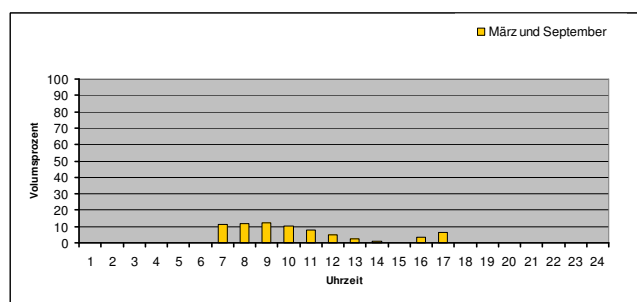
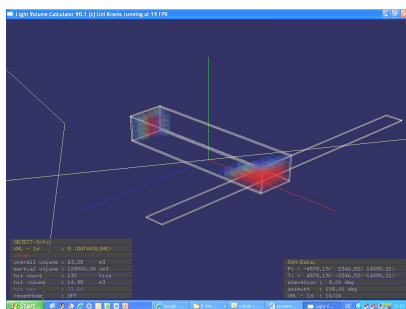
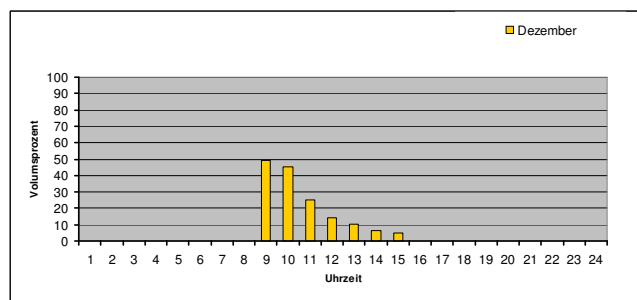
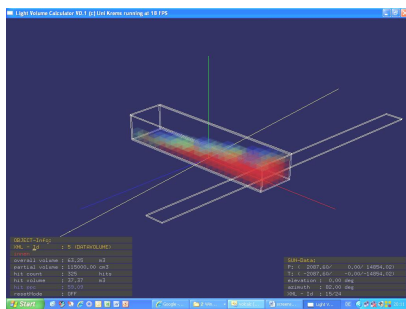
Datenblatt Typ T_GGG_B230_T1100_A-30



T_GGG_B230_T1100_A-30													Sum/Average			
LPF	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12			31,77 %
HWB	8,0	6,8	1,9	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,9	8,0			20,74 kWh/m ²
KB	0,0	0,0	0,0	0,5	5,8	11,0	13,0	13,4	10,8	5,1	0,9	0,0	0,0			60,44 kWh/m ²

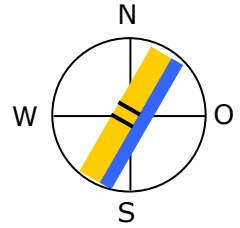


Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]

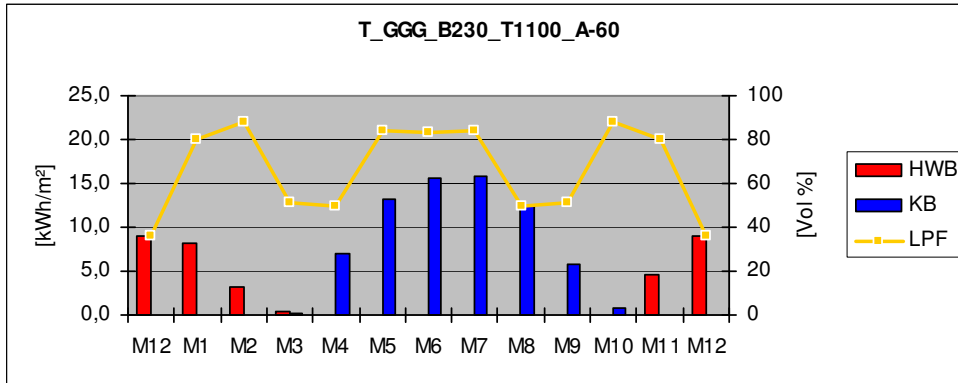


Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

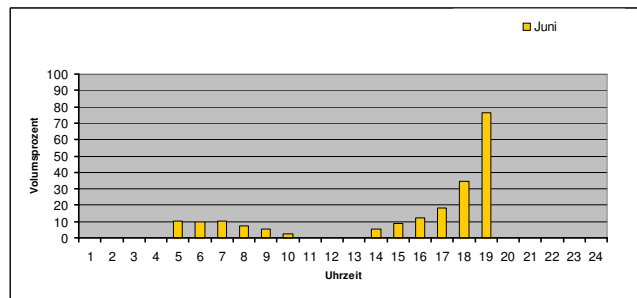
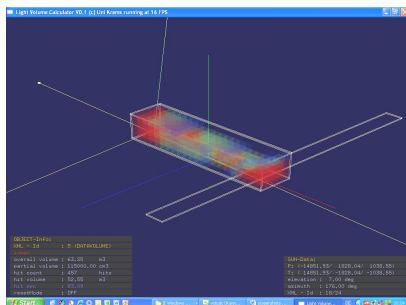
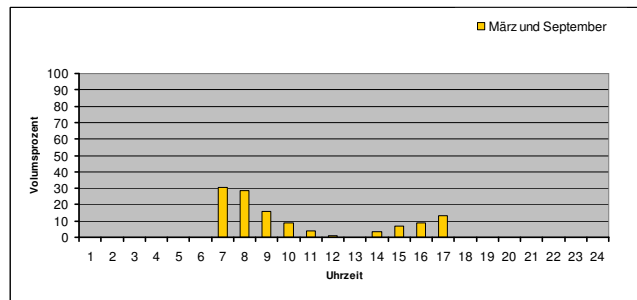
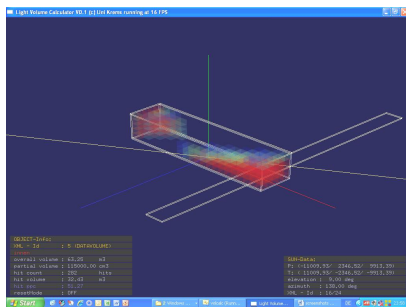
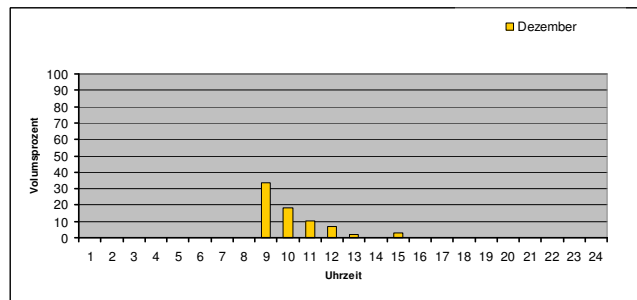
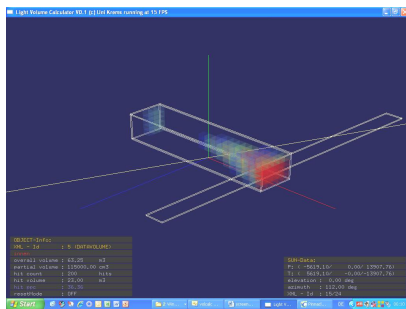
Datenblatt Typ T_GGG_B230_T1100_A-60



T_GGG_B230_T1100_A-60													Sum/Average	
LPF	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	68,71 %
HWB	9,1	8,3	3,3	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,6	9,1	25,59 kWh/m ²
KB	0,0	0,0	0,0	0,2	6,9	13,2	15,6	15,8	12,5	5,8	0,9	0,0	0,0	70,89 kWh/m ²

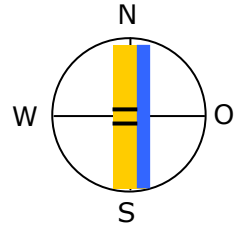


Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]

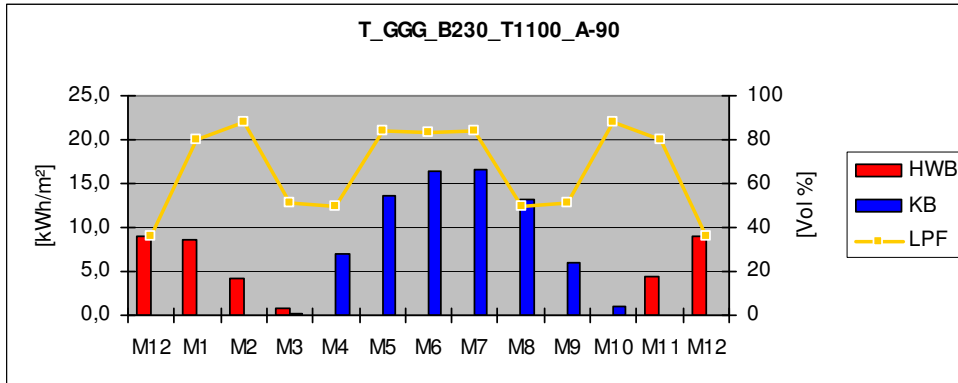


Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

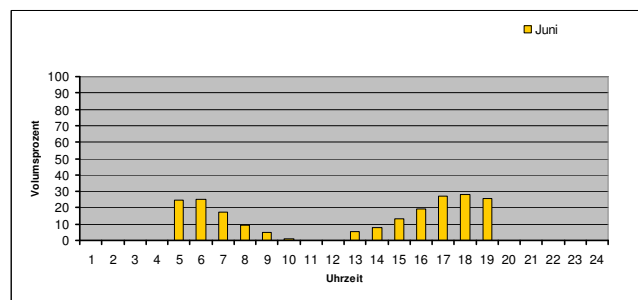
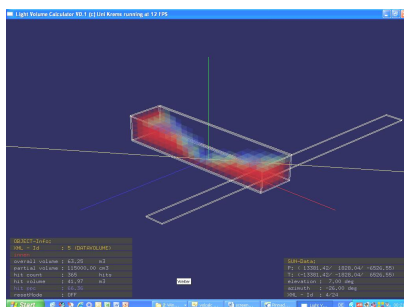
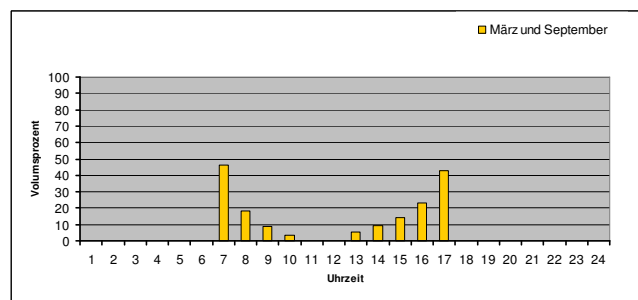
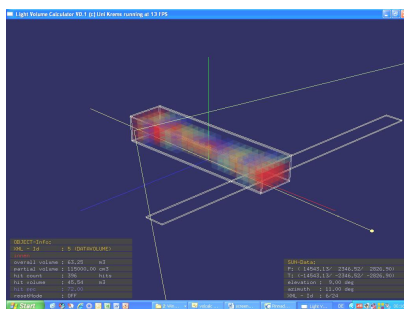
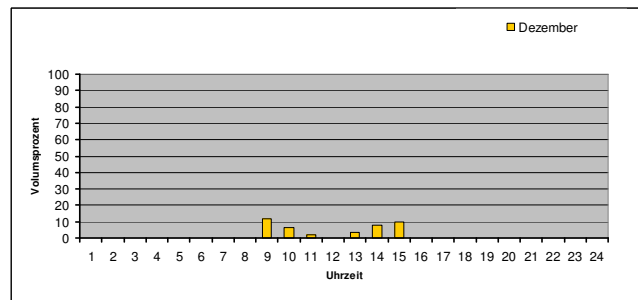
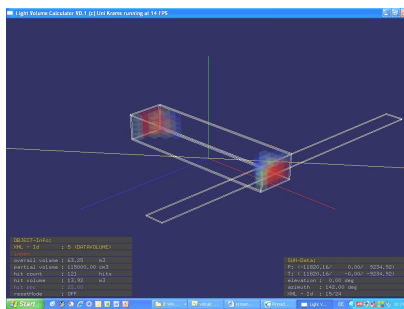
Datenblatt Typ T_GGG_B230_T1100_A-90



T_GGG_B230_T1100_A-90													Sum/Average	
LPF	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	64,09 %
HWB	9,0	8,6	4,2	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,4	9,0	26,93 kWh/m ²
KB	0,0	0,0	0,0	0,1	7,1	13,7	16,5	16,7	13,1	6,0	1,0	0,0	0,0	74,17 kWh/m ²

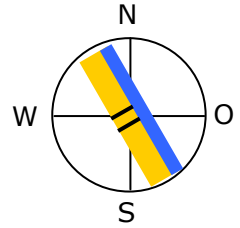


Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]

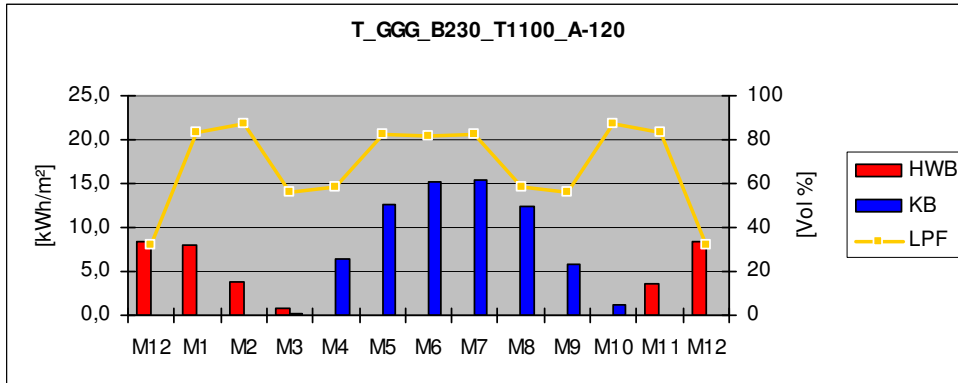


Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

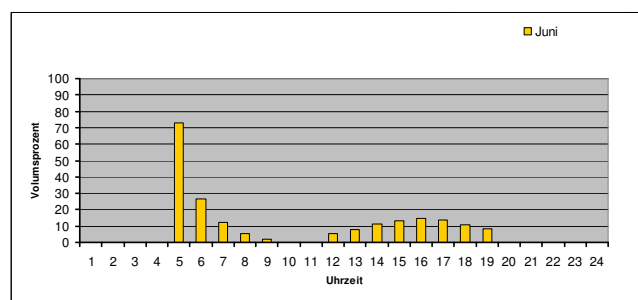
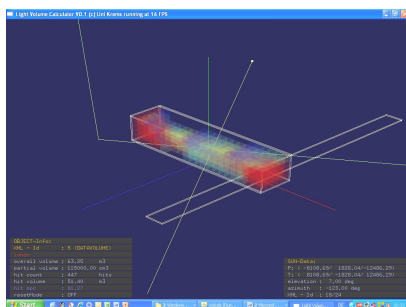
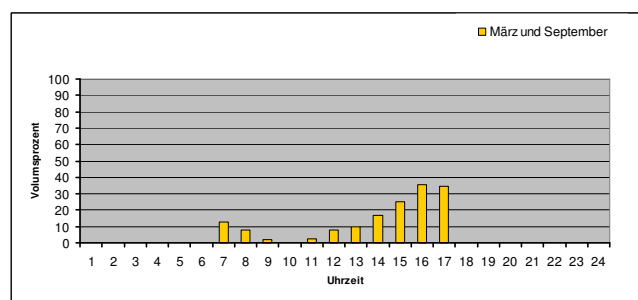
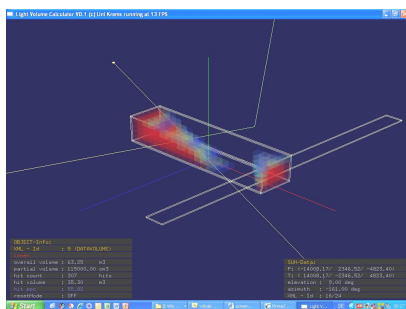
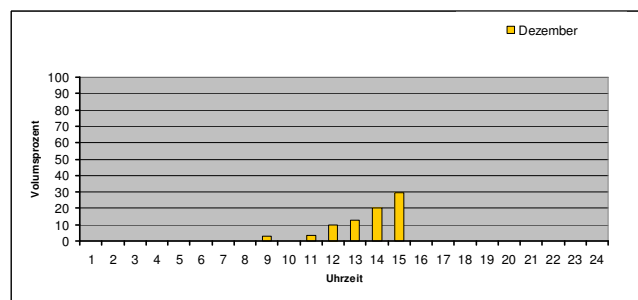
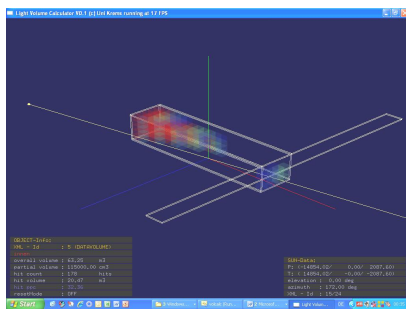
Datenblatt Typ T_GGG_B230_T1100_A-120



T_GGG_B230_T1100_A-120														
	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	Sum/Average
LPF	32	83	87	56	58	82	81	82	58	56	87	83	32	70,59 %
HWB	8,4	8,0	3,9	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,6	8,4	24,63 kWh/m ²
KB	0,0	0,0	0,0	0,1	6,4	12,6	15,3	15,4	12,5	5,8	1,2	0,0	0,0	69,34 kWh/m ²

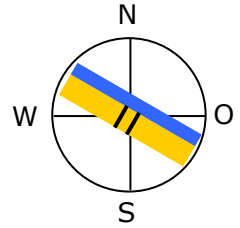


Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]

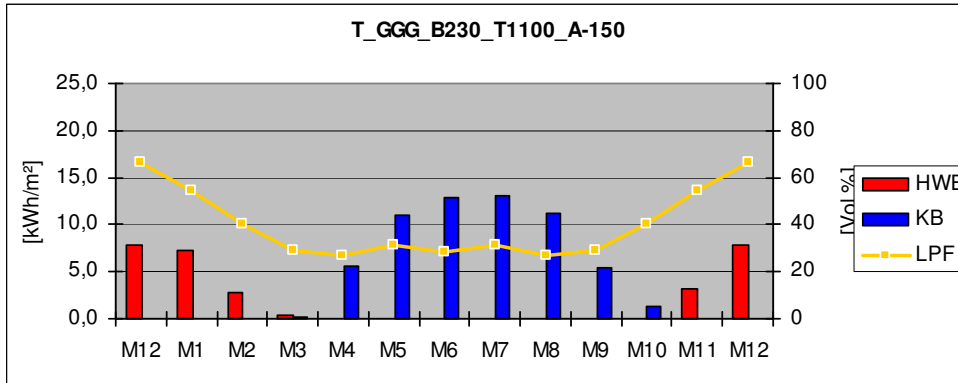


Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

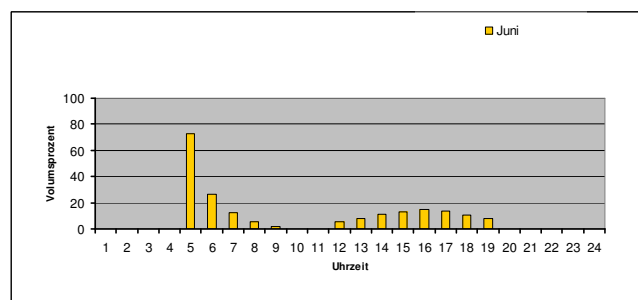
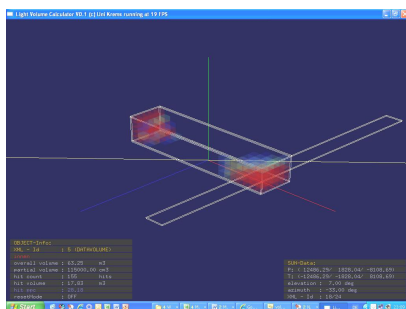
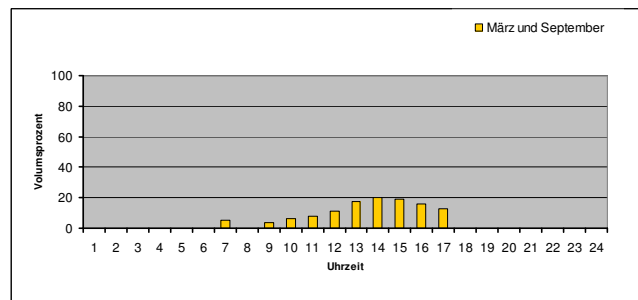
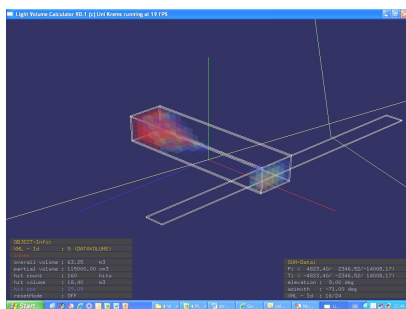
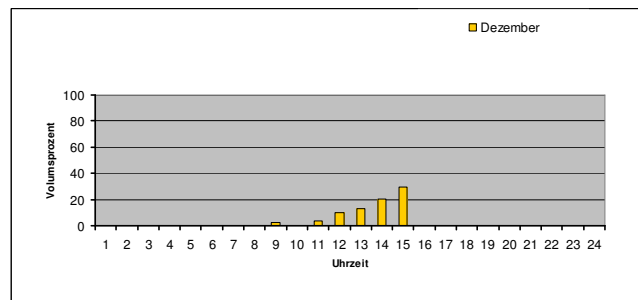
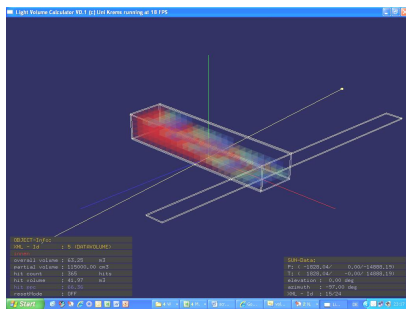
Datenblatt Typ T_GGG_B230_T1100_A-150



T_GGG_B230_T1100_A-150														
	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	Sum/Average
LPF	66	55	40	29	27	31	28	31	27	29	40	55	66	38,21 %
HWB	7,9	7,3	2,9	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,2	7,9	21,60 kWh/m ²
KB	0,0	0,0	0,0	0,3	5,7	11,0	12,8	13,1	11,2	5,4	1,3	0,0	0,0	60,74 kWh/m ²



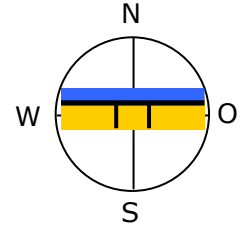
Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]



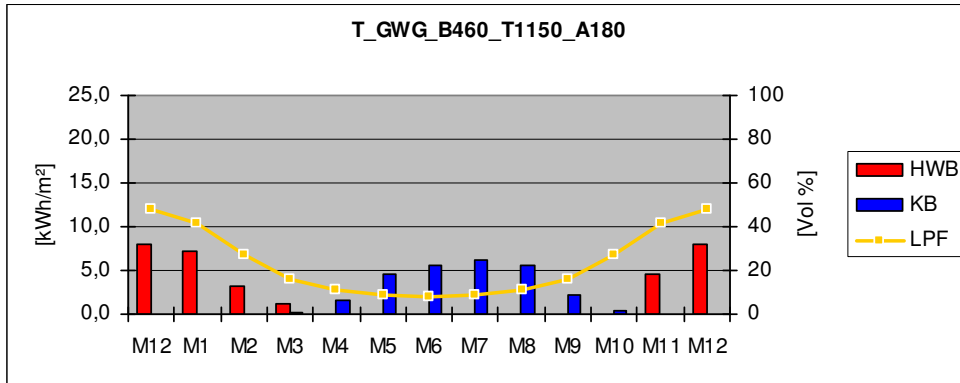
Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

20.3. Datenblätter zum Basismodell GWG_B460_T1150

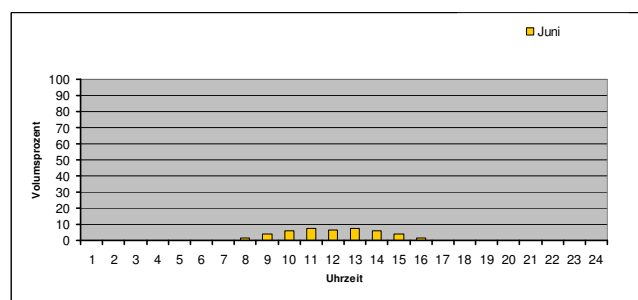
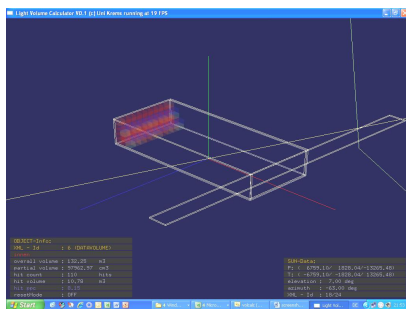
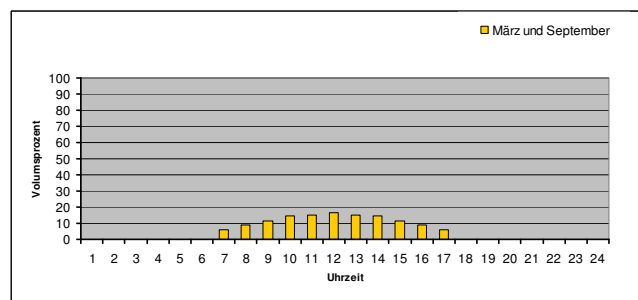
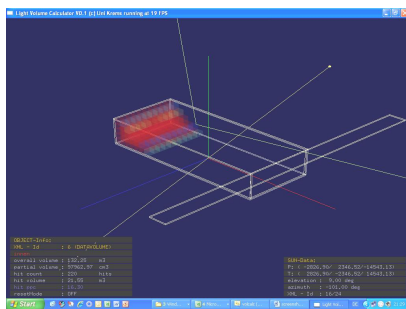
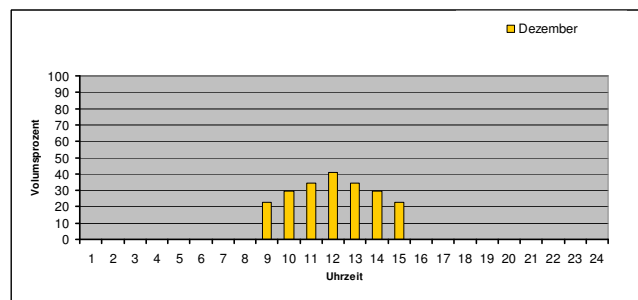
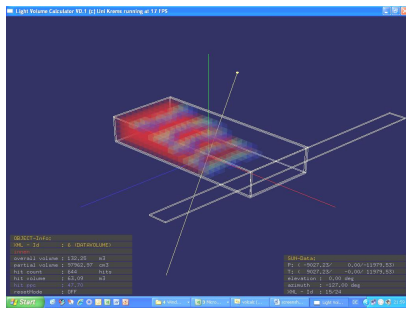
Datenblatt Typ T_GWG_B460_T1150_A180



T_GWG_B460_T1150_A180														
	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	Sum/Average
LPF	48	42	27	16	11	8	8	8	11	16	27	42	48	22,09 %
HWB	7,9	7,3	3,1	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	4,7	7,9	24,25 kWh/m ²
KB	0,0	0,0	0,0	0,1	1,7	4,7	5,6	6,3	5,6	2,1	0,3	0,0	0,0	26,40 kWh/m ²

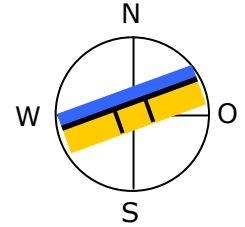


Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]

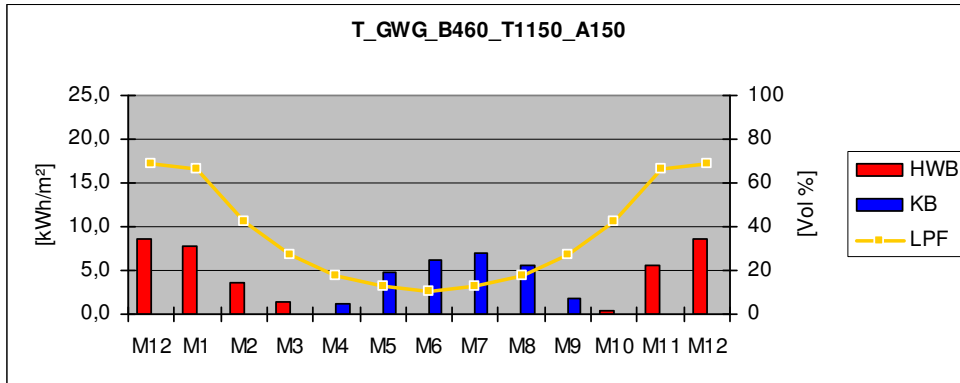


Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

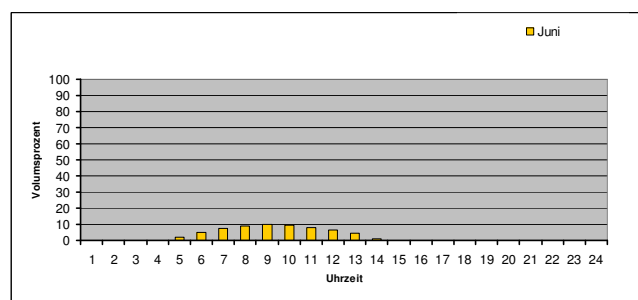
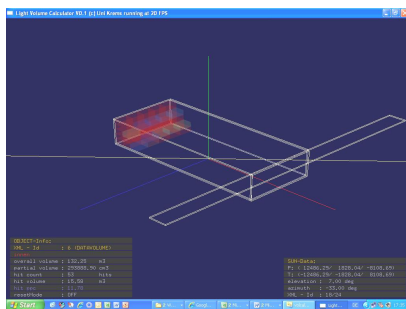
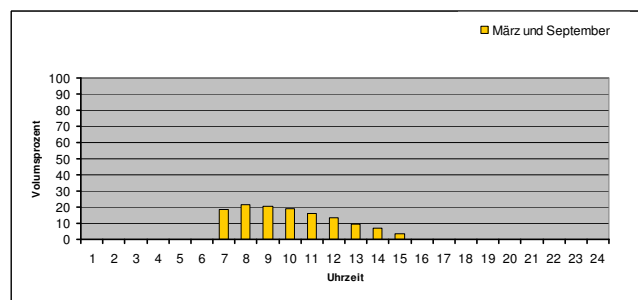
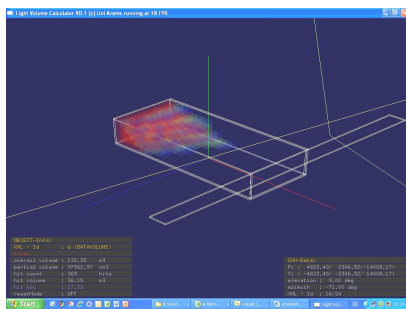
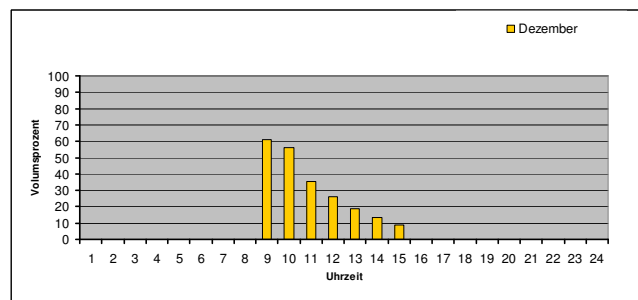
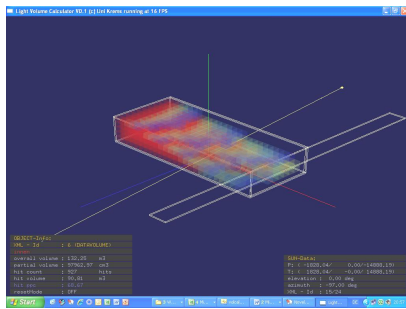
Datenblatt Typ T_GWG_B460_T1150_A150



T_GWG_B460_T1150_A150														
	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	Sum/Average
LPF	69	66	43	27	18	13	11	13	18	27	43	66	69	34,35 %
HWB	8,6	7,9	3,7	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	5,6	8,6		27,65 kWh/m ²
KB	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1	4,8	6,2	7,0	5,6	1,8	0,1	0,0	0,0	26,68 kWh/m ²

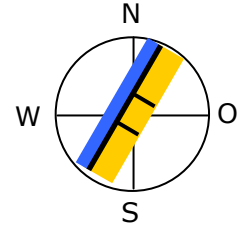


Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]

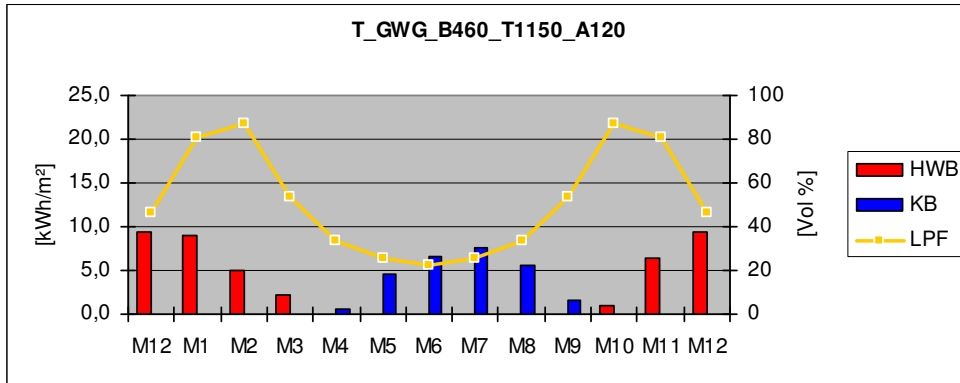


Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

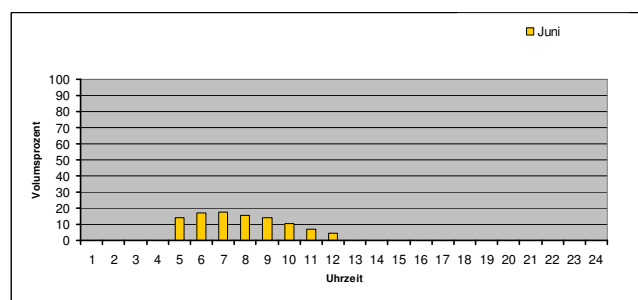
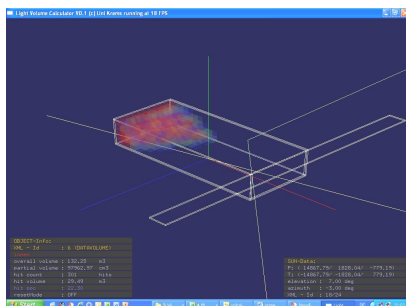
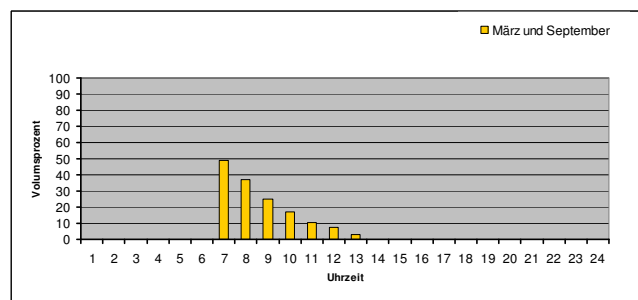
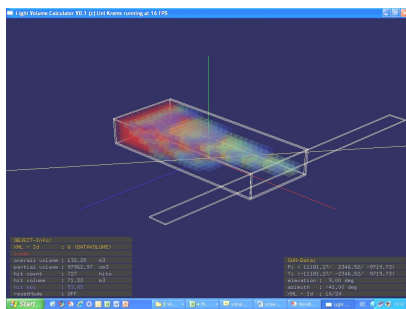
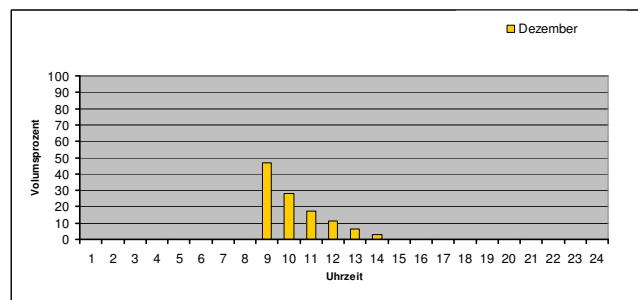
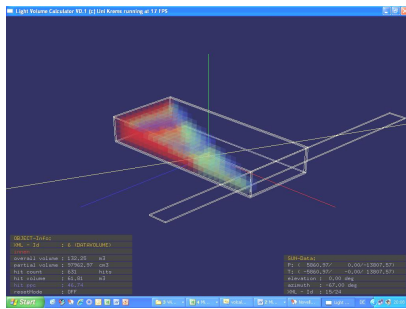
Datenblatt Typ T_GWG_B460_T1150_A120



T_GWG_B460_T1150_A120														
	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	Sum/Average
LPF	47	80	87	54	34	25	22	25	34	54	87	80	47	52,52 %
HWB	9,4	9,0	5,0	2,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9	6,3	9,4	32,79 kWh/m ²
KB	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	4,6	6,7	7,6	5,6	1,5	0,0	0,0	0,0	26,48 kWh/m ²

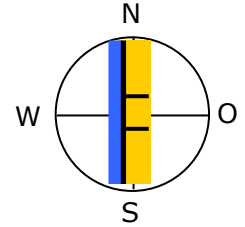


Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]

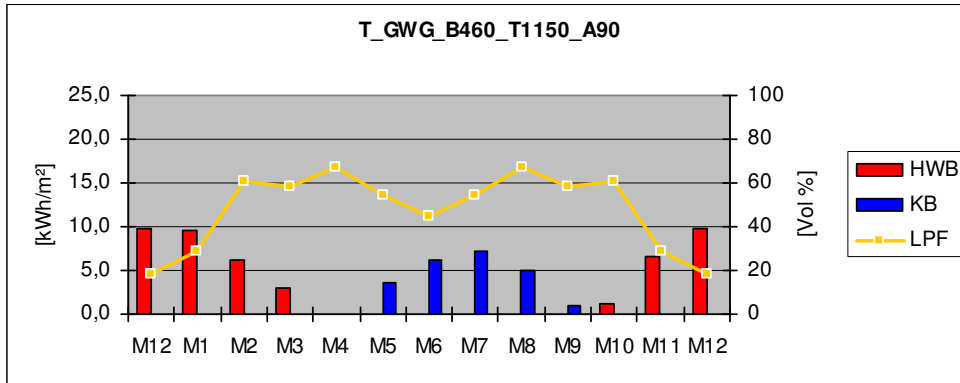


Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

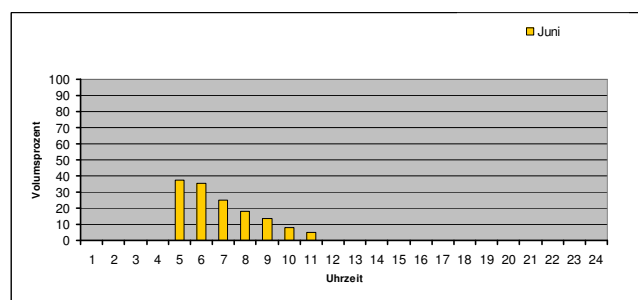
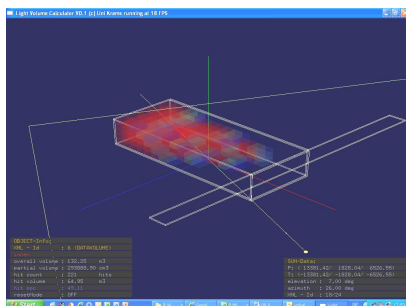
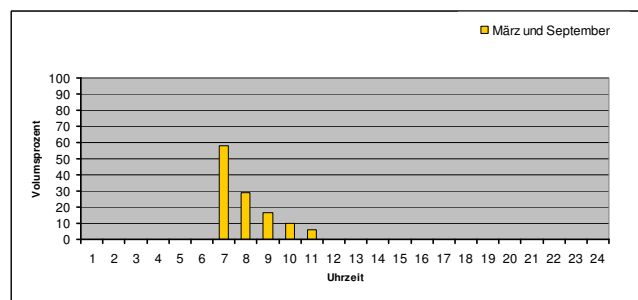
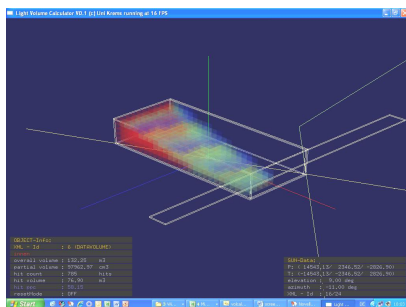
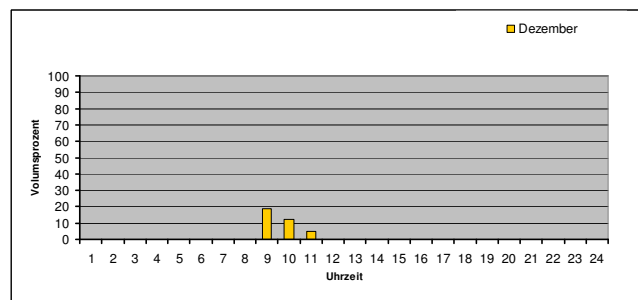
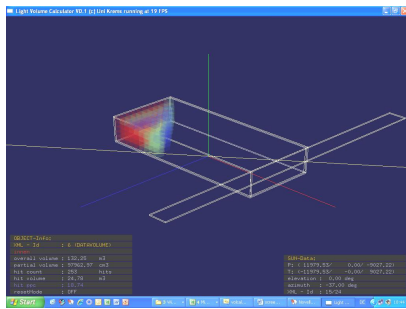
Datenblatt Typ T_GWG_B460_T1150_A90



T_GWG_B460_T1150_A90														
	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	Sum/Average
LPF	19	29	61	58	67	54	45	54	67	58	61	29	19	50,22 %
HWB	9,8	9,6	6,2	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,3	6,7	9,8	36,57 kWh/m ²
KB	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,6	6,3	7,2	5,0	1,1	0,0	0,0	0,0	23,17 kWh/m ²

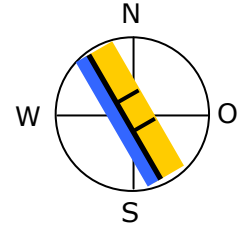


Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]

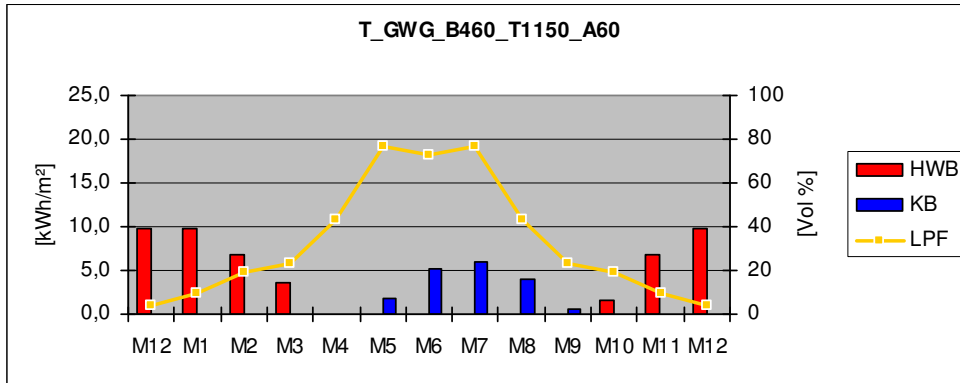


Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

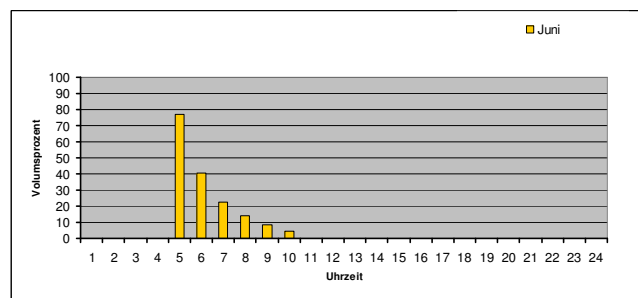
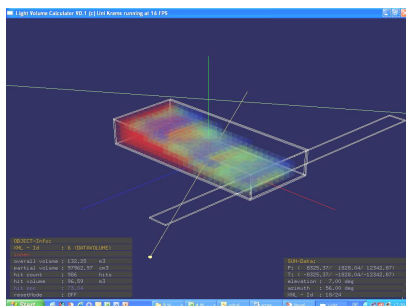
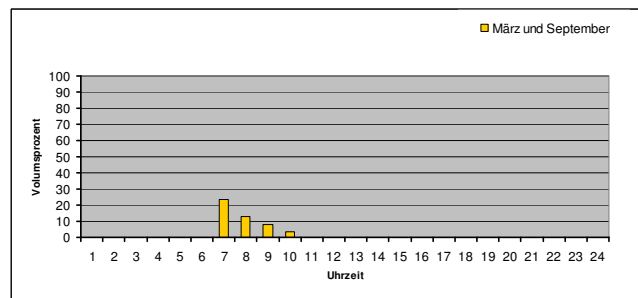
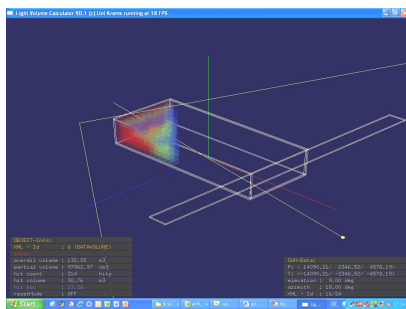
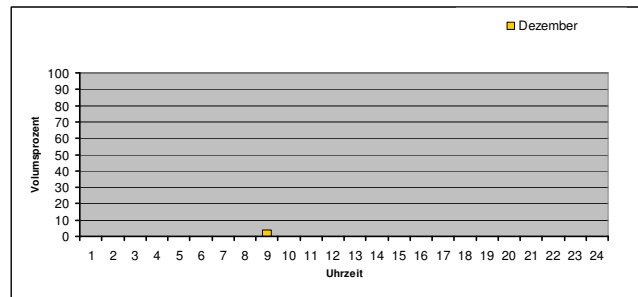
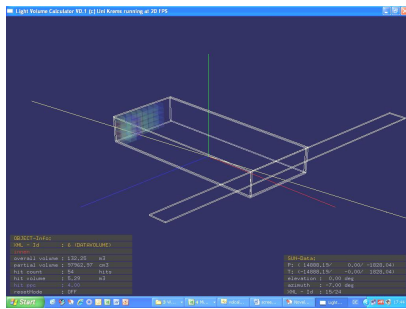
Datenblatt Typ T_GWG_B460_T1150_A60



T_GWG_B460_T1150_A60														
	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	Sum/Average
LPF	4	10	19	23	43	77	73	77	43	23	19	10	4	35,20 %
HWB	9,7	9,8	6,8	3,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,5	6,7	9,7	38,22 kWh/m ²
KB	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,8	5,2	6,0	4,0	0,6	0,0	0,0	0,0	17,51 kWh/m ²

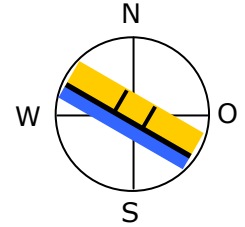


Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]

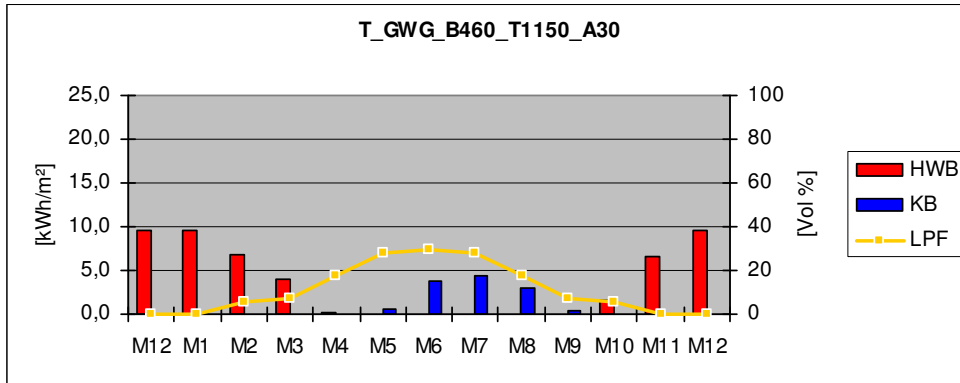


Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

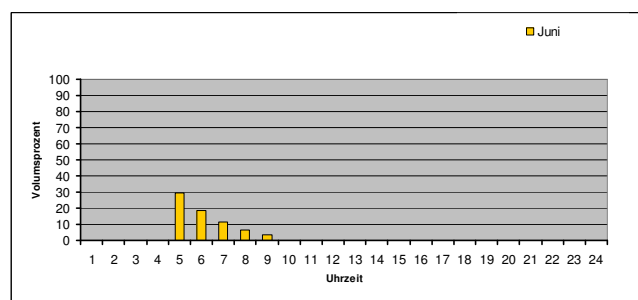
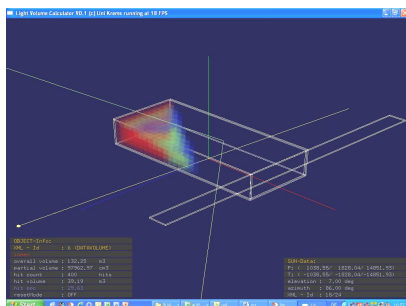
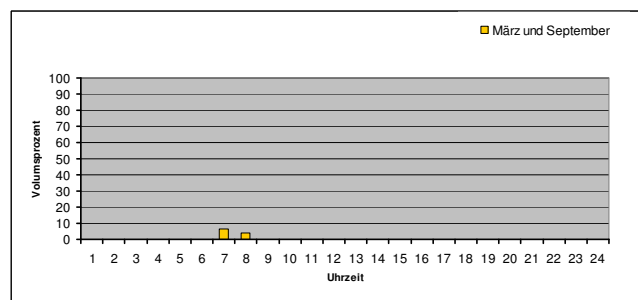
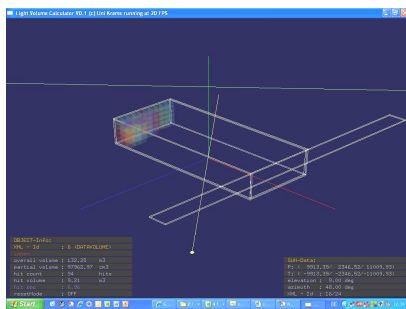
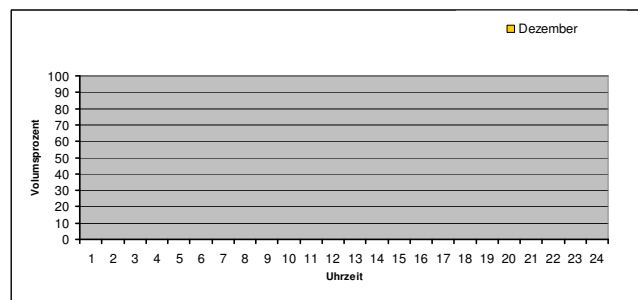
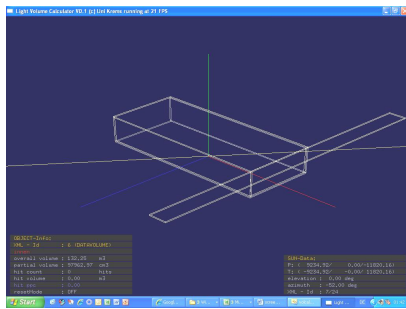
Datenblatt Typ T_GWG_B460_T1150_A30



T_GWG_B460_T1150_A30														
	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	Sum/Average
LPF	0	0	6	7	17	28	30	28	17	7	6	0	0	12,20 %
HWB	9,6	9,6	6,7	3,9	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,7	6,7	9,6	38,38 kWh/m ²
KB	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	3,8	4,5	2,9	0,3	0,0	0,0	0,0	12,07 kWh/m ²

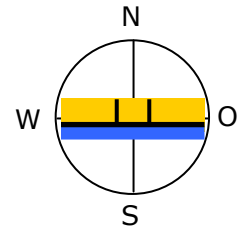


Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]

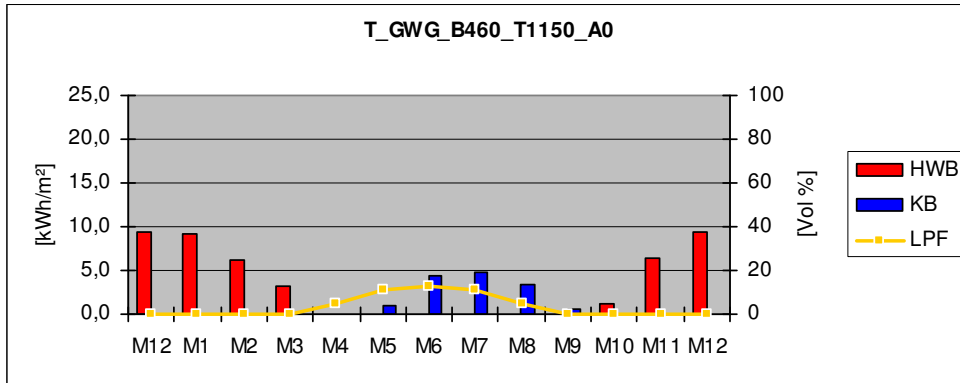


Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

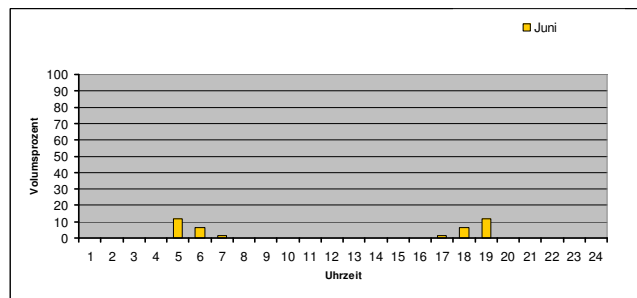
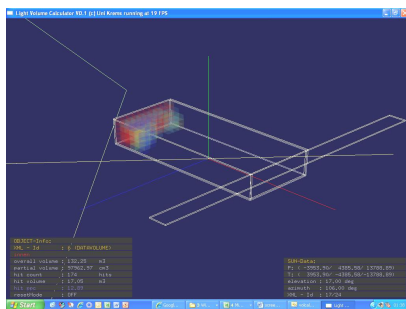
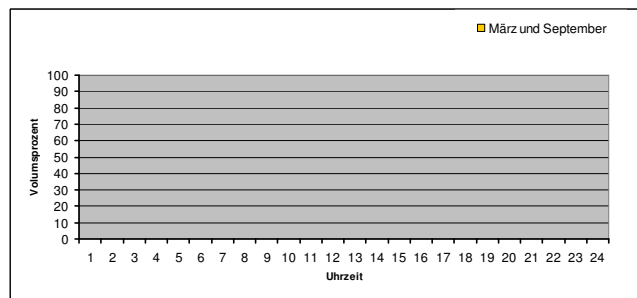
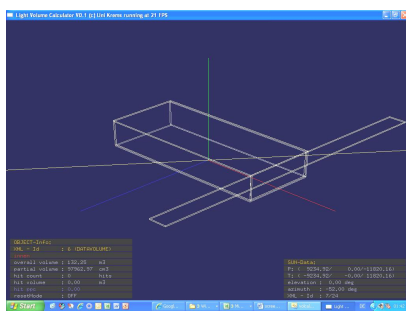
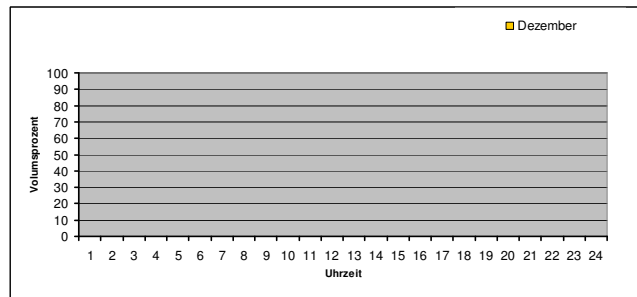
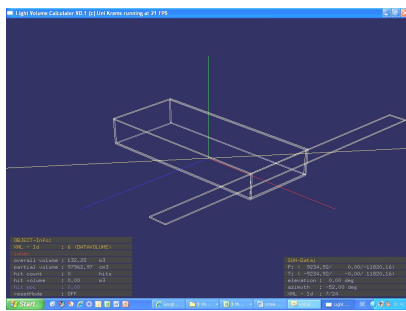
Datenblatt Typ T_GWG_B460_T1150_A0



T_GWG_B460_T1150_A0														
	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	Sum/Average
LPF	0	0	0	0	5	11	13	11	5	0	0	0	0	3,69 %
HWB	9,4	9,3	6,2	3,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,3	6,4	9,4	35,85 kWh/m ²
KB	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1	4,3	4,9	3,4	0,6	0,0	0,0	0,0	14,25 kWh/m ²

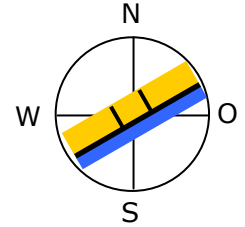


Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]

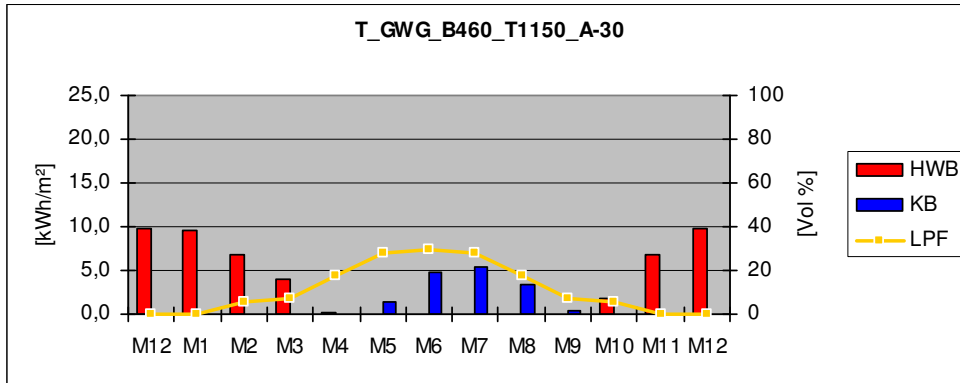


Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

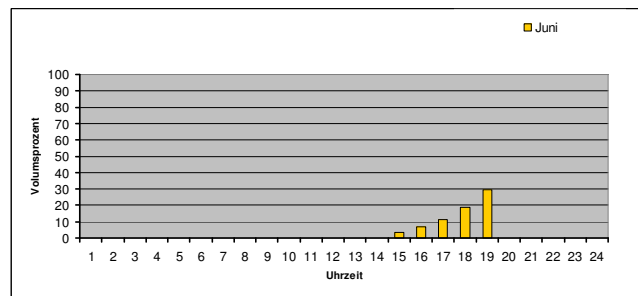
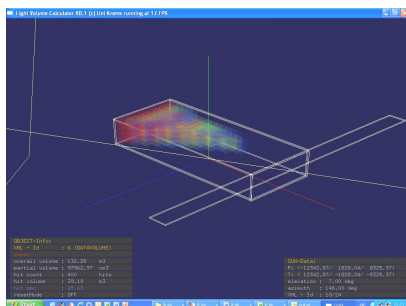
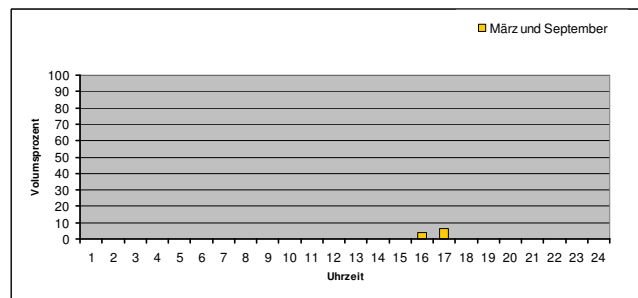
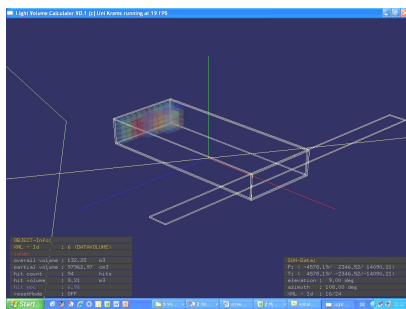
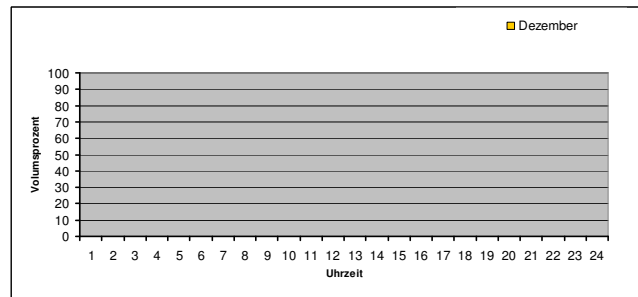
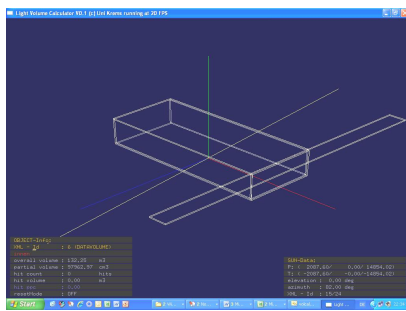
Datenblatt Typ T_GWG_B460_T1150_A-30



T_GWG_B460_T1150_A-30													Sum/Average	
LPF	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	12,20 %
HWB	0	0	6	7	17	28	30	28	17	7	6	0	0	38,80 kWh/m ²
KB	9,7	9,7	6,7	3,9	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,7	6,8	9,7	15,56 kWh/m ²
	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,4	4,9	5,3	3,5	0,5	0,0	0,0	0,0	

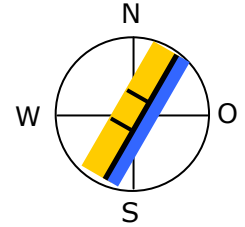


Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]

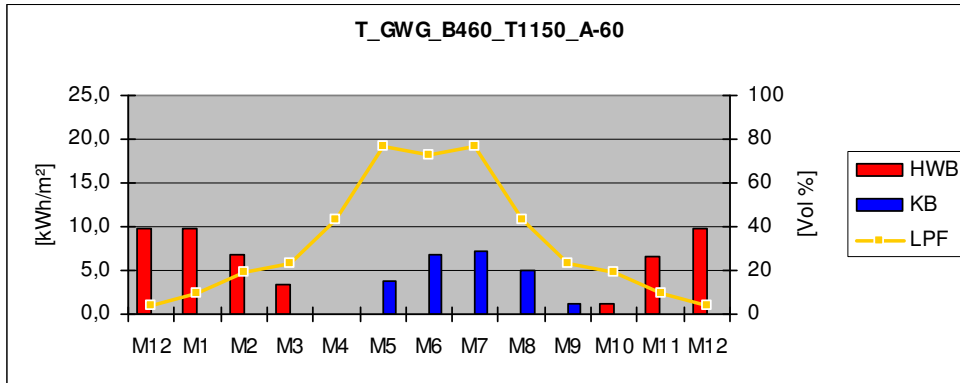


Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

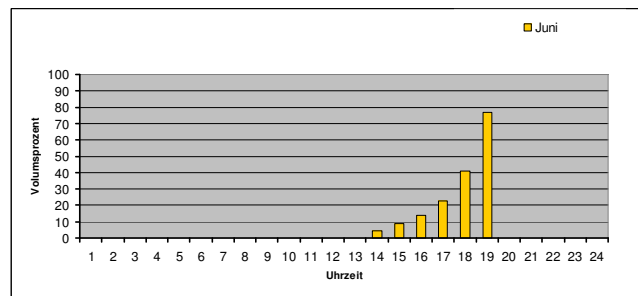
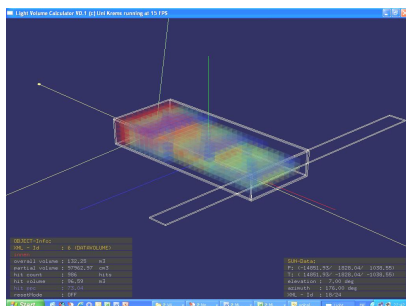
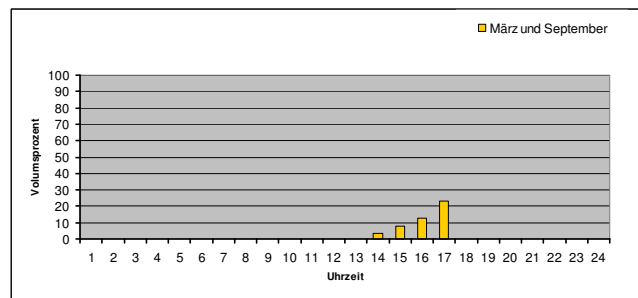
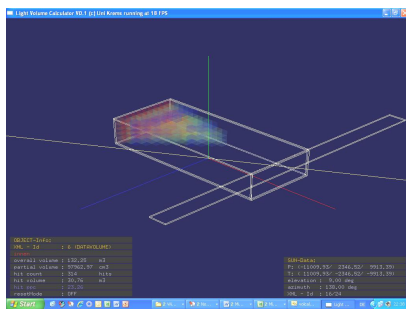
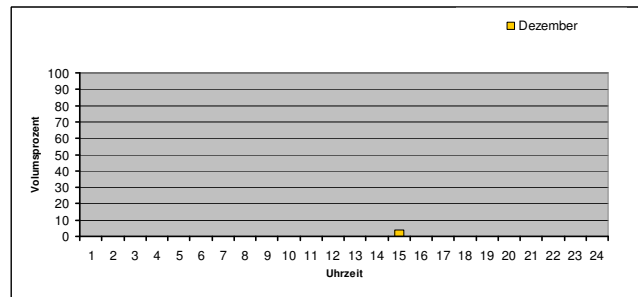
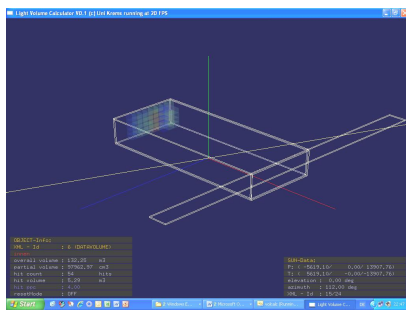
Datenblatt Typ T_GWG_B460_T1150_A-60



T_GWG_B460_T1150_A-60														
	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	Sum/Average
LPF	4	10	19	23	43	77	73	77	43	23	19	10	4	35,20 %
HWB	9,8	9,8	6,7	3,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1	6,7	9,8	37,49 kWh/m ²
KB	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	3,8	6,8	7,1	5,0	1,2	0,0	0,0	0,0	23,99 kWh/m ²

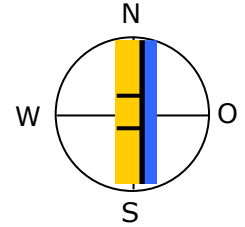


Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]

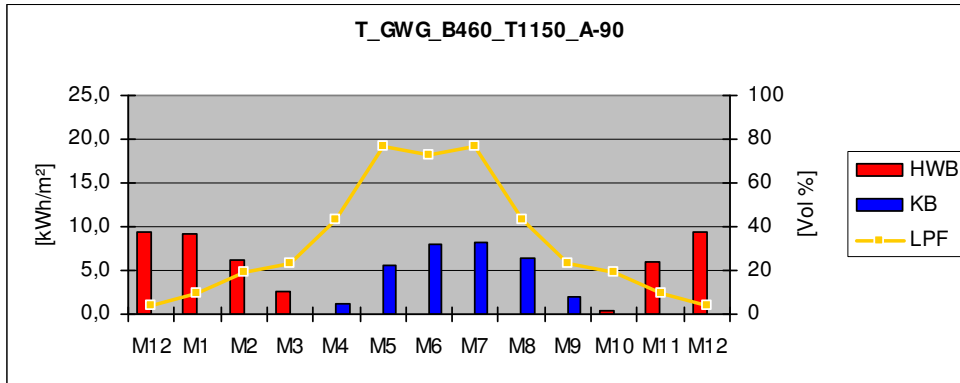


Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

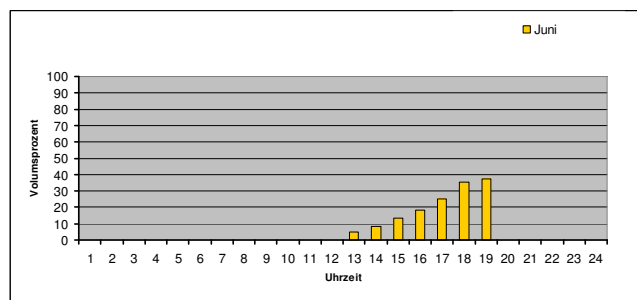
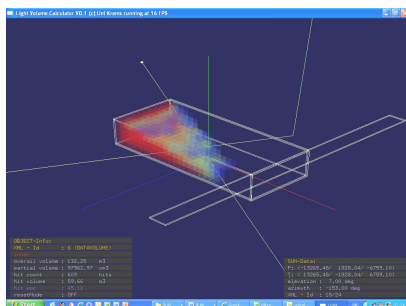
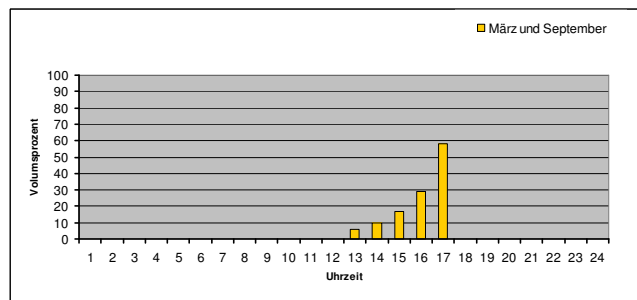
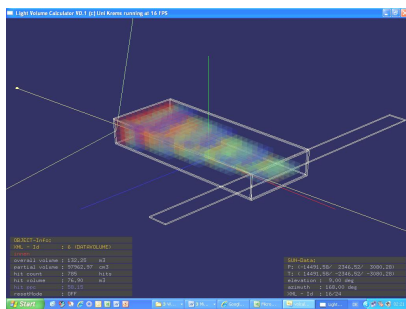
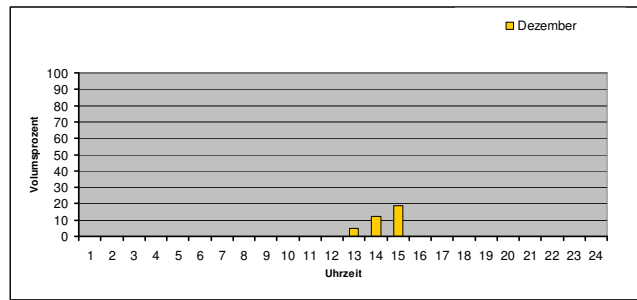
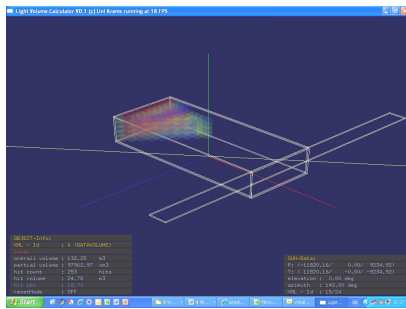
Datenblatt Typ T_GWG_B460_T1150_A-90



T_GWG_B460_T1150_A-90														
	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	Sum/Average
LPF	19	29	61	58	67	54	45	54	67	58	61	29	19	50,22 %
HWB	9,3	9,3	6,2	2,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	5,9	9,3	33,75 kWh/m ²
KB	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1	5,6	8,0	8,2	6,4	2,1	0,1	0,0	0,0	31,42 kWh/m ²

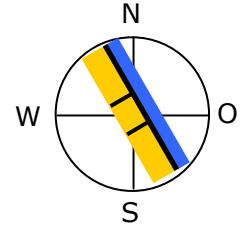


Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]

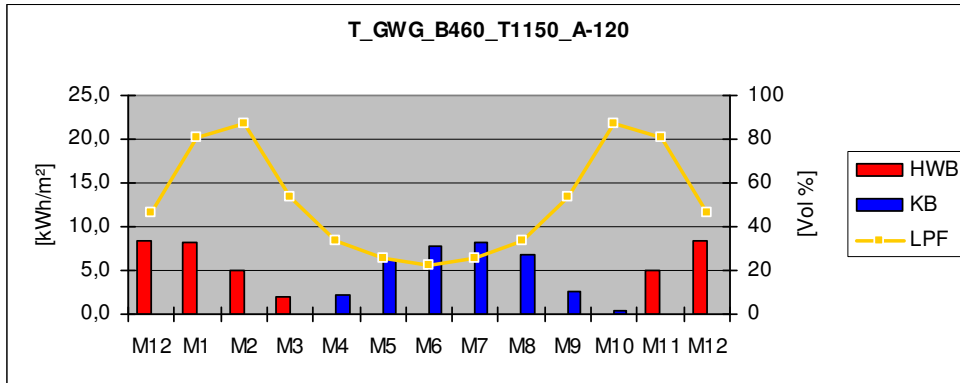


Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

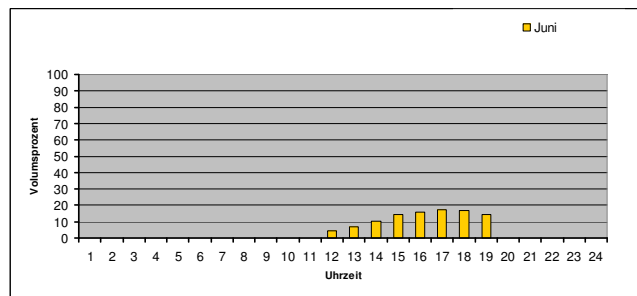
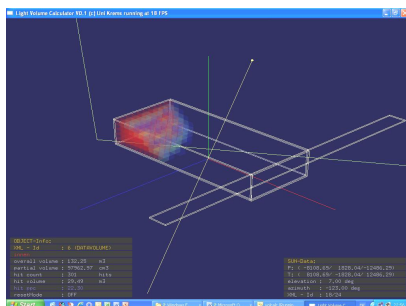
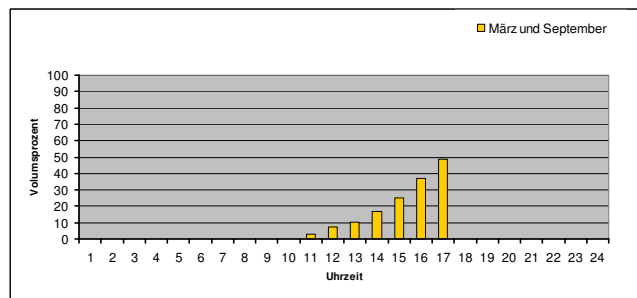
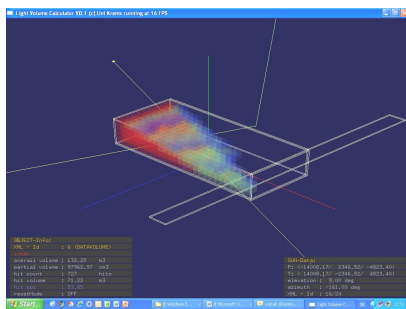
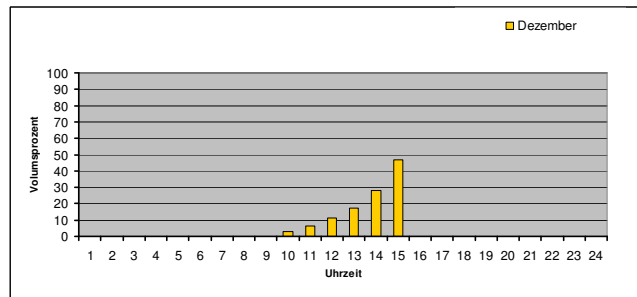
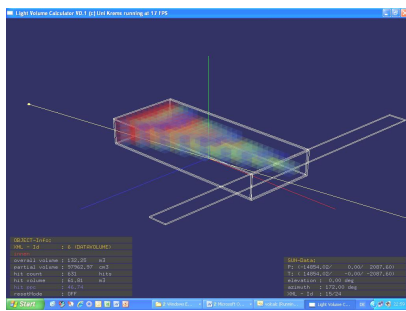
Datenblatt Typ T_GWG_B460_T1150_A-120



T_GWG_B460_T1150_A-120													Sum/Average	
LPF	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	52,52 %
HWB	8,5	8,3	5,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	5,0	8,5	28,85 kWh/m ²	
KB	0,0	0,0	0,0	0,0	2,1	6,3	7,9	8,2	6,9	2,6	0,3	0,0	34,33 kWh/m ²	

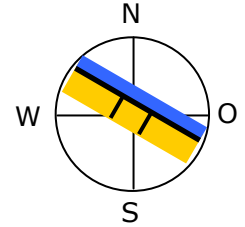


Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]

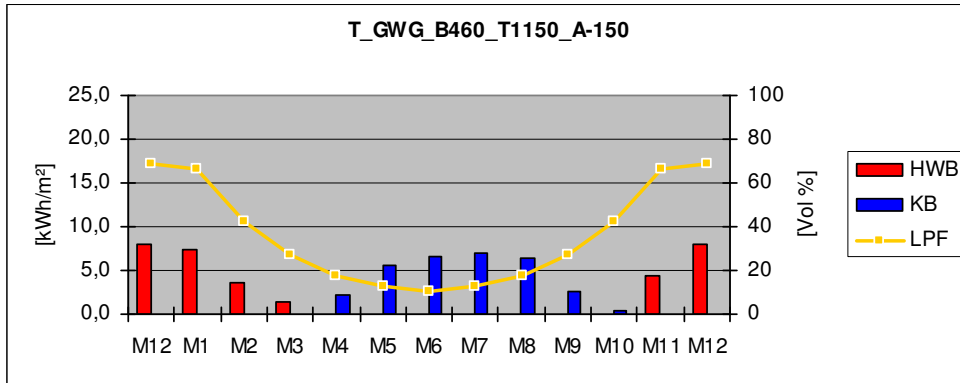


Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

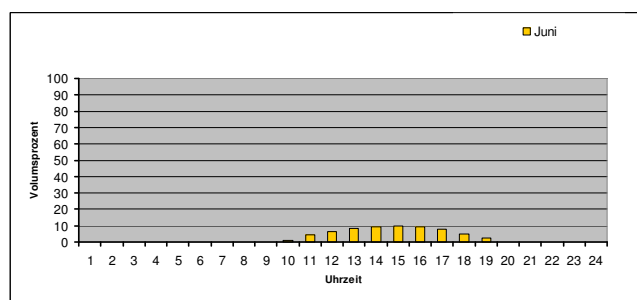
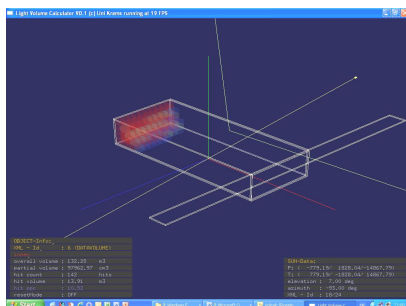
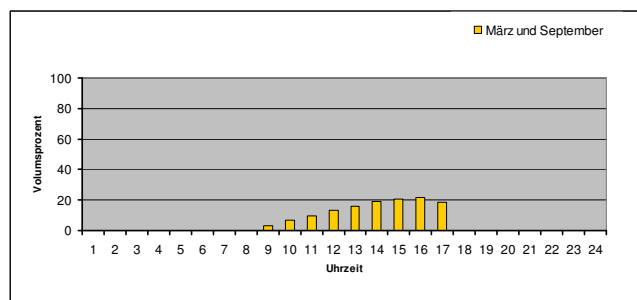
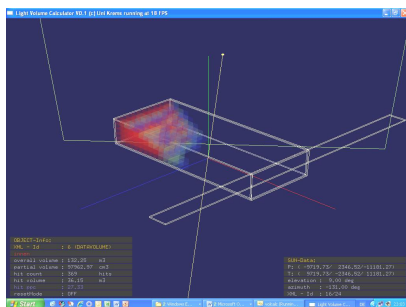
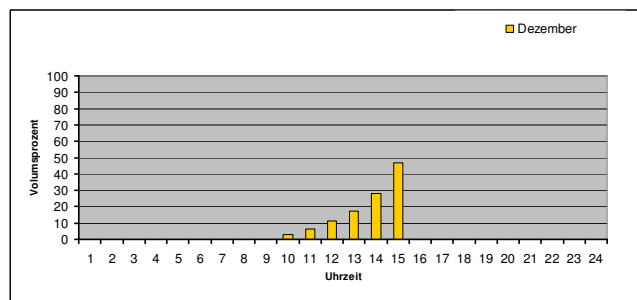
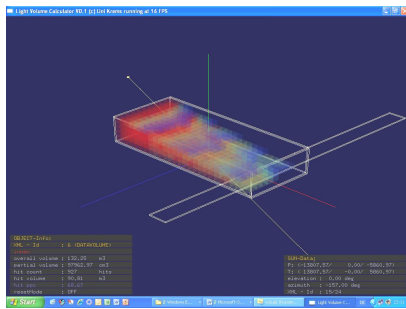
Datenblatt Typ T_GWG_B460_T1150_A-150



T_GWG_B460_T1150_A-150														
	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	Sum/Average
LPF	69	66	43	27	18	13	11	13	18	27	43	66	69	34,35 %
HWB	7,9	7,5	3,6	1,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,5	7,9	24,94 kWh/m ²
KB	0,0	0,0	0,0	0,1	2,2	5,6	6,6	7,1	6,4	2,6	0,5	0,0	0,0	31,03 kWh/m ²



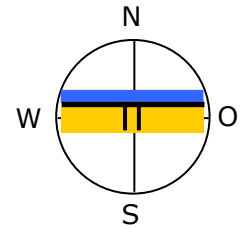
Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]



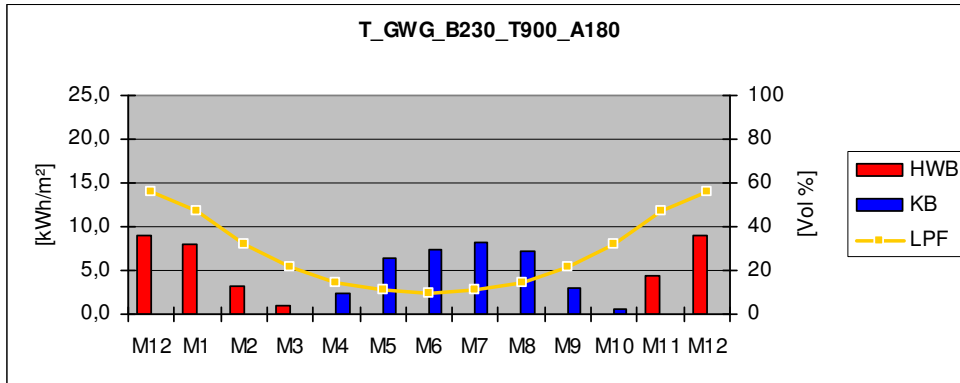
Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

20.4. Datenblätter zum Basismodell GWG_B230_T900

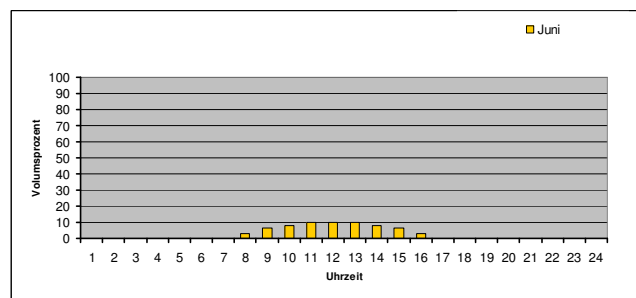
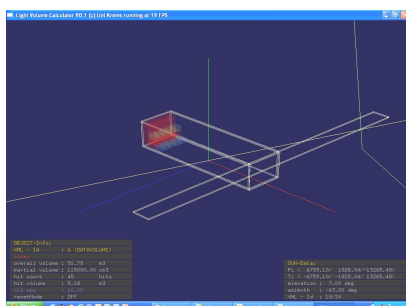
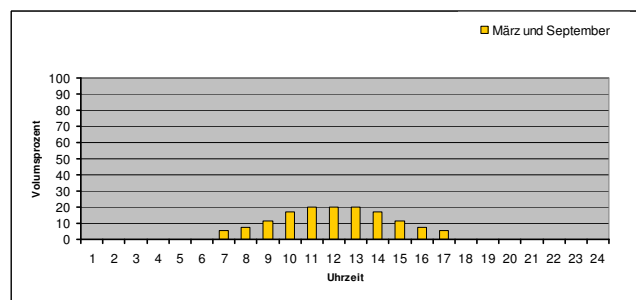
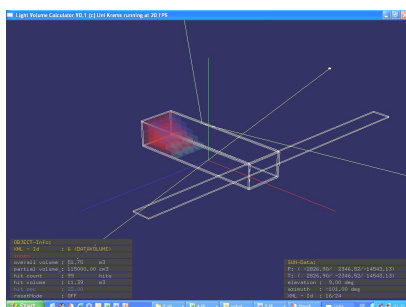
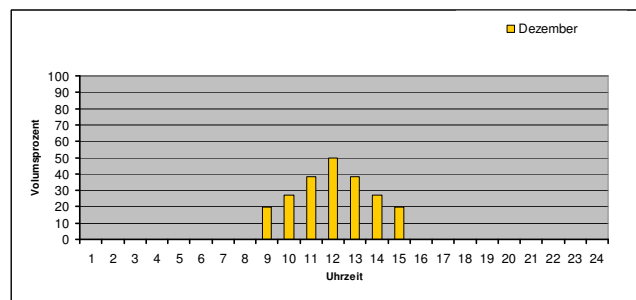
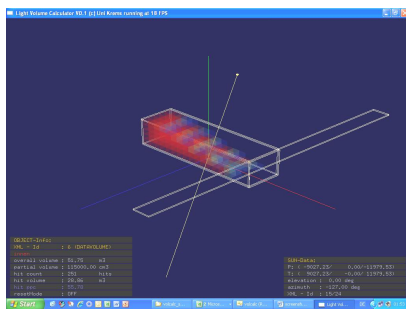
Datenblatt Typ T_GWG_B230_T900_A180



T_GWG_B230_T900_A180														
	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	Sum/Average
LPF	56	47	32	22	14	11	10	11	14	22	32	47	56	26,56 %
HWB	8,9	8,0	3,2	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,5	8,9	25,62 kWh/m ²
KB	0,0	0,0	0,0	0,1	2,4	6,4	7,4	8,2	7,3	3,0	0,5	0,0	0,0	35,12 kWh/m ²

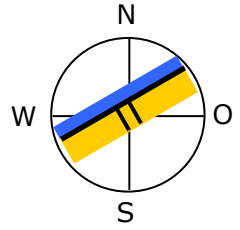


Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]

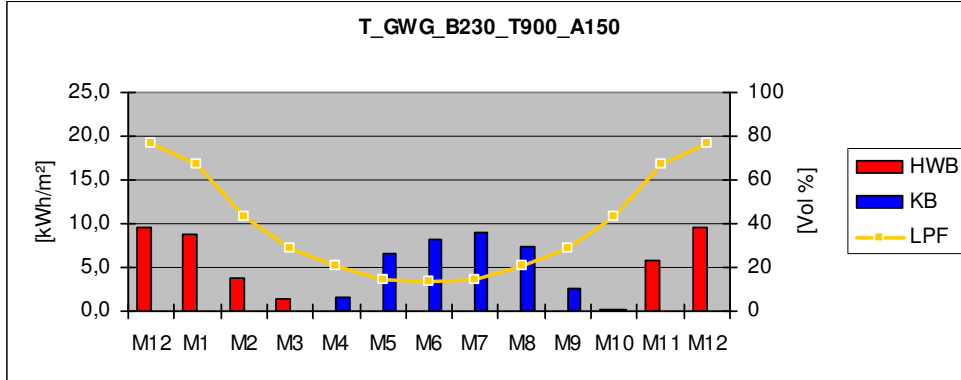


Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

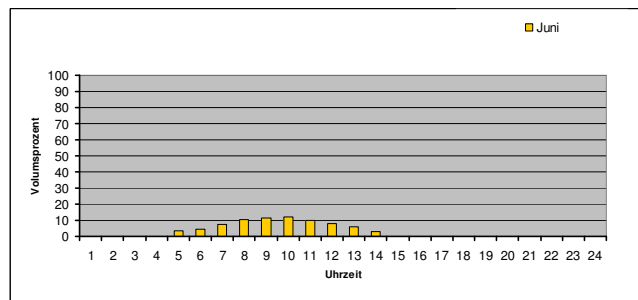
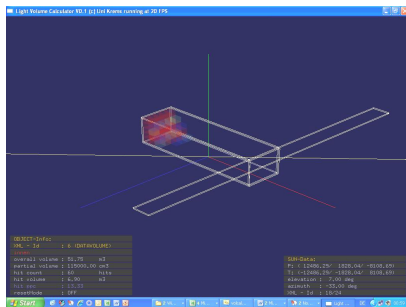
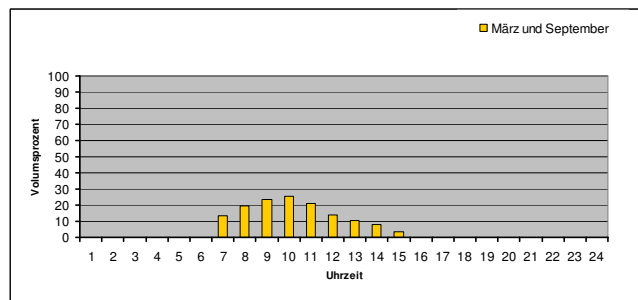
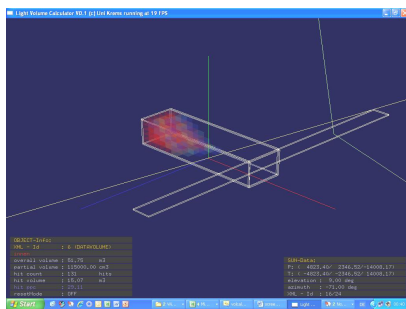
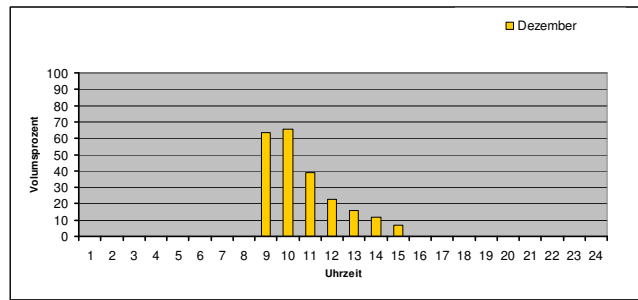
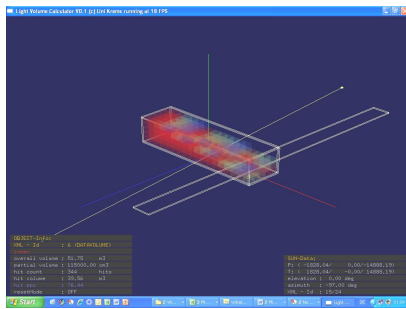
Datenblatt Typ T_GWG_B230_T900_A150



T_GWG_B230_T900_A150														
	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	Sum/Average
LPF	76	67	43	29	20	15	13	15	20	29	43	67	76	36,48 %
HWB	9,7	8,8	3,9	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	5,9	9,7		29,61 kWh/m ²
KB	0,0	0,0	0,0	0,0	1,7	6,5	8,1	9,1	7,3	2,6	0,2	0,0	0,0	35,50 kWh/m ²

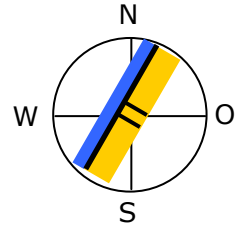


Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]

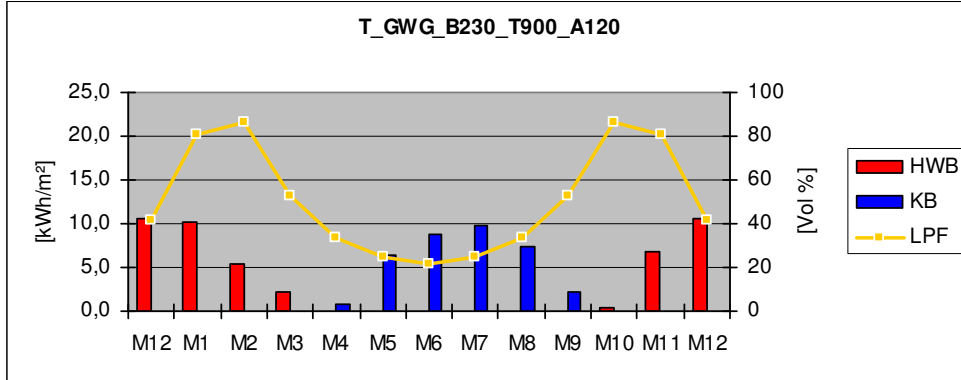


Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

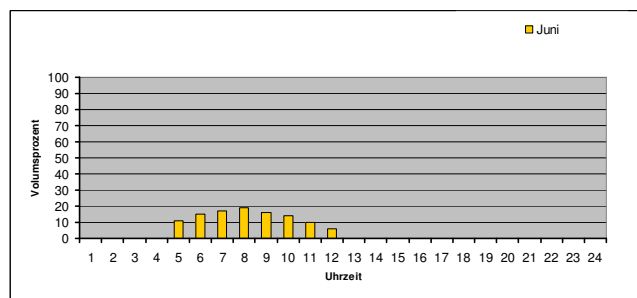
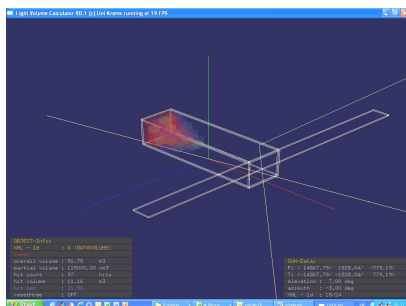
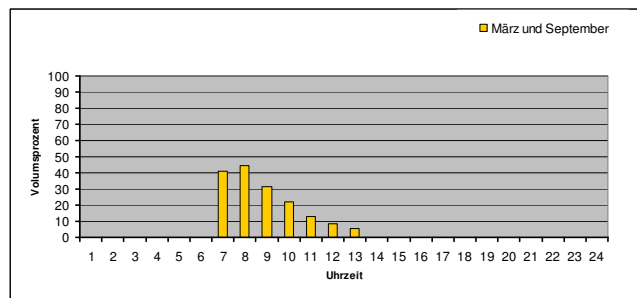
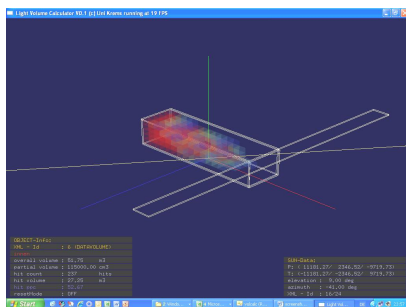
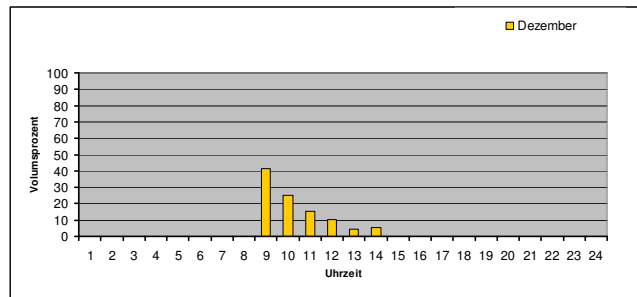
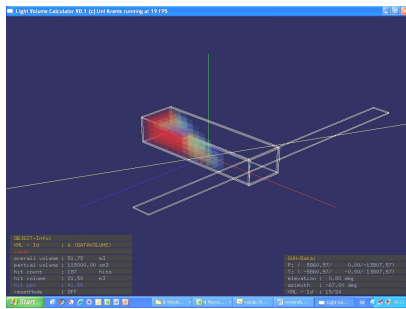
Datenblatt Typ T_GWG_B230_T900_A120



T_GWG_B230_T900_A120													Sum/Average	
LPF	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	51,71 %
HWB	42	81	86	53	34	25	22	25	34	53	86	81	42	35,71 kWh/m ²
KB	10,7	10,1	5,4	2,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	6,9	10,7	0,0	35,24 kWh/m ²

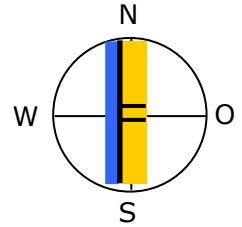


Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]

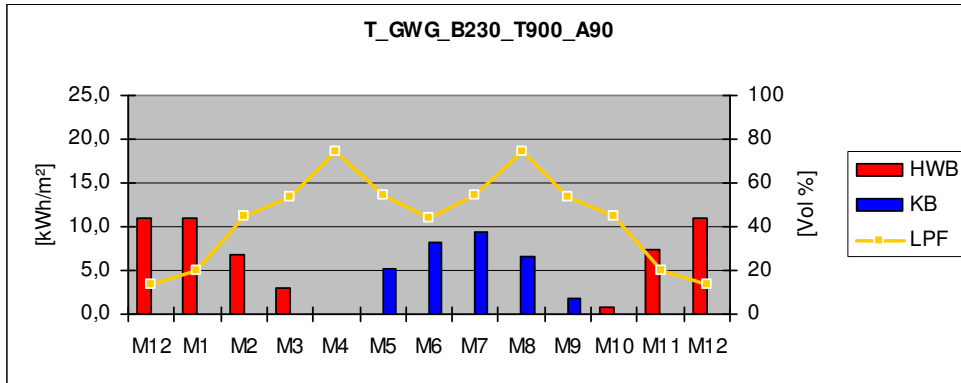


Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

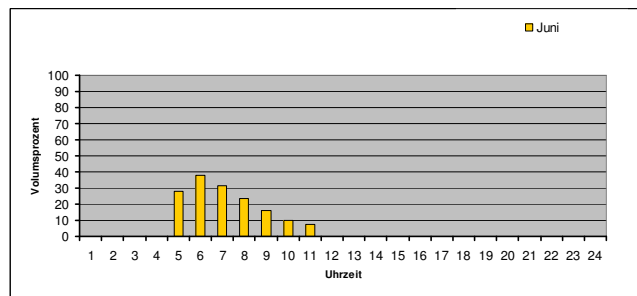
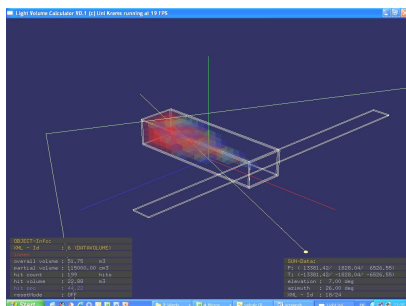
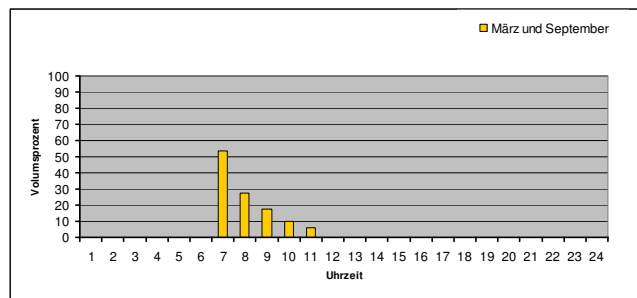
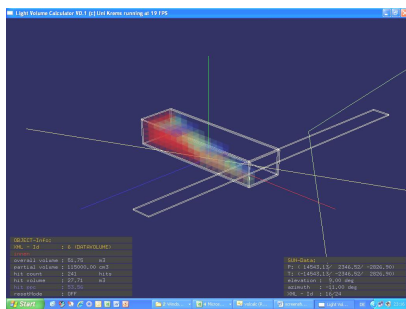
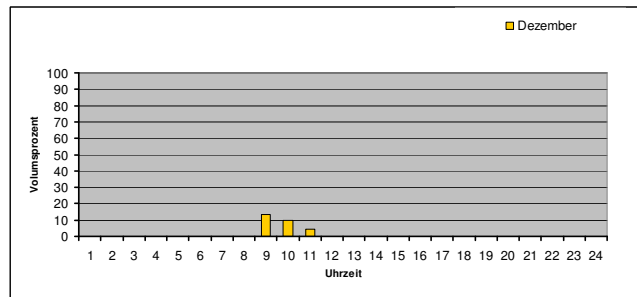
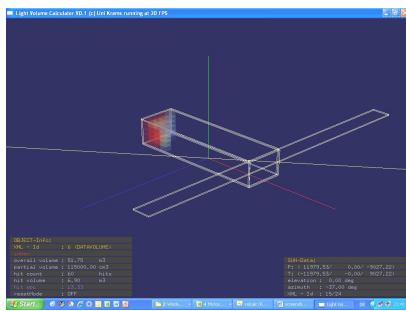
Datenblatt Typ T_GWG_B230_T900_A90



T_GWG_B230_T900_A90														
	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	Sum/Average
LPF	13	20	44	54	74	54	44	54	74	54	44	20	13	45,91 %
HWB	11,1	10,9	6,8	3,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	7,4	11,1	40,12 kWh/m ²
KB	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	5,2	8,3	9,3	6,6	1,7	0,0	0,0	0,0	31,20 kWh/m ²

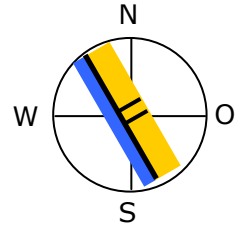


Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]

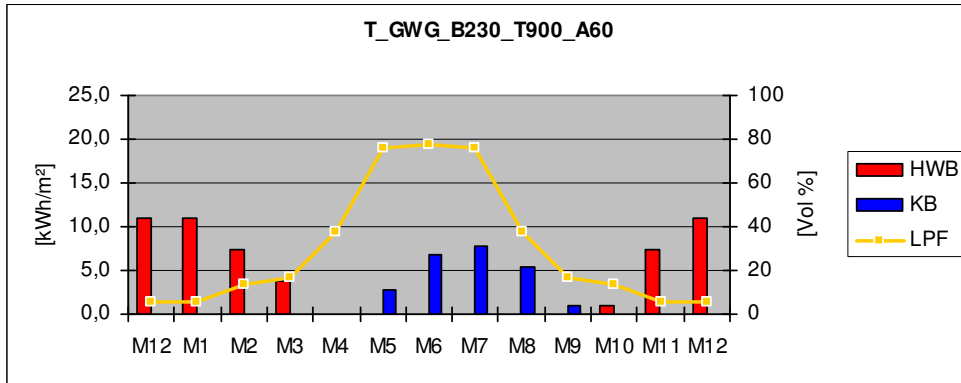


Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

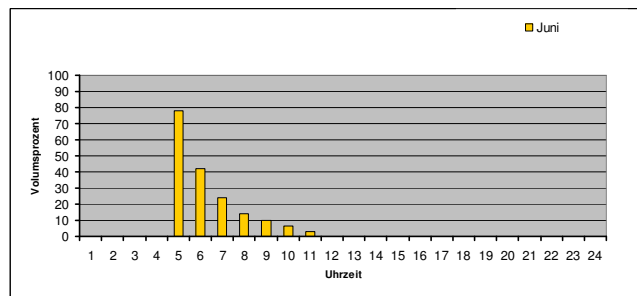
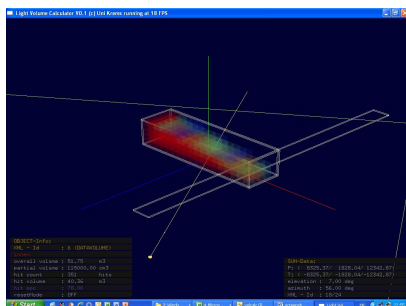
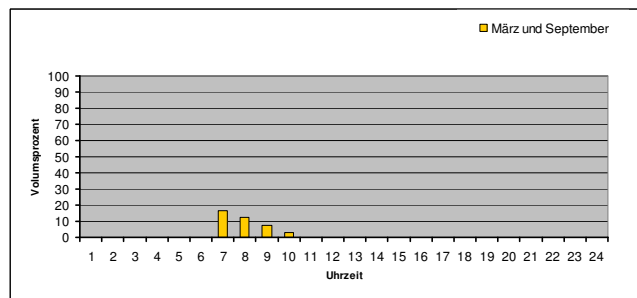
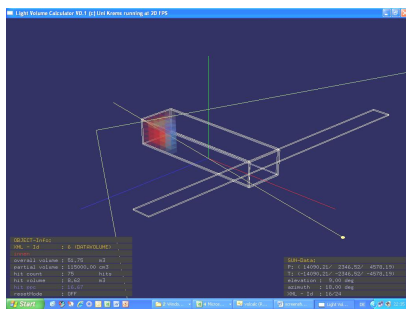
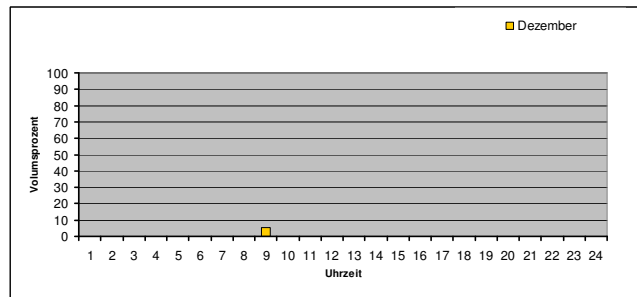
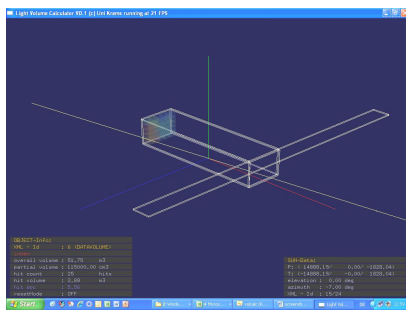
Datenblatt Typ T_GWG_B230_T900_A60



T_GWG_B230_T900_A60														
	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	Sum/Average
LPF	6	6	13	17	37	76	78	76	37	17	13	6	6	31,78 %
HWB	11,0	11,0	7,5	3,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	7,5	11,0		41,75 kWh/m ²
KB	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,8	6,9	7,8	5,4	1,1	0,0	0,0		24,02 kWh/m ²

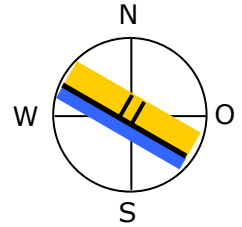


Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]

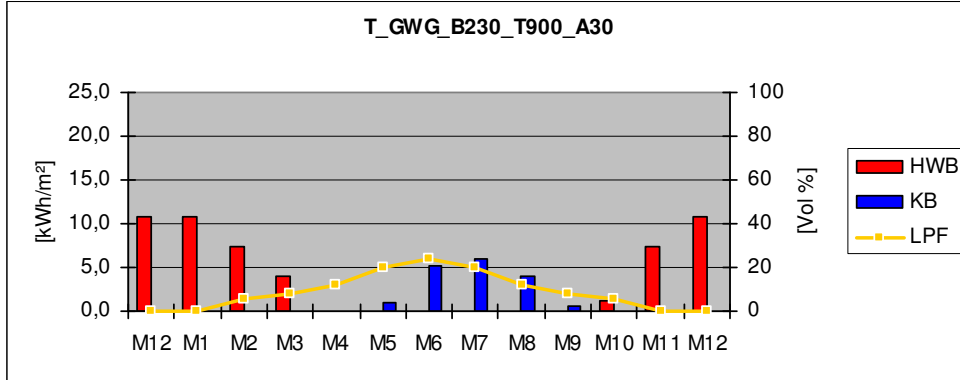


Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

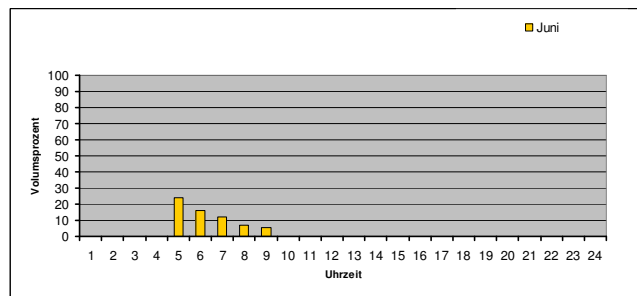
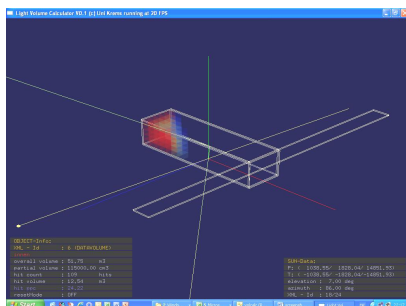
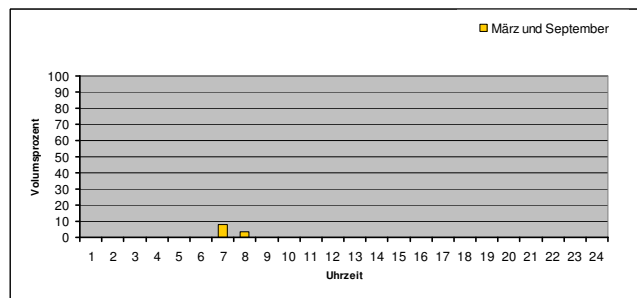
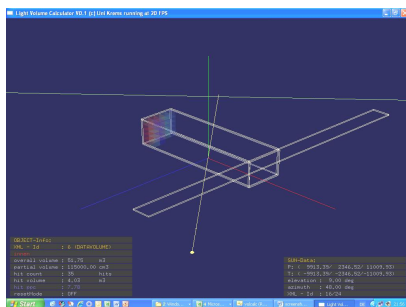
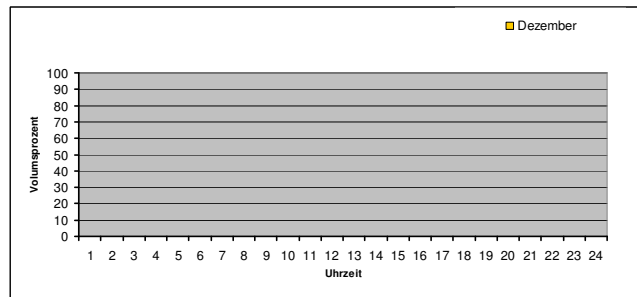
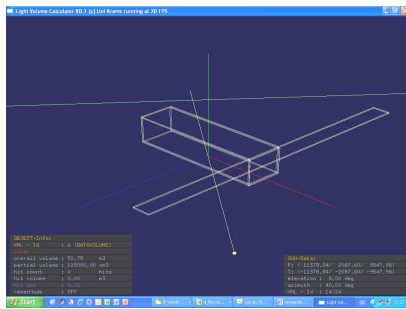
Datenblatt Typ T_GWG_B230_T900_A30



T_GWG_B230_T900_A30														
	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	Sum/Average
LPF	0	0	6	8	12	20	24	20	12	8	6	0	0	9,58 %
HWB	10,9	10,8	7,4	4,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,2	7,4	10,9	41,62 kWh/m ²
KB	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	5,2	6,0	4,1	0,7	0,0	0,0	0,0	16,90 kWh/m ²

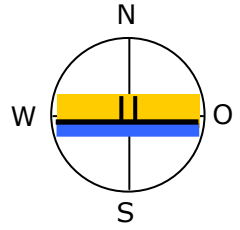


Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]

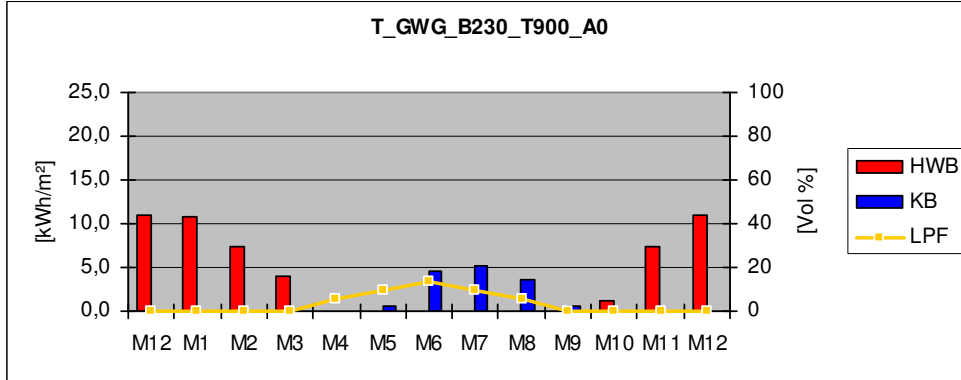


Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

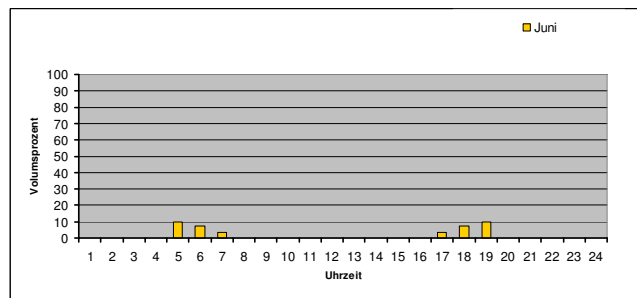
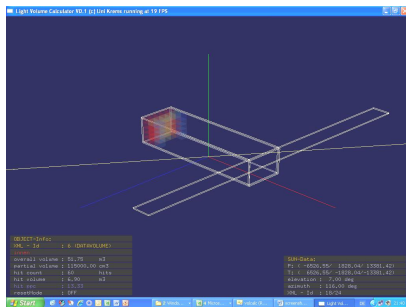
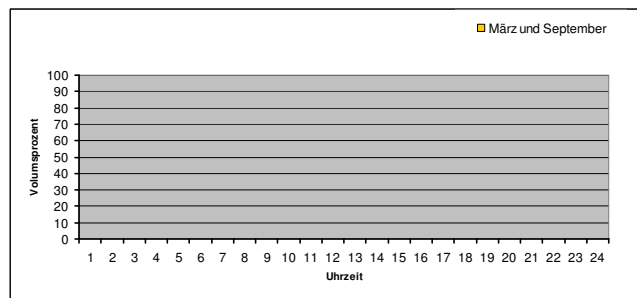
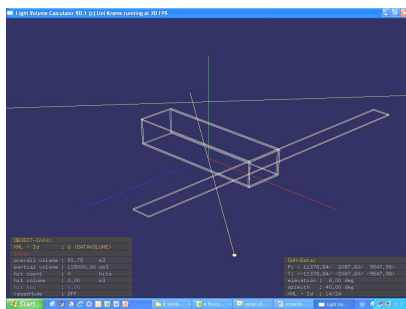
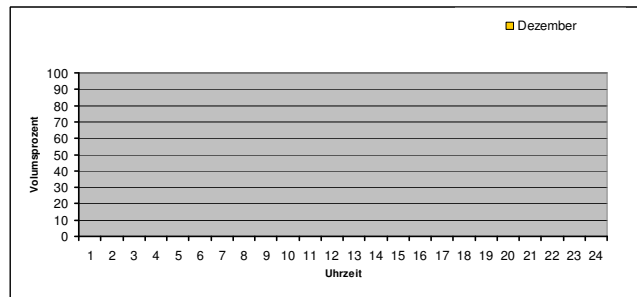
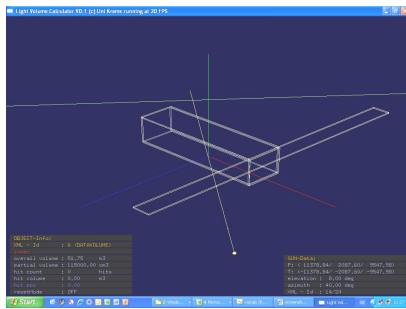
Datenblatt Typ T_GWG_B230_T900_A0



T_GWG_B230_T900_A0													Sum/Average	
LPF	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	3,70 %
HWB	10,9	10,8	7,3	4,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,3	7,5	10,9	41,89 kWh/m ²
KB	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	4,6	5,3	3,6	0,5	0,0	0,0	0,0	14,51 kWh/m ²

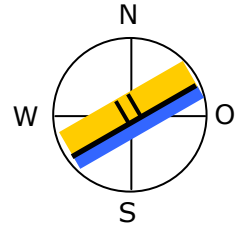


Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]

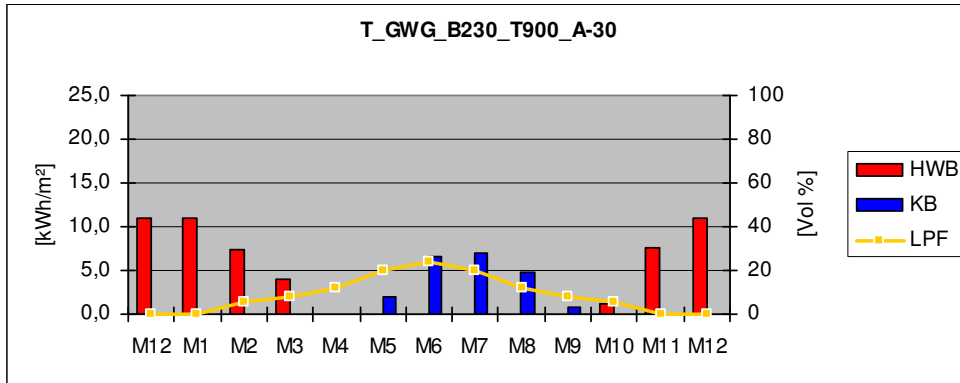


Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

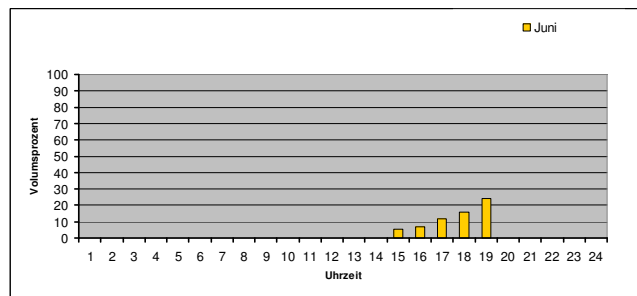
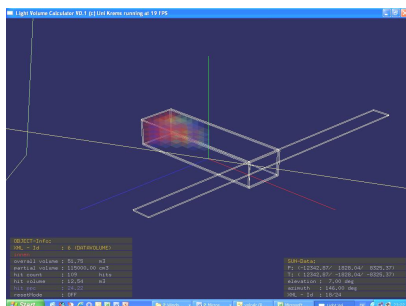
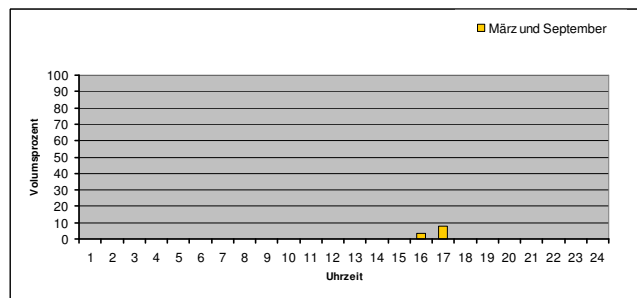
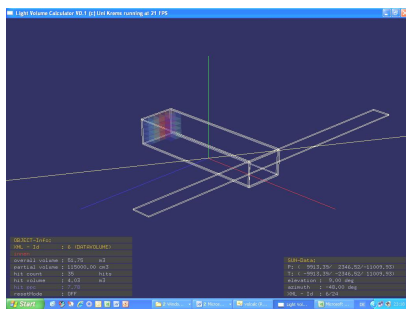
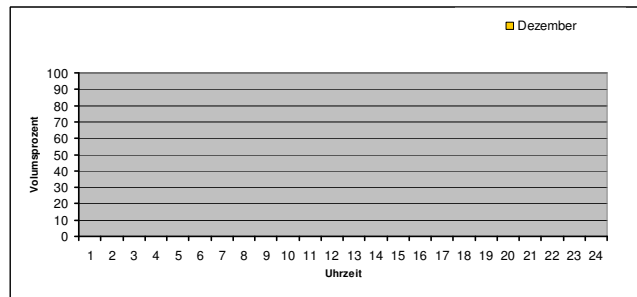
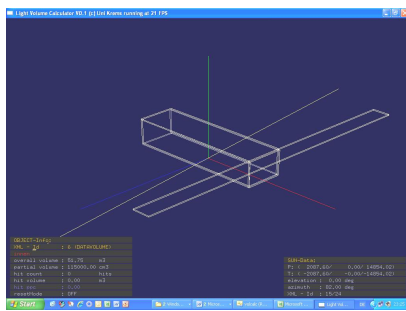
Datenblatt Typ T_GWG_B230_T900_A-30



T_GWG_B230_T900_A-30													Sum/Average	
LPF	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	9,58 %
HWB	11,1	10,9	7,4	4,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,3	7,6	11,1	42,27 kWh/m ²
KB	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,1	6,6	7,0	4,7	0,9	0,0	0,0	0,0	21,27 kWh/m ²

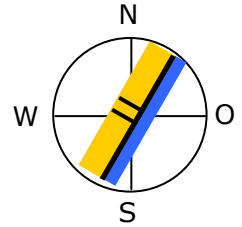


Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]

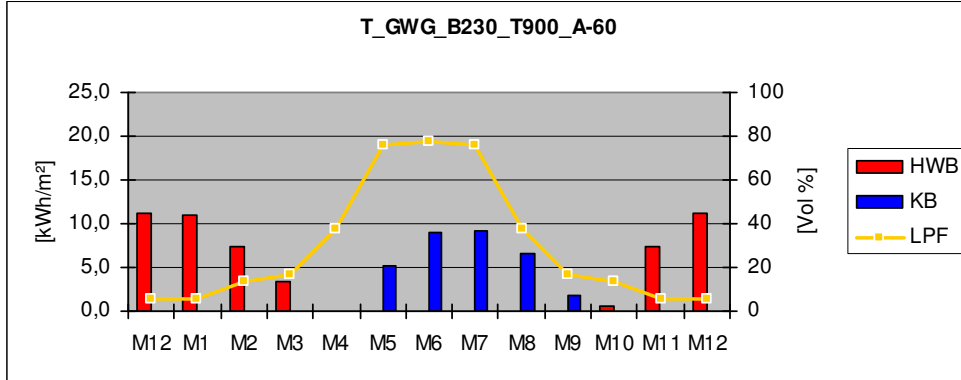


Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

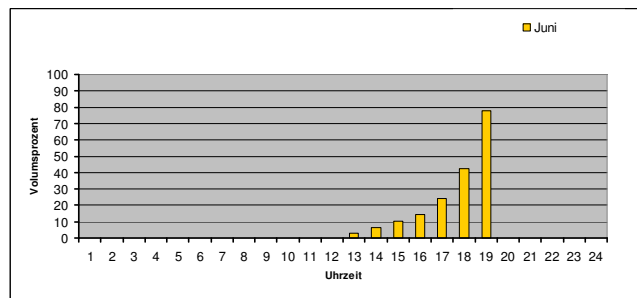
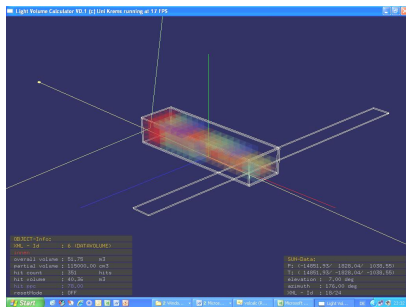
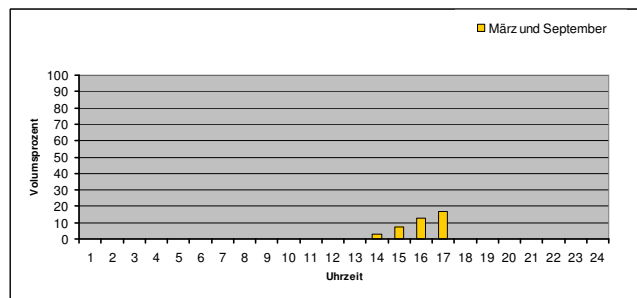
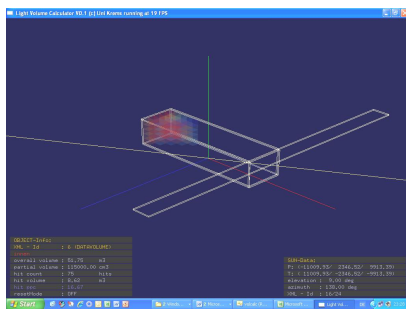
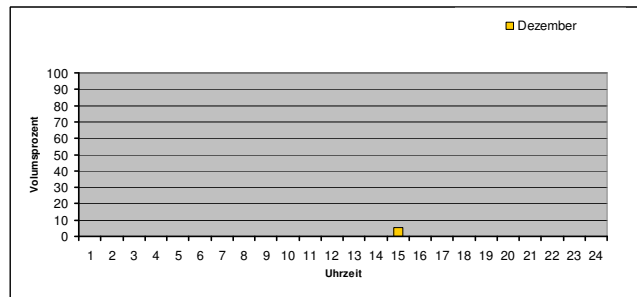
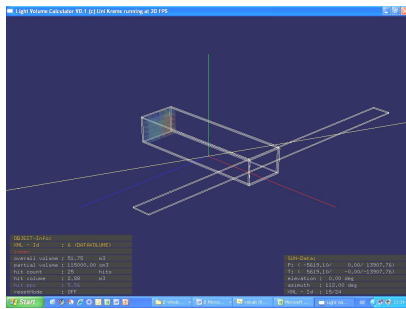
Datenblatt Typ T_GWG_B230_T900_A-60



T_GWG_B230_T900_A-60														
	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	Sum/Average
LPF	6	6	13	17	37	76	78	76	37	17	13	6	6	31,78 %
HWB	11,2	11,1	7,4	3,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	7,4	11,2	41,16 kWh/m ²
KB	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	5,3	8,9	9,2	6,7	1,9	0,0	0,0	0,0	32,00 kWh/m ²

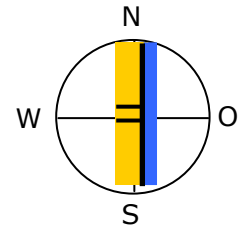


Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]

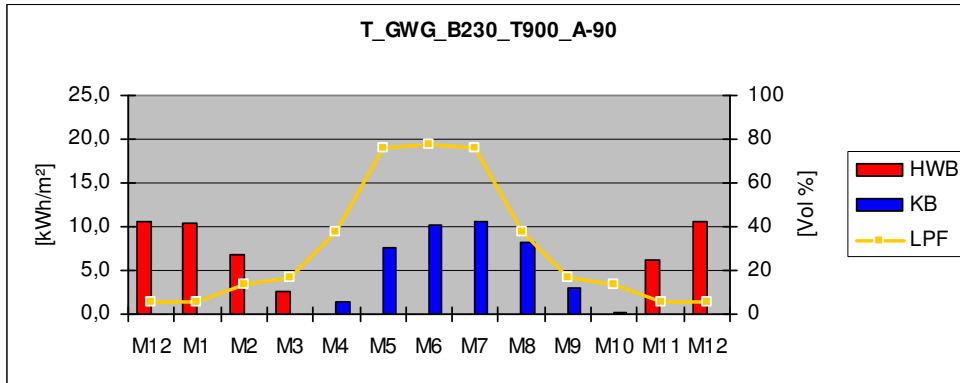


Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

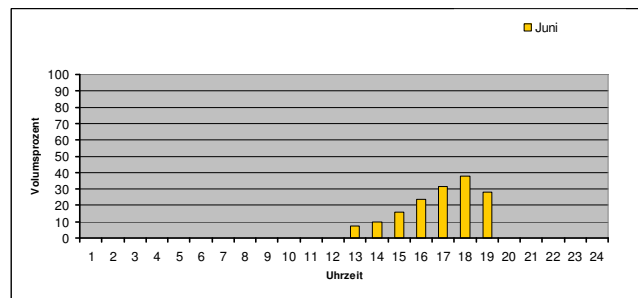
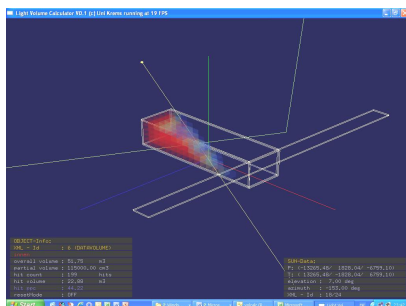
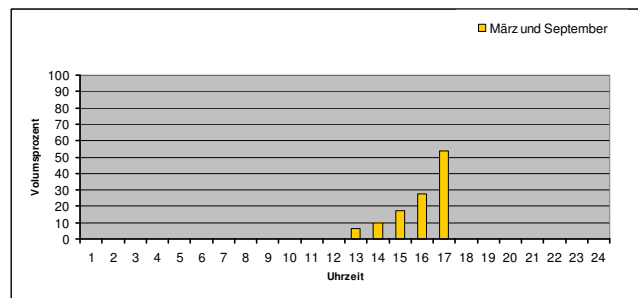
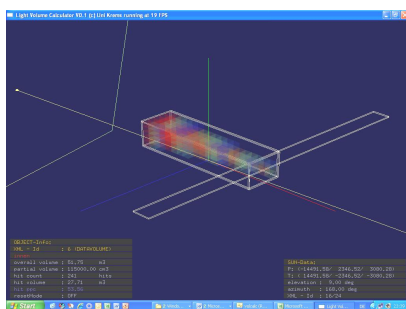
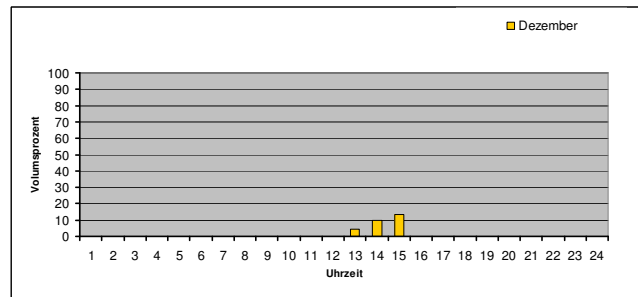
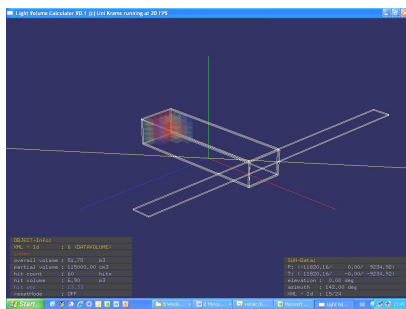
Datenblatt Typ T_GWG_B230_T900_A-90



T_GWG_B230_T900_A-90													Sum/Average	
LPF	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	45,91 %
HWB	13	20	44	54	74	54	44	54	74	54	44	20	13	36,83 kWh/m ²
KB	10,6	10,5	6,8	2,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,9	0,2	6,3	10,6	41,24 kWh/m ²

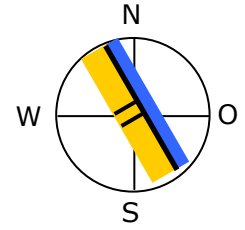


Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]

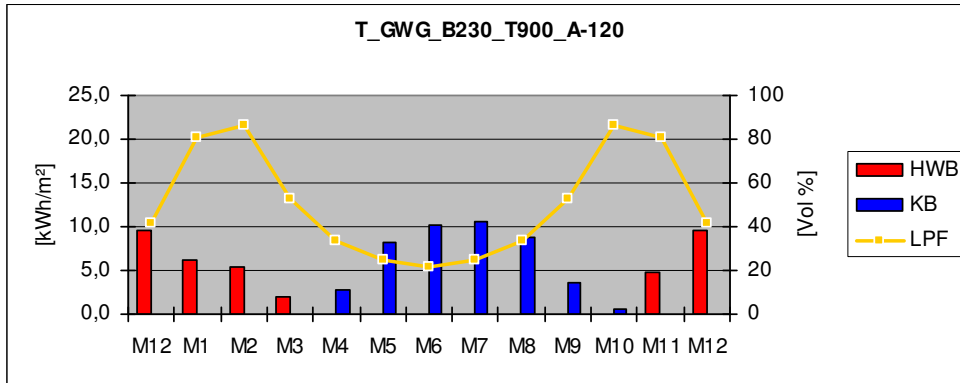


Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

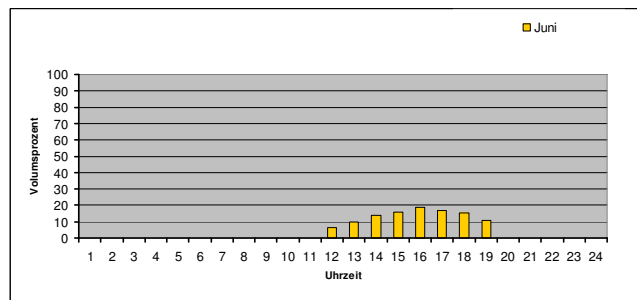
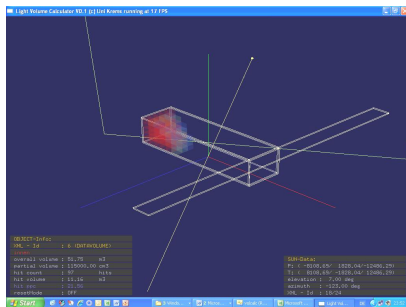
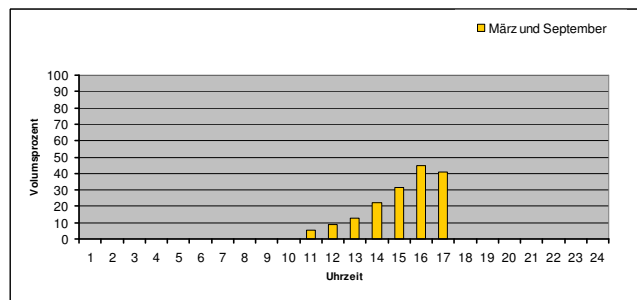
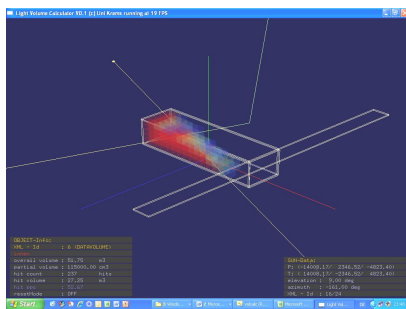
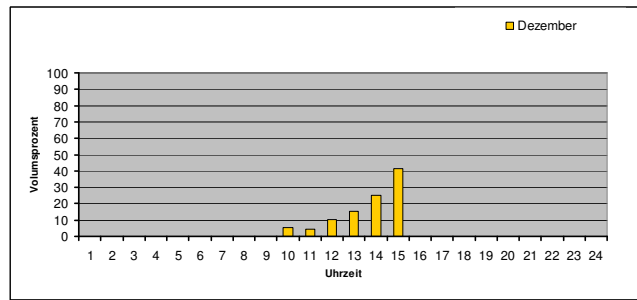
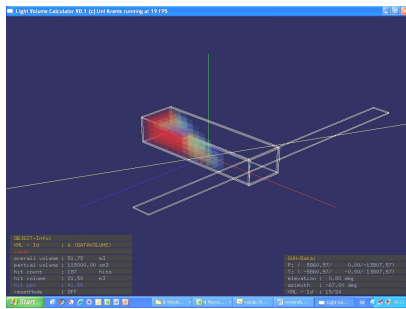
Datenblatt Typ T_GWG_B230_T900_A-120



T_GWG_B230_T900_A-120													Sum/Average	
LPF	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	51,71 %
HWB	9,6	6,3	5,4	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,9	9,6	28,11 kWh/m ²	
KB	0,0	0,0	0,0	0,0	2,9	8,3	10,2	10,6	8,9	3,6	0,5	0,0	44,94 kWh/m ²	

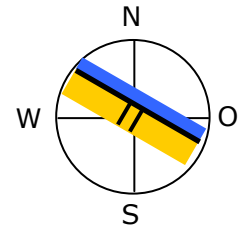


Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]

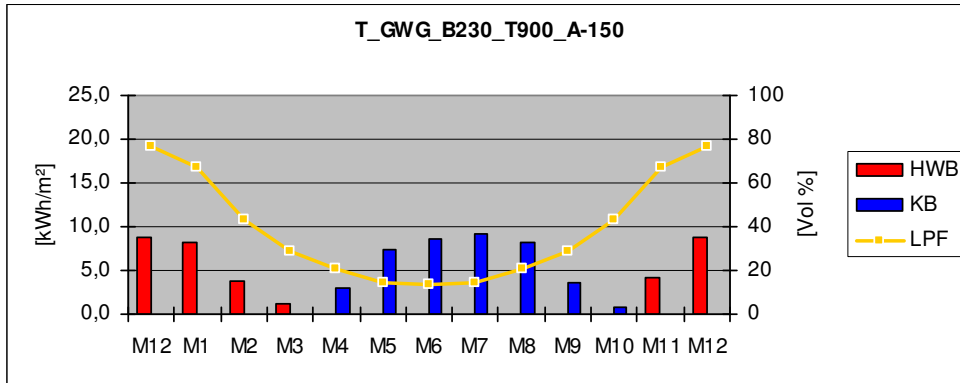


Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

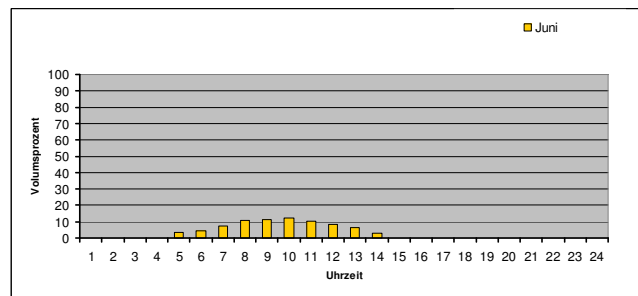
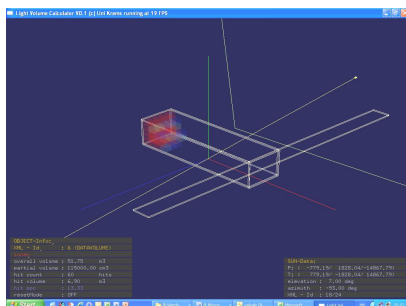
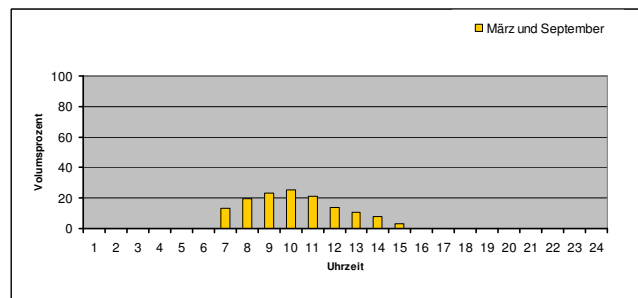
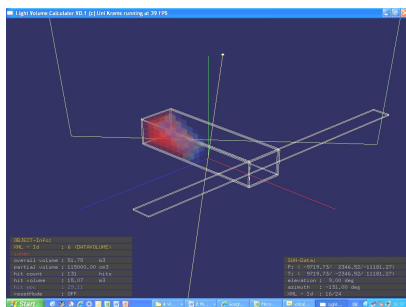
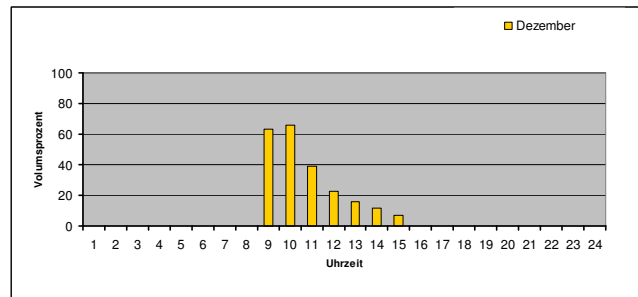
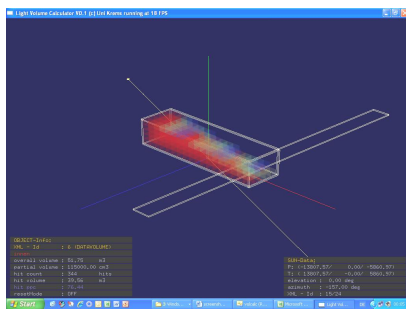
Datenblatt Typ T_GWG_B230_T900_A-150



T_GWG_B230_T900_A-150														
	M12	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	Sum/Average
LPF	76	67	43	29	20	15	13	15	20	29	43	67	76	36,48 %
HWB	8,9	8,2	3,8	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,1	8,9	26,33 kWh/m ²
KB	0,0	0,0	0,0	0,1	3,1	7,5	8,6	9,1	8,2	3,6	0,7	0,0	0,0	40,92 kWh/m ²



Jahresverlauf von HWB und KB [kWh/m²] und LPF [Vol %]



Durchlichtungsfaktor (LPF) und stündliche Momentanwerte des LPF am 21. Dez, 21. März, 21. Juni (v.o.n.u.)

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Passivwohnhaus, Darmstadt Kranichstein, H. Bott, K. Ridder, H. Westermeyer	25
Abbildung 2: Passivwohnhausanlage, Esslinger Hauptstraße 17, Wien 22, W. Hackermüller	25
Abbildung 3: Passivwohnhausanlage, Utendorfgasse 7, Wien 14, H. Schöberl, M. Pöll ..	25
Abbildung 4: Haus Margaret Esherick, Chestnut Hill, Fassade Nordost, L. Kahn.....	26
Abbildung 5: Haus Margaret Esherick, Chestnut Hill, Fassade Südwest, L. Kahn.....	26
Abbildung 6: Haus Margaret Esherick, Chestnut Hill, Innenansicht des Wohnraumes mit der von L. Kahn als Keyhole Window bezeichneten Fensteranordnung	26
Abbildung 7: Haus LEE, Wien 22, Fassade West, querkraft architekten wien.....	27
Abbildung 8: Haus LEE, Wien 22, Fassade Ost, querkraft architekten wien	27
Abbildung 9: Haus LEE, Wien 22, Innenansicht mit Blick auf den überhöht angeordneten Balkon, querkraft architekten wien	27
Abbildung 10: Haus LEE, Wien 22, Schnitt durch den überhöht angeordneter Balkon, querkraft architekten wien	27
Abbildung 11: Haus ÖBV, Wien 17, Fassadenausschnitt mit Schiebeläden, D. Henke, M. Schreieck	28
Abbildung 12: Haus ÖBV, Wien 17, Erschließungsgänge, D. Henke, M. Schreieck	28
Abbildung 13: Haus ÖBV, Wien 17, Innenansicht mit Blick auf die Loggia, D. Henke, M. Schreieck	28
Abbildung 14: Sanatorium Paimio, Finnland, Ansicht des Süd- und des Zentraltraktes, A. Aalto	29
Abbildung 15: Sanatorium Paimio, Finnland, Oberste Liegehalle, A. Aalto	29
Abbildung 16: Sanatorium Paimio, Finnland, Krankenzimmer, A. Aalto.....	29
Abbildung 17: Pavillon 8 Krankenhaus Lainz, Wien 13, Fassade Süd, F. Judtman, E. Riss	30
Abbildung 18: Pavillon 9 Pulmologisches Zentrum, Wien 14, Fassade Süd, C. Boog, F. Berger	30
Abbildung 19: Pulmologisches Zentrum, Wien 14, Detail teilverglaste Loggia, C. Boog, F. Berger	30

Abbildung 20: Laubengangwohnhaus, Brünnerstraße 26 – 32, Wien 23, H. Richter, 1991.....	37
Abbildung 21: Laubengangwohnhaus, Rosensteingasse 104 – 106, Wien 17, L. Dungl, 2004.....	37
Abbildung 22: Laubengangwohnhaus, Breitenfurter Straße 114, Wien 12, H. Wimmer 2002.....	37
Abbildung 23: Beschreibung der Sonnenposition durch Sonnenhöhe und Sonnenazimut	41
Abbildung 24: Energiebilanz der Erde nach Kiehl und Trenberth, 1997.....	56
Abbildung 25: Weltweite Planetarische Albedo für die Periode von Dezember bis Februar	57
Abbildung 26: Darstellung des Schichtaufbaus der menschlichen Haut mit einem Detailschnitt der Epidermis	113
Abbildung 27: Molekularstruktur von 7-Dehydrcholesterol als exemplarisches Steran ..	123
Abbildung 28: Photosynthese von Previtamin D ₃ und biochemische Folgereaktionen ...	125
Abbildung 29: Interaktionen zwischen 1,25(OH) Vitamin D ₃ und dem Immunsystem...	136
Abbildung 30: Schematische Darstellung des Schichtaufbaus der Retina.....	144
Abbildung 31: Verteilung der Photorezeptoren auf der Retina	146
Abbildung 32: Darstellung des Verlaufs der Sehbahn vom Auge bis zur primären Sehrinde	154
Abbildung 33: Neuronale Einbindung der Schichten des seitlichen Kniehöckers in die Sehbahn	156
Abbildung 34: Lagebeziehungen der rezeptiven Felder der Zellen innerhalb einer Orientierungssäule und in benachbarten Orientierungssäulen	158
Abbildung 35: Schematische Darstellung einer Hyperkolumne.....	160
Abbildung 36: Neurotransmitter Synthese und Präsynaptische Prozesse	175
Abbildung 37: Ablaufschema der negativen molekularen Rückkopplungsschleife im suprachiasmatischen Nucleus des Menschen	178
Abbildung 38: Vergleichende Darstellung von zwei Phase-Response-Kurven unterschiedlicher Autoren zur Verschiebung der circadianen Rhythmik	180
Abbildung 39: Geometrisches Modell zur Tageslichtberechnung in der Raumtiefe	298
Abbildung 40: Hof des Hauses Apollgasse 3, A 1070 Wien im Jahr 1928	305

Abbildung 41: Haus Anne Gasse 5, A-1010 Wien im Jahr 2007	306
Abbildung 42: Laubengangwohnhaus, über Eck, Brünnerstraße 26-32, Wien 23, H. Richter, 1991	307
Abbildung 43: Laubengangwohnhaus, Innenansicht Laubengang, Brünnerstraße 26-32, Wien 23, H. Richter, 1991.....	307
Abbildung 44: Laubengangwohnhaus, Südfassade, Speisinger Straße 50-52, Wien 13, M. Praschl, A. Praschl Goodarzi, 1999	307
Abbildung 45: Laubengangwohnhaus, Innenansicht Laubengang, Speisinger Straße 50-52, Wien 13, M. Praschl, A. Praschl Goodarzi, 1999.....	307
Abbildung 46: Laubengangwohnhaus, Innenansicht Laubengang, Breitenfurter Straße 114, Wien 12, H. Wimmer, 2002.....	308
Abbildung 47: Laubengangwohnhaus, über Eck, Breitenfurter Straße 114, Wien 12, H. Wimmer, 2002	308
Abbildung 48: Laubengangwohnhaus, Rosensteingasse 104-106, Wien 17, L. Dungl, 2004	308
Abbildung 49: Laubengangwohnhaus, Innenansicht Laubengang, Rosensteingasse 104-106, Wien 17, L. Dungl, 2004.....	308
Abbildung 50: Geometrisches Modell zur Berechnung des Durchlichtungsfaktors	339
Abbildung 51: Axonometrische Ergebnisdarstellung des LPF für das Basismodell Typ T_GGG_B460_T1400_A180 am 21. Juni	340
Abbildung 52: Geometrisches Modell zur Berechnung des Heizwärmebedarfs	344
Abbildung 53: Symbole zur Beschreibung der Basismodelle	351
Abbildung 54: Exemplarisches Datenblatt zur Ergebnisdarstellung	352
Abbildung 55: Legende zur Ergebnisdarstellung in Kreisdiagrammen.....	372
Abbildung 56: Ergebnisdarstellung in Kreisdiagrammen für die Typen GGG	372
Abbildung 57: Ergebnisdarstellung in Kreisdiagrammen für die Typen GWG	372
Abbildung 58: Legende zur Ergebnisdarstellung in Kreisdiagrammen.....	381
Abbildung 59: Ergebnisdarstellung im beschrifteten Kreisdiagramm für die Typen T_GGG_B460_T1400	382
Abbildung 60: Ergebnisdarstellung im beschrifteten Kreisdiagramm für die Typen T _GGG_B230_T1100	383

Abbildung 61: Ergebnisdarstellung im beschrifteten Kreisdiagramm für die Typen T_GWG_B460_T1150.....	384
Abbildung 62: Ergebnisdarstellung im beschrifteten Kreisdiagramm für die Typen T_GWG_B230_T900.....	385
Abbildung 63: Schema der vergleichenden Kreisdarstellung wie bereits eingeführt	411
Abbildung 64: Beschriftete Kreisdarstellung der Typologien für T_GGG_B460_T1400 ..	412
Abbildung 65: Beschriftete Kreisdarstellung der Typologien für T_GGG_B230_T1100 ..	413
Abbildung 66: Beschriftete Kreisdarstellung der Typologien für T_GWG_B460_T1150 ..	422
Abbildung 67: Beschriftete Kreisdarstellung der Typologien für T_GWG_B230_T900....	423
Abbildung 68: Unité d´habitation, Marseille, Blick aus dem zweigeschossigen Wohnbereich auf die Loggia, Le Corbusier, 1952	436
Abbildung 69: Haus Tak, Tokyo, Durchblick vom Erdgeschoss bis in den Dachraum, Shioda Y., 2002	436
Abbildung 70: Zweifamilienhaus, Utrecht, Fassade Süd, Maas W., van Rijs J., de Vries N., 1997.....	437
Abbildung 71: Miyama-so, Präfektur Kyoto, Blick längs der Engawa, um 1850.....	437
Abbildung 72: Wohnhaus Buck, Los Angeles, Durchblick in die Bibliothek, Schindler R., 1934	437
Abbildung 73: Hochhaus mit gemischter Nutzung Sky Village, Wettbewerbsprojekt zur Realisierung in Kopenhagen, Maas W., van Rijs J., de Vries N., Krogh M., Laursen M., Lonka A., aktuell	438
Abbildung 74: Sanatorium Sonnenstrahl, Hilversum, Duiker J., 1931.....	438
Abbildung 75: Einfamilienhaus Müller, Staufen, Blick in das Badezimmer, Degelo H., Morger M., 1999.....	439
Abbildung 76: Einfamilienhaus, Präfektur Gunma, Blick in das Badezimmer, Shiina E., keine Angaben	439
Abbildung 77: Einfamilienhaus, Aufbringen von Wärmedämmung an einer Fensterlaibung, anonym	441
Abbildung 78: Rathaus, Heilbronn, alte Fassade Ost mit vermauerten historischen Fenstern, Kern um 1300, mehrfach umgebaut und erweitert.....	441
Abbildung 79: Palazzo Salis, Bondo im Bergell, Eckraum, Croce F., 1765-1774	442

Abbildung 80: Einfamilienhaus, Pavi, Bad Waltersdorf, Ausgestaltung der Fensterlaibung, Kaufmann J., 2002	442
Abbildung 81: Hochhaus mit gemischter Nutzung Namba Park, Osaka, 2003, Jerde, 2003	443
Abbildung 82: Bürogebäude der Firma Graf, Dornbirn, Fassade mit Klappläden, Baumschlager C., Eberle D., 1995.....	444
Abbildung 83: Historische Fassade mit Klappläden, Corniglio, Ligurien, anonym	444
Abbildung 84: Blick in eine nächtliche Engawa, Japan, anonym	445
Abbildung 85: Satellitenbild, Nachtaufnahme des Mittelmeerraumes	445
Abbildung 86: Geometriemodell zur Berechnung der Tageslichtquotientenverteilung ...	460
Abbildung 87: Geometriemodell zur Berechnung des Durchlichtungsfaktors	464
Abbildung 88: Axonometrische Ergebnisdarstellung des LPF für das Basismodell T_GGG_B460_T1400_A60 am 21. März.....	465
Abbildung 89: Geometrisches Modell zur Berechnung des Heizwärme- und des Kühlbedarfs	468
Abbildung 90: Zweijahresmittelwert der weltweiten Verteilung der Niederschlags verfügbaren Wasserdampfmenge.....	476
Abbildung 91: perspektivische Darstellung des Raummodells zur Berechnung der Bestrahlungsstärke in der Raumtiefe.....	499
Abbildung 92: Emissionsspektrum OSRAM Lumilux 840	503
Abbildung 93: Emissionsspektrum OSRAM Lumilux 840	503

DIAGRAMMVERZEICHNIS

Diagramm 1: Anteilige Treibhausgasemissionen in Österreich 2006 nach Nutzungssektoren.....	31
Diagramm 2: Polares Sonnenbahndiagramm für den 48. nördlichen Breitengrad.....	42
Diagramm 3: Zylindrisches Sonnenbahndiagramm für den 48. nördlichen Breitengrad .	42
Diagramm 4: Häufigkeitsverteilung der Sonnenhöhe für drei europäische Standorte	43
Diagramm 5: Gemessener Verlauf der Totalen Solaren Bestrahlungsdichte 1978-2008 .	45
Diagramm 6: Rekonstruktion der Solaren Bestrahlungsdichte.....	47
Diagramm 7: Spektraler Verlauf der extraterrestrischen Strahlung überlagert mit der Strahlungsemission eines Temperaturstrahlers mit einer Temperatur von 5.780 K.....	49
Diagramm 8: Extinktion der Direktstrahlung in der Atmosphäre am Referenzzeitpunkt 15. Juni, 12:00	60
Diagramm 9: Spektrale terrestrische Globalstrahlungsstärken um jeweils 07:00.....	75
Diagramm 10: Spektrale terrestrische Globalstrahlungsstärken um jeweils 12:00.....	76
Diagramm 11: Spektrale terrestrische Globalstrahlungsstärken um jeweils 17:00.....	76
Diagramm 12: Spektrale terrestrische Globalstrahlungsstärken am 15. März.....	77
Diagramm 13: Spektrale terrestrische Globalstrahlungsstärken am 15. Juni.....	78
Diagramm 14: Spektrale terrestrische Globalstrahlungsstärken am 15. September.....	78
Diagramm 15: Spektrale terrestrische Globalstrahlungsstärken am 15. Dezember.....	79
Diagramm 16: Bestrahlungssummen 07:00 wolkenlos und vergleichend statistisch bewölkt	81
Diagramm 17: Bestrahlungssummen 12:00 wolkenlos und vergleichend statistisch bewölkt	81
Diagramm 18: Bestrahlungssummen 17:00 wolkenlos und vergleichend statistisch bewölkt	82
Diagramm 19: Reflexion, Absorption und Transmission einer 6mm Klarglasscheibe in Abhängigkeit von der Wellenlänge bei senkrechtem Strahlungseinfall.....	87
Diagramm 20: Reflexion, Absorption und Transmission einer 6mm Klarglasscheibe in Abhängigkeit vom Einfallswinkel (über das Spektrum gemittelte Werte)	88
Diagramm 21: Transmissionsgrad von 6 mm Klarglas im UV-Bereich.....	89

Diagramm 22: Effekt der Low-e-Beschichtung auf auf Ebene 3 auf den spektralen Transmissionsgrad in einem Zweischiebenglas (dargestellter Wellenlängenbereich von 250 nm bis 2.500 nm)	96
Diagramm 23: Effekt der Low-e-Beschichtung auf den spektralen Transmissionsgrad in einem Zweischiebenglas (dargestellter Wellenlängenbereich 280 nm bis 480 nm)	97
Diagramm 24: Spektraler Transmissionsgrad der Referenzverglasungen	109
Diagramm 25: Spektrale Wirkungs-Kurven: Sofortpigmentierung und verzögerte Pigmentierung nach DIN 5031-10	118
Diagramm 26: Spektrale Wirkungs-Kurve: Erythem nach CIE 1987/1993	120
Diagramm 27: Spektrale Wirkungs-Kurve: Photokarzinogenität nach CIE 1999	121
Diagramm 28: Qualitative Risikoabschätzung über das Auftreten von Photokarzinomen	122
Diagramm 29: Spektrale Wirkungs-Kurve: Pre-Vitamin D ₃ Synthese nach CIE 2006	124
Diagramm 30: Funktionskurve des Vitamin D ₃ Status	126
Diagramm 31: Gestorbene nach Todesursachen 2006 Österreich gesamt	131
Diagramm 32: Tumorlokalisationen nach Geschlecht, Österreich gesamt 2004, österreichisches Krebsregister Stand 11.09.2007	133
Diagramm 33: Wirkungs-Kurve $V'(\lambda)$ der Hellempfindlichkeit nach CIE unter skotopischen Bedingungen	148
Diagramm 34: Wirkungs-Kurven der Hellempfindlichkeit der drei Zapfen-Typen unter photopischen Bedingungen	150
Diagramm 35: Wirkungs-Kurve $V(\lambda)$ der Hellempfindlichkeit des Auges nach DIN 5031-3 unter photopischen Bedingungen	163
Diagramm 36: Wirkungs-Kurve für die Melatonin Suppression bezogen auf die Wellenlänge des angebotenen Lichts nach Thapan et. al. und nach Brainard et. al.	165
Diagramm 37: Wirkungs-Kurve $c(\lambda)$ für die Melatonin Suppression als circadiane Wirkfunktion nach Gall 2004	171
Diagramm 38: Dosis-Wirkungs-Kurve für die Melatonin Suppression in Bezug zur Hornhautbeleuchtungsstärke nach Zeitzer 2000	172
Diagramm 39: Dosis-Wirkungs-Kurve der Phasenverschiebung des endogenen rhythmischen Ansteigens und Absinkens des Melatonin Blutserumspiegels in Bezug zur Hornhautbeleuchtungsstärke nach Zeitzer 2000	181

Diagramm 40: Alters- und geschlechtsspezifische Entwicklung des Chronotyps	182
Diagramm 41: Vergleich der gesamten Schlafdauer an Arbeitstagen und an arbeitsfreien Tagen	183
Diagramm 42: Einfluss der Aufenthaltsdauer im Freien auf die zeitliche Lage der Schlafphase an arbeitsfreien Tagen	184
Diagramm 43: Ablaufschema der Bezüge von circadianem Rhythmus, homöostatischem Druck und Schlafinertie	189
Diagramm 44: Vergleichende Darstellung der Dosis-Wirkungs-Kurve der subjektiven Munterkeit und des Auftretens langsamer Augenbewegungen in Bezug zur Hornhautbeleuchtungsstärke.....	191
Diagramm 45: Wirkung von monochromatischem Licht der Wellenlängen 460 nm und 550 nm auf die Körperkerntemperatur [C°] und den distal-proximalen Hauttemperatur Gradient [C°].....	193
Diagramm 46: Wirkung von monochromatischem Licht der Wellenlängen 460 nm und 550 nm auf die Herzfrequenz [Schläge/min]	194
Diagramm 47: Verhältnis von Superoxid-Dismutase und der spezifischen Stoffwechselrate in der Säugetierleber	199
Diagramm 48: Wirkungs-Kurve $s(\lambda)_{bi}$ der Photoisomerisierung von Bilirubin in der Haut	205
Diagramm 49: Charakteristik der Vermittlungsfrequenz von Erregungspotentialmuster durch Wärme- und Kälterezeptoren bei statischem Temperaturempfinden.....	208
Diagramm 50: Ausgewählte photobiologische Wirkungs-Kurven des Menschen.....	221
Diagramm 51: Bestrahlungsstärke zu den Referenzzeitpunkten des 15. März	230
Diagramm 52: Spektrale Bestrahlungsstärke am 15. März um 07:00	231
Diagramm 53: Spektrale Bestrahlungsstärke am 15. März um 12:00	231
Diagramm 54: Spektrale Bestrahlungsstärke am 15. März um 17:00	232
Diagramm 55: Bestrahlungsstärke zu den Referenzzeitpunkten des 15. Juni	233
Diagramm 56: Spektrale Bestrahlungsstärke am 15. Juni um 07:00	234
Diagramm 57: Spektrale Bestrahlungsstärke am 15. Juni um 12:00	234
Diagramm 58: Spektrale Bestrahlungsstärke am 15. Juni um 17:00	235
Diagramm 59: Bestrahlungsstärke zu den Referenzzeitpunkten des 15. September	236
Diagramm 60: Spektrale Bestrahlungsstärke am 15. September um 07:00.....	237

Diagramm 61: Spektrale Bestrahlungsstärke am 15. September um 12:00.....	237
Diagramm 62: Spektrale Bestrahlungsstärke am 15. September um 17:00.....	238
Diagramm 63: Bestrahlungsstärke zu den Referenzzeitpunkten des 15. Dezember	239
Diagramm 64: Spektrale Bestrahlungsstärke am 15. Dezember um 12:00.....	240
Diagramm 65: Beleuchtungsstärke zu den Referenzzeitpunkten des 15. März	243
Diagramm 66: Spektrale Beleuchtungsstärke am 15. März um 07:00.....	244
Diagramm 67: Spektrale Beleuchtungsstärke am 15. März um 12:00.....	244
Diagramm 68: Spektrale Beleuchtungsstärken am 15. März um 17:00	245
Diagramm 69: Beleuchtungsstärke zu den Referenzzeitpunkten des 15. Juni	246
Diagramm 70: Spektrale Beleuchtungsstärke am 15. Juni um 07:00.....	247
Diagramm 71: Spektrale Beleuchtungsstärke am 15. Juni um 12:00.....	247
Diagramm 72: Spektrale Beleuchtungsstärke am 15. Juni um 17:00.....	248
Diagramm 73: Beleuchtungsstärke zu den Referenzzeitpunkten des 15. September....	249
Diagramm 74: Spektrale Beleuchtungsstärke am 15. September um 07:00	250
Diagramm 75: Spektrale Beleuchtungsstärke am 15. September um 12:00	250
Diagramm 76: Spektrale Beleuchtungsstärke am 15. September um 17:00	251
Diagramm 77: Beleuchtungsstärke zu den Referenzzeitpunkten des 15. Dezember.....	252
Diagramm 78: Spektrale Beleuchtungsstärke am 15. Dezember um 12:00	253
Diagramm 79: Stündliche erythemale Dosis zu den Referenzzeitpunkten des 15. März.....	257
Diagramm 80: Spektrale erythemal bewertete Strahlungsdichte am 15. März um 07:00	258
Diagramm 81: Spektrale erythemal bewertete Strahlungsdichte am 15. März um 12:00	258
Diagramm 82: Spektrale erythemal bewertete Strahlungsdichte am 15. März um 17:00	259
Diagramm 83: Stündliche erythemale Dosis zu den Referenzzeitpunkten des 15. Juni	260
Diagramm 84: Spektrale erythemal bewertete Strahlungsdichte am 15. Juni um 07:00	261

Diagramm 85: Spektrale erythemal bewertete Strahlungsdichte am 15. Juni um 12:00	261
Diagramm 86: Spektrale erythemal bewertete Strahlungsdichte am 15. Juni um 17:00	262
Diagramm 87: Stündliche erythemale Dosis zu den Referenzzeitpunkten des 15. September	263
Diagramm 88: Spektrale erythemal bewertete Strahlungsdichte am 15. September um 07:00	264
Diagramm 89: Spektrale erythemal bewertete Strahlungsdichte am 15. September um 12:00	264
Diagramm 90: Spektrale erythemal bewertete Strahlungsdichte am 15. September um 17:00	265
Diagramm 91: Stündliche erythemale Dosen zu den Referenzzeitpunkten des 15. Dezember	266
Diagramm 92: Spektrale erythemal bewertete Strahlungsdichte am 15. Dezember um 12:00	267
Diagramm 93: Stündliche Pre-Vitamin D ₃ bewertete Dosen zu den Referenzzeitpunkten des 15. März	270
Diagramm 94: Spektrale Pre-Vitamin D ₃ bewertete Strahlungsdichte am 15. März, 07:00	271
Diagramm 95: Spektrale Pre-Vitamin D ₃ bewertete Strahlungsdichte am 15. März, 12:00	272
Diagramm 96: Spektrale Pre-Vitamin D ₃ bewertete Strahlungsdichte am 15. März, 17:00	272
Diagramm 97: Stündliche Pre-Vitamin D ₃ bewertete Dosis zu den Referenzzeitpunkten des 15. Juni	273
Diagramm 98: Spektrale Pre-Vitamin D ₃ bewertete Strahlungsdichte am 15. Juni, 07:00	274
Diagramm 99: Spektrale Pre-Vitamin D ₃ bewertete Strahlungsdichte am 15. Juni, 12:00	274
Diagramm 100: Spektrale Pre-Vitamin D ₃ bewertete Strahlungsdichte am 15. Juni, 17:00	275

Diagramm 101: Stündliche Pre-Vitamin D ₃ bewertete Dosis zu den Referenzzeitpunkten des 15. September.....	276
Diagramm 102: Spektrale Pre-Vitamin D ₃ bewertete Strahlungsdichte am 15. September, 07:00.....	277
Diagramm 103: Spektrale Pre-Vitamin D ₃ bewertete Strahlungsdichte am 15. September, 12:00.....	277
Diagramm 104: Spektrale Pre-Vitamin D ₃ bewertete Strahlungsdichte am 15. September, 17:00.....	278
Diagramm 105: Stündliche Pre-Vitamin D ₃ bewertete Dosis zu den Referenzzeitpunkten des 15. Dezember.....	279
Diagramm 106: Spektrale Pre-Vitamin D ₃ bewertete Strahlungsdichte am 15. Dezember, 12:00.....	280
Diagramm 107: Melatonin Suppression bewertete Strahlungsdichte zu den Referenzzeitpunkten des 15. März.....	284
Diagramm 108: Spektrale Melatonin Suppression bewertete Strahlungsdichte am 15. März, 07:00.....	285
Diagramm 109: Spektrale Melatonin Suppression bewertete Strahlungsdichte am 15. März, 12:00.....	285
Diagramm 110: Spektrale Melatonin Suppression bewertete Strahlungsdichte am 15. März, 17:00.....	286
Diagramm 111: Melatonin Suppression bewertete Strahlungsdichten zu den Referenzzeitpunkten des 15. Juni.....	287
Diagramm 112: Spektrale Melatonin Suppression bewertete Strahlungsdichte am 15. Juni, 07:00.....	288
Diagramm 113: Spektrale Melatonin Suppression bewertete Strahlungsdichten am 15. Juni, 12:00.....	288
Diagramm 114: Spektrale Melatonin Suppression bewertete Strahlungsdichten am 15. Juni, 17:00.....	289
Diagramm 115: Melatonin Suppression bewertete Strahlungsdichten zu den Referenzzeitpunkten des 15. Sept.....	290
Diagramm 116: Spektrale Melatonin Suppression bewertete Strahlungsdichten am 15. September, 07:00.....	291

Diagramm 117: Spektrale Melatonin Suppression bewertete Strahlungsdichten am 15. September, 12:00.....	291
Diagramm 118: Spektrale Melatonin Suppression bewertete Strahlungsdichten am 15. September, 17:00	292
Diagramm 119: Melatonin Suppression bewertete Strahlungsdichten zu den Referenzzeitpunkten des 15. Dez.....	293
Diagramm 120: Spektrale Melatonin Suppression bewertete Strahlungsdichten am 15. Dezember, 12:00	294
Diagramm 121: Strahlungssummen unter Referenzbedingungen und im langjährigen Mittel, 07:00.....	296
Diagramm 122: Strahlungssummen unter Referenzbedingungen und im langjährigen Mittel, 12:00.....	297
Diagramm 123: Strahlungssummen unter Referenzbedingungen und im langjährigen Mittel, 12:00.....	297
Diagramm 124: Verlauf der Vertikalbeleuchtungsstärke in der Raumtiefe.....	299
Diagramm 125: Verlauf des Tageslichtquotienten im Raumtyp T_GGG_B460_T2850 ...	332
Diagramm 126: Verlauf des Tageslichtquotienten im Raumtyp T_GWG_B460_T1150...	332
Diagramm 127: Jahresverlauf des LPF für das Basismodell T_GGG_B460_T1400_A180	341
Diagramm 128: Tageserlauf der stündlichen Momentanwerte des LPF für das Basismodell T_GGG_B460_L1400_A180	342
Diagramm 129: Exemplarische Darstellung des monatlichen LPF und HWB über ein Jahr	347
Diagramm 130: Exemplarische Darstellung des monatlichen LPF, HWB und KB über ein Jahr	348
Diagramm 131: Spektrale terrestrische Bestrahlungsstärken um jeweils 12:00	390
Diagramm 132: Spektrale Bestrahlungsstärken am 15. Juni um 12:00 hinter technischen Funktionsglasscheiben	391
Diagramm 133: Spektrale Bestrahlungsstärken am 15. Juni um 12:00 hinter den technischen Funktionsglasscheiben, Ausschnitt 280nm bis 780 nm	392
Diagramm 134: Ausgewählte photobiologische Wirkungs-Kurven des Menschen	393

Diagramm 135: spektrale Pre-Vitamin D ₃ bewertete Strahlungsdichte am 15. Juni, 12:00	395
Diagramm 136: Stündliche erythemale Dosis zu den Referenzzeitpunkten des 15. Juni	400
Diagramm 137: Spektrale erythemal bewertete Strahlungsdichte am 15. Juni um 12:00	401
Diagramm 138: Qualitative Risikoabschätzung über das Auftreten von Photokarzinomen.....	402
Diagramm 139: Melatonin Suppression bewertete Strahlungsdichte zu den Referenzzeitpunkten des 15. März	405
Diagramm 140: Spektrale Bestrahlungsstärke am 15. Juni um 12:00.....	408
Diagramm 141: Strahlungssummen unter Referenzbedingungen und im langjährigen Mittel, 12:00	432
Diagramm 142: Verlauf der Beleuchtungsstärke an vertikalen Messebenen in der Raumtiefe.....	433
Diagramm 143: Tagesverlauf der Momentanwerte des LPF für das Basismodell T_GGG_B460_T1400_A60 am 21. März.....	465
Diagramm 144: Langjährige Monatsmittel der Luftfeuchte in Wien.....	474
Diagramm 145: langjähriger Jahresverlauf der zonalen Monatsmittel der totalen Ozonsäulenmenge für 45 bis 50° nördl. Breite, laut NASA TOMS Earth Probe	478
Diagramm 146: Verlauf der Vertikalbeleuchtungsstärke in der Raumtiefe.....	500
Diagramm 147: Strahlungssummen unter Referenzbedingungen und im langjährigen Mittel, 07:00.....	507
Diagramm 148: Strahlungssummen unter Referenzbedingungen und im langjährigen Mittel, 12:00	508
Diagramm 149: Strahlungssummen unter Referenzbedingungen und im langjährigen Mittel, 12:00	508

FORMELVERZEICHNIS

Formel 1: Lambert-Beer'sches Gesetz der Strahlungsextinktion, 1. Schreibweise	52
Formel 2: Lambert-Beer'sches Gesetz der Strahlungsextinktion, 2. Schreibweise	52
Formel 3: Atmosphärischer Transmissionskoeffizient	53
Formel 4: Lambert-Beer'sches Gesetz der Strahlungsextinktion, 3. Schreibweise	53
Formel 5: Lambert-Beer'sches Gesetz der Strahlungsextinktion, 4. Schreibweise	53
Formel 6: Summenformel für die optische Dicke, 1. Schreibweise	54
Formel 7: Summenformel für die optische Dicke, 2. Schreibweise	54
Formel 8: Lambert-Beer'sches Gesetz der Strahlungsextinktion als Funktion der Wellenlänge	55
Formel 9: Lambert-Beer'sches Gesetz, Schreibweise mit Linke-Faktor	57
Formel 10: Ångström-Formel: spektrale optische Dicke aufgrund von Mie-Streuung	58
Formel 11: Näherungsformel von Leckner für die optische Dicke aufgrund von Rayleigh-Streuung	64
Formel 12: Näherungsformel von Gueymard für die optische Dicke aufgrund von Rayleigh-Streuung	64
Formel 13: Näherungsformel von Gueymard für die atmosphärische Masse für Rayleigh-Streuung	64
Formel 14: Formel von Ångström für optische Dicke aufgrund von Mie-Streuung an Aerosolen	65
Formel 15: Formel von Ångström, Schreibweise für eine Referenz-Wellenlänge von 0,5 µm	65
Formel 16: Atmosphärischer Transmissionskoeffizient von gasförmigen Atmosphärenbestandteilen	67
Formel 17: Näherungsformel zur Berechnung der Diffusstrahlung aus Rayleigh-Streuung	68
Formel 18: Näherungsformel zur Berechnung der Diffusstrahlung aus Mie-Streuung	69
Formel 19: Lambert-Beer'sches Gesetz der Strahlungsextinktion für den Durchgang durch Glas	86
Formel 20: Zusammenhang zwischen spektralem Reflexions-, Absorptions- und Transmissionsrad	86

Formel 21: Stefan-Boltzmann ´sches Gesetz für schwarze Strahler	89
Formel 22: Erweitertes Stefan-Boltzmann ´sches Gesetz für nicht schwarze Strahler	90
Formel 23: Berechnung der Selektivitätskennzahl	102
Formel 24: Berechnung des normalen Emissionsvermögen	103
Formel 25: Berechnung einer photobiologisch wirksamen Bestrahlungsstärke E_{biol} aus der relativen spektralen Empfindlichkeit $s(\lambda)_{\text{biol}}$	110
Formel 26: Berechnung einer photobiologisch wirksamen Bestrahlungsstärke X_{biol} aus der relativen spektralen Empfindlichkeit $s(\lambda)_{\text{biol}}$	110
Formel 27: Berechnung der Beleuchtungsstärke aus dem spektralen Helligkeitsempfinden $v(\lambda)$	111
Formel 28: Maßeinheit für die Dosierung von Vitamin D ₃ laut WHO	128
Formel 29: Baurechtlich maximal zulässige Wohnungstiefen des direkt belichteten Wohnungsteils.....	313
Formel 30: Baurechtlich maximal zulässige Wohnungstiefe des indirekt belichteten Wohnungsteils.....	314
Formel 31: Anforderung an den Heizwärmebedarf ($HWB_{\text{BGF,WG,Ref}}$) laut ÖNORM B 8110-1	322
Formel 32: Photometrisches Entfernungsgesetz.....	449
Formel 33: Planck ´sches Strahlungsgesetz	450
Formel 34: Wiensches Verschiebungsgesetz.....	450
Formel 35: Boltzmann ´sches Gesetz.....	450
Formel 36: Planck ´sches Strahlungsgesetz	451
Formel 37: Umrechnung des Photonenflusses in die energetische Bestrahlungsstärke .	451
Formel 38: Berechnung lichttechnischer Größen aus spektralen energetischen Strahlungsgrößen	453
Formel 39: Lambert Beer ´sches Gesetz der Strahlungsextinktion, 5. Schreibweise	455
Formel 40: Lambert-Beer ´sches Gesetz der Strahlungsextinktion, 6. Schreibweise	455
Formel 41: Snellius ´sches Brechungsgesetz.....	456
Formel 42: Grenzwinkel der Totalreflexion	457
Formel 43: Lambert-Beer ´sches Gesetz, Schreibweise mit Linke-Faktor	482
Formel 44: Optische Dicke der Referenzatmosphäre bei vertikalem Strahlungseinfall ..	482

Formel 45: Transmissions-Leitwert eines Gebäudes nach OENORM B 8110-6.....	486
Formel 46: Transmissions-Leitwert eines Gebäudes mit Temperaturkorrekturfaktoren nach OENORM B 8110-6.....	487
Formel 47: Pauschale Berücksichtigung von Wärmebrücken.....	487
Formel 48: Anforderungen an den Heizwärmebedarf nach OENORM B 8110-1	490

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Eingabedaten zur Berechnung der terrestrischen Sonnenstrahlung zu den Referenzzeitpunkten	72
Tabelle 2: Kennzahlen der terrestrischen Sonnenstrahlung zu den Referenzzeitpunkten um 12:00.....	73
Tabelle 3: Kennzahlen der terrestrischen Sonnenstrahlung zu den Referenzzeitpunkten um 07:00 und 17:00	74
Tabelle 4: Bestrahlungssummen 07:00 wolkenlos und vergleichend statistisch bewölkt	80
Tabelle 5: Bestrahlungssummen 12:00 wolkenlos und vergleichend statistisch bewölkt	80
Tabelle 6: Bestrahlungssummen 17:00 wolkenlos und vergleichend statistisch bewölkt	80
Tabelle 7: Festlegungen zum Wärmedurchgangskoeffizient	98
Tabelle 8: Festlegungen zum Gesamtenergiedurchlassgrad	99
Tabelle 9: Festlegungen zum Transmissionsgrad	100
Tabelle 10: Festlegungen zum Reflexionsgrad.....	102
Tabelle 11: Festlegungen zur Selektivitätskennzahl	103
Tabelle 12: Festlegungen zum Emissionsvermögen	104
Tabelle 13: Prozentanteile der auf die Hautoberfläche auftreffenden UV-Strahlung, die unterschiedlich tiefe epidermale Schichten erreichen.....	115
Tabelle 14: Hauttypen des Menschen modifiziert nach Fitzpatrick.....	119
Tabelle 15: Überblick über ausgewählte Studienergebnisse betreffend den Vitamin D ₃ Status in unterschiedlichen europäischen Ländern differenziert nach Populationsgruppen und Winter- beziehungsweise Sommerhalbjahr	127
Tabelle 16: Prozentanteile der auf die Hautoberfläche auftreffenden IR-Strahlung, die unterschiedlich tiefe Hautschichten erreichen	209
Tabelle 17: Bestrahlungsstärken zu den Referenzzeitpunkten	229
Tabelle 18: Bestrahlungsstärken zu den Referenzzeitpunkten relativ zu außen.....	229
Tabelle 19: Beleuchtungsstärken zu den Referenzzeitpunkten	241
Tabelle 20: Beleuchtungsstärken zu den Referenzzeitpunkten relativ zu außen	242
Tabelle 21: Stündliche erythemale Dosis zu den Referenzzeitpunkten.....	255
Tabelle 22: Stündliche erythemale Dosis zu den Referenzzeitpunkten relativ zu außen	256

Tabelle 23: Stündliche Pre-Vitamin D ₃ bewertete Strahlungsdosis zu den Referenzzeitpunkten	269
Tabelle 24: Stündliche Pre-Vitamin D ₃ bewertete Strahlungsdosis zu den Referenzzeitpunkten relativ zu außen.....	269
Tabelle 25: Melatonin Suppression bewertete Strahlungsdichte.....	283
Tabelle 26: Melatonin Suppression bewertete Strahlungsdichte relativ zu außen	283
Tabelle 27: Strahlungssummen unter Referenzbedingungen und im langjährigen Mittel.....	295
Tabelle 28: Liste der höchstzulässigen Wärmedurchgangskoeffizienten laut ÖMORM B 8110-1	322
Tabelle 29: Geometrie der Basismodelle	325
Tabelle 30: Geometrie der übergeordneten Raumstrukturen.....	325
Tabelle 31: U-Werte der Hüllbauteile der Basismodelle und der übergeordneten Raumstrukturen	326
Tabelle 32: Gesamtenergiedurchlassgrade der Verglasungen	326
Tabelle 33: Ergebnisse der Tageslichtquotientenberechnung an den Basismodellen	330
Tabelle 34: Ergebnisse der Tageslichtquotientenberechnung an den verkürzten Basismodellen	331
Tabelle 35: Geometrie der verkürzten Basismodelle	333
Tabelle 36: Geometrie der verkürzten übergeordneten Raumstrukturen.....	333
Tabelle 37: Bauphysikalische Kennwerte der Hüllbauteile der verkürzten Raumstrukturen	334
Tabelle 38: Ergebnisübersicht T_GGG_B460_T1400	367
Tabelle 39: Ergebnisübersicht T_GGG_B230_T1100	368
Tabelle 40: Ergebnisübersicht T_GWG_B460_T1150.....	369
Tabelle 41: Ergebnisübersicht T_GWG_B230_T900	370
Tabelle 42: Ergebnisse "Moderate Typen".....	376
Tabelle 43: Ergebnisse "Thermisch mehrfach problematische Typen"	377
Tabelle 44: Ergebnisse "Dunkle Typen"	378
Tabelle 45: Ergebnisse "Heizproblematische Typen"	379
Tabelle 46: Ergebnisse "Überhitzungstypen".....	380

Tabelle 47: stündliche Pre-Vitamin D ₃ bewertete Strahlungsdosis zu den Referenzzeitpunkten	395
Tabelle 48: Überblick über ausgewählte Studienergebnisse betreffend den Vitamin D ₃ Status in unterschiedlichen europäischen Ländern differenziert nach Populationsgruppen und Winter- beziehungsweise Sommerhalbjahr	397
Tabelle 49: stündliche erythemale Dosis zu den Referenzzeitpunkten	399
Tabelle 50: Melatonin Suppression bewertete Strahlungsdichte.....	404
Tabelle 51: Bestrahlungsstärken zu den Referenzzeitpunkten	407
Tabelle 52: Ergebnisübersicht T_GGG_B460_T1400	414
Tabelle 53: Ergebnisübersicht T_GGG_B230_T1100	415
Tabelle 54: Ergebnisübersicht T_GWG_B460_T1150.....	424
Tabelle 55: Ergebnisübersicht T_GWG_B230_T900	425
Tabelle 56: Benennung der Wellenlängenbereiche laut DIN 5031-7	452
Tabelle 57: Stundenwerte der Lufttemperatur am Standort Wien nach ÖNORM B 8110-5 und ÖNORM H 5056	472
Tabelle 58: Langjährige Monatsmittel der Luftfeuchte in Wien	473
Tabelle 59: Langjähriger Jahresverlauf der zonalen Monatsmittel der totalen Ozonsäulenmenge für 45 bis 50° nördl. Breite.....	477
Tabelle 60: Monatsmittelwerte des AOD 500, Univ. München 2001, 2002, 2007.....	480
Tabelle 61: Eingabedaten zur Berechnung der terrestrischen Sonnenstrahlung zu den Referenzzeitpunkten	483
Tabelle 62: Sonnengeometrische Eingabedaten der Referenzzeitpunkte.....	484
Tabelle 63: Mindest erforderliche U-Werte der übergeordneten Raumstrukturen	491
Tabelle 64: Geometrie der Basismodelle	491
Tabelle 65: Geometrie der übergeordneten Raumstrukturen.....	492
Tabelle 66: Temperaturkorrekturfaktoren zur vereinfachten Berechnung des Transmissions-Leitwertes nach OENORM B 8110-6.....	493
Tabelle 67: Temperaturkorrekturfaktoren zur vereinfachten Berechnung des Transmissions-Leitwertes nach den Richtwerten der MA 25	493
Tabelle 68: Temperaturkorrekturfaktoren gegen unbeheizte Nachbarräume.....	494
Tabelle 69: Geometrie der Basismodelle	495

Tabelle 70: Bauphysikalische Kennwerte der Hüllbauteile der verkürzten Raumstrukturen	497
Tabelle 71: Vertikalbeleuchtungsstärken in der Raumtiefe.....	499
Tabelle 72: Langjährige monatliche Tagessummen der Globalstrahlung für den Standort Wien.....	505
Tabelle 73: Langjährige mittlere Trübungsfaktoren für den 15. Tag des Monats am Standort Wien.....	506
Tabelle 74: Bestrahlungssummen unter Referenzbedingungen und im langjährigen Mittel	506

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Åkerstedt T., Gillberg M., Subjective and objective sleepiness in the active individual, *International Journal of Neuroscience* 52, 29 – 37, 1990
- [2] Alagol F., Shihadeh Y., Boztepe H., Tanakol R., Yarman S., Azizlerli H., Sandalci O., Sunlight exposure and vitamin D deficiency in Turkish women, *Journal of Endocrinological Investigation* 23, 173 – 177, 2000
- [3] Altmeyer P., Hoffmann K., *Basiswissen Dermatologie, Eine vorlesungsbegleitende Darstellung*, 2005
- [4] Ancoli-Israel S., Gehrman P., Martin J., Shochat T., Marler M., Corey-Bloom J., Levi L., Increased Light Exposure Consolidates Sleep and Strengthens Circadian Rhythms in Severe Alzheimer´s Disease Patients, *Behavioral Sleep Medicine*, 1/1, 22 – 36, 2003
- [5] Ancoli-Israel S., Martin J., Kripke D., Marler M., Klauber M., Effect of light treatment on sleep and circadian rhythms in demented nursing home patients., *Journal of the American Geriatrics Society* 50/2, 282 – 289, 2002
- [6] Anderson G. P., Chetwynd J. H., Theriault J. M., Acharya P., Berk A., Robertson D. C., Kneizys F. X., Hoke M. L., Abreu L.W. and Shettle E. P.: MODTRAN 2 – suitability for remote sensing, *Proceedings of the Conference on Propagation and Remote Sensing II*, Vol. 1968, Orlando, S.514-525, 1993
- [7] Anderson G., Chlebowski R., Rossouw J., Rodabough R., McTiernan A., Margolis K., Aggerwal A., Curb J., Hendrix S., Hubbell F., Khandekar J., Lane D., Lasser N., Lopez A., Potter J., Ritenbaugh C., Prior Hormone Therapy and Breast Cancer Risk in the Women's Health Initiative Randomized Trial of Estrogen Plus Progestin., *Maturitas* 55,103-115, 2006
- [8] Andjelkovic Z., Vojinovic J., Pejnovic N., Popovic M., Dujic A., Mitrovic D., Pavlica L., Stefanovic D., Disease modifying and immunomodulatory effects of high dose 1 alpha (OH) D3 in rheumatoid arthritis patients. , *Clinical and Experimental Rheumatology* 17, 453 - 456, 1999
- [9] Ångström A.: On the atmospheric transmission of sun radiation and on dust in the air, *Geographische Annalen* 2, 1929, S.156-166
- [10] Antolin I., Mayo J., Sáinz R., del Brio M., Herrera F., Martín V., Rodríguez C., Protective effect of melatonin in a chronic experimental model of Parkinson´s disease, *Brain Research* 943, 163 – 173, 2002
- [11] Arendt J., Does melatonin improve sleep?, *British Medical Journal* 332, 550, 2006
- [12] Ariznavarreta C., Cardinali D., Villanúa M., Granados B., Martín M., Chiesa J., Golombek D., Tresguerres J., Circadian rhythms in airline pilots submitted to long-haul transmeridian flights., *Aviation, Space and Environmental Medicine* 73/5, 445-55, 2002
- [13] Armstrong B., Kricker A., The epidemiology of UV induced skin cancer, *Journal of Photochemistry and Photobiology* 63, 8 – 18, 2001
- [14] ASTM E490-00a, *Standard Solar Constant and Zero Air Mass Solar Spectral Irradiance Tables*, 2006
- [15] ASTM G173-03e1, *Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface*, 2003
- [16] Auer D., Schumann E., Kumpfel T., Gossel C., Trenkwalder C., Seasonal fluctuations of gadolinium-enhancing magnetic resonance imaging lesions in multiple sclerosis., *Annals of Neurology* 47, 276 – 277, 2000
- [17] Avenell A., Gillespie W., Gillespie L., O´Connell D., Vitamin D and vitamin D analogues for preventing fractures associated with involutional and post-menopausal osteoporosis, *Cochrane Database of Systematic Reviews* 20/3, 227, 2005
- [18] Badia P., Myers B., Boecker M., Culpepper J., Harsh J., Bright Light Effects on Body Temperature, Alertness, EEG and Behavior, *Physiology & Behavior* 50, 583 – 588, 1991
- [19] Bailey S., Heitkemper M., Circadian Rhythmicity of Cortisol and Body Temperature: Morningness-Eveningness Effects, *Chronobiology International* 18/2, 249 – 261, 2001
- [20] Baum A., Grunberg N., Measurement of stress hormones. In: Cohen D., Kessler R., Gordon L. (Herausgeber), *Measuring stress: A guide for health and social scientists*, 175-192, 1997
- [21] Bayer W., Martin M., Epiphysenhormon Melatonin, *Labormedizin in der Naturheilkunde*, 254 – 255, 2006

- [22] Behrman R., Nelson Textbook of Pediatrics, 16. Auflage, 2000
- [23] Benitez-King G., Ramirez-Rodriguez G., Ortiz L., Meza I., The neuronal cytoskeleton as a potential as a potential therapeutical target in neurodegenerative diseases and schizophrenia, *Current Drug Targets- CNS & Neurological Disorders* 3/6, 515 – 533, 2004
- [24] Benninghoff A., Drenckhahn D., Zenker W., Anatomie, Makroskopische Anatomie, Histologie, Embryologie, Zellbiologie, Band 2, Herz-Kreislauf-System, Lymphatisches System, endokrines System, Nervensystem, Sinnesorgane, Haut, 16. Auflage, 2004
- [25] Bentham G., Association between incidence of non-Hodgkin´s lymphoma and solar ultraviolet radiation in England and Wales, *British Medical Journal* 312/7039, 1128 - 1131, 1996
- [26] Bergmann L., Schaefer Cl. Et al.: Lehrbuch der Experimentalphysik, Verlag Walter de Gruyther, Berlin, 1966
- [27] Berk A., Bernstein L. S. and Robertson D. C.: MODTRAN: A oderate Resolution Model for LOWTRAN 7, Reprot GL-TR-89-0122, Air Force Geophysical Labaratory, Hanscom, MA, 1989
- [28] Bernard E.: Mehr als nur Licht, Das Fenster – Bauteil oder Gestaltungselement, Vorlesung an der Donau-Universität Krems, 2009
- [29] Berson D., Dunn F., Takao M., Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock, *Science* 295, 1070 – 1073, 2002
- [30] Bertone-Johnson E., Chen W., Holick M., Hollis B., Colditz G., Willett W., Hankinson S., Plasma 25-hydroxyvitamin D and 1,25-dihydroxyvitamin D and risk of breast cancer, *Cancer Epidemiology Biomarkers and Prevention*, 14/8, 1991 - 1997, 2005
- [31] BGBl. Nr. 742/1988 ST0281 Maß- und Eichgesetz , Artikel I,§ 2 (6) 4., 1988
- [32] Bird R. E.: A simple, solar spectral model for direct and diffuse horizontal radiation, *Solar Energy* 32, 461-471, 1984
- [33] Bird R. E. und Riordan C.: Simple solar spectral model for direct and diffuse radiation on horizontal and tilted planes at the Earth´s surface for cloudless atmospheres, *Journal of Climate and Applied Meteorology* 25, S.87-97, 1986
- [34] Bischoff H., Stähelin H., Vogt P., Friderich P., Vontheim R., Tyndall A., Theiler R., Immobility as a major cause of bone remodeling in residents of a long-stay geriatric ward, *Calcified Tissue International* 64, 485 – 489, 1999
- [35] Bischoff-Ferrari H., Dawson-Hughes B., Willett W., Stachelin H., Bazemore M., Zee R., Wong J., Effect of Vitamin D on falls: a meta-analysis., *Journal of the American Medical Association*, 291, 1999 – 2006, 2004
- [36] Black A., Japanische Häuser, Architektur und Interieurs, 2001
- [37] Bodiwala D., Luscombe C., Liu S., Saxby M., Jones P., Fryer A., Strange R., Prostate cancer risk and exposure to ultraviolet radiation: further support for the protective effect of sunlight, *Cancer Letters* 192, 145 – 149, 2003
- [38] Boonen S., Bischoff-Ferrari H., Cooper C., Lips P., Ljunggren O., Meunier P., Reginster J., Addressing the musculoskeletal components of fracture risk with calcium and vitamin D: a review of the evidence., *Calcified Tissue International* 78 / 5, 257 – 270, 2006
- [39] Brainard G., Hanifin J., Greeson J., Byrne B., Glickman G., Gerner E., Rollag M., Action Spectrum for Melatonin Regulation in Humans: Evidence for a Novel Circadian Photoreceptor, *The Journal of Neuroscience*, 21(16) 6405 – 6412, 2001
- [40] Braun-Falco O., Plewig G., Wolff H., *Dermatologie und Venerologie*, 4. Auflage, 497, 1996
- [41] Brodner B., Pawlatschen, *Die alte Idee – Der neue Freiraum*, Diplomarbeit an der Universität für Bodenkultur Wien, 1997
- [42] Bruls W., van Weelden H., van der Leun J., Transmission of UV-radiation through human epidermal layers as a factor influencing the minimal erythema dose., *Photochemistry and Photobiology* 39, 63 - 67, 1984
- [43] Buijs R., Wortel J., van Heerikhuize J., Feenstra M., Horst G., Romijn H., Kalsbeek A., Anatomical and functional demonstration of a multisynaptic suprachiasmatic nucleus adrenal (cortex) pathway, *European Journal of Neuroscience*, 11/5, 1535 – 1544, 1998
- [44] Burmester G., *Taschenatlas der Immunologie. Grundlagen*, Labor, Klinik., 2. Auflage, 2006
- [45] Buscemi N., Vandermeer B., Hooton N., Pandya R., Tjosvold L., Hartling L., Vohra S., Klassen T., Baker G., Efficacy and safety of exogenous melatonin for secondary sleep disorders and sleep disorders accompanying sleep restriction: meta-analysis., *British Medical Journal* 332, 385–393, 2006

- [46] Buselmaier W., *Biologie für Mediziner*, 10. Auflage, 2006
- [47] Cajochen C., Zeitzer J., Czeisler C., Dijk D., Dose-response relationship for light and ocular and electroencephalographic correlates of human alertness, *Behavioural Brain Research* 115, 75 – 83, 2000
- [48] Cajochen C., Münch M., Kobińska S., Kräuchi K., Steiner R., Oelhafen P., Orgül S., Wirz-Justice A., High sensitivity of human melatonin, alertness, thermoregulation and heart rate to short wavelength light, *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism* 90/3, 1311 – 1316, 2005
- [49] Cajochen C., *Altering effects of light*, *Sleep Medicine Reviews* 11, 453 – 464, 2007
- [50] Cannell J., Vieth R., Umhau J., Holick M., Grant W., Madronich S., Garland C., Giovannucci E., Epidemic influenza and Vitamin D, *Epidemiology and Infection* 134, 1129 – 1140, 2006
- [51] Cantorna M., Mahon B., Mounting Evidence for Vitamin D as an Environmental Factor Affecting Autoimmune Disease Prevalence, *Experimental Biology and Medicine* 229, 1136 – 1142, 2004
- [52] Ceballos-Baumann A., Abele M., *Bewegungsstörungen: Richtig erkennen und behandeln*, 322 – 325, 2005
- [53] Chew K., Mc Cleary R., The spring peak in suicides: a cross-national analysis, *Social Science & Medicine* 40/2, 223 – 230, 1995
- [54] Chlebowski R., Hendrix S., Langer R., Stefanick M., Gass M., Lane D., Rodabough R., Gilligan M., Cyr M., Thomson C., Khandekar J., Petrovitch H., McTiernan A., Influence of Estrogen Plus Progestin on Breast Cancer and Mammography in Healthy Postmenopausal Women: the Women's Health Initiative Randomized Trial., *The Journal of the American Medical Association* 289, 3243-3253, 2003
- [55] CIE 158-2004: Ocular lighting effects on human physiology and behaviour, Report herausgegeben von Brainard G., Roberts J., van den Beld G., Veitch J., 2004
- [56] CIE 174:2006: Action Spectrum for the Production of Previtamin D₃ in Human Skin, 2006
- [57] CIE Draft Committee Report TC 6-32 (1999) Action spectrum for photocarcinogenesis, 1999
- [58] CIE 103/3, Reference action spectra for ultraviolet induced erythema and pigmentation of different human skin types, 1993
- [59] CIE Proceedings (1951), Vol. 1, Sec 4; Vol 3, p. 37, Bureau Central de la CIE, Paris, 1951
- [60] CIE-Journal 6/1 17-22, 1987
- [61] Coblenz W., Stair R., Hogue J., The spectral erythemic reaction of the untanned human skin to ultra-violet radiation, *Journal of Research of the National Bureau of Standards* 8, 541, 1932
- [62] Cohen M., Mesler D., Snipes R., Gray T., 1,25-dihydroxyvitamin D₃ activates secretion of hydrogen peroxide by human monocytes., *The Journal of Immunology* 136, 1049-1053, 1986
- [63] Corrodi M., Spechtenhauser K., *LichtEinfall*, 2008
- [64] Crawford B., The scotopic visibility function, In: *Proceedings of the Physical Society*, 62, 321-334, 1949
- [65] Cruz A., Nutrition and osteoporosis: facts and uncertainties about calcium and vitamin D recommendations, *Forum of Nutrition* 56, 178 – 181, 2003
- [66] Cucino D., Sonnenberg A., Occupational mortality from inflammatory bowel disease in the United States 1991 – 1996., *American Journal of Gastroenterology*, 96, 1101 – 1105, 2001
- [67] Cuito A., Asensio P. (Herausgeber), *Minimalist Spaces, Housing, Commercial Spaces, Offices and Public Buildings*, 2002
- [68] Cutler R., Genetic and evolutionary molecular aspects of aging, in: Dall J., Ermini M., Herrling P., Lehr U., Meier-Runge W., Stähelin H., (Herausgeber), *Prospects in aging*, 1993
- [69] Czeisler C., Wright K. Jr., Influence of light on circadian rhythmicity in humans, in: *Regulation of Sleep and Circadian Rhythms*, Herausgeber: Turek F, Zee P., 149 -180, 1999
- [70] Dacey D., Liao H., Peterson B., Robinson F., Smith V., Pokorny J., et. al. , Melanopsin-expressing ganglion cells in primate retina signal colour and irradiance and project to the LGN, *Nature* 433, 749 – 754, 2005
- [71] Danno K., Mori N., Toda K., Kobayashi T., Utani A., Near-infrared irradiation stimulates cutaneous wound repair: laboratory experiments on possible mechanisms, *Photodermatology Photoimmunology and Photomedicine* 17, 261 – 265, 2001

- [72] Daurat A., Aguirre A., Foret J., Gonnet P., Keromes A., Benoit O., Bright Light Affects Alertness and Performance Rhythms During a 24-h Constant Routine, *Physiology & Behavior* 53, 929 – 936, 1993
- [73] Davies H., Bignell G., Cox C., Mutations of the BRAF gene in human cancer, *Nature* 417/ 6, 949 – 954, 2002
- [74] Davies P., Bates C., Cole T., Prentice A., Clark P., Vitamin D: seasonal and regional differences in preschool children in Great Britain, *European Journal of Clinical Nutrition* 53, 195 – 198, 1999
- [75] Dees C., Harkins J., Petersen M., Fisher W., Wachter E., Treatment of murine cutaneous melanoma with near infrared light, *Photochemistry and Photobiology* 75, 296 – 301, 2002
- [76] Deetjen P., Speckmann E., Hescheler J., *Physiologie*, 4. Auflage, 2004
- [77] Dement W., *Some Must Watch While Some Must Sleep*, 1976
- [78] Deutschen Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bericht, Improvement of the Indoor Air Quality, 1996
- [79] Deutschen Strahlenschutzkommission: Stellungnahme, Schutz des Menschen vor den Gefahren der UV-Strahlung in Solarien, wissenschaftliche Begründung zur gleichnamigen Empfehlung der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 172. Sitzung, 2001
- [80] Deutsches Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bericht, Improvement of the Indoor Air Quality, 1996
- [81] Diabetes Epidemiology Research International Group, Geographic patterns of childhood insulin-dependent diabetes mellitus., *Diabetes* 37, 1113 - 1119, 1988
- [82] DIN 5031- 3, Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik – Teil 3: Größen, Formelzeichen und Einheiten der Lichttechnik, 1982
- [83] DIN 5031- 7, Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik, - Teil 7: Benennung der Wellenlängenbereiche, 1984
- [84] DIN 5031-10, Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik , - Teil 10: Größen, Formeln und Kurzzeichen für photobiologisch wirksame Strahlung, 2000
- [85] DIN 5034- 2, Tageslicht in Innenräumen – Teil 2: Grundlagen, 1985
- [86] DIN 5034-4, Tageslicht in Innenräumen, Teil 4 – vereinfachte Bestimmungen für Mindestfenstergrößen für Wohnräume, 1994
- [87] DIN EN 60335-2-27; VDE 0700-27:2009-04 Sicherheit elektrischer Geräte für den Hausgebrauch und ähnliche Zwecke - Teil 2-27: Besondere Anforderungen für Hautbehandlungsgeräte mit Ultraviolett- und Infrarotstrahlung, 2009
- [88] Dines W., The heat balance of the atmosphere, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol.43, 1917, S.151-158
- [89] Docio S., Riancho J., Perez A., Olmos J., Amado J., Gonzalez-Macias J., Seasonal deficiency of vitamin D in children: a potential target for osteoporosis-preventing strategies? *Journal of Bone and Mineral Research* 13, 544 – 548, 1998
- [90] Douglas A., Rawles J., Alexander E., Allan T., Winter pressure on hospital medical beds, *British Medical Journal* 303, 508-509, 1991
- [91] Ebner P., Klaffke J., *Living Streets*, Forschungsarbeit an der Technischen Universität München, 2007
- [92] Ehrenstein W., Das Auge stellt die biologische Uhr des Menschen – Konsequenzen für Lichtnutzung und Lichttechnik, Technische Universität Berlin, Symposium „Licht und Gesundheit“, 21. und 22. Februar 2002
- [93] Enoch M., Goldman D., Genetic influences, In: Patronen T., Magnusson A., (Herausgeber), *Seasonal Affective Disorder, Practice and Research*, 261 – 266, 2001
- [94] Escamés G., León J., López L., Acuña-Castroviejo, Mechanisms of N-methyl-D-aspartate receptor inhibition by melatonin in the rat striatum., *Journal of Neuroendocrinology* 16, 929 – 935, 2004
- [95] EURODIAB ACE study Group, Variation and trends in incidence of childhood diabetes in Europe, *Lancet* 355, 873 – 876, 2000
- [96] EURODIAB Substudy 2 Study Group, Vitamin D supplement in early childhood and risk for Type I (insulin-dependent) diabetes mellitus., *Diabetologia* 42, 51- 54, 1999
- [97] Everett M., Yeagers E., Sayre R., Olsen R. , Penetration of epidermis by ultraviolet rays, *Photochemistry and Photobiology* 5, 533 - 542, 1966

- [98] Eysel U., Signalaufnahme und Verarbeitung in der Netzhaut, *Der Ophthalmologe* 104/1, 79 – 92, 2007
- [99] Fahn S., Cohen G., The oxidant stress hypothesis in Parkinson´s disease: evidence supporting it., *Annals of Neurology* 32/6, 804 – 812, 1992
- [100] Fardellone P., Sebert J., Garabedian M., Bellony R., Maamer M., Agbomson F., Brazier M., Prevalence and biological consequences of vitamin D deficiency in elderly institutionalized subjects, *Review Du Rhumatisme, Englische Ausgabe* 62, 576 – 581, 1995
- [101] Feskanich D., Ma J., Fuchs C., et al., Plasma vitamin D metabolites and risk of colorectal cancer in women, *Cancer Epidemiology Biomarkers and Prevtion* 13/9, 1502 - 1508, 2004
- [102] Fisch J., Licht und Gesundheit, *Das Leben mit optischer Strahlung, Literaturrecherche Zusammenstellung, Ergebnisse und Ausblick , Zeitraum: 1800 – 2000, Technische Universität Ilmenau*, 2000
- [103] Fisher M., Kripke M., Systemic alteration induced in mice by ultraviolet light irradiation and its relationship to ultraviolet carcinogenesis, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 74, 1688 – 1692, 1987
- [104] Fitzpatrick T., Ultraviolet-induced pigmentary changes: Benefits and hazards, *Current Problems in Dermatology* 15, 25 - 38, 1986
- [105] Fitzpatrick T., The validity and practicality of sun-reactive skin types I through VI, *Archives of Dermatology* 124 , 869-871, 1988
- [106] Foster R., Bright blue times, *Nature*, 433, 698 – 699, 2005
- [107] Framingham Heart Studie, Framingham, Mass (T.J.W., M.J.P., E.I., K.L., E.J.B., R.B.D., R.S.V.); Cardiology Division (T.J.W.) and Renal Division (M.W.), Department of Medicine, Massachusetts General Hospital, Harvard Medical School, Boston, Mass; Statistics and Consulting Unit, Department of Mathematics (M.J.P., R.B.D.), Boston University, Boston, Mass; Jean Mayer US Department of Agriculture Human Nutrition Research Center on Aging (S.L.B., P.F.J.), Tufts University, Boston, Mass; and Sections of Cardiology and Preventive Medicine (E.J.B., R.S.V.), Boston Medical Center, Boston University School of Medicine, Boston, Mass (1948 laufend)
- [108] Freedman D., Zahm S., Dosemeci M., Residential and occupational exposure to sunlight and mortality from non-Hodgkin´s lymphoma, composite (threefold) case-control study, *British Medical Journal* 314, 1451-14455, 1997
- [109] Freedman D., Dosemeci M., McGlynn K., Sunlight and mortality from breast,ovarian, colon, prostate, and non-melanoma skin cancer: a composite death certificate based case-control study., *Journal of Occupational and Environmental Medicine* 59 /4, 257 - 262, 2002
- [110] Fritsch P., *Dermatologie und Venerologie*, 2. Auflage, 2004
- [111] Fröhlich C., Solar Irradiance Variability since 1978 - Revision of the PMOD Composite during Solar Cycle 21, *Eigenpubloikation des Physikalisch-Meteorologischen Observatorium Davos, World Radiation Center*, 2005
- [112] Fröstl H., *Demenzen in Theorie und Praxis*, 2001
- [113] Futagawa Y., *GA Houses*, 73 Japan V, 2003
- [114] Gall D., Die Messung circadianer Strahlungsgrößen, *Licht und Gesundheit*, 114 – 132, Berlin, 26./27. Februar 2004
- [115] Garland C., Comstock G., Garland F., Helsing K., Shaw E., Groham E., Serum 25-hydroxyvitamin D and colon cancer: eight-year prospective study, *Lancet* 2, 1176 - 1178, 1989
- [116] Garland F., Garland C., Gorham E., Young J., Geographic variation n breast cancer mortality in the United States: a hypothesis involving exposure to solar radiation, *The American Journal of Preventive Medicine* 19, 614 – 622. 1990
- [117] Geist J., Der experimentelle Charakter des Laubenganghauses, *Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar*, 33/4-6, 251 – 255, 1987
- [118] Gibson K., The relative visibility function, CIE Sixième Session, Genève, *Compte Rendu des Séances*, 232-238, 1924
- [119] Giedion S., *Befreites Wohnen*, 1929
- [120] Giovannucci E., The epidemiology of vitamin D and cancer incidence and mortality: a review (United States), *Cancer Causes Control* 16/2, 83 – 95, 2005
- [121] Girasole G., Wang J., Pedrazzoni M., Pioli G., Balota C., Passeri M., Lazzarin A., Ridolfo A., Mantovani A ., Augmentation of monocyte chemotaxis by 1 α ,25-dihydroxyvitamin D₃ stimulation of defective migration of AIDS patients., *The Journal of Immunology* 145/8, 2459 – 2464, 1990

- [122] Glickman G., Hanifin J., Rollag M., Wang J., Cooper H., Brainard G., Inferior Retinal Light Exposure Is More Effective than Superior Retinal Exposure in Suppressing Melatonin in Humans, *Journal of Biological Rhythms*, Vol. 18 No 1, 71 -79, 2003
- [123] Golden R., Gaynes B., Ekstrom R., Hamer R., Jacobsen F., Suppes T., Wisner K., Nemeroff C., The Efficacy of Light Therapy in the Treatment of Mood Disorders: A Review and Meta-Analysis of the Evidence, *American Journal of Psychiatry* 162, 656 – 662, 2005
- [124] Grant A., Avenell A., Campbell M., McDonald A., MacLennan G., McPherson G., Anderson F., Cooper C., Francis R., Donaldson C., Gillespie W., Robinson C., Torgerson D., Wallace W., Oral vitamin D3 and calcium for secondary prevention of low-trauma fractures in elderly people: a randomised placebo-controlled trial., *Lancet* 365, 1599 – 1600, 2005
- [125] Grant W., An estimate of premature cancer mortality in the US because of inadequate doses of solar ultraviolet-B radiation., *Cancer* 94/6, 1867 – 1875, 2002
- [126] Grant W., Ecologic studies of solar UV-B radiation and cancer mortality rate. *Recent Results, Cancer Research* 164, 371 - 377, 2003
- [127] Griffin E. Jr., Staknis D., Eitz C., Light-Independent role of CRY1 and CRY2 in the Mammalian Circadian Clock, *Science* 22, Vol. 286, no. 5440, 768 – 771, 1999
- [128] Groos G., Meijer J., Effects of illumination on suprachiasmatic nucleus electrical discharge, *Ann. NY Acad. Sci.* 453, 134 - 146, 1985
- [129] Gropius W., Die soziologischen Grundlagen der Minimalwohnung für die städtische Industriebevölkerung, in: Hoffmann J. (Herausgeber), *Internationale Kongresse für Neues Bauen, Die Wohnung für das Existenzminimum*, 13 – 23, 1933
- [130] Groveman B., Landsberg H., Simulated northern hemisphere temperature departures 1579-1880, *Geophysical Research Letters* 6, 767-769, 1979
- [131] Gueymard C., Development and performance assessment of a clear sky spectral radiation model, *Proceedings of 22nd ASES Conference, Solar '93*, S.433-438, 1993
- [132] Gueymard C., Parameterized transmittance model for direct beam and circumsolar spectral irradiance, *Solar Energy* Vol. 71, No. 5, Elsevier, Oxford, S.325-346, 2001, 2001
- [133] Gueymard C., Kambezidis H., *Solar Spectral Radiation*, Excerpt aus Muneer T. et al., *Solar Radiation & Daylight Models*, 2nd ed., 221-301, 2004
- [134] Guillemant J., Le H., Maria A., Allemandou A., Peres G., Guillemant S., Wintertime vitamin D deficiency in male adolescents: effect on parathyroid function and response to vitamin D3 supplements., *Osteoporosis International* 12, 875 – 879, 2001
- [135] Hanchette C., Schwartz G., Geographic patterns of prostate cancer mortality. Evidence for a protective effect of ultraviolet radiation, *Cancer* 70/12, 2861 – 2869, 1992
- [136] Hansen J., Increased breast cancer risk among women who work predominantly at night. *Epidemiology* 12, 74 – 77, 2001
- [137] Hantel M.: *Observed Global Climate / Landolt-Börnstein Series, Group V (Geophysics), Volume 6 (Observed Global Climate)*, Springer, Berlin et al., 2005
- [138] Hardeland R., Antioxidative Protection by Melatonin, Multiplicity of Mechanisms from Radical Detoxification to Radical Avoidance, *Endocrine* 27/2, 119 -130, 2005
- [139] Hardman J., Limbird L., Molinoff P., Ruddon R., *Neurotransmission und das zentrale Nervensystem*, 277-305, in: Goodman & Gilman – *Pharmakologische Grundlagen der Arzneimitteltherapie*, 9. Auflage, 1998
- [140] Hattar S., Lucas R., Mrosovsky N., Thompson S., Douglas R., Hankins M., Lem J., Biel M., Hofmann F., Foster R., Yau K., Diverse brain targets of melanopsin expressing retinal ganglion cells, *Invest Ophthalmol., Visual Science* 45, 2004
- [141] Hayes C., Nashold F., Spach K., Pedersen L., The immunological functions of the vitamin D endocrine system, *Cellular and Molecular Biology* 49 / 2, 277 – 300, 2003
- [142] He S., Dong W., Deng Q., Weng S., Sun W., Seeing more clearly: recent advances in understanding retinal circuitry. *Science* 302, 408 – 411, 2003
- [143] Heaney R., Dowell M., Hale C., Bendich A., Calcium absorption varies within the reference range for serum 25-hydroxyvitamin D, *Journal of the American College of Nutrition* 22, 142 – 146, 2003
- [144] Hefner-Alteneck von H., Über die Strahlung und Temperatur der Hefnerlampe, *Elektronische Zeitschrift* 5, 20, 1884

- [145] Hegarty V., Woodhouse P., Khaw K., Seasonal variation in 25-hydroxyvitamin D and parathyroid hormone concentrations in healthy elderly people, *Age and Ageing* 23, 478 – 482, 1994
- [146] Heindl W., Koch H.: Die Berechnung von Sonneneinstrahlungsintensitäten für wärmetechnische Untersuchungen im Bauwesen, *Gesundheits-Ingenieur* 97, 12, 301 – 314, 1976
- [147] Heindl W., Sigmund A., Kreč K., Klimadatenkatalog, Kommissionsverlag: Österreichischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Wien, 1984
- [148] Heinemann A., Schuligoi R., Clopidogrel, Sumatriptan, Metoclopramid, Loratadin, Ramitidin, Montelukast; Coxibe, ASS etc., *Wie wirken Arzneimittel?*, Österreichische Apothekerzeitung 13, 2008
- [149] Hermann L., Eine Erscheinung simultanen Contrastes, *Pflügers Archiv für die Gesamte Physiologie des Menschen und der Thiere*, 3, 13-15, 1870
- [150] Herxheimer A., Petrie K., Melatonin for the prevention and treatment of jet lag, *Cochrane Database of Systematic Reviews* 1, 2001
- [151] Hobday R., *The Light Revolution, Health, Architecture and the Sun*, 2006
- [152] Hodder S., Parsons K., The effects of solar radiation on thermal comfort, *International Journal of Biometeorology* 51, 233 – 250, 2007
- [153] Hoddes E., Zarcone V., Smythe H., Phillips R., Dement W., Quantification of sleepiness: a new approach, *Psychophysiology* 10, 431 – 436, 1973
- [154] Holick M., Sunlight and vitamin D for bone health and prevention of autoimmune diseases, cancers, and cardiovascular disease, *American Journal of Clinical Nutrition* 80, 1678 – 1688, 2004
- [155] Holick M., Vitamin D: importance in the prevention of cancers, type 1 diabetes, heart disease, an osteoporosis, *American Journal of Clinical Nutrition* 79, 362 - 371, 2004
- [156] Holick M., The role of vitamin D for bone health and fracture prevention., *Current osteoporosis reports* , 4 / 3, 96 – 102, 2006
- [157] Holick M., Vitamin D deficiency, *The New England Journal of Medicine* 357, 266 – 281, 2007
- [158] Hollis B., Circulating 25-Hydroxyvitamin D Levels Indicative of Vitamin D Sufficiency: Implications for Establishing a New Effective Dietary Intake Recommendation for Vitamin D, *Journal of Nutrition* 135/2, 317 – 322, 2005
- [159] Holzer P., *Farben des Lichts: Unveröffentlichte Studie zur Sonnenhöhen-Charakteristik*, Donau-Universität Krems, 2007
- [160] Hopf S., *In-vivo- und in-vitro-Untersuchungen zum Einfluss von Brain-derived Neurotrophic Factor auf die Entwicklung serotonerger Neurone im Gehirn der Maus*, Dissertation an der Freien Universität Berlin, 2003
- [161] Hornung E., *Akhenaten and the religion of light*, 2001
- [162] http://thebrain.mcgill.ca/flash/a/a_02/a_02_cl/a_02_cl_vis/a_02_cl_vis.html, 15.03.2009
- [163] http://thebrain.mcgill.ca/flash/a/a_02/a_02_cr/a_02_cr_vis/a_02_cr_vis.html, 15.03.2009
- [164] http://thebrain.mcgill.ca/flash/a/a_11/a_11_m/a_11_m_hor/a_11_m_hor.html, 28.03.2009
- [165] http://thebrain.mcgill.ca/flash/i/i_02/i_02_cl/i_02_cl_vis/i_02_cl_vis.html, 15.03.2009
- [166] http://thebrain.mcgill.ca/flash/i/i_02/i_02_cr/i_02_cr_vis/i_02_cr_vis.html, 15.03.2009
- [167] <http://www.fz-juelich.de/inb/inb-1/datapool/page/214/Neurotransmitter%20Synthese%20SS2005.ppt> -, 18:45,05.01.2009
- [168] <http://www.medscape.com/viewarticle/491041>, 24.02.2009
- [169] http://www.statistik.at/web_de/statistiken/gesundheit/krebserkrankungen/krebsinzidenz_im_ueberblick/020524.html, 08.06.2008
- [170] http://www.statistik.at/web_de/statistiken/gesundheit/todesursachen/todesursachen_im_ueberblick/index.html, 08.06.2008
- [171] http://www.statistik.at/web_de/statistiken/gesundheit/todesursachen/todesursachen_im_ueberblick/index.html 08.06.2008
- [172] Hu S., Ma F., Collado-Mesa F., Kirsner R., Ultraviolet radiation and incidence of non-Hodgkin´s Lymphoma among Hispanics in the United States, *Cancer Epidemiology Biomarkers and Prevition* 13, 59 – 64, 2004

- [173] Hubalek S., LuxBlick, Messung der täglichen Lichtexposition zur Beurteilung der nicht-visuellen Lichtwirkungen über das Auge, Dissertation an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Nr.: 17257, 2007
- [174] Hughes A., Armstrong B., Vajdic C., Turner J., Grulich A., Fritschi L., Milliken S., Kaldor J., Beneke G., Krickler A., Sun Exposure may protect against Non-Hodgkin Lymphoma: a case-control study, *International Journal of Cancer* 112, 865 – 871, 2004
- [175] Hypponen E., Laara E., Reunanen A., Jarvelin M., Virtanen S., Intake of vitamin D and risk of type 1 diabetes: a birth-cohort study., *Lancet* 358, 1500-1503, 2001
- [176] ISO 10527:2007(E)/CIE S 014-1/E:2006 CIE farbmimetrische Normalbeobachter, 2006
- [177] ISO 9845-1, Solar energy -- Reference solar spectral irradiance at the ground at different receiving conditions Direct normal and hemispherical solar irradiance for air mass 1,5, , 1999
- [178] Jacobs H., Gross I., Rest-Activity Patterns of Premature Infants Are Regulated by Cycled Lighting, *Pediatrics*, 113/4, 833 – 839, 2004
- [179] Jeanneret C., veröffentlicht als Le Corbusier, *Towards a New Architecture*, 1931
- [180] Jiao L., Takada J., Endo S., Tanaka K., Zhang W., Ivannikov A., Hoshi M., Effects of Sunlight Exposure on the Human Tooth Enamel ESR Spectra Used for Dose Reconstruction, *Journal of Radiation Research* 48/1, 21-29, 2007
- [181] John E., Dreon D., Koo J., Schwartz G., Residential sunlight exposure is associated with a decreased risk of prostate cancer, *Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology* 89 – 90/1-5, 549-552, 2004
- [182] Kandel E., Schwartz J., Jessel T., *Principles of Neural Science*, 4. Auflage, 2000
- [183] Kanitakis J., Anatomy, histology and immunohistochemistry of normal human skin, *European journal of dermatology* 12/4,390 - 399, 2002
- [184] Kanski J., *Klinische Ophthalmologie, Lehrbuch und Atlas*, 6. Auflage, 2008
- [185] Kasper S., Wehr T., Bartok J., Gaist P., Rosenthal N., Epidemiological findings of seasonal changes in mood and behavior., *Archives of General Psychiatry* 46/9, 823 – 833, 1989
- [186] Kasten F., The Linke turbidity factor based on improved values of the integral Rayleigh optical thickness, *Solar Energy* 56, p. 239-244, 1996
- [187] Kaupp U., Signaling in vertebrate photoreceptors, In: Elsner N., Breer H. (Herausgeber) *Sensory transduction. Proceedings of the 22nd Göttinger Neurobiology Conference Vol.1*, 1994
- [188] Kelleher D., Thews O., Rzeznik J., Scherz A., Salomon Y., Vaupel P., Water filtered infrared-A radiation: a novel technique for localized hyperthermia in combination with bacteriochlorophyll-based photodynamic therapy, *International Journal of Hyperthermia* 15, 467 – 474, 1999
- [189] Kessler K., *Wohnungsbau der 20er Jahre, Die Architekten Ernst May und Walter Schwagenscheidt, Ihre Theorien und Bauten*, 2006
- [190] Khalil O., Yeh S., Lowery M., Wu X., Hanna C., Kantor S., Jeng T., Kanger J., Bolt R., de Mul F., Temperature modulation of the visible and near infrared absorption and scattering coefficients of human skin, *Journal of Biomedical Optics* 8/2, 191 - 205 , 2003
- [191] Kiehl J., Trenberth K.: *Earth's Annual Global Mean Energy Budget*, *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol.78, No.2, 197-208, 1997
- [192] Klein D., Moore R., Reppert S., *Suprachiasmatic Nucleus: The Mind's Clock*, Oxford University Press, Oxford 1991
- [193] Klimot J., *Österreichische Gesundenbefragung 2006/2007, Hauptergebnisse und methodische Dokumentation*, *Statistik Austria*, 88, 2007
- [194] Klinker R., Pape H., Silbernagl S., *Physiologie*, 5. Auflage, 2005
- [195] Köck C., Schwappach D., Niemann F., Strassmann T., Ebner H., Klaushofer K., Incidence and costs of osteoporosis-associated hip fractures in Austria., *Wiener Klinische Wochenschrift* 113, 371 - 377, 2001
- [196] Koller M., Härma M., Laitinen J., Kundi M., Pieglar B., Haider M., Different patterns of light exposure in relation to melatonin and Cortisol rhythms and sleep of night workers, *Journal of Pineal Research*, 16/3, 127 -135, 2007
- [197] Kreč K., *Zur Berechnung von solaren Bestrahlungsstärken*, unveröffentlichte Eigenpublikation, 1995

- [198] Kricker A., Armstrong B., Does sunlight have a beneficial influence on certain cancers?, *Progress in Biophysics and Molecular Biology* 92, 132 – 139, 2006
- [199] Kroger H., Penttila I., Alhava E., Low serum vitamin D metabolites in women with rheumatoid arthritis., *Scandinavian Journal of Rheumatology* 22, 172 – 177, 1993
- [200] Kromp-Kolb H., Formayer H., Schwarz Buch Klimawandel, Wieviel Zeit bleibt uns noch, Salzburg, 2005
- [201] Lack L., Bootzin R., Circadian rhythm factors in insomnia and their treatment. In: Perlis M., Lichstein K. (Herausgeber), *Treatment of sleep Disorders: Principles and Practice of behavioral sleep medicine.*, 2003
- [202] Lack L., Bramwell T., Wright H., Kemp K., Morning blue light can advance the melatonin rhythm in mild delayed sleep phase syndrome. *Sleep and biological rhythms*, 5, 78-80, 2007
- [203] Laden F., Spiegelman D., Neas L., Colditz G., Hankinson S., Manson J., Byrne C., Rosner B., Speizer F., Hunter D., Geographic variation in breast cancer incidence rates in cohort of U.S. women, *Journal of the National Cancer Institute* 89/18, 1373 - 1378, 1997
- [204] Lam R., Levitt A., Canadian consensus guidelines for the treatment of seasonal affective disorder, 2002
- [205] Lambert G., Reid C., Kaye D., Jennings G., Esler M., Increased Suicide Rate in the Middle-Aged and Its Association With Hours of Sunlight, *American Journal of Psychiatry* 160/4, 793 – 795, 2003
- [206] Lasko T., Kripke D., Elliot J., Melatonin Suppression by illumination of Upper and Lower Visual Fields, *Journal of Biological Rhythms*, Vol. 14, No. 2, 122 – 125, 1999
- [207] Laufer J., Simpson R., Kohl M., Essenpreis M., Cope M., Effect of temperature on the optical properties of ex vivo human dermis and subdermis, *Physics in Medicine and Biology* 43, 2479 -2489 , 1998
- [208] Laut P., Solar activity and terrestrial climate / an analysis of some purported correlations, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol.65, 7, 801-812, 2003
- [209] Lawson M., Thomas M., Hardiman A., Dietary and lifestyle factors affecting plasma vitamin D levels in Asian children living in England, *European Journal of Clinical Nutrition* 53, 268 – 272, 1999
- [210] Leckner B., The spectral distribution of solar radiation at the earth's surface – elements of a model, *Solar Energy* 20, 143-150, 1978
- [211] Lefkowitz E., Garland C., Sunlight, vitamin D, and ovarian cancer mortality rates in US women., *International Journal of Epidemiology* 23/6, 1133 – 1136, 1994
- [212] Lehotonen- Veromaa M., Mottonen T., Irjala K., Karkkainen M., Lamberg-Allardt C., Hakola P., Viikari J., Vitamin D intake is low and hypovitaminosis D common in healthy 9- to 15-year-old Finnish girls., *European Journal of Clinical Nutrition* 53, 746 – 751, 1999
- [213] Leidig P., Haas G., Dellling G., Krakamp B., 30-jähriger Patient mit progredienten Knochenschmerzen und Muskelschwäche, *Der Internist*, 43 / 5, 661 – 664, 2002
- [214] Lemire J., Beck L., Faherty D., Gately M., Spiegelberg H., 1,25-Dihydroxyvitamin D₃ inhibits the production of IL-12 by human monocytes and B cells, in: Norman A., Bouillon R., Thomasset M. (Herausgeber), *Vitamin D, a pluripotent steroid hormone: structural studies molecular endocrinology and clinical applications.*, 531 – 539, 1994
- [215] Lewy A., Wehr T., Goodwin F., Newsome D., Markey S., Light suppresses melatonin secretion in humans, *Science* 210, 1267 – 1269, 1980
- [216] Lindsay P., Norman D., *Human Information Processing: An Introduction to Psychology*, 2nd edition. New York: Academic Press, 1977
- [217] Linke F., Boda K., Vorschläge zur Berechnung des Trübungsgrades der Atmosphäre, *Meteorologische Zeitschrift* 39, S. 161, 1922
- [218] Liu R., Zhou J., van Heerikhuizen J., Hofman M., Swaab D., Decreased melatonin levels in postmortem cerebrospinal fluid in relation to aging, Alzheimer's disease and apolipoprotein E-ε 4/4 genotype., *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism* 84, 323 – 327, 1999
- [219] Lockley S., Evans E., Scheer F., Brainard G., Czeisler C., Aeschbach D., Short-wavelength sensitivity for the direct effects of light on alertness, vigilance, and the waking electroencephalogram in humans., *Sleep* 29, 161 – 168, 2006
- [220] Lode U.S.: Tiefenrekonstruktion vertikaler Konzentrationsprofile in der wasserseitigen Grenzschicht mittels spektroskopischer laserinduzierter Fluoreszenz (LIF), Diplomarbeit an

- der Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 1998, Seite 39
- Loguinova M., Rostovtseva E., Feldman T., Ostrovsky M., Impairment of A2-rhodopsin regeneration induced by visible (Blue) light, *Doklady Akademii Nauk*, Vol. 419/6, 838–841, 2008 (russisches Original) im Englischen in: *Doklady Biological Sciences* 419, 83-85, 2008
- [221] Löffler G., *Basiswissen Biochemie: mit Pathobiochemie*, 7. Auflage, 2008
- [222] López-Burillo S., Tan D., Mayo J., Sáinz R., Manchester L., Reiter R., Melatonin, xanthurenic acid, resveratrol, EGCG, vitamin C and α -lipoic acid differentially reduce oxidative DNA damage induced by Fenton reagents: A study of their individual and synergistic actions., *Journal of Pineal Research* 34, 269 – 277, 2003
- [223] Loth H., *Grundlagen des intra- und transdermalen Transportes von Arzneistoffen*, I. *Acta Pharmaceutica Technologica -International Journal of Drug Formulation and Biopharmaceutics* 32, 109 – 114, 1986
- [224] Loth H., *Grundlagen des intra- und transdermalen Transportes von Arzneistoffen*. II. *Acta Pharmaceutica Technologica -International Journal of Drug Formulation and Biopharmaceutics* 33, 3 – 14, 1987
- [225] Lowe N., *Photoprotection*, *Seminars in Dermatology* 9, 78 - 83, 1990
- [226] Luscombe C., Fryer A., French M., Liu S., Saxby M., Jones P., Strange R., Exposure to ultraviolet radiation: association with susceptibility and age at presentation with prostate cancer, *Lancet* 358 /9282, 641 – 642, 2001
- [227] Magnusson A. Friis S., Opjordsmoen S., International consistency of the Seasonal Pattern Assessment Questionnaire (SPAQ), *Journal of Affective Disorders* 42, 113 –116, 1997
- [228] Magnusson A., Boivin D., Seasonal Affective Disorder: An Overview, *Chronobiology International*, 20/2 189 – 207, 2003
- [229] Mann, M. E., Bradley, R. S., and Hughes, M. K., Northern hemisphere temperatures during the past millenium: inferences, uncertainties and limitations, *Geophysical Research Letters*, Vol.26, 6, 759-762, 1999
- [230] Mark B., Carson J., Vitamin D and Autoimmune Diseases – Implications for Practice from the Multiple sclerosis Literature., *Journal of the American Dietetic Association*, 106, 418 – 424, 2006
- [231] Mathers M., Schmitges J., Klotz T., Sommer F., Einführung in die Diagnostik und Therapie der Ejaculation praecox, *Deutsche Ärzteblatt* 104/50, 2007
- [232] Matsubara E., Bryant-Thomas T., Pacheco Q., Henry T., Poeggeler B., Herbert D., Cruz-Sanchez F., Chyan Y., Smith M., Perry G., Shoji M., Abe K., Leone A., Grundke-Ikbal I., Wilson G., Ghiso J., Williams C., Refolo L., Pappolla M., Melatonin increases survival and inhibits oxidative and amyloid pathology in a transgenic model of Alzheimer's disease, *Journal of Neurochemistry* 85/5, 1101 – 1108, 2003
- [233] McKenna M., Differences in vitamin D status between countries in young adults and elderly, *American Journal of Medicine* 93, 69 – 77, 1992
- [234] Meffert B., Meffert H., *Optische Strahlung und ihre Wirkungen auf die Haut*, *Biomedizinische Technik* 45/4, 98 – 104, 2000
- [235] Meffert H., Buchholtz I., Brenke A., Mild infrared A hyperthermia in treatment of systemic scleroderma, *Dermatologische Monatsschrift* 176, 683 – 686, 1990
- [236] Meffert H., Piazena H., Kolde G., Die Infrarot-Erytheme, Vom Infrarot-A- und Infrarot-C-Erythem zum Erythema ab igne, *Aktuelle Dermatologie* 334, 119 – 123, 2008
- [237] Melton L., Chrischilles E., Cooper C., Lane A., Riggs B., How many women have osteoporosis? *Journal of Bone Mineral Research* 7, 1005 – 1010, 1992
- [238] Melyan Z., Tarttelin E., Bellingham J., Lucas R., Hankins M., Addition of human melanopsin renders mammalian cells photoresponsive, *Nature* 433, 741 – 745, 2005
- [239] Merlino L., Curtis J., Mikuls T., Cerhan J., Criswell L., Saag K., Vitamin D intake is inversely associated with rheumatoid arthritis: results from the Iowa Women´s health Study., *Arthritis and Rheumatism* 50, 72 – 77, 2004
- [240] Meroow M., Spoelstra K., Roenneberg T., The circadian cycle: daily rhythms from behaviour to genes, *European Molecular Biology Organization reports* 6, 930–935, 2005
- [241] Michaud M., Dumont M., Selmaoui B., Paquet J., Fantini M., Montplaisir J., Circadian rhythm of restless legs syndrome: relationship with biological markers, *Annals of Neurology* 55/3, 372 – 380, 2004
- [242] Michels K., Solomon C., Hu F., et al., Typ 2 diabetes and subsequent incidence of breast cancer in the Nurses´Health study., *Diabetes Care* 26, 1752 – 1758, 2003

- [243] Miehle W., Rheumatoide Arthritis, 1999
- [244] Miller A., Epidemiology, Etiology, and Natural Treatment of Seasonal affective Disorder, *Alternative Medicine Review* 10/1, 2005
- [245] Mistlberger R., Skene D., Social influences on mammalian circadian rhythms: Animal and human studies, *Biological Reviews* 79, 533-556, 2004
- [246] Mittelstraß J. (Herausgeber), Philosophie und Wissenschaftstheorie, Enzyklopädie, Band 2, Sonderausgabe, 2004
- [247] Molozolowski W., zitiert Jedrezej Sniadecki (1786-1883), On the cure of rickets, *Nature* 143, 121, 1939
- [248] Monk T., Buysse D., Reynolds C., Berga S., Jarrett D., Begley A., Kupfer D., Circadian rhythms in human performance and mood under constant conditions, *Journal of Sleep Research* 6, 9 – 18, 1997
- [249] Moon S., Freyer A., Strange R., Ultraviolet radiation: effects on risks of prostate cancer and other internal cancers, *Mutation Research* 571/1-2, 207 – 219, 2005
- [250] Moore R., Circadian rhythms: basic neurobiology and clinical applications, *Ann. Rev. Med* 48, 253 – 266, 1997
- [251] Moore R., Circadian Timing, in: *Fundamental Neuroscience*, Herausgeber: Zigmond M., Bloom F., Landis S., Roberts J., Squire L., 1195, 1999
- [252] Moore R., The Neurobiology of Sleep-Wake Regulation, *Medscape Special Report on Current Perspectives in Insomnia* 3, 2004 The Medscape Special Report on Current Perspectives in Insomnia is a free, CME-certified bimonthly newsletter focused on the recent developments and advances in the understanding and treatment of insomnia and related sleep disorders. <http://www.medscape.com/viewarticle/491041>, 24.02.2009
- [253] Morin L., The circadian visual system, *Brain Res Rev* 19, 102 – 127, 1994
- [254] Mosmann T., Cherwinski H., Bond M., Giedlin M., Coffman R., Two types of murine helper T cell clone. I. Definition according to profiles of lymphokine activities and secreted proteins., *Journal of Immunology*. 136/7, 2348 – 2357, 1986
- [255] Muhle H., Neumann A., Lohmann-Hedrich K., Lohnau t., Lu Y., Winkler S., Waltz S., Fischenbeck A., Kramer P., Klein C., Stephani U., Childhood-onset restless legs syndrome: Clinical and genetic features of 22 families, *Movement Disorders* 23/8, 1112 -1121, 2008
- [256] Munger K., Zhang S., O´Reilly E., et al., Vitamin D intake and incidence of multiple sclerosis., *Neurology* 62, 60 – 65, 2004
- [257] Muñoz-Hoyos A., Espin-Quirantes C., Molina-Carballo A., Uberos J., Conteras-Chova F., Narbona-López E., Gutiérrez-Salmerón M., Neuroendocrine and circadian aspects (melatonin and β -endorphin) of atopic dermatitis in the child, *Pediatric Allergy and Immunology* 18/8, 679 – 686, 2007
- [258] National Sleep Foundation, 2008 Sleep in America Poll, Summary of Findings, <http://www.sleepfoundation.org/atf/cf/%7Bf6bf2668-a1b4-4fe8-8d1a-a5d39340d9cb%7D/2008%20POLL%20SOF.PDF>, 15.02.2009
- [259] Naumann B., Rhythmus: Spuren eines Wechselspiels in Künsten und Wissenschaften, 2005
- [260] Neumeister A., Konstantinidis A., Praschak-Rieder N., Willeit M., Hilger E., Stastny J., Kasper S., Monoamines, In: Partonen T., Magnusson A. (Herausgeber) *Seasonal Affective Disorder, Practice and Research*, 201 – 217, 2001
- [261] Newman L., Walker M., Brown R., Cronin T., Robinson P., Melanopsin forms a functional short-wavelength photopigment, *Biochemistry* 42, 12734 – 12738, 2003
- [262] Norval M., Effects of solar radiation on the human immune system, *Journal of Photochemistry and Photobiology* 63, 28 – 40, 2001
- [263] Oelzner P., Franke S., Muller A., Hein G., Stein G., Relationship between soluble markers of immune activation and bone turnover in post-menopausal women with rheumatoid arthritis., *Rheumatology* 38, 841 – 847, 1999
- [264] Ogurtsov M., Nagovitsyn Yu., Kocharov G. und Jungner H., Long-period cycles of the sun's activity recorded in direct solar data and proxies, *Solar Physics*, Volume 211, Numbers 1-2, 371-394, 2002
- [265] Okuno T., Thermal Effect of Visible Light and Infra-Red Radiation (i.r.-A, i.r -B and i.r -C) on the Eye: a Study on Infra-Red Cataract Based on a Model, *Annual of the British Occupational Hygiene Society* 38/4, 351 – 359, 1994
- [266] Olanow C., Oxidation reactions in Parkinson´s disease, *Neurology* 40/7, 32-37,1990

- [267] ÖNORM B 1800, Ermittlung von Flächen und Rauminhalten von Bauwerken, 2002
- [268] ÖNORM B 8110-1, Wärmeschutz im Hochbau, Teil 1 – Anforderungen an den Wärmeschutz und Deklaration des Wärmeschutzes von gebäuden/Gebäudeteilen – Heizwärmebedarf und Kühlbedarf, 2007
- [269] ÖNORM B 8110-3, Wärmeschutz im Hochbau - Wärmespeicherung und Sonneneinflüsse, 1999, in Verbindung mit ÖNORM B 8110-3/AC1, Berichtigung, 2001
- [270] ÖNORM B 8110-5, Wärmeschutz im Hochbau, Teil 5 – Klimamodell und Nutzungsprofile, 2007
- [271] ÖNORM B 8110-6, Wärmeschutz im Hochbau, Teil 6 – Grundlagen und Nachweisverfahren - Heizwärmebedarf und Kühlbedarf, 2007
- [272] ÖNORM EN 410 – Glas im Bauwesen, Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen, 1998
- [273] ÖNORM EN 673, Glas im Bauwesen - Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) – Berechnungsverfahren, 1997 + A1:2000 + A2:2002
- [274] ÖNORM EN 14255-4, Messung und Beurteilung von personenbezogenen Expositionen gegenüber inkohärenter optischer Strahlung - Teil 4: Terminologie und Größen für Messungen von UV-, sichtbaren und IR-Strahlungs-Expositionen, 2007
- [275] ÖNORM H 5056, VORNORM, Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden - Heiztechnik-Energiebedarf (2007)
- [276] ÖNORM M 7701, Bbl 2, Sonnenteknische Anlagen: Allgemeine Kennwerte zur Bemessung von passiven Anlagen und von Flachkollektoren in Warmwasser-Aufbereitungsanlagen, 2004
- [277] Orikasa M., Kawase T., Suzuki A., Induction of macrophagic and granulocytic differentiation of murine bone marrow progenitor cells by 1,25 dihydroxyvitamin D3, *Calcified Tissue International* 53, 193 – 200, 1993
- [278] Ortonne J., Schwarz T., Klinik und Pathogenese UV-induzierter Pigmentveränderungen, *Journal der Deutschen Dermatologischen Gesellschaft* 1/4, 274 – 284, 2003
- [279] Ouezzani S., Tramu G., Magoul R., Seasonal variations of the β -endorphin neuronal system in the mediobasal hypothalamus of the jerboa (*Jaculuc orientalis*), *Neuroscience Letters*, 376/2, 107 – 110, 2005
- [280] Panda S., Sato T., Castrucci A., Rollag M., De Grip W., Hongenesch J., Provencio I., Kay S., Melanopsin (Opn4) requirement for normal light-induced circadian phase shifting, *Science* 298, 2213 – 2216, 2002
- [281] Partonen T., Lönnqvist J., Seasonal affective disorder, *The Lancet* 325, 1369 – 1374, 1998
- [282] Patronen T., Magnusson A., Seasonal Affective Disorder, 2001
- [283] Partonen T., Haukka J., Nevanlinna H., Lönnqvist J., Analysis oft he seasonal pattern in suicide, *Journal of Affective Disorders* 81, 133-139, 2004
- [284] Pearse A., Gaskell S., Marks R. , Epidermal changes in epidermal skin following irradiation with either UVB or UVA., *Journal of Investigative Dermatology* 88, 83 - 87, 1987
- [285] Peharda V., Gruber F., Kastelan M., Massari L., Saftic M., Cabrijan L., Zamolo G., Occupational skin diseases caused by solar radiation, *Collegium Antropologicum* 31/1,87 – 90, 2007
- [286] Perrin F., Peigneux P., Fuchs S., Verhaeghe S., Laureys S., Middleton B., Degueldre C., Del Fiore G., Vandewalle G., Balteau E., Poirrier R., Moreau V., Luxen A., Maquet P., Dijk D., Nonvisual Responses to Light Exposure in the Human Brain during the Circadian Night, *Current Biology* 14, 1842 – 1846, 2004
- [287] Phipps-Nelson J., Redman J., Dijk d., Rajarantnam M., Daytime exposure to bright light, as compared to dim light, decreases sleepiness and improves psychmotor vigilance performance, *Sleep* 26, 695 -700, 2003
- [288] Pietschmann P., Willheim M., Peterlik M., Bedeutung von Vitamin D im Immunsystem, *Journal für Mineralstoffwechsel* 10/3, 13 – 15, 2003
- [289] Ponsonby A., Lucas R., van der Mel I., UVR, vitamin D and three autoimmune deseases – multiplesclerosis, type1 diabetes, rheumathoid arthrithis, *Photochemistry and Photobiology* 81, 1267 – 1275, 2005
- [290] Porojnicu A., Robsahm T., Ree A., Moan J., Season of diagnosis is aprognostic factor in Hodgkin´s lymphoma: a possible role of sun-induced vitamin D., *British Journal of Cancer* 93, 571 – 574, 2005

- [291] Porthouse J., Cockayne S., King C., et al., Randomised controlled trial of calcium and supplementation with cholecalciferol (vitamin D₃) for prevention of fractures in primary care, *British Medical Journal* 330, 1003 – 1009, 2005
- [292] Poser H., *Wissenschaftstheorie, Eine philosophische Einführung*, 2004
- [293] Praschak-Rieder N., Willeit M., Wilson A., Houle S., Meyer J., *Archives of General Psychiatry*, 65/9, 1072 – 1078, 2008
- [294] Provencio I., Jiang G., De Grip W., Hayes W., Rollag M., Melanopsin: an opsin in melanophores, brain and eye, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 95, 340 – 345, 1998
- [295] Provvedini D., Deftos L., Manolagas S., 1,25 Dihydroxyvitamin D₃ promotes in vitro morphologic and enzymatic changes in normal human monocytes consistent with their differentiation into macrophages, *Bone* 7, 23 – 28, 1986
- [296] Purkinje J., *Beobachtungen und Versuche zur Physiologie der Sinne*, 1825
- [297] Qiu X., Kumbalasing T., Carlson S., Wong K., Krishna V., Provencio I., Berson D., Induction of photosensitivity by heterologous expression of melanopsin, *Nature* 433, 745 – 749, 2005
- [298] Raab W., *Lichtfibel, Sonne – Bräunung – Pigmentstörungen*, 2. Auflage, 1990
- [299] Rajakumar K., Vitamin D, Cod-Liver Oil, Sunlight, and Rickets: A Historical Perspective, *Pediatrics* 112 / 2, 132 – 135, 2003
- [300] Rajaratnam S., Arendt J., Health in a 24-h society, *The Lancet* 358, 999 – 1005, 2001
- [301] Rasmussen N., Farr L., Effects of Morphine and Time of Day on Pain and Beta-Endorphin, *Biological Research For Nursing*, 5/2, 105 – 116, 2003
- [302] Rea M., A Second Kind of Light, *Optics and Photonics News*, 35 – 39, Oct. 2006
- [303] Rea M., Figueiro M., Bullough J., Bierman A., A model of phototransduction by the human circadian system, *Brain Research Reviews* 50, 213 -228, 2005
- [304] Reichardt W., Mac Ginitie G., Zur Theorie der lateralen Inhibition, *Biological Cybernetics* 1/4, 155-165, 1962
- [305] Reiter R., Tan D., Mayo J., Sáinz R., León J., Czarnocki Z., Melatonin as an antioxidant: biochemical mechanisms and pathophysiological implications in humans., *Acta Biochim Polon* 50, 1129 – 1146, 2003
- [306] Reiter R., Tan D., Gitto E., Sáinz R., Mayo J., León J., Manchester L., Vijayalaxmi G., Kilic E., Kilic U., Pharmacological utility of melatonin in reducing oxidative cellular and molecular damage., *Polish Journal of Pharmacology* 56/2, 159 – 170, 2004
- [307] Reppert S., Godson C., Mahle C., Weaver D., Slangenaupt S., Gusella J., Molecular characterization of a second melatonin receptor expressed in human retina and brain: the Mel1b melatonin receptor , *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 92 no.19, 8734-8738, 1995
- [308] Revell V., Arendt J., Fogg L., Skene D., Alerting effects of light are sensitive to very short wavelengths, *Neuroscience Letters* 399, 96 – 100, 2006
- [309] Ringe J., *Osteoporose: Differentialdiagnose und Differentialtherapie. Praxiskompndium mit 34 ausgewählten Kasuistiken*, 2001
- [310] Rivkees S., Developing Circadian Rhythmicity in Infants, *Pediatrics* 112/2, 373 – 381, 2003
- [311] Robsahm T., Tretli S., Dahlback A., Moan J., Vitamin D₃ from sunlight may improve the prognosis of breast-, colon- and prostate cancer (Norway), *Cancer Causes Control* 15/2, 149 – 158, 2004
- [312] Roenneberg T., Daan S., Mellow M., The art of entrainment, *Journal of Biological Rhythms* 18/3, 183 – 194, 2003
- [313] Roenneberg T., Foster R., Twilight times – Light and the circadian system, *Photochem Photobiol* 66, 549 – 561, 1997
- [314] Roenneberg T., Wirz-Justice A., Mellow M., Life between Clocks: Daily Temporal Patterns of Human Chronotypes, *Journal of Biological Rhythms*, 18/1, 80 – 90, 2003
- [315] Roenneberg T., Kuehnle T., Pramstaller P., Ricken J., Havel M., Guth A., Mellow M., A marker for the end of adolescence, *Current Biology* 14/24, 1038-1039, 2004
- [316] Roenneberg T., Mellow M., Das Leben im Zeitraum Tag, http://www.imp-muenchen.de/Das_Leben_im_Zeitraum.chrono_lit.1.html, 01.30.2008; http://www.notfallpflege.ch/Das_Leben_im_Zeitraum_Tag.pdf, 15.02.2009
- [317] Rohen J., *Funktionelle Neuroanatomie, Lehrbuch und Atlas*, 6. Auflage, 2001

- [318] Rosenthal N., Sack D., Gillin J., Lewy A., Goodwin F., Davenport Y., Mueller P., Newsome D., Wehr T., Seasonal affective disorder: a description of the syndrome and preliminary findings with light therapy, *archives of General Psychiatry*, 41/1, 72 – 80, 1984
- [319] Rosenthal N., Kasper S., *Lichttherapie, Das Programm gegen Winterdepressionen*, 2004
- [320] Salazar-Martinez E., Lazcano-Ponce E., Gonzalez Lira-Lira G., Escudero-Delos Rios P., Hernandez-Avila M., Nutritional determinants of epithelial ovarian cancer risk: a case-control study in Mexico., *Oncology* 63/2, 151 – 157, 2002
- [321] Saper C., Scammell T., Lu J., Hypothalamic regulation of sleep and circadian rhythms, *Nature* 437, 1257 – 1263, 2005
- [322] Sasidharan P., Rajeev E., Vijayakumari V., Tuberculosis and vitamin D deficiency., *Journal of Association of Physicians of India* 50, 554 – 558, 2002
- [323] Schatz H., *Diabetologie kompakt*, 4. Auflage, 2006
- [324] Scheer F., van Doornen L., Buijs R., Light and diurnal cycle affect autonomic cardiac balance in human; possible role for the biological clock, *Autonomic Neuroscience Basic & Clinical* 110/1, 44 – 48, 2004
- [325] Scheer F., Czeisler C., Melatonin, sleep, and circadian rhythms, *Sleep Medicine Reviews* 9, 5 – 9, 2005
- [326] Schernhammer E., Laden F., Speizer F., Willett W., Hunter D., Kawachi I, Colditz G., Rotating night shifts and risk of breast cancer in women participating in the nurses' health study, *Journal of the National Cancer Institute* 93/20, 1563 – 1568, 2001
- [327] Schernhammer E., Laden F., Speizer F., Willett W., Hunter D., Kawachi I, Colditz G., Night-shifts Work and Risk of Colorectal Cancer in the Nurses' Health Study, *Journal of the National Cancer Institute* 95/11, 825 – 828, 2003
- [328] Schieke S., Schroeder P., Krutmann J., Cutaneous effects of infrared radiation: from clinical observations to molecular response mechanisms, *Photodermatology Photoimmunology and Photomedicine* 19, 228 – 234, 2003
- [329] Schierz C., Wie wird Leuchtdichte subjektiv als Helligkeit wahrgenommen?, Paper zur Tagung: Lux Junior, Ilmenau 21.-23.9.2007
- [330] Schmidt R., Lang F., (Herausgeber), *Physiologie des Menschen mit Pathophysiologie*, 30. Auflage, 2007
- [331] Schober H., *Das Sehen*, VEB Fachbuchverlag, Bd. 1 und 2, Leipzig 1970
- [332] Schobersberger W., Gufler V., Hoffmann G., Wieviel Licht braucht der Mensch? – Bedeutung von Licht für die Gesundheit, *Tagungsband 2-8, IBO-Kongress Wien*, 15. Februar, 2007
- [333] Scholz R., *Medizinische Biochemie, Lernbuch in Einzeldarstellungen*, Kapitel 5/6 Häm und Hämoglobin, Eisen und Eisenstoffwechsel, 2003
- [334] Schröder J., Zu: Tommaso Campanellas „Der Sonnenstaat“, Seminararbeit, 2001
- [335] Schroeder P., Haendeler J., Krutmann J., The role of near infrared radiation in photoaging of the skin, *Experimental Gerontology* 43, 629 – 632, 2008
- [336] Schulungbaum W., *Eine Einführung in die physikalischen und biologischen Grundlagen der medizinischen Strahlenanwendung für Mediziner, medizinisch-technische Radiologieassistentinnen und -assistenten*, 7. Auflage, 1994
- [337] Schwartz G., Whitlatch L., Chen T., Lokeshwar B., Holick M., Human prostate cells synthesize 1,25-dihydroxyvitamin D₃ from 25-hydroxyvitamin D₃, *Cancer Epidemiology Biomarkers and Prevention* 7, 391 - 395, 1998
- [338] Scragg R., Holdaway I., Jackson R., Lim T., Plasma 25-hydroxyvitamin D₃ and its relation to physical activity and other heart disease risk factors in the general population, *Annals of Epidemiology* 2, 697 – 703, 1992
- [339] Sekaran S., Foster R., Lucas R., Hankins M., Calcium Imaging Reveals a Network of Intrinsically Light-Sensitive Inner-Retinal Neurons, *Current Biol.* 13, 1290 – 1298, 2003
- [340] Sethi K., Restless legs syndrome sees the light of day, *The Lancet Neurology* 7/7, 564 -565, 2008
- [341] Sharma S., Tatovic D., Andrews R., The role of twenty four hours of daylight on sleep, appetite and cortisol: is it a hard day's night?, *Endocrine Abstracts* 12, 71 - 71, 2006
- [342] Shettle E., Fenn R., *Models for the Aerosols of the Lower Atmosphere and the Effects of Humidity Variations on their optical Properties*, Environmental Research Paper, Project 7670, Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom, Massachusetts, U.S.A., 1979

- [343] Shivananda S., Lennard-Jones J., Logan R., Fear N., Price A., Carpenter L., van Blankenstein M., Incidence of inflammatory bowel disease across Europe: is there a difference between north and south? Results of the European Collaborative Study on Inflammatory Bowel Disease (EC-IBD), *Gut* 39, S. 690 – 697, 1996
- [344] Sillito A., Cudeiro J., Jones H., Always returning: feedback and sensory processing in visual cortex and thalamus, *Trends in Neuroscience* 29/6, 307 – 316, 2006
- [345] Skene D., Optimization of Light and Melatonin to Phase-Shift Human Circadian Rhythms, *Journal of Neuroendocrinology* 15, 438 – 441, 2003
- [346] Skinner M., Everts S., Reid A., Vitkin I., Lilge L., Sherar M., Changes in optical properties of ex vivo rat prostate due to heating, *Physics in Medicine and Biology* 45, 1375 – 1386, 2000
- [347] Smedby K., Hjalgrim H., Melbye M., Torrång A., Rostgaard K., Munksgaard L., Adami J., Hansen M., Porwit-MacDonald A., Anker Jensen B., Roos G., Bach Pedersen B., Sundström C., Glimelius B., Adami H., Ultraviolet radiation exposure and risk of malignant lymphomas, *Journal of the National Cancer Institute* 97, 199 – 209, 2005
- [348] Solanki S., Fligge, Reconstruction of Past Solar Irradiance, *Space Science Reviews*, Vol. 94, 127-138, 2001
- [349] Speckmann E., Wittkowski W., *Bau und Funktionen des menschlichen Körpers*, 1998
- [350] Spina C., Tangpricha V., Uskokovic M., Adorinic L., Maehr H., Holick M., Vitamin D and Cancer, *Anticancer Research* 26, 2515 - 2524 , 2006
- [351] Spittler A., Willheim M., Leutmezer F., Ohler R., Krugluger W., Reissner C., Lucas T., Brodowicz T., Roth E., Boltz-Nitulescu G., Effects of 1 alpha, 25-dihydroxyvitamin D₃ and cytokines on the expression of MHC antigens, complement receptors and other antigens on human blood monocytes and U937 cells: role in cell differentiation, activation and phagocytosis., *The Journal of Immunology* 90, 286-293, 1997
- [352] Srinivasan V., Pandi-Perumal S., Maestroni G., Esquifino A., Hardenland R., Cardinali D., Role of Melatonin in Neurodegenerative Diseases, *Neurotoxicity Research* 7/4, 293 – 318, 2005
- [353] Staples J., Ponsonby L., Lim L., McMichael A., Ecologic analysis of some immune-related disorders, including type 1 diabetes, in Australia: latitude, regional ultraviolet radiation, and disease prevalence., *Environmental Health Perspectives* 111, 518 – 523, 2003
- [354] Steele J., R. M. Schindler, 1999
- [355] Steigerwald K.: *Sehleistung des Vogelauges - Perspektiven und Konsequenzen für die Haltung von Zier- und Wirtschaftsgeflügel unter Kunstlichtbedingungen*, Dissertation an der Ludwig-Maximilians-Universität München, 2006
- [356] Steinhausen H., Gundelfinger R., Winkler Metzke C., Prevalence of self-reported seasonal affective disorders and the validity of the seasonal pattern assessment questionnaire in young adults: Findings from a Swiss community study, *Journal of Affective Disorders* , ISBN 0165-0327 (P) [Epub ahead of print], 2008
- [357] Stene L., Ulriksen P., Joner M., Goner G., Use of cod liver oil during pregnancy associated with lower risk of Type I diabetes in the offspring., *Diabetologia* 43, 1093 – 1098, 2000
- [358] Stockman A., Sharpe L., Spectral sensitivities of the middle- and long-wavelength sensitive cones derived from measurements in observers of known genotype, *Vision Research* 40, S. 1711-1737. 2000
- [359] Swedo S., Pleeter J., Richter D., Hoffmann C., Allen A., Hamburger S., Turner E., Yamada E., Rosenthal N., Rates of seasonal affective disorder in children and adolescents, *American Journal of Psychiatry* 152/7, 1016 - 1019 , 1995
- [360] Tang B., Estick G., Nowson C., Smith C., Bensoussan A., Use of calcium or calcium in combination with vitamin D supplementation to prevent fractures and bone loss in people aged 50 years and older: a meta-analysis., *Lancet* 370, S. 657 – 666, 2007
- [361] Tangpricha V., Flanagan J., Whitlatch L., Tseng C., Chen T., Holt P., Lipkin M., Holick M., 25-hydroxyvitamin D-1 α -hydroxylase in normal and malignant colon tissue, *Lancet* 357, 1673 - 1674, 2001
- [362] Tangpricha V., Koutkia P., Rieke S., Chen T., Perez A., Holick M., Fortification of orange juice with Vitamin D: a novel approach to enhance vitamin D nutritional health, *American Journal of Clinical Nutrition* 77: S 1478 – 1483, 2003
- [363] Tangrea J., Helzlsouer K., Pietinen P., et al., Serum levels of vitamin D metabolites and the subsequent risk of colon and rectal cancer in Finnish men., *Cancer Causes Control.* 8/4, 615 – 625, 1997

- [364] Taylor A., Lack L., Wright H. , The effect of "sleeping-in" weekend mornings on the circadian rhythms, sleep, and daytime sleepiness, *Sleep* 29, Abstract 20th Annual Meeting, Associated Professional Sleep Societies, Salt Lake City, USA, 2006
- [365] Taylor C., Stern R., Leyden J., Gilchrest B., Photoaging/photodamage and photoprotection, *Journal of the American Academy of Dermatology* 22, 1 - 15, 1990
- [366] Thapan K., Arendt J., Skene D., An action spectrum for melatonin suppression: Evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans, *The Journal of Physiology* 535 (1), 261 - 267, 2001
- [367] Thienel K.-Ch., Werkstoffe des Bauwesens: Glas, Vorlesung an der Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Bauingenieur und Vermessungswesen, Institut für Werkstoffe des Bauwesens, 2006
- [368] Ucke C., Wolf R., Durch Farbe in die 3. Dimension, *Physik in unserer Zeit* 30, Nr. 2, 50 - 53, 1999
- [369] Umweltbundesamt, Klimaschutzbericht 2008, 2008
- [370] Ungerleider L., Mishkin M., Two cortical visual systems. In: Ingle D., Goodale M., Mansfield R., (Herausgeber), *Analysis of visual behavior*, 549 - 586, 1982
- [371] Van den Berg F., Cabri J., Gifford L., Arendt-Nielsen L., Bader E., *Angewandte Physiologie: Das Bindegewebe des Bewegungsapparates verstehen und beeinflussen*, 2. Auflage, 2003
- [372] Van der Wielen R., Lowik M., van den Berg H., de Groot L., Haller J., Moreiras O., van Staveren W., Serum vitamin D concentrations among elderly people in Europe, *Lancet* 346, 207 - 210, 1995
- [373] Van Someren E., Kessler A., Mirmiran M., Swaab D., Indirect Bright Light Improves Circadian Rest-Activity rhythm Disturbances in Dement Patients, *Biological Psychiatry* 41, 955 - 963, 1997
- [374] Vandewalle G., Balteau E., Phillips C., Degueldre C., Moreau V., Sterpenich V., Albouy G., Darsaud A., Desseilles M., Dang-Vu T., Peigneux P., Luxen A., Dijk D., Maquet P., Daytime Light Exposure Dynamically Enhances Brain Responses, *Current Biology* 16, 1616 - 1621, 2006
- [375] Vandewalle G., Gais S., Schabus M., Balteau E., Carrier J., Darsaud A., Sterpenich V., Albouy G., Dijk D., Maquet P., Wavelength-dependent modulation of brain responses to a working memory task by daytime light exposure, *Cerebral Cortex* 17/12 2788 - 2795, 2007
- [376] Verhaar H., Samson M., Jansen P., de Vreede P., Manten J., Duursama S., Muscle strength, functional mobility and vitamin D in older women. *Aging* 12 / 6, 455 - 460, 2000
- [377] Vetter N., 70 Jahre Pulmologisches Zentrum, Pulmologisches Zentrum der Stadt Wien, 1993
- [378] Vetter P., Roth A., Hausser M., Propagation of action potentials in dendrites depends on dendritic morphology, *Journal of Neurophysiology* 85/2, 926-937, 2001
- [379] Wagner-Rieger R., *Wiens Architektur im 19. Jahrhundert*, ÖBV für Unterricht, Wiss. und Kunst, Wien, 1970
- [380] Wald G., Human vision and the spectrum, *Science* 101, 653-658, 1945
- [381] Walther D., Peter J., Bashammakh S., Hoertnagl H., Voits M., Fink H., Bader M., Synthesis of serotonin by a second tryptophan hydroxylase isoform, *Science* 299, 76 - 76, 2003
- [382] Walther D., *Protein-Monoaminylierung: Neu erkannte Funktionen monoaminerger Hormone*, Jahrbuch 2007 - Max-Planck-Institut für molekulare Genetik, 2007
- [383] Wang T., Pencina M., Booth S., Jacques P., Ingelsson E., Lanier K., Benjamin E., D'Agostino R., Wolf M., Vasan R., Vitamin D Deficiency and Risk of Cardiovascular Disease, *Circulation* 117, 503 - 511, 2008
- [384] Waterhouse J., Edwards B., Nevill A., Carvalho S., Atkinson G., Buckley P., Reilly T., Godfrey R., Ramsay R., Identifying some determinants of "jet lag" and its symptoms: a study of athletes and other travellers, *British Journal of Sports Medicine* 36/1, 54 - 60, 2002
- [385] Waters J., Larkum M., Sakmann B., Helmchen F., Supralinear Ca²⁺ influx into dendritic tufts of layer 2/3 neocortical pyramidal neurons in vitro and in vivo, *Journal of Neuroscience* 23/24, 8558 - 8567, 2003
- [386] Wehr T. , The durations of human melatonin secretion and sleep respond to changes in daylength, *J Clin Endocrinol Metab* 73, 1276 - 1280, 1991
- [387] Weihsmann H., *In Wien erbaut*, 2005

- [388] Weingrill T., Gray D., Barrett L., Henzi P., Fecal cortisol levels in free-ranging female chacma baboons: relationship to dominance, reproductive state and environmental factors, *Hormones and Behaviour*, 45/4, 259 – 269, 2004
- [389] Weisman Y., Harell A., Edelstein S., David M., Spierer Z., Golander A., 1,25-dihydroxyvitamin D₃ and 24,25-dihydroxyvitamin D₃ in vitro synthesis by human decidua and placenta, *Nature* 281, 317-319, 1979
- [390] Welsch U., Sobotta, Lehrbuch Histologie, 2. Auflage, 2006
- [391] Wettenberg L., Light and biological rhythms in man, Stockholm, Pergamon 1993
- [392] Wever R., Die zirkadiane Rhythmik des Menschen unter "Freilauf"-Bedingungen, *Münchener medizinische Wochenschrift*, 132, 684, 1990
- [393] Whitman T., O'Callaghan M., Maxwell S., The Effects of Cycled Versus Noncycled Lighting on Growth and Development in Preterm Infants, *Infant Behavior and Development* 18, 87 – 95, 1995
- [394] Whitmore D., Cermakian N., Crosio C., Foulkes N., Pando M., Travnickova Z., Sassone-Corsi P., A clockwork organ, *Biological Chemistry* 381, 793-800, 2000
- [395] Willis G., Robertson A., Recovery of experimental Parkinson's disease with the melatonin analogues ML-23 and S-20928 in a chronic, bilateral 6-OHDA model: a new mechanism involving antagonism of the melatonin receptor, *Pharmacology Biochemistry and Behavior* Volume 79/3, 413 – 429, 2004
- [396] Winkelmann J., Schormair B., Lichtner P., Ripke S., Xiong L., Jalilzadeh S., Fulda S., Pütz B., Eckstein G., Hauk S., Trenkwalder C., Zimprich A., Stiasny-Kolster K., Oertel W., Bachmann C., Paulus W., Peglau I., Eisensehr I., Montplaisir J., Turecki G., Rouleau G., Gieger C., Illig T., Wichmann E., Holsboer F., Müller-Myhsok B., Meitinger T., Genome-wide association study of restless legs syndrome identifies common variants in three genomic regions., *Nature Genetics* 39/8, 1000 – 1006, 2007
- [397] Winkler D., Pjrek E., Kasper S., Iwaki R., Kasper S., Treatment of seasonal affective disorder. *Expert Review of Neurotherapeutics* 6/7, 1039 – 1048, 2006
- [398] Wirz-Justice A., Graw P., Krauchi K., Gisin B., Arendt J., Aldhous M., Poldinger W., Morning or night-time melatonin is ineffective in seasonal affective disorder, *Journal of Psychiatric Research* 24/2, 129 – 137, 1990
- [399] Wissenschaftlicher Lebensmittelausschuss der Europäischen Kommission: Opinion of the Scientific Committee on Food on the Tolerable Upper Intake Level of Vitamin D., 2002
- [400] Witt-Enderby R., Bennett J., Jarzynka M., Firestine S., Melan M., Melatonin receptors and their regulation: biochemical and structural mechanisms, *Life Sciences* 72, 2183-2198, 2003
- [401] Wokalek H., Physiologie der Haut, In: Niedner R., Ziegenmeyer J. (Herausgeber), *Dermatika*, 7 – 24, 1992
- [402] Wolters M., Ströhle A., Hahn A., Neue Erkenntnisse zu Vitamin D und Vitamin B₁₂, *Deutsche Apotheker Zeitung*, 145 / 2, 65 – 72, 2005
- [403] Wong K., Dunn F., Berson D., Photoreceptor Adaptation in Intrinsically Photosensitive Retinal Ganglion Cells, *Neuron*, Vol. 48, 1001 – 1010, 2005
- [404] Wright H., Lack L., The effect of different wavelengths of light in changing the phase of the melatonin circadian rhythm, In: Pandi-Perumal S., Cardinali D. (Herausgeber), *Melatonin: Biological basis of its function in health and disease*, 170-183, 2006
- [405] Wu Y., Feenstra M., Zhou J., Liu R., Toraño J., van Kan H., Fischer D., Ravid R., Swaab D., Molecular Changes Underlying Reduced Pineal Melatonin Levels in Alzheimer Disease: Alterations in Preclinical and Clinical Stages, *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism* 88/12, 5898 – 5906, 2003
- [406] Xu H., Soruri A., Gieseler R., Peters J., 1,25-Dihydroxyvitamin D₃ exerts opposing effects to IL-4 on MHC class-II antigen expression, accessory activity and phagocytosis on human monocytes., *The Journal of Immunology* 38, 535 – 540, 1993
- [407] Yeh S., Khalil O., Hanna C., Kantor S., Near-infrared thermo-optical response of the localized reflectance of intact diabetic and nondiabetic human skin, *Journal of Biomedical Optics* 8/3, 534 – 544, 2003
- [408] Zeitzer M., Dijk D., Kronauer R., Brown E., Czeisler C., Sensitivity of the human circadian pacemaker to nocturnal light: melatonin phase resetting and suppression, *The Journal of Physiology*, 526, 695 – 702, 2000

- [409] Ziambaras K., Dagogo-Jack S., Reversible muscle weakness in patients with vitamin D deficiency, *The Western Journal of Medicine*, 167, 435 – 439, 1997
- [410] Zittermann A., Niedriger Vitamin-D-Status und geringe Calciumzufuhr – Risikofaktoren des metabolischen Syndroms?, *Ernährungs-Umschau* 50, 84 – 90, 1987
- [411] Zittermann A., Scheld K., Stehle P., Seasonal variations in vitamin D status and calcium absorption do not influence bone turnover in young women, *European Journal of Clinical Nutrition* 52, 501 – 506, 1998
- [412] Zittermann A., Vitamin D in preventive medicine: are we ignoring the evidence?, *British Journal of Nutrition* 89, 552 - 572, 2003

Akademischer Lebenslauf

Arch. DI Renate Hammer, MAS



Geburtsdatum und -ort

26. Jänner 1969, Wien

Werdegang

- 1987 – 1994 **Studium der Architektur** an der Technischen Universität Wien mit Sponson zum **Diplomingenieur der Architektur**, Diplomarbeit „Hospiz“
- 1989 - 1991 Praktika in Architekturbüros:
- Architekturbüro Langmaack in Hamburg, Deutschland
- Architekturbüro Rohringer und Heinz, Wien
- Architekturbüro Hauss in Hassloch/Bad Dürkheim, Deutschland
- 1991 – 1993 Freiberufliche Mitarbeit für das Architektur Atelier Oberhofer, Wien
- 1992 Freiberufliche Tätigkeit für „Die Presse“ Unabh. Tageszeitung für Österreich
- 1992 – 1994 **Tutorin für angewandte Ästhetik** an der Technischen Universität Wien
- 1994 – 2002 **Studium der Philosophie** an der Universität Wien
- 1995 – 1998 Anstellung im Architekturbüro Brada Wien
- 1995 **Postgraduales Studium Urban Engineering** an der Universität Tokyo bei Prof. Dr. Yuki Nishimura, finanziert durch ein Leistungsstipendium der Technischen Universität Wien
- 1997 –1999 **Postgraduales Studium Solararchitektur** an der Donau Universität in Krems
- 1998 – 2006 **Wissenschaftliche Mitarbeiterin** am Zentrum für Bauen und Umwelt der Donau-Universität Krems und **Lehrgangsheiterin** der Universitätslehrgänge Solararchitektur, Solares Planen und Bauen, Klima-Engineering, Master of Building Science, gemeinsam mit DI Peter Holzer
- 1999 Graduierung zum **Master of Advanced Studies** (Solar Architecture)
- 1999 bis dato Selbständige Architektin BAK Deutschland, niedergelassen in Memmingen
- 2004 bis dato Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Department für Bauen und Umwelt der Donau-Universität Krems und **Leiterin des Fachbereichs Architektur und Ingenieurwissenschaften**, gemeinsam mit DI Peter Holzer
- 2007 bis dato Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Department für Bauen und Umwelt der Donau-Universität Krems und Leitung der **Stabstelle Forschung und Entwicklung** am Department für Bauen und Umwelt

Außer-Akademische Tätigkeiten

Architektur Projekte

2000	Neubau Solarsiedlung Hohensteinstraße in 3500 Krems; Entwurfsarbeit beauftragt durch Bmstr. E. Krammer; realisiert
2001	Wiederaufbau des Ledigenheims A 3500 Krems, Vorentwurf beauftragt durch Bmstr. E. Krammer, realisiert
2002	Areal - Kasernstraße – Krems; Städtebauliche Studien in vier Varianten beauftragt durch Bmstr. E. Krammer, derzeit ruhend
2002	Niedrigenergiehaus Unterkirchbach; Entwurf und Einreichplanung beauftragt durch Lindner und Partner Bauträger, realisiert
2003	Wohnanlage Kasernstraße - Krems; Solararchitektonischer Entwurf beauftragt von der Gemeinnützigen Donau-Ennstaler Siedlungs AG Krems, derzeit ruhend
2005	Sanierung und Umbau Wohnung Himmelpfortgasse 1010 Wien; Entwurf in drei Varianten; privater Bauherr, laufend
2006	Thermische Sanierung und Umbau des Haus Sochor Tribulzgasse 1230 Wien; Entwurf in zwei Varianten; privater Bauherr, laufend
2007	Thermische Sanierung und Umbau des Austraghauses Aich Oberösterreich; Entwurf; privater Bauherr, realisiert

Akademische Tätigkeiten

Akademische Aufbauarbeit

1998 bis dato	Entwicklung, leitende Durchführung und laufende Weiterentwicklung postgradualer Universitätslehrgänge am Department für Bauen und Umwelt der Donau-Universität Krems, gemeinsam mit DI Peter Holzer: „Solararchitektur“, „Klima-Engineering“, „Master of Building Science“, „Future Building Solutions“ (englischsprachig) und „Lichtgestaltung“
2006 bis dato	Aufbau einer schlagkräftigen Akquisition und Qualitätssicherung für Forschung und Entwicklung am Department für Bauen und Umwelt
2006 bis dato	Aufbau des Lichtlabors an der Donau Universität Krems und Ankauf des künstlichen Himmels aus Eigenmitteln.
2009	Gründung und inhaltliche Leitung des Area Systems des Kompetenzprojektes „Futur Building“ als Spin-Off Unternehmen für Forschung und Entwicklung der Donau Universität Krems im Rahmen der Forschungsförderungsschiene COMET

Ausgewählte Forschungsprojekte

1999	R. Hammer, P. Jung; <i>Beton in der Solararchitektur</i> , im Auftrag von Zement+Beton; Köln
2001	R. Hammer; <i>Fachbeitrag zum Kriterienkatalog Umweltfreundliche Beschaffung</i> , im Auftrag des Beschaffungsservice Austria, IFZ-Graz, im Rahmen eines EU- Projektes
2007	R. Hammer, P. Holzer: <i>Zuviel Licht?</i> Studie gefördert durch die Wiener Wohnbauforschung. Untersucht den Zielkonflikt von thermischer Gebäudeoptimierung und optimaler

- Tageslichtnutzung von Gebäuden in Bezug auf deren Himmelsausrichtung. Durchgeführt am Modell eines Hochverglasten Laubenganghauses.
- 2008 P. Holzer, R. Hammer: *Sommertauglichkeit im Klimawandel*
Eigenforschung der Donau-Universität Krems. Untersuchung der Auswirkungen des prognostizierten Klimawandels auf den Wärme- und Kältebedarf eines charakteristischen Büroraums, aufbauend auf den lokalen Klimaszenarien des Österreichischen Projekts reclip:more. Veröffentlichung u.a. im Rahmen des IBO Kongresses im Feb 2008, Wien
- 2008 R. Hammer, P. Holzer: *Light Passage*
Das Projekt wurde im Rahmen des Tecnet Capital Calls „Intelligentes Bauen“ als Siegerprojekt ausgezeichnet. Der Call „Intelligentes Bauen“ wurde vom Land Niederösterreich initiiert, um die Vernetzung der Industrie mit den Forschungsinstitutionen zu intensivieren

Akademische Lehrveranstaltungen

- SS 1992 Lehrtätigkeit am Institut für Gebäudelehre, Technische Universität Wien
Technischen Universität Wien:
- UE Angewandte Ästhetik Improvisationsübung
- Seit 1999 Lehrtätigkeit am Department für Bauen und Umwelt der Donau-Universität Krems:
- **VO Ethische Grundlagen**
 - **VO Ökologie und Ethik**
 - **VO und UE Wissenschaftlich Arbeiten**
 - **UE Ortsanalyse und Ortswahrnehmung**
 - **VO Theoriebildung Solararchitektur**
 - **VO Solare Stadt**
 - **UE Angewandte Tageslichtplanung**
 - **UE Entwerfen**

Außer-akademische Lehrveranstaltungen

- 2007 Mitautorenschaft am Vortrag von DI Peter Holzer im Rahmen der Baustudienwoche 2007, Zürs, mit Mitautorenschaft von Arch. DI Renate Hammer, MAS: „Konzepte für Gebäude die mehr können und weniger brauchen“
- 2008 Vortrag im Rahmen des Workshops „Forschungsperspektiven – Umwelt und Gesundheit: Status quo und Zukunft“ über die Forschungsschwerpunkte am Department für Bauen und Umwelt, Salzburg, Juni 2008
- 2008 Fields of Innovation, Scenarios for the Building Sector in Austria 2050, Vortrag vor einer internationalen Visite in der WKO, September 2008
- 2008 Vortrag im Rahmen der Ausbildung zum zertifizierten Lichtplaner für die Lichttechnische Gesellschaft Österreichs durch Austria Standard Plus Trainings „Tageslichtangebote im Gebäude – Wieviel Licht braucht der Mensch“, Oktober 2008

Gremien und Beiräte sowie Tagungsorganisationen

1999	Co-Konzeption und -Veranstaltung des Symposiums „Skylines – Sind Hochhäuser zukunftsfähig?“, gemeinsam mit DI Peter Holzer, in Kooperation mit ÖGFA
2000	Mitveranstaltung des Symposium „E-living, die elektronische Vernetzung der Gesellschaft und die Auswirkung auf den Menschen - die Architektur“, gemeinsam mit DI Peter Holzer, in Kooperation mit Büro LOG ID, Tübingen, École D´Architecture, Paris und Universität Darmstadt, Abteilung Hochbaukonstruktion
2003	Co-Konzeption des Symposiums „Architektur – Consulting“, gemeinsam mit DI Peter Holzer, in Kooperation mit orte Niederösterreich
2004	Konzeption, Durchführung, Mitglied des Wissenschaftlichen Beirats und Chairman der 8. Europäischen Passivhaustagung, Krems
2006 – 2007	Mitglied des redaktionellen Beirats der ARGE Baukulturreport 2006
2007	Konzeption, Durchführung, Mitglied des programme committees, Chairman der 4. internationalen Konferenz TIA – Teaching in Architecture, Krems, in Kooperation mit dem Netzwerk TIA, co-finanziert im Rahmen des EU-Programms Intelligent Energy Europe
2007	Konzeption, Durchführung, Mitglied der Fachjury des internationalen Architekturwettbewerbs „Daylight Spaces“ mit Jurierung und Preisverleihung im Rahmen der 4. internationalen Konferenz TIA – Teaching in Architecture, Krems,
2007	Co-Konzeption und –Veranstaltung sowie Chairman des IBO Kongresses 2007 im Rahmen der internationalen Messe Bauen und Energie: „Gute Aussichten – Tageslicht in Gebäuden“
2007	Mitglied der Fachjury des VCÖ Mobilitätspreises "stadt.land.mobil" 2007
2007	Chairman auf dem Energy Forum Brixen
2008	geladenes Mitglied im beratenden Expertengremium zur Programmlinie Haus der Zukunft plus
2008	Co-Konzeption und -Durchführung des Symposiums Forum Building Science, Krems, gemeinsam mit DI Dr. Christian Hanus
2008	wissenschaftliche Begleitung des Architektur- und Realisierungswettbewerbes „model home 2020“ des VELUX Konzerns für VELUX Austria, Target for the Austrian project: zero carbon emissioning
2008	Expertenbefragung „Identifikation von Handlungsempfehlungen zur Anpassung an den Klimawandel in Österreich“ im Rahmen von AustroClim, Institut für Soziale Ökologie, Universität Klagenfurt, Umweltbundesamt und Institut für Meteorologie, Universität für Bodenkultur im Auftrag des BMKFUW

Mitgliedschaften in Organisationen

1999 bis dato	Bundes Architekten Kammer Deutschland (Bayern)
2006 bis dato	Erweitertes Vorstandsmitglied der Plattform für Architekturpolitik und Baukultur, zuständig für Ausbildung und Forschung
2008 bis dato	Mitglied des Oxford Round Table
2008 bis dato	Mitglied des Beirats für Baukultur des Bundeskanzleramtes

Reviews

- 2008 V. Bokalders, M. Block: *The Whole Building Handbook*. Earthscan, London, 2008
- 2008 bis dato Mitglied des Reviewer Pool der Fachzeitschrift „Solar Energy Journal“. Publisher: Clean Energy Research Center, University of South Florida

Förderungen und Preise

- 1989 Auszeichnung für den Beitrag: Zukunftsorientierte Stadtauffassung im Rahmen der EXPO-Ideensuche im Bereich Stadtstruktur, Verkehr
- 2003 Auszeichnung des Universitätslehrgangs Solararchitektur als Top-Bildungsangebot im Rahmen der NÖ Umweltbildungsinitiative 2003
- 2004 Auszeichnung des Universitätslehrgangs Master of Building Science mit seinen drei Vertiefungen Solararchitektur, Klima-Engineering und Sanierungsmanagement als Top-Bildungsangebot im Rahmen der NÖ Umweltbildungsinitiative 2004/2005
- 2000 Beauftragung im Rahmen eines Verhandlungsverfahrens mit 7 Bewerbern: Entwurf eines Gendarmeriegebäudes in Hadersdorf am Kamp im Auftrag des gewerblichen Architekturbüros Kramer, Krems
- 2002 Österreichischer Solarpreis in der Kategorie C –Eigentümer: Entwurf zur Sanierung der Betriebsanlage der Firma Kugler in Gföhl im Auftrag des gewerblichen Architekturbüros Kramer, Krems
- 2003 Stadt- u. Dorferneuerungspreis des Niederösterreichischen Baugewerbes 3. Preis: Entwurf der Solarsiedlung Hohensteinstraße in Krems im Auftrag des gewerblichen Architekturbüros in Krems
- 2008 Auszeichnung des Projekts „Light Passage“ des Departments für Bauen und Umwelt im Rahmen des Tecnet Capital Calls „Intelligentes Bauen“ als Siegerprojekt, 1. Preis für Projektleiterin R. Hammer
- 2009 3. Platz für das Department für Bauen und Umwelt im Rahmen des Quatour Coromati 2009, Fairnesspreis des Baugewerbes

Manuskripte und Veröffentlichungen

Konferenzbeiträge

- 1995 Vortrag auf der D-A-CH-Tagung: Aktuelle Probleme des Erdbebeningenieurwesens und der Baudynamik, Graz: Wiederaufbau von Kobe/Japan – Möglichkeiten und Grenzen städtischer Planung
- 2000 Vortrag am Symposium „E-Living: Die elektronische Vernetzung der Gesellschaft und die Auswirkung auf den Menschen und die Architektur“, gemeinsam mit DI Peter Holzer, in Kooperation mit École D'Architecture, Paris und Universität Darmstadt, Abteilung Hochbaukonstruktion: „The Danube University Krems“
- 2001 Vortrag auf der XVII International Conference WACRA, Krems: “Sustainable Development through Research and Learning”
- 2001 Vortrag auf dem Symposium Bau Innovativ 2001 im Rahmen der Messe Nürnberg, gemeinsam mit DI Patrick Jung: Massivbau in der Solararchitektur

- 2002 Vortrag auf dem Symposium „Forum Zukunft“ im Rahmen der internationalen Fachmesse light&building, Frankfurt: „Postgraduale Universitätslehrgänge Solararchitektur und Klima-Engineering an der Donau-Universität Krems
- 2003 Vortrag auf den Architekturgesprächen des Europäischen Forums Alpbach: „Drei provokante Thesen zu Leben mit schwindenden Ressourcen“
- 2005 Mitautorenschaft am Vortrag von DI Peter Holzer auf dem Begleitkongress zur internationalen Fachmesse „Bau München“: „Postgradualer Master-Studiengang Klima-Engineering“
- 2005 Vortrag auf der Konferenz „Zukunft Solararchitektur“, Mainz, gemeinsam mit DI Peter Holzer: „Solararchitektur und Klima-Engineering: Entwerfen für den Menschen“
- 2006 Vortrag auf dem Symposium Forum Building Science 2006, Krems: „Lichtlabor – Instrument empirischer Forschung“
- 2006 Vortrag auf der Generalversammlung der Plattform für Architekturpolitik und Baukultur: „Sustainable Building Culture in Austria“
- 2007 Vortrag auf der CESB 2007 – Central Europe towards Sustainable Building, Prag, mit Mitautorenschaft von DI Peter Holzer: „Postgraduate Education in Building Science at Danube University Krems“
- 2007 Vortrag auf dem Energy Forum Brixen, Brixen: „Vom energieeffizienten Gebäude zur solaren Architektur“
- 2008 Mitautorenschaft am Vortrag von DI Peter Holzer auf dem IBO Kongress 2008 im Rahmen der internationalen Messe Bauen und Energie: „Sommertauglichkeit von Gebäuden im Klimawandel“
- 2008 Vortrag auf dem Symposium Forum Building Science 2008, Krems, mit Mitautorenschaft von DI Peter Holzer: „Zuviel Licht? – Ergebnisse über Bedarf und Potenzial von Tageslicht im Innenraum“
- 2008 Vortrag im Rahmen der Wiener Wohnbauforschungstage, mit Mitautorenschaft von DI Peter Holzer: „Zuviel Licht?“

Konferenzbeiträge in peer-reviewten Proceedings

- 2000 R. Hammer, P. Holzer; *Postgraduate Studies in Solar Architecture*, Vortrag auf der 6th European Conference Solar Energy in Architecture and Urban Planning, Bonn 2000, The City - A Solar Power Station, EUROSLOAR, Ort, 2001
- 2003 R. Hammer; *Drei provokante Thesen zu Leben mit schwindenden Ressourcen*, Vortrag auf den Architekturgesprächen des Europäischen Forums Alpbach 2003 Documentation, Hrsg.: ATP Innsbruck, 2003, S. 124-126
- 2007 R. Hammer; *The Dimension of Daylight in Teaching Solar Architecture*. Proceedings of the 4th International Conference TIA – Teaching in Architecture, Krems 2007, Hrsg. Donau-Universität Krems, 2004, S. 7-9
- 2008 R. Hammer; *Building 2050 - Thermal and Daylight Optimization facing Climate Change*, Vortrag
- 5/2008 R. Hammer, P. Holzer; *Zuviel Licht? Wohnqualität durch neue Laubengänge*. Veröffentlichung der Beiträge der Wiener Wohnbauforschungstage 2008, Wiener Wohnbauforschung, 2008,
- 8/2008 R. Hammer, P. Holzer; *Effects of highly insulating and sun protecting glazing on the Photobiological Indoor Conditions*, paper Round Table Oxford August 2008

Broschüren und Buchbeiträge

- 1999 R. Hammer, P. Jung; *Beton in der Solararchitektur*, Hrsg.: Zement+Betton, Köln, 2000
- 2006 R. Hammer, P. Holzer; *Österreichischer Baukulturreport 2006, Teil 4, Ökologische Nachhaltigkeit*, Hrsg. ARGE Baukulturreport, Wien, 2007
- 2008 R. Hammer, P. Holzer; *Gebäudeperformance im Klimawandel – Wie bauen im Klimawandel?*, Österreichisches Bau- und Energiespar Handbuch, Österreichische Baudokumentation, Hrsg. Schmutzer Verlag GmbH, S. 7-11, 2008
- 2008 R. Hammer; white paper, Focus: Architektur, Innovation in der Architektur – Analyse und Anregungen, Gastkommentar: Prinzip Nachhaltigkeit, Hrsg. Departure (Tochter: Wiener Wirtschaftsförderungsfonds), S. 29-32, Mai 2008
- 2008 R. Hammer; *Towards Sustainability – Scenarios for the Building Sector and Fields of Innovation*, Velux Austria Konzern

Beiträge in Fachzeitschriften

- 3/1992 R. Hammer; *Dynamische Tonne Wien Westbahnhof: Die überirdische Situation einer neuen U-Bahn Station*; Artikel im Architektur Feuilleton der Tageszeitung „Die Presse“, 14. März 1992
- 3/1995 R. Hammer; *Hospizpavillion Baumgartnerhöhe, Architektonisches Modell einer Hospizanlage*; Artikel in der Zeitschrift der internationalen Gesellschaft für Sterbebegleitung; 7. Jahrgang, Heft 1, 03/1995 (Veröffentl. zur Diplomarbeit)
- 5/1995 R. Hammer; *Transformation of Movemnets Describing Space*. Artikel in der Fachzeitschrift Space Design – monthly Journal of Art and Architecture 05, 1995, S.112-113
- 11/1999 P. Holzer; R.Hammer; *Zwischen Ökoträgheit und schlechtem Gewissen, Warum interessieren sich Architekten eigentlich nicht für Solararchitektur?*; Deutsches Architektenblatt 11/99; S. 1464 – 1465
- 10/2000 R. Hammer, P. Jung; *Beton in der Solararchitektur*; Artikel in der Fachzeitschrift: Zement+Betton; Köln; 2000
- 2/2002 R. Hammer, P. Holzer; *Besser Wohnen durch ganzheitliche Planung*. Interview in der Fachbeilage der Tageszeitung „Der Standard“ vom 11. Feb. 2002, S. 6
- 4/2006 R. Hammer, P. Holzer; *Die gebaute Umgebung, Alternde Gesellschaft und bauliche Entwicklungstendenzen*. Fachbeitrag in upgrade 4.06/07, Magazin für Wissen und Weiterbildung der Donau-Universität Krems
- 3/2008 R. Hammer; *Thermische Optimierung und Tageslichtangebot – ein Zielkonflikt?*, Artikel im IBO Magazin, S.18-21
- 9/2008 R. Hammer; „Architects need examples“, Photon International, solar architecture special S. 142

Diplomarbeit

- 1994 R. Hammer, E. Simoncsics (Betreuer): *Hospiz*. Diplomarbeit an der Technischen Universität Wien am Institut für Gebäudelehre, Fakultät für Architektur und Raumplanung

Master-These

- 1999 R. Hammer, E. Mair, P. Jung (Betreuer); *Beton in der Solararchitektur*, Master-Thesis am Zentrum für Bauen und Umwelt der Donau-Universität Krems

Akademischer Lebenslauf

DI Peter Holzer



Geburtsdatum und -ort

16. April 1967, Wien

Werdegang

- 1985 – 1994 **Studium des Maschinenbaus** an der Technischen Universität Wien; mit **Sponision zum Diplomingenieur des Maschinenbaus**, Diplomarbeit: „Heizungstechnische Untersuchung eines scheitholzbeheizten Zentralheizungsherdes“
- 1989 – 1996 **Freiberufliche Forschungsarbeiten** im Themenfeld der Gebäude- und Umwelttechnik, unter anderem
- im Forschungszentrum Seibersdorf, Abt. f. Umwelttechnik,
 - in der Versuchsanstalt der Hafner Österreichs,
 - im Ziviltechnikbüro Dr. Peter Schütz, Wien
 - sowie an der Technischen Universität Wien, Institut für Verfahrenstechnik
- 1996 - 2006 **Wissenschaftlicher Mitarbeiter** am Department für Bauen und Umwelt, vormals Zentrum für Bauen und Umwelt der Donau-Universität Krems und **Lehrgangleiter** der Universitätslehrgänge Solararchitektur, Solares Planen und Bauen, Klima-Engineering, Master of Building Science, gemeinsam mit Arch. DI Renate Hammer, MAS
- 2004 bis dato Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Department für Bauen und Umwelt der Donau-Universität Krems und **Leiter des Fachbereichs Architektur und Ingenieurwissenschaften**, gemeinsam mit Arch. DI Renate Hammer, MAS
- 2001 – 2005 **Selbständiger Ingenieurkonsulent für Maschinenbau** mit den Tätigkeitsschwerpunkten Bauphysik und Klima-Engineering
- 2006 und
2008 bis dato Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Department für Bauen und Umwelt der Donau-Universität Krems und **interimistische Leitung des Departments**
- 2006 bis dato **Lehrbeauftragter an der Technischen Universität Wien** im Universitätslehrgang „Renewable Energy in Central and Eastern Europe“
- 2009 bis dato **Lehrbeauftragter an der fh campus wien** im Fachhochschulstudium „Nachhaltigkeit in der Bautechnik“

Akademische Tätigkeiten

Akademische Aufbauarbeit

- 1996 bis dato Entwicklung, leitende Durchführung und laufende Weiterentwicklung postgradualer Universitätslehrgänge am Department für Bauen und Umwelt der Donau-Universität Krems, gemeinsam mit Arch. DI Renate Hammer, MAS: „Solararchitektur“, „Klima-Engineering“, „Master of Building Science“ (englischsprachig) und „Lichtgestaltung“
- 2004 bis dato Aufbau und laufende Weiterentwicklung des Forschungsschwerpunkts thermische Gebäudephysik am Department für Bauen und Umwelt der Donau-Universität Krems mit einer qualitätvollen, eigenfinanzierten, Ausstattung von Simulationssoftware und Messgeräten.
- 2009 Gründung und inhaltliche Leitung des Area Components des Kompetenzprojektes „Futur Building“ als Spin-Off Unternehmen für Forschung und Entwicklung der Donau Universität Krems im Rahmen der Forschungslinie COMET

Ausgewählte Forschungsprojekte

- 2002 – 2004 P. Holzer; *Klima-Engineering Campus Krems*, Planungsbegleitendes Consulting für thermische Behaglichkeit, Sonnenschutz, Lüftungstechnik und haustechnische Konzeption für den Neubau des Campus Krems
- 2003 P. Holzer: *Thermisches Verhalten hochverglaster Laubengänge*. Eigenforschung der Donau-Universität Krems. Untersuchung der energietechnischen und thermischen Charakteristik hochverglaster Laubengänge in der Wechselwirkung mit dem angrenzenden Gebäude
- 2005 P. Holzer: *Parameterstudie zur thermischen Speicherwirkung von Fassaden*. Eigenforschung der Donau-Universität Krems Parameterstudie zur Wirksamkeit außen liegender thermischer Speichermassen von Fassaden. Veröffentlicht im Rahmen des Österreichischen Betontags im März 2006, Wien.
- 2006 – 2008 P. Holzer, H.P. Rodtleitner; *Monitoring Biohof Achleitner*, Langzeitmessungen und Modellrechnungen zur Fragestellung der thermischen und psychosozialen Wirkung raumprägender Innenraumbepflanzung.
- 2007 R. Hammer, P. Holzer: *Zuviel Licht?*
Studie gefördert durch die Wiener Wohnbauforschung. Untersuchung des Zielkonflikts von thermischer Gebäudeoptimierung und optimaler Tageslichtnutzung von Gebäuden in Bezug auf deren Himmelsausrichtung.
- 2007 – 2008 P. Holzer, U. Wernhart; *Bildungsmaterialien EPBD*, Erstellung von Bildungsmaterialien für die Energieausweiserstellung nach EPBD, im Rahmen eines Kooperationsprojekts aller österr. Bundesländer
- 2007 – 2008 P. Holzer; *MED-ENEC Energy Efficiency in the Construction sector of the Mediterranean*, Wissenschaftliche Begleitung energieeffizienter Pilotgebäude in Jordanien und Israel, im Auftrag von GTZ, mit Förderung der EU-EI
- 2008 P. Holzer, R. Hammer: *Sommertauglichkeit im Klimawandel*
Eigenforschung der Donau-Universität Krems. Untersuchung der Auswirkungen des prognostizierten Klimawandels auf den Wärme- und Kältebedarf eines charakteristischen Büroraums, aufbauend auf den lokalen Klimaszenarien. Veröffentlichung u.a. im Rahmen des IBO Kongresses im Feb 2008, Wien.
- 2008 R. Hammer, P. Holzer: *Light Passage*
Das Projekt wurde im Rahmen des Tecnet Capital Calls „Intelligentes Bauen“ als Siegerprojekt ausgezeichnet. Der Call „Intelligentes Bauen“ wurde vom Land Niederösterreich initiiert, um die Vernetzung der Industrie mit den Forschungsinstitutionen zu intensivieren

Akademische Lehrveranstaltungen

- seit 1997 Gestaltung und Leitung mehrerer Studientreisen zu ausgewählten Themen energieeffizienter Architektur und Gebäudetechnik, etwa nach Vorarlberg, Tirol, Süddeutschland, Dresden, IBA Emscher Park, Berlin, USA Ostküste, USA Westküste, gemeinsam mit Arch. DI Renate Hammer, MAS und tw. weiteren KollegInnen des Departments für Bauen und Umwelt
- Seit 1999 Lehrtätigkeit am Department für Bauen und Umwelt der Donau-Universität Krems:
- **VO und UE Grundlagen Energie**
 - **VO Biomasseheizung**
 - **UE Entwerfen/Projektarbeit**
 - **VO und UE Thermische Behaglichkeit**
 - **VO und UE Haustechnische Konzeption**
 - **VO und UE Thermische Sommertauglichkeit**
 - **VO und UE Solare Standortanalyse**
 - **VO und UE Gebäudesimulation**
 - **VO und UE Energieausweisberechnung nach EPBD**
 - **VO und UE Lichtsimulation**
 - **VO und UE Wärmebrückenanalyse**
- Seit 2006 Lehrtätigkeit im Universitätslehrgang „Renewable Energy in Central and Eastern Europe“ der Technischen Universität Wien
- **VO und UE Thermal Comfort**
 - **VO und UE External Climatic Conditions,**
 - **VO und UE Energy Demand Calculation of Buildings**
- SS 2008 Lehrtätigkeit im Rahmen des Studiums Architektur an der Kunstuniversität Linz
- **VO und UE Tageslicht**
- Seit WS 2009 Lehrtätigkeit im Rahmen des Studiums Nachhaltigkeit in der Bautechnik an der fh campus wien
- **VO und UE Haustechnik**

Gremien und Beiräte sowie Tagungsorganisationen

- 1999 Co-Konzeption und -Veranstaltung des Symposiums „Skylines – Sind Hochhäuser zukunftsfähig?“, gemeinsam mit Arch. DI Renate Hammer, MAS, in Kooperation mit ÖGFA
- 2000 Mitveranstaltung des Symposium „E-living, die elektronische Vernetzung der Gesellschaft und die Auswirkung auf den Menschen - die Architektur“, gemeinsam mit Arch. DI Renate Hammer, MAS, in Kooperation mit Büro LOG ID, Tübingen, École D'Architecture, Paris und Universität Darmstadt, Abteilung Hochbaukonstruktion
- 2003 Co-Konzeption des Symposiums „Architektur – Consulting“, gemeinsam mit Arch. DI Renate Hammer, MAS, in Kooperation mit orte Niederösterreich
- Seit 2004 Mitglied des ON-Komitees 235 – Rationeller Energieeinsatz in Gebäuden
- 2005 Mitglied des Wissenschaftlichen Beirats und Chairman der 9. Internationalen Passivhaustagung, Ludwigshafen
- Seit 2006 Mitglied im Wissenschaftlichen Beirat des bauen.energie.unwelt clusters Niederösterreich

2006	Co-Konzeption und -Durchführung und Chairman des Symposiums Forum Building Science, Krems
2006	Mitglied des Wissenschaftlichen Beirats und Chairman der 10. Internationalen Passivhaustagung, Hannover
2006	Mitglied des Expertengremiums zur Erarbeitung der Inhalte des Strategieprozesses Energie 2050 des bm:vit.
2006 – 2007	Mitglied des projektleitenden Konsortiums des Programms klima:aktiv haus im Auftrag des bm:lfuw
2006	Geladenes Mitglied des Expertengremiums zur Erarbeitung des Masterplans Umwelttechnik (MUT)
2006 bis dato	regelmäßiges Mitglied der Fachjury zum NÖ Bautechnikpreis im Auftrag der NÖ Landesinnung Bau
2006	Mitglied der Fachjury im Architekturwettbewerb zum Neubau des Kompetenzzentrums Groß Schönau
2007	Konzeption und Durchführung, der Fachtagung „Kompetenz Klima-Engineering“ im Rahmen der Fachmesse haustec, Salzburg, gemeinsam mit Arch. DI Renate Hammer, MAS.
2007	Co-Konzeption und -Durchführung des Symposiums Forum Building Science, Krems, gemeinsam mit DI Tania Berger
2007	Mitglied des Wissenschaftlichen Beirats und Chairman der 11. Internationalen Passivhaustagung, Bregenz
2007	Konzeption, Durchführung, Mitglied des programme committees, Chairman der 4. internationalen Konferenz TIA – Teaching in Architecture, Krems, in Kooperation mit dem Netzwerk TIA, co-finanziert im Rahmen des EU-Programms Intelligent Energy Europe
2007	Mitglied der Fachjury des internationalen Architekturwettbewerbs „Daylight Spaces“ mit Jurierung und Preisverleihung im Rahmen der 4. internationalen Konferenz TIA – Teaching in Architecture, Krems
2007	Mitglied der Fachjury im Architekturwettbewerb zum Neubau der österreichischen Botschaft in Jakarta, Indonesien, im Auftrag des Bundesministeriums für europäische und internationale Angelegenheiten
2007	Mitarbeit im Arbeitskreis Energie in Gebäuden im Strategieprozess energie 2050 des bm:vit
2008	wissenschaftliche Begleitung des Architektur- und Realisierungswettbewerbes „model home 2020“ des VELUX Konzerns für VELUX Austria, Target for the Austrian project: zero carbon emissioning
Seit 2008	Mitglied der Fachjury des Österreichischen Staatspreises für Consulting, im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaftliche Angelegenheiten
Seit 2008	Mitglied des ON-Komitees 175 – Wärmeschutz in Gebäuden
2008	Geladenes Mitglied im beratenden Expertengremium zur Programmlinie Haus der Zukunft plus
Seit 2008	Mitglied des Expertengremiums zur Beratung der NÖ Wohnbauförderung, LR Wolfgang Sobotka
2008	Co-Konzeption und -Durchführung des Symposiums Forum Building Science, Krems, gemeinsam mit DI Dr. Christian Hanus
2008	Geladene Teilnahme und Keynote am „Oxford Round Table; Sustainability: The Ultimate Quest“, Oxford

Mitgliedschaften in Organisationen

1998 bis dato	Ordentliches Mitglied des IBO - Institut für Bauökologie und –biologie, Wien
2001 – 2005	Mitglied der Kammer der Architekten und Ingenieurkons. für Wien, NÖ und Bgld
2008 bis dato	Mitglied des Oxford Round Table
2008 bis dato	Ersatzmitglied im Beirat für Baukultur des österreichischen Bundeskanzleramts
Seit 2004	Mitglied der IG Passivhaus Ost

Förderungen und Preise

1996	Auszeichnung des Universitätslehrgangs Solararchitektur mit dem europäischen Solarpreis der EUROSOLAR Europäische Vereinigung für Erneuerbare Energien e.V.
2003	Auszeichnung des Universitätslehrgangs Solararchitektur als Top-Bildungsangebot im Rahmend der NÖ Umweltbildungsinitiative 2003
2004	Auszeichnung des Universitätslehrgangs Master of Building Science mit seinen drei Vertiefungen Solararchitektur, Klima-Engineering und Sanierungsmanagement als Top-Bildungsangebot im Rahmend der NÖ Umweltbildungsinitiative 2004/2005
2009	3. Platz für das Department für Bauen und Umwelt im Rahmen des Quatour Coromati 2009, Fairnesspreis des Baugewerbes

Manuskripte und Veröffentlichungen

Vorträge und Konferenzbeiträge

2003	Keynote auf dem Symposiums „Architektur – Consulting“ in Kooperation mit orte Niederösterreich
6/2004	Vortrag auf dem [energiegespräch] der Österreichischen Energieagentur im Technischen Museum Wien: „Passive Cooling oder Wie viel Kälte brauchen wir?“
2006	Vortrag am Österreichischen Betontag 2006, Wien: „Speicherwand: Parameterstudie zu einem hartnäckigen bauphysikalischen Gerücht“
2006	Vortrag auf dem FMA-ÖVI Symposium, Wien: „Thermische Behaglichkeit – ein innerer Wert von Immobilien“
2007	Vortrag auf dem ATGA Facility Kongress, Wien: „Klima-Engineering, Planungsbeiträge für wohltemperierte Gebäude“
2007	Vortrag auf dem ÖVI FMA Symposium Die Zukunftsfähigkeit von Immobilien: Nutzen sichern – Werte halten, Wien, gemeinsam mit MMag. Anton Holzapfel: „Die Umsetzung des Energieausweises aus technischer und rechtlicher Sicht“
2008	Vortrag auf dem IBO Kongress 2008 auf der internationalen Messe Bauen und Energie, mit Mitautorenschaft von Arch. DI Renate Hammer, MAS: „Sommertauglichkeit von Gebäuden im Klimawandel“

Konferenzbeiträge in peer-reviewten Proceedings

- 1998 P. Holzer: *Post Graduate Education and Training in Solar Architecture of the Danube University of Krems*. Proceedings of the 5th European Conference Solar Energy in Architecture and Urban Planning - Building a New Century, Bonn 1998, Edited by EUROSOLAR, Bonn, 1999, S. 230-231
- 2000 R. Hammer, P. Holzer; *Postgraduate Studies in Solar Architecture*, Vortrag auf der 6th European Conference Solar Energy in Architecture and Urban Planning, The City - A Solar Power Station, Bonn 2000, Edited by EUROSLOAR, Bonn, 2001
- 2000 R. Hammer, P. Holzer: *Postgraduate Studies in Solar Architecture at Center of Architecture, Construction and Environment*. Proceedings of the 3rd International Conference TIA – Teaching in Architecture, Oxford 2000
- 2005 C. Metzger v. Thülen, P. Blineder, P. Holzer (Referent): *Baustandard der Zukunft? Das Passivhaus im historischen Vergleich*. Tagungsband der 9. Internationalen Passivhaustagung, Ludwigshafen 2005
- 2007 P. Holzer, M. Sambale: *Qualifikation als Passivhausplaner*. Tagungsband der 11. Internationalen Passivhaustagung, Bregenz 2007
- 2007 P. Holzer: *The Climate Engineer - Education for a new Profession*. Proceedings of the 4th International Conference TIA – Teaching in Architecture, Krems 2007, Hrsg. Donau-Universität Krems, 2004, S. 5-6
- 2008 R. Hammer, P. Holzer: *Zuviel Licht? Wohnqualität durch neue Laubengänge*. Veröffentlichung der Beiträge der Wiener Wohnbauforschungstage 2008, Wiener Wohnbauforschung, 2008, Internet vom 22.07.2008: <http://www.wohnbauforschung.at/de/veranstaltung-6.htm>

Buchbeiträge

- 2004 P. Holzer; *Klima-Engineering – Consulting für Innenraumbehaglichkeit*, Beitrag in *Architektur Consulting*, Hrsg. O. Schürer und G. Brandner, Springer, 2004, S. 99 – 104
- 2006 R. Hammer, P. Holzer; *Österreichischer Baukulturreport 2006, Teil 4, Ökologische Nachhaltigkeit*, Hrsg. ARGE Baukulturreport, Wien, 2007

Beiträge in Fachzeitschriften

- 1999 P. Holzer; R.Hammer; *Zwischen Ökoträgheit und schlechtem Gewissen, Warum interessieren sich Architekten eigentlich nicht für Solararchitektur?;* Deutsches Architektenblatt 11/99; S. 1464 – 1465
- 2000 P. Holzer: *Entwicklung zum Niedrigenergiehaus*. Autorisiertes Interview im Fachmagazin TGA – Technische Gebäudeausrüstung, Heft 12, Jahrgang 2000, S. 8-9
- 2002 R. Hammer, P. Holzer: *Besser Wohnen durch ganzheitliche Planung*. Interview in der Fachbeilage der Tageszeitung „Der Standard“ vom 11. Feb. 2002, S. 6
- 2002 P. Holzer, S. Barasits: *Die Immobilie – eine komplexe Dienstleistung für Menschen*. Artikel in der Fachzeitschrift Facility Management 1/2002, S. 63-65
- 2002 P. Holzer: *Thermische Gebäudesimulation der Inselwelt Jois am Neusiedlersee*. Artikel in der Fachzeitschrift Intelligente Architektur, Jän/Feb 2002, S. 54-55
- 2002 G.W. Reinberg, P. Holzer: *Inselwelt Jois*. Artikel in der Fachzeitschrift HLK – Heizung Lüftung Klimatechnik 5/2002, S. 4-10

- 2005 P. Holzer: *Effizienz, Effizienz*. Autorisiertes Interview in der Fachzeitschrift Architektur & Bau Forum März 05, S. 12-13
- 2006 R. Hammer, P. Holzer: *Die gebaute Umgebung, Alternde Gesellschaft und bauliche Entwicklungstendenzen*. Fachbeitrag in upgrade 4.06/07, Magazin für Wissen und Weiterbildung der Donau-Universität Krems

Diplomarbeit

- 1994 P. Holzer, H.Hofbauer. (Betreuer): *Energietechnische Untersuchung eines scheitholzbefeuerten Zentralheizungsherd*. Diplomarbeit an der Technischen Universität Wien am Institut für Verfahrenstechnik, Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswirtschaft
-