

DIPLOMARBEIT

Validierung und Vergleich von Methoden zur Berechnung der Kühllast von Räumen und Gebäuden

Ausgeführt zum Zweck der Erlangung des
akademischen Grades eines Diplomingenieurs

am Institut für
Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften
eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

unter der Leitung von
Ao. Univ.Prof. Dipl.Ing. Dr.techn. Dr.hc Anton Friedl

von
Michael Pokorny
Matrikel Nr. 9626115
Braungasse 12, 1170 Wien

Wien, im Juni 2009

Kurzfassung

Auf thermische Behaglichkeit von Arbeits- und Wohnräumen ist bei der Planung in zunehmendem Maße zu achten, vor allem für die Sommermonate. Dies kann oft nur mit Hilfe von Kühlanlagen erreicht werden. In dieser Arbeit wird durch Validierung, Vergleich und Einsatz verschiedener Berechnungsmethoden zur Ermittlung der Kühllast untersucht, mit welchen Verfahren Kühlanlagen optimal dimensioniert werden können.

In der vorliegenden Arbeit wurden für den österreichischen Raum angebotene Werkzeuge zur Berechnung der sensiblen Kühllast, die im deutschsprachigen Raum veröffentlichten Normen und Richtlinien entsprechen, validiert und verglichen. Dabei wurde ausschließlich auf Luftkühlung eingegangen. Anhand von mehreren, mit analytischen Berechnungsmethoden nachgerechneten Validierungsfällen, konnte das Verfahren der ÖNORM H 6040 verifiziert werden (Abweichungen unter 5%). Der Vergleich zwischen dem Verfahren der ÖNORM H 6040 und den beiden Berechnungsmethoden nach VDI 2078 ergab, dass der Vorteil der VDI-Verfahren in der Einsparung von Eingabewerten und Rechenaufwand liegt, der Vorteil des ÖNORM-Verfahrens in der genaueren und flexibleren Berechnung. Der Vergleich des verifizierten Verfahrens der ÖNORM mit den VDI-Verfahren, Webseitenrechnern und Formblättern zeigte teilweise sehr starke Abweichungen in den Ergebnissen für ein in Österreich gelegenes Gebäude. Die VDI-Verfahren ergaben meist zu geringe Kühllasten (EDV-Verfahren -13% bis -62%, Kurzverfahren +18% bis -80%). Außerdem sind die Differenzen zwischen den Ergebnissen verschiedener Programme, die alle nach den VDI-Verfahren arbeiten, auffällig. Des Weiteren wurde die weit verbreitete Ansicht widerlegt, dass die Ergebnisse einfacher Abschätzungsmethoden immer auf der sicheren Seite lägen. Diese stark vereinfachenden Methoden ergeben oftmals viel zu kleine Kühllasten. Die Schwankungen der Ergebnisse zwischen verschiedenen Verfahren sind dabei außerdem sehr groß (-100% bis +382%).

Zuletzt wurde noch die Eignung von Kühllast-Berechnungsverfahren (hier stellvertretend das Verfahren der ÖNORM H 6040) zur thermischen Optimierung von Gebäuden für die Sommermonate untersucht und im Wesentlichen bestätigt. Mit Hilfe des Simulationsverfahrens konnte die Wirkung verschiedener Maßnahmen beurteilt und die optimale Lösung zur Senkung der maximalen Kühllast gewählt werden.

Abstract

Thermal comfort of working and living rooms has to be taken into account more and more conscientiously at the planning stage, especially for summer months. To achieve thermal comfort often air conditioning systems have to be applied. In this paper research is done by validation, comparison and application of different calculation methods for the cooling load to find procedures which lead to optimally dimensioned air conditioning systems.

In this paper tools for the calculation of the sensible cooling load, offered for Austria and matching with standards and guidelines published in the German speaking area, were validated and compared. In doing so only air cooling was considered. Based on a couple of different validation cases checked by an analytical method of calculation the procedure of ÖNORM H 6040 could be verified (deviations below 5%). A comparison between the procedure of ÖNORM H 6040 and the two methods of calculations by VDI 2078 showed advantages of VDI 2078 in terms of a smaller needed data input and in terms of a lower calculation complexity. A more accurate and flexible calculation is showed as the advantage of ÖNORM procedure. The comparison of the verified procedure of ÖNORM with VDI procedures as well as with website calculators and simple forms used for the calculation partly showed strong deviations in the results for a building located in Austria. The VDI procedures mostly gave too low values of cooling loads (computer process -13% to -62%, abridged process +18% to -80%). Moreover discrepancies between results of different software programs all based on the VDI procedures were noticeable. Besides the common opinion that the results of simple and quick procedures would always be on the save side was disproved. These strongly simplifying procedures often give too low values of cooling loads. The variations of the results of different calculation methods are massive (-100% to +382%).

In a final step the suitability of cooling load calculation procedures (using the procedure given by ÖNORM H 6040 as representative) for the thermal optimization for summer months were explored and essentially confirmed. Using the simulation method the effect of various measures could be evaluated and the optimal solution for a decrease of the maximum cooling load could be chosen.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	2
Abstract	3
1 Aufgabenstellung	8
2 Begriffsbestimmungen und physikalische Grundlagen	10
2.1 Einleitung	10
2.2 Innenlufttemperatur und operative Temperatur	10
2.3 Kühlleistung, Kühllast und Nennkühllast	10
2.4 Luftkühlung, Kühlflächen und Bauteilaktivierung	14
2.5 Speichermassen und Wärmespeicherung	15
2.6 Dynamische und statische Berechnungen	16
2.7 Dynamische Computer-Simulation	16
2.8 Eingeschwungener Zustand	18
3 Stand der Technik	19
3.1 Die österreichische Norm ÖNORM H 6040	20
3.1.1 Einleitung	20
3.1.2 Grundlagen des Rechenverfahrens	21
3.1.3 Software nach ÖNORM H 6040	24
3.1.4 Zusammenfassung und Kommentar	24
3.2 Die deutsche Richtlinie VDI 2078	25
3.2.1 Einleitung	25
3.2.2 Grundlagen des Rechenverfahrens	26
3.2.3 Software nach VDI 2078	30
3.2.4 Zusammenfassung und Kommentar	31
3.3 Die schweizer Norm SN 546 382/2 bzw. SIA V 382/2	33
3.3.1 Einleitung	33
3.3.2 Zusammenfassung und Kommentar	34
3.4 Die europäische Norm EN 15243	35
3.5 Die europäische Norm EN 15255	36
3.5.1 Einleitung	36

3.5.2 Anforderungen an die Berechnungsverfahren	37
3.5.3 Validierung und Einstufung der Berechnungsverfahren	37
3.5.4 Zusammenfassung und Kommentar	38
3.6 Gegenüberstellung der Regelwerke	39
3.7 Weitere Berechnungsverfahren	45
3.7.1 Einleitung.....	45
3.7.2 GEBA.....	45
3.7.3 GEBSIMU	46
3.7.4 Trnsys	47
3.7.5 TAS	48
3.7.6 Kühllast-Abschätzungsmethoden	48
4 Berechnungsgrundlagen für die Validierung.....	49
4.1 Einleitung.....	49
4.2 Statischer Wärmedurchgang durch eine Wand	50
4.3 Statische Wärmezufuhr in einen Raum mit Lüftung	56
4.4 Statischer Wärmedurchgang durch eine Wand mit Einstrahlung.....	58
4.5 Statischer Wärmedurchgang durch ein Fenster ohne Einstrahlung.....	61
4.6 Statischer Wärme- und Strahlungsdurchgang durch ein Fenster	62
4.6.1 Allgemeines.....	62
4.6.2 Teilsystem Fenster	64
4.6.3 Systemgrenze Fenster – Innenraum.....	69
4.6.4 Teilsystem Innenraum – Ableitung für die Rückstrahlung aus dem Raum	71
4.6.5 Zusammenführung der Teilsysteme – Kühllast-Berechnung.....	78
4.6.6 Parameter.....	82
5 Validierung der Rechenverfahren.....	84
5.1 Einleitung.....	84
5.2 Die Validierungsfälle.....	86
5.3 Fall 1 – Wärmedurchgang durch eine Wand.....	87
5.3.1 Analytische Berechnung	87
5.3.2 Berechnungen nach ÖNORM	88
5.3.3 Wiederholung der Berechnung mit angepassten Parametern	89
5.3.4 Vergleich und Diskussion der Ergebnisse	90
5.4 Fall 2 – Wärmedurchgang durch eine Wand, mit Lüftung	91
5.4.1 Analytische Berechnung	91
5.4.2 Berechnungen nach ÖNORM	93

5.4.3 Überprüfung der Parameter.....	94
5.4.4 Wiederholung der Berechnung mit angepassten Parametern.....	94
5.4.5 Vergleich und Diskussion der Ergebnisse	95
5.5 Fall 3 – Wärmedurchgang durch eine Wand, mit Einstrahlung	97
5.5.1 Analytische Berechnung.....	97
5.5.2 Berechnungen nach ÖNORM	99
5.5.3 Vergleich und Diskussion der Ergebnisse	101
5.6 Fall 4 – Wärmedurchgang durch ein Fenster.....	102
5.6.1 Analytische Berechnung.....	102
5.6.2 Berechnungen nach ÖNORM	103
5.6.3 Vergleich und Diskussion der Ergebnisse	104
5.7 Fall 5 – Wärme- und Strahlungsdurchgang durch ein Fenster.....	105
5.7.1 Analytische Berechnung.....	105
5.7.2 Berechnungen nach ÖNORM	107
5.7.3 Vergleich und Diskussion der Ergebnisse	108
5.8 Diskussion der Ergebnisse der Validierung	109
6 Vergleich der Rechenverfahren.....	112
6.1 Einleitung.....	112
6.2 Projekt- und Eingabedaten	113
6.3 Fall 1 – Büroraum in einem größeren Gebäude.....	120
6.3.1 Vorgaben.....	120
6.3.2 Ergebnisse	123
6.4 Fall 2 – Wohnraum in einem größeren Gebäude	125
6.4.1 Vorgaben.....	125
6.4.2 Ergebnisse	128
6.5 Fall 3 – Büroraum in einem Gründerzeithaus.....	130
6.5.1 Vorgaben.....	130
6.5.2 Ergebnisse	133
6.6 Fall 4 – Wohnraum mit Flachdach.....	135
6.6.1 Vorgaben.....	135
6.6.2 Ergebnisse	139
6.7 Sonderfall 1 – Büroraum in größerem Gebäude ohne innere Lasten	141
6.7.1 Vorgaben.....	141
6.7.2 Ergebnisse	144
6.8 Sonderfall 2 – Wohnraum mit Flachdach ohne innere Lasten.....	146

6.8.1 Vorgaben.....	146
6.8.2 Ergebnisse	149
6.9 Diskussion der Ergebnisse der Vergleichsrechnungen	151
7 Thermische Optimierung.....	156
7.1 Einleitung.....	156
7.2 Optimierung 1 - Horizontaler Sonnenschutz	161
7.2.1 Vorgaben.....	161
7.2.2 Ergebnisse	161
7.3 Optimierung 2 – Vertikaler Sonnenschutz	163
7.3.1 Vorgaben.....	163
7.3.2 Ergebnisse	164
7.3.3 Ergebnisse bei modifizierter Sonnenschutzsteuerung	165
7.4 Optimierung 3 – Erhöhter Nachtluftwechsel.....	167
7.4.1 Vorgaben.....	167
7.4.2 Ergebnisse	168
7.5 Analyse der Ergebnisse der Fälle 1 bis 3.....	169
7.6 Optimierung 4 – Sonnenschutz und Nachtluftwechsel.....	171
7.6.1 Vorgaben.....	171
7.6.2 Ergebnisse	172
7.7 Optimierung 5 – Weitere Optimierungen.....	173
7.7.1 Erhöhung der Solltemperatur	173
7.7.2 Senkung der Luftwechselrate am Tag.....	173
7.7.3 Erhöhung der Speichermassen.....	173
7.7.4 Verkleinerung der Fensterfläche.....	177
7.7.5 Verminderung der freigesetzten Maschinenabwärme	178
7.7.6 Verminderung der Transparenz des Sonnenschutzes	178
7.7.7 Erhöhung des Nachtluftwechsels.....	179
7.8 Ergebnisse der Optimierungen.....	180
7.9 Diskussion der Ergebnisse der Optimierungen	186
8 Zusammenfassung und Aussicht	187
9 Symbolverzeichnis.....	190
10 Abbildungsverzeichnis	192
11 Tabellenverzeichnis	194
12 Literaturverzeichnis.....	196

1 Aufgabenstellung

Auf ein angenehmes Raumklima von Arbeits- und Wohnräumen wird immer größerer Wert gelegt. Durch die im Sommer auftretenden Temperaturen und Einstrahlungswerte ist ein gutes thermisches Raumklima meist nur durch besondere bauliche Maßnahmen oder den Einbau von Kühlanlagen erreichbar.

Die Planung und insbesondere die Auslegung von Kühl- und Klimaanlage erfolgt häufig immer noch mittels sehr einfacher Überschlagsrechnungen. Diese Abschätzungsmethoden rechnen meist mit sehr großen Sicherheiten, wodurch die Vermutung nahe liegt, dass es oft zu einer erheblichen Überdimensionierung der Geräte kommt. Die Überschlagsrechnungen könnten durch ungenaue Angaben und simple Berechnungsmethoden aber sogar zu der noch viel problematischeren Unterdimensionierung von Anlagen führen.

Mehr und mehr Auftraggeber erwarten von Haustechnikern die Planung von energetisch optimal dimensionierten und damit wirtschaftlichen und umweltgerechten Lösungen.

Um präzise Aussagen zu erhalten, sind einerseits möglichst genaue Ausgangsparameter erforderlich, andererseits ist ein Rechenverfahren nötig, das die komplexen thermischen Vorgänge gut simuliert. Universelle Gebäudesimulationen beruhen oft auf solchen Rechenverfahren und liefern damit gute Ergebnisse, das aber meist auf Kosten eines hohen Bearbeitungs- und Rechenaufwands. Zusätzlich schrecken viele Planer wegen der hohen Anschaffungskosten vor dem Kauf einer entsprechenden Software zurück.

Aus diesem Grund wurden von verschiedenen Organisationen Regelwerke mit dem Ziel erstellt, Rechenverfahren zur Verfügung zu stellen, die gute Ergebnisse liefern und gleichzeitig einen möglichst geringen und damit für die Praxis zumutbaren Arbeitsaufwand pro Projekt ermöglichen.

In der vorliegenden Arbeit werden im deutschsprachigen Raum veröffentlichte Normen und Richtlinien, für die in der Praxis anwendbare Werkzeuge für den österreichischen Raum angeboten werden, zur Berechnung der sensiblen Kühllast von Räumen und Gebäuden in Österreich validiert und verglichen. Dabei wird ausschließlich auf Kühlung mittels Luftkühlung eingegangen. Zusätzlich werden die Ergebnisse der Berechnungen den Ergebnissen von einfach gehaltenen

Überschlagsrechnungen gegenübergestellt, um die Eignung solcher Abschätzungsmethoden zu überprüfen. Zuletzt wird der Nutzen der verifizierten Berechnungsmethoden für die thermische Optimierung von Gebäuden für die Sommermonate beleuchtet.

Der Verfasser dieser Diplomarbeit beschäftigt sich durch seine Arbeit am Simulationsprogramm „Kühllast H6040“ seit längerem mit Berechnungsmethoden zur Ermittlung der Kühllast. Aus diesem Grund ist für ihn die Validierung und ein objektiver Vergleich der verschiedenen Verfahren für seine Tätigkeit in diesem Bereich ein Anliegen und von großem Interesse.

2 Begriffsbestimmungen und physikalische Grundlagen

2.1 Einleitung

Für jede Berechnungsart der Kühllast gelten die selben physikalischen Rahmenbedingungen. Die auftretenden Wärmeströme und die Wärmespeicherung sind von den Umgebungsbedingungen, dem Gebäude und dessen Nutzung abhängig. Daher können, unabhängig vom Berechnungsverfahren, einige allgemein gültige Begriffe definiert und physikalische Grundlagen festgehalten werden.

2.2 Innenlufttemperatur und operative Temperatur

Bei der Innenlufttemperatur handelt es sich um die Temperatur, die die Luft innerhalb eines Raums durchschnittlich besitzt. Dabei werden Einstrahlungen nicht berücksichtigt.

Bei der operativen oder „fühlbaren“ Temperatur handelt sich im Gegensatz dazu um den arithmetischen Mittelwert der Innenlufttemperatur und dem flächengewichteten Mittelwert der inneren Oberflächentemperaturen aller Bauteile im Raum.

2.3 Kühlleistung, Kühllast und Nennkühllast

Zuerst werden die in der ÖNORM H 6040 und der VDI 2078 angeführten Definitionen dargestellt:

- Kühllast ist definiert als der zeitlich veränderliche Wärmestrom, der aus dem Raum abzuführen ist, „*um eine vorgegebene Raumlufthtemperatur halten zu können*“ [ÖNORM H 6040 (1997), Seite 2] bzw. „*einen vorgegebenen Raumlufthtemperaturgang einzuhalten*“ [VDI 2078 (1996), Seite 9] (wobei auch die ÖNORM eine Regelung nach Temperaturgang vorsieht).
- Unter Kühlleistung wird der tatsächlich aus dem Raum oder dem Gebäude abgeführte Wärmestrom verstanden (z.B. kann bei Begrenzung der Kühlleistung die Kühllast unter Umständen nicht erreicht werden).
- Die Nennkühllast ist laut [ÖNORM H 6040 (1997), Seite 2] und [VDI 2078 (1996), Seite 8] die höchste auftretende Kühllast im Verlauf eines Tages im eingeschwungenen Zustand (siehe Kapitel 2.8).

Bei der Nennkühlleistung eines aus mehreren Räumen bestehenden Gebäudes handelt es sich um das Maximum aus den Summen aller zeitgleichen Raumkühlleistungen. Das ist im Allgemeinen ein niedrigerer Wert als die Summe aller Raum-Nennkühlleistungen, da die Nennkühlleistungen von verschiedenen orientierten Räumen im Normalfall zu unterschiedlichen Zeiten auftreten (z.B. Ost-Raum am Vormittag/Mittag, West-Raum am Nachmittag).

Diese Begriffsdefinitionen aus den oben genannten Regelwerken sind nicht ganz vollständig und angesichts der Entwicklungen und Erkenntnisse der letzten Jahre auf dem Gebiet der Haustechnik nicht mehr ausreichend.

Mittlerweile wird unterschieden zwischen sensibler und latenter Kühlleistung. Die sensible Kühlleistung beinhaltet die benötigte Wärmeabfuhr für die Einhaltung eines vorgegebenen Raumlufttemperaturgangs, allerdings ohne Berücksichtigung von Verdampfungs- und Kondensationseffekten der Luftfeuchte und des damit einhergehenden Energieaufwands oder Energiegewinns. Die latente Kühlleistung beinhaltet nur den Energieaufwand der nötig ist, um eine bestimmte Raumluftfeuchte (oder eventuell einen Raumluftfeuchte-Tagesgang) einzuhalten. Wobei analog zur sensiblen Kühlleistung (die nur die Energie zur Kühlung beinhaltet) die latente Kühlleistung nur die Energie zur Entfeuchtung beinhaltet, nicht aber die Energie einer eventuell vorteilhaften Befeuchtung. Sowohl sensible als auch latente Kühlleistung bezeichnen dabei nur die theoretisch aus dem Raum abzuführende Energiemenge und berücksichtigen nicht die Eigenschaften der Anlagentechnik. Diese ist auch kaum allgemein gültig zu berücksichtigen, da je nach Verfahren und Fabrikat verschiedene Wirkungsgrade auftreten.

Da in der ÖNORM und in der VDI-Richtlinie auf Berechnungen zur Luftfeuchte nicht eingegangen wird (die VDI-Richtlinie weist zwar auf „*latente Wärmen*“ [VDI 2078 (1996), Seite 8] hin, gibt jedoch keine Berechnungsmethoden oder –vorschriften an), beziehen sich die oben angeführten Definitionen nur auf die sensible Kühlleistung. Ebenso wird in dieser Arbeit nur auf die sensible Kühlleistung näher eingegangen, daher ist im Folgenden unter Kühlleistung immer die sensible Kühlleistung zu verstehen.

Eine weitere Präzisierung der Definitionen ist bei der Art der Abfuhr des Wärmestroms notwendig. Die Definitionen der ÖNORM und der VDI-Richtlinie beinhalten nicht bzw. nur indirekt den Hinweis, dass es sich bei der Kühlleistung um die durch eine Kühlanlage durch Kühlung abzuführende Wärmemenge handelt. Durch einfaches Lüften oder eine erhöhte Luftzufuhr zu günstigen Zeiten durch eine Lüftungsanlage wird Wärme abgeführt, ohne dass es sich dabei um eine Wärmeabfuhr im Sinne der oben genannten Definitionen der Kühlleistung handelt!

Außerdem wird nicht darauf eingegangen, dass der geforderte Raumlufitemperaturgang durch den tatsächlichen Temperaturgang auch unterschritten werden kann (wobei in dieser Zeit die Kühlanlage nicht kühlen sollte bzw. darf). Bei einem solchen Unterschreiten des geforderten Raumlufitemperaturgangs ist Zuheizen nur dann sinnvoll, wenn eine unkomfortabel niedrige Temperatur erreicht werden würde. Ansonsten sollte ein Heizen unterlassen werden, um die Kühllast am folgenden Tag nicht unnötig zu erhöhen. In den gängigen Kühllastberechnungen wird deshalb ein möglicherweise notwendiges Heizen (z.B. in der Nacht) nicht berücksichtigt.

Bezüglich der Nennkühllast kann noch etwas präziser angegeben werden, dass es sich um den höchsten Wert der Kühllast innerhalb eines Monats handelt, da die Kühllast bei den meisten Verfahren (auch in der ÖNORM und in der VDI-Richtlinie) für einen definierten Tag im Monat berechnet wird. Daher ergeben die Berechnungen zwölf Tagesverläufe der Kühllast für einen Standort für ein definiertes Jahr. Und somit auch zwölf Nennkühllast-Werte. Oft ist eine Unterscheidung zwischen den zwölf Werten und dem maximalen Wert im Jahr für die Auslegung einer Anlage nicht nötig, kann aber in speziellen Fällen doch sinnvoll sein (z.B. Schulgebäude – die Kühllast in den Ferienmonaten ist für die Auslegung der Anlage unerheblich, solange das Gebäude nicht auch anderweitig genutzt wird).

Für die Auslegung der Anlage ist also die höchste Nennkühllast ausschlaggebend, die in den Nutzungszeitraum des Gebäudes fällt. Für diesen dimensionierenden Wert wird im Folgenden noch (zusätzlich zu den Normen und der gängigen Literatur) die „Auslegungskühllast“ definiert.

Die hier angeführten Überlegungen führen zu den folgenden genaueren Definitionen:

- Kühllast ist der zeitlich veränderliche Wärmestrom, der mittels einer Kühlanlage durch Kühlung aus dem Raum abzuführen ist, um bei definierter Nutzung des Raums und definiertem Raumlufitemperaturgang einen vorgegebenen Raumlufitemperaturgang nicht zu überschreiten.
- Kühlleistung ist der tatsächlich aus dem Raum oder dem Gebäude durch eine Kühlanlage durch Kühlung abgeführte Wärmestrom.
- Die Nennkühllast ist die höchste auftretende Kühllast im Verlauf eines Monats im eingeschwungenen Zustand.
- Die Auslegungskühllast ist die höchste im Nutzungszeitraum des Gebäudes auftretende Nennkühllast.

Bei diesen Definitionen ist die Entwicklung hin zu einer Anlagenregelung nach der sogenannten operativen Temperatur (siehe Kapitel 2.2) noch nicht berücksichtigt. Diese beispielsweise in der ÖNORM EN 15255 [EN 15255 (2007)] angeführte Regelung wurde bis jetzt im deutschsprachigen Raum noch nicht in nationalen Regelwerken für die Kühllastberechnung umgesetzt, eine Anpassung der Definitionen an die operative Temperatur wird aber in Zukunft bald notwendig sein.

In Abweichung zu den Definitionen der Regelwerke wird im Sprachgebrauch unter Kühllast die als Nennkühllast definierte Größe verstanden, also die höchste auftretende Kühllast im Monat bzw. oft sogar im Jahr, da dies der für die Auslegung der meisten Klimaanlage maßgebliche Wert ist. Ist also die Ermittlung der Kühllast gefordert, so wird im Allgemeinen die Auslegungskühllast als Ergebnis erwartet. Das bedeutet, obwohl viele Rechenmethoden einen Kühllast-Tagesgang ermitteln, würde tatsächlich auch ein Wert – die Auslegungskühllast – als Ergebnis ausreichen. Der Tagesgang der Kühllast ist allerdings unter Umständen interessant, um zu sehen, ob die maximale Nennkühllast innerhalb oder außerhalb der Betriebszeiten auftritt, oder um Optimierungen vornehmen zu können.

Im Unterschied zum Kühlenergiebedarf (der im Allgemeinen abhängig von durchschnittlichen meteorologische Daten des Projekt-Standortes berechnet wird, um den durchschnittlichen Energieverbrauch einer Anlage zu ermitteln), ist die Kühllast in Abhängigkeit von jenen meteorologischen Daten zu berechnen, die die für das Innenraumklima ungünstigsten Bedingungen ergeben, d.h. die höchste realistisch auftretende Kühllast liefern.

Laut den Definitionen erfassen Kühlleistung, Kühllast, als auch Kühlenergiebedarf keine Kühlanlagen-spezifischen Einflüsse (z.B. Wirkungsgrad der Kühlanlage) und sind daher Raum- bzw. Gebäudeeigenschaften (in Abhängigkeit des vorgegebenen Raumluft-Solltemperaturgangs, der Raumnutzung bzw. den Lasten im Raum und den Umgebungsbedingungen). Diese Kühlleistung darf daher nicht mit der Anschlussleistung der Kühlanlagen verwechselt werden. Der tatsächliche Energiebedarf bzw. die von der Kühlanlage maximal aufgenommene (im Allgemeinen elektrische) Leistung kann nicht ohne genaue Kenntnis der Kühlanlage ermittelt werden. Zusätzlich ist noch die erwähnte latente Kühllast bei der Auslegung der Anlage zu berücksichtigen.

2.4 Luftkühlung, Kühlflächen und Bauteilaktivierung

Es wird unterschieden zwischen verschiedenen Arten der Kühlung, also dem Abtransport von Wärme durch Kühlanlagen.

Luftkühlung ist die am weitesten verbreitete Kühlungsart. Dabei wird eine meistens von der Umgebung (Frischluft) oder vom Raum (Umluft) entnommene Luft mittels Wärmeaustauscher auf eine Temperatur unter die gewünschte Raumtemperatur gekühlt und in den Raum geleitet. Durch diese Zufuhr von gekühlter Luft und der darauffolgenden Mischung mit der Raumluft soll die gewünschte Raumtemperatur erreicht werden.

Kühlflächen sind für gewöhnlich Metallflächenelemente, die an der Oberfläche eines Bauteils mit oder ohne Abstand montiert werden. Sie werden von einem Kühlmittel durchspült, erhalten dadurch eine Temperatur unter dem Niveau der Raumlufttemperatur und entziehen durch Konvektion, Wärmeleitung und Absorption von Strahlung dem Raum Wärme. Da bei dieser Art der Kühlung die Kühlleistung aufgrund der Trägheit des Systems schwer regelbar ist und immer wieder systembedingt die benötigte Kühlleistung nicht aufgebracht werden kann (die Oberflächentemperatur der Kühlelemente darf nicht zu niedrig sein, da sonst Kondensation auftritt), werden Kühlflächen des Öfteren mit Luftkühlung kombiniert. Außerdem werden – unter anderem um die Baukosten zu senken – öfters bereits vorhandene (oder bereits eingepflanzte) Bodenheizungselemente auch für die Kühlung verwendet. Da dies aber zu kalten Füßen oder sogar zu einem nassen Fußboden (Kondensation) führen kann, ist diese Art der „Bodenkühlung“ nicht unproblematisch und eine Erhöhung des Komforts gegenüber einer (reinen) Luftkühlung ist fraglich.

Bauteilaktivierungen bezeichnen Bauteile, in die Kühlschlangen oder andere Kühlelemente eingebaut sind. Dadurch ist es möglich, Bauteile (z.B. Wände) definiert zu temperieren. Allerdings ist eine solche Kühlung sehr träge, weshalb die Raumlufttemperatur allein mit dieser Kühlmethode kaum regelbar ist.

Grundsätzlich gilt, dass Kühlflächen und Bauteilaktivierungen im Allgemeinen mehr Wärme abtransportieren müssen als Luftkühlungen. Das ist damit begründet, dass diese Kühlmethoden die an die Kühlflächen angrenzenden Bauteile (durch den Kontakt zwischen Bauteil und Kühlflächen) stärker abkühlt als eine Luftkühlung und daher auch den angrenzenden Räumen (bei Innenbauteilen) bzw. der Umgebung (bei Außenbauteilen) auf der anderen Seite der Bauteile mehr Wärme entzieht.

2.5 Speichermassen und Wärmespeicherung

Unter Speichermasse wird im Prinzip jedes Material im Raum bzw. im Gebäude verstanden. Dabei bezieht man sich auf die Fähigkeit jedes Materials, in stoffabhängigem Ausmaß Wärme aufzunehmen und zu speichern.

Diese Fähigkeit hängt ab von

- der Oberflächenbeschaffenheit
(ausschlaggebend für die Aufnahme und Abgabe von Strahlung und konvektiver Wärme),
- der Wärmeleitfähigkeit
(je besser das Material leitet, desto besser kann sich die Wärme von der Oberfläche in das Innere z.B. eines Bauteils ausbreiten) und
- der Dichte und der spezifischen Wärmekapazität
(je dichter und je höher die spezifische Wärmekapazität, desto mehr Wärme kann ein m³ eines Materials aufnehmen).

Durch mehr Speichermassen wird mehr Wärme gespeichert, wodurch im Allgemeinen der Temperaturverlauf eines Raums gedämpft und die Nennkühllast gesenkt wird. Die Zeitspanne, in der gekühlt werden muss, kann aber wesentlich verlängert werden.

Wärmespeicherung führt zu oft nicht leicht erkennbaren Fehleinschätzungen. Beispielsweise können „bessere“ Fenster, d.h. Fenster mit einem geringeren U-Wert, die Abkühlung des Raums in der Nacht verringern, wodurch sich die Kühllast des Raums erhöht. Die übliche Ansicht, dass eine bessere Wärmedämmung in jedem Fall zu einem geringeren Energieverbrauch führt, trifft in einigen Fällen nicht zu. Denn mehr Wärmedämmung verringert zwar den Heizenergieverbrauch, kann aber den Kühlenergieverbrauch erhöhen. Im angeführten Beispiel ist die Lösung allerdings oft einfach: Ein erhöhter Luftwechsel in der Nacht kann die geringere Abkühlung durch die Fenster oft kompensieren – vorausgesetzt natürlich, dass in der Nacht die Außenlufttemperatur die Soll-Temperatur unterschreitet.

Die äußeren und inneren Einflüsse (Sonneneinstrahlung, Außenlufttemperatur, innere Lasten, etc.) ändern sich im Allgemeinen im Laufe des Tages beträchtlich. Ebenso hat die mit der Zeit sich ändernde gespeicherte Wärmemenge (und somit die Speichermassen von Gebäuden) einen ganz wesentlichen Einfluss auf die thermischen Vorgänge, also auch auf den Temperaturverlauf bzw.

die Nennkühllast. Aus diesem Grund ist die Berücksichtigung der Wärmespeicherfähigkeit der Bauteile besonders wichtig um genaue Ergebnisse erhalten zu können. Die Speichermasse der sich im Raum befindenden Luft ist gering im Vergleich zu den Speichermassen der Raumumschließungsbauteile, weshalb die Speichermasse der Luft bei vielen Berechnungsverfahren als vernachlässigbar angesehen wird.

2.6 Dynamische und statische Berechnungen

Statische, oder auch stationär genannte Berechnungen ermitteln mit über die Zeit konstanten Parametern ein konstantes Ergebnis. Das ist dann ausreichend, wenn die Parameter keinen zeitlichen Veränderungen unterworfen sind oder die Parameter über sehr lange Zeit konstant bleiben. Wird mit einem stationär rechnenden Verfahren ein instationärer Vorgang nachgerechnet, so erhält man nur einen Wert als Ergebnis, der im besten Fall dem Mittelwert oder dem maximalen Wert des Ergebnisses einer instationären Berechnung entspricht. Allerdings ist das bei komplexeren Aufgaben kaum zu erreichen, wodurch das Ergebnis einer stationären Berechnung nur eine grobe Näherung darstellt oder sogar gänzlich falsch ist.

Dynamische, oder auch instationär genannte Berechnungen hingegen rechnen mit zeitlich veränderlichen Parametern. Dadurch können beispielsweise Tagesverläufe von Temperaturen, Einstrahlungen, Lasten und Sollwert-Vorgaben berücksichtigt werden.

2.7 Dynamische Computer-Simulation

Ganz allgemein berechnet eine dynamische Computer-Simulation die zeitlich veränderlichen Zustände eines Systems (z.B. die Temperaturen in einem Gebäude). Die dazu erforderliche mathematische Modellierung muss das System (Gebäude) und dessen Reaktionen auf zeitlich sich ändernde äußere und innere Einflüsse möglichst genau beschreiben. Eine Computer-Simulation „simuliert“ somit im Idealfall das Verhalten des Systems (des Gebäudes) auf dem Computer so, wie sich das reale System unter den gegebenen Umständen tatsächlich verhalten würde.

Eine dynamische Simulation berücksichtigt im Allgemeinen wesentlich mehr Eigenschaften und Vorgänge, als dies ein mit Mittelwerten „stationär“ rechnendes Näherungsverfahren tut. Die folgenden Abbildungen zeigen beispielhaft den Temperaturverlauf durch eine einfach aufgebaute Wand, bestehend aus einer einzigen homogenen Schicht. Bei dem statischen Verfahren (linke

Abbildung) kann nur eine Außentemperatur ($\vartheta_{E,max}$) vorgegeben werden, das dynamische Verfahren (rechte Abbildung) zeigt die Abhängigkeit von Außentemperaturschwankungen:

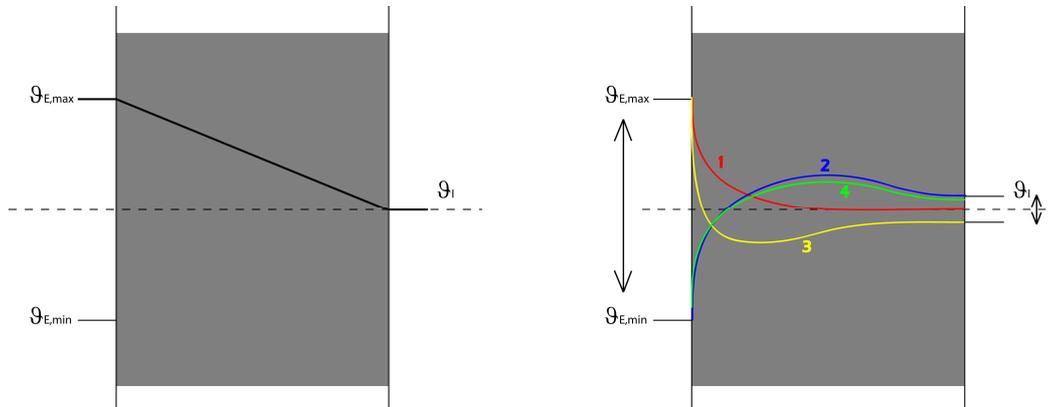


Abb. 2.1: Temperaturverlauf in einer Wand, statisch und dynamisch ermittelt

Der wesentliche Vorteil einer dynamischen Simulationsrechnung zur Ermittlung der Kühllast ist, dass eine Prognose für ein geplantes Gebäude zeitabhängig und damit abhängig von Tagesgängen der inneren Wärmequellen und der Umgebungsbedingungen (Außenlufttemperaturen, Sonneneinstrahlung etc.) möglich ist. Außerdem können auch die zu erwartenden Raumluft-Temperaturverläufe für den Fall, dass nicht oder nur an einem Teil des Tages gekühlt wird, ausgegeben werden.

Der zweite Vorteil einer dynamischen Simulation gegenüber einem (statischen) Näherungsverfahren ist die wesentlich größere Genauigkeit der Ergebnisse. Das setzt selbstverständlich voraus, dass die dynamische Simulation alle ausschlaggebenden Parameter in entsprechender Genauigkeit berücksichtigt.

Ein Rechenverfahren sollte möglichst klar zeigen, welche Änderungen am Gebäude (Wärmedämmung, Speichermassen, Sonnenschutzeinrichtungen, inneren Lasten, Lüftung etc.) zu welchen Änderungen des thermischen Verhaltens und dessen zeitlichem Verlauf führen. Vor allem Wärmespeichervorgänge beeinflussen unter zeitlich veränderlichen Einflüssen das thermische Verhalten des Gebäudes und damit die Kühllast stark. Die Wirkung wird aber nur bei einer dynamischen Betrachtung sichtbar. Stationäre Näherungsverfahren (konstant gehaltene Parameter) lassen nicht ausreichend erkennen, welche Eigenschaften des Gebäudes dessen thermisches Verhalten beeinflussen.

2.8 Eingeschwungener Zustand

Viele dynamische Berechnungsverfahren gehen vom sogenannten „eingeschwungenen Zustand“ aus. Es wird dazu eine sich wiederholende 24-stündige Periode (1 Tag) festgelegt, die immer wieder mit genau den gleichen zeitlich definierten Umgebungsbedingungen und Lasten durchlaufen wird. Sobald alle Ergebnisse (z.B. Raumlufttemperatur, Kühllast) zu jedem beliebigen Zeitpunkt der Periode die exakt gleichen Werte wie zum gleichen Zeitpunkt der vorhergehenden Periode annehmen, ist der eingeschwungene Zustand erreicht. Dieser ist nicht zu verwechseln mit einem statischen Zustand, da z.B. die Außenlufttemperatur einen gleichbleibenden Tagesverlauf besitzt und nicht wie bei einem statischen Zustand einen festen, gleichbleibenden Wert.

Das Erreichen der exakt gleichen Werte würde theoretisch unendlich viele Perioden-Rechenwiederholungen benötigen. Daher werden Toleranzen festgelegt, die bestimmen, ab wann von einem eingeschwungenen Zustand gesprochen werden darf (z.B. ÖNORM H 6040: Raumlufttemperatur-Abweichung $\leq 0.01^\circ\text{C}$ und Raumkühllast-Abweichung $\leq 0.1\%$ [ÖNORM H 6040 (1997), Seite 57]).

3 Stand der Technik

Im deutschsprachigen Raum wurden schon in den 1970ern erste Kühllast-Regelwerke veröffentlicht. Diese setzten vorerst überwiegend händische Berechnungsmethoden ein. Die Überarbeitungen bzw. Neuveröffentlichungen der 1990er setzten in wesentlich größerem Umfang auf computerunterstützte Rechenverfahren, wobei sich unterschiedliche Herangehensweisen an die Aufgabenstellung herausgebildet haben. Beispielsweise wird in der VDI 2078 versucht, mit vielen vordefinierten Standardwerten (z.B. Einstrahlungswerte in den Raum hinter dem Fenster) in Verbindung mit kurzen Rechnungen und Korrekturfaktoren, eine Näherung zu ermöglichen. In der ÖNORM H 6040 wird hingegen ein dynamisches Simulationsverfahren eingesetzt, das weitgehend ohne solche Standardwerte und vollkommen ohne Korrekturfaktoren auskommt und dadurch genauere Ergebnisse liefern kann. Infolgedessen ist allerdings der Rechenaufwand und teilweise auch der Eingabeaufwand etwas größer.

Im Folgenden wird ein Überblick über die im deutschsprachigen Raum erhältlichen Verfahren für die Ermittlung der Raumkühllast gegeben. Es wurde versucht einen möglichst umfassenden Abriss des Angebots zu geben, allerdings im Bewusstsein, dass eine vollständige Darstellung durch die Vielzahl an angebotenen Methoden kaum möglich ist. Vor allem Lösungen, die auf einfachen, abschätzenden Verfahren beruhen sind viele – teilweise auch kostenlose - im Internet zu finden.

3.1 Die österreichische Norm ÖNORM H 6040

3.1.1 Einleitung

Die „ÖNORM H 6040 – Lüftungstechnische Anlagen – Kühllastberechnung“ schreibt zur Berechnung von Raumtemperaturen und Kühlleistungen bzw. Kühllasten ein dynamisches Simulationsverfahren vor. In der Literatur (z.B. [Feist 1994]) werden einige Verfahren für thermische Gebäudesimulationen genannt. Für die ÖNORM H 6040 wurde ein dynamisches Simulationsverfahren vom zuständigen Normungsausschuss des Österreichischen Normungsinstituts gewählt, das für seine allgemeine Eignung für verschiedenste Gebäude und seiner theoretischen Genauigkeit bekannt war.

Die ÖNORM H 6040 (Ausgabe 1997) beinhaltet als Rechenvorschrift den Sourcecode des Rechenteils eines Fortran-Programms. Dieser ist in Programmen nach ÖNORM einzusetzen.

Das Verfahren ist weltweit anwendbar, benötigt dafür allerdings meteorologische Daten des Projektstandortes. Wenn diese nicht verfügbar sind, kann auch im Bereich zwischen den Polarkreisen mit halbsynthetischen Daten gerechnet werden.

Die Genauigkeit und Zuverlässigkeit des Simulationsverfahrens wurde im Rahmen einer Forschungsarbeit für das Bundesministerium für Wissenschaft und Forschung bestätigt [Deubner 1992]. Dabei wurden über einen Zeitraum von ca. 15 Monaten die Stundenwerte der Innentemperaturen von Wohnhäusern berechnet und mit den über diesen Zeitraum gemessenen Innentemperaturen verglichen. Die meteorologischen Daten wurden ebenfalls über den ganzen Beobachtungszeitraum gemessen um der Simulation eine entsprechend genaue Basis geben zu können. Bei dem Vergleich von Berechnung zu Messung zeigte sich laut Pokorny [Pokorny 2009] eine Abweichung von weniger als 0,5 K (nur selten wurden Abweichungen bis 2 K gemessen – vermutlich eine Folge der ungenauen Erfassung der Stellung von geöffneten Fenstern durch die Sensoren). Da diese Abweichung kleiner als die mögliche Messgenauigkeit war, war damit die Genauigkeit des Verfahrens bestätigt.

3.1.2 Grundlagen des Rechenverfahrens

Grundsätzlich wird jeder gewünschte Monat getrennt von den anderen berechnet. Dafür werden meteorologische Daten von einem maßgeblichen Tag (dem sogenannten „dimensionierenden Tag“) herangezogen. Dabei handelt es sich um den „*Außenlufttemperaturverlauf eines mittleren Tages mit dem monatlichen Maximum*“ und um Strahlungswerte „*des mittleren Tagesganges der Strahlung mit dem größten Tagesmaximum, wobei die zugehörigen Sonnenstände (Sonnenazimut und Sonnenhöhe) für den 21. des betreffenden Monats herangezogen werden.*“ [ÖNORM H 6040 (1997), Seite 3].

Da die Außenlufttemperatur und die Sonneneinstrahlung erheblichen Einfluss auf das thermische Verhalten eines Gebäudes haben, werden für die Berechnungen möglichst genaue meteorologische Daten eingesetzt. Für den Projektstandort werden Außenlufttemperatur, Globalstrahlung, diffuse Himmelsstrahlung, Sonnenazimut und Sonnenhöhenwinkel jeweils in Stundenschritten angegeben (jeweils 24 Werte pro Monat). In der Norm sind lediglich die Werte von Wien und Salzburg aufgelistet, da zum Zeitpunkt des Entstehens der Norm noch keine weiteren Daten zur Verfügung standen. Um trotzdem auch an anderen Standorten (weltweit) möglichst genau rechnen zu können, wurde zusätzlich ein halb-synthetisches Verfahren zur Ermittlung der benötigten Daten für jene Orte, für die keine Messwerte verfügbar sind, eingebaut. Dieses Verfahren ermittelt die Sonneneinstrahlung gemäß dem Verfahren nach Heindl.

Mit diesen Daten werden alle benötigten Werte stundenweise ermittelt (24 Stundenwerte pro Monat). Dabei werden die Berechnungen mit den meteorologischen Daten dieses einen Tages des Monats so lange wiederholt, bis sich ein eingeschwungener Zustand eingestellt hat. Dieser ist so definiert, dass zu keiner Tagesstunde zwischen zwei aufeinander folgenden Tages-Berechnungen die Temperaturdifferenz größer als 0,01K und die Differenz der Raumkühllast größer als 0,1% sein darf. Sollte der eingeschwungene Zustand nach 365 Tagen noch immer nicht erreicht sein, so wird die Berechnung abgebrochen und die beim letzten Tagesdurchlauf berechneten Raumlufttemperaturen werden als Ergebnisse in der Ausgabedatei gespeichert. Es ist bekannt, dass dadurch bei Gebäuden mit außergewöhnlich großen Speichermassen unter Umständen kein eingeschwungener Zustand erreicht wird. Allerdings wird bei den meisten Gebäuden der eingeschwungene Zustand schon nach 2 bis 4 Tagen erreicht.

Das Rechenverfahren unterteilt jeden Bauteil in dünne Teilschichten. Jede Teilschicht ist in sich homogen anzunehmen, besteht also aus einem einzigen Baustoff und örtlich unabhängig konstanten physikalischen Parametern. Eine Teilschicht kann also maximal eine Baustoffschicht beinhalten. Im Allgemeinen sind diese Teilschichten 2 mm dick, durch besonders dünne Baustoffschichten (z.B. Folien) können sich jedoch auch dünnere Teilschichten ergeben. Die Teilschichten jedes Bauteils hängen in Serie zusammen.

Die an einen Innenraum grenzenden Teilschichten aller Bauteile dieses Raums hängen in einem gemeinsamen Knoten zusammen, der diesen Innenraum darstellt und in dem alle Wärmeströme (Wärmetransport durch langwellige Strahlung und Konvektion, abgegeben und aufgenommen von den Bauteilen) zusammengeführt werden. Für jeden Raum eines Gebäudes wird also ein eigener Knoten gebildet. Im Unterschied dazu hängen alle ans Freie grenzenden Teilschichten aller Bauteile des gesamten Gebäudes in einem gemeinsamen Knoten, der die Umgebung darstellt, zusammen. Über weitere Knoten innerhalb lichtdurchlässiger oder an Oberflächen grenzenden Teilschichten wird durch Strahlungsabsorption bzw. -emission Wärme zu- bzw. abgeführt.

Wärmeleitung und Wärmespeicherung in jeder Teilschicht werden durch Gleichungen für instationäre Wärmeleitung beschrieben. Der Wärmefluss wird also als instationäre, eindimensionale Wärmeströmung durch verschiedene, in sich homogene Schichten angesehen. Die Temperatur ϑ ist eine Funktion der Zeit t und des Abstandes x von der Bauteiloberfläche:

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} \quad a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \quad (3.1-1)$$

λ Wärmeleitfähigkeit

c spezifische Wärmekapazität

ρ Dichte

a Temperaturleitfähigkeit

Durch die von Beuken beobachtete Analogie der Gleichungen für Wärmeleitung und elektrische Leitung (d.h. wegen formaler Gleichheit der Wärmeleitungsgleichung und der Gleichung für den idealen, induktivitätsfreien elektrischen Leiter) kann das System durch ein elektrisches Ersatzschaltmodell (dem Modell von Beuken) dargestellt werden, bei dem elektrische Widerstände für die Übergangs- und Wärmeleitwiderstände, und Kondensatoren in der Mitte der Teilschichten für Wärmespeicherung stehen:

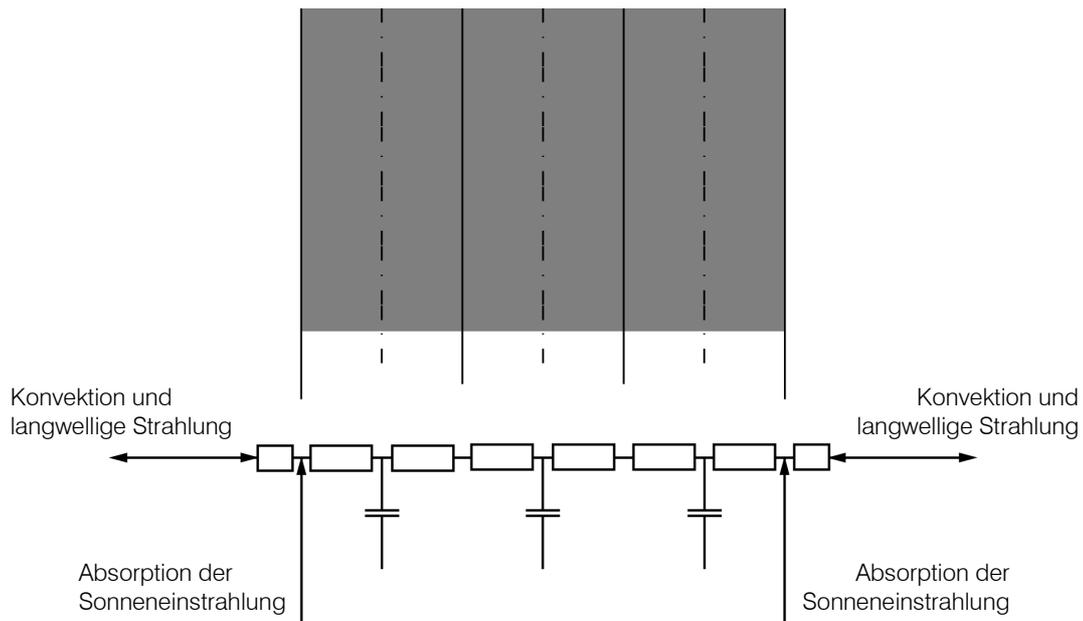


Abb. 3.1: Elektrisches Ersatzschaltmodell

Die Summe der Wärmeströme und die Temperaturen in jedem Knoten werden durch weitere Gleichungen pro Knoten (Kirchhoff'sche Sätze) beschrieben. Es werden also die für den Raum geltenden Gleichungen durch die gemeinsame Randbedingung Raumlufttemperatur – d.h. durch den schon angeführten gemeinsamen Knoten – „zusammengehängt“.

Alle Bauteilschichten eines Gebäudes bilden somit ein umfangreiches Netz aus wärmeleitenden und wärmespeichernden Elementen und Knoten, die durch die genannten Gleichungen beschrieben werden. Daraus ergibt sich ein entsprechend umfangreiches System von Gleichungen.

Um alle Änderungen der Temperaturen und der momentan gespeicherten Wärmemengen für jede Bauteilschicht, jede Bauteiloberfläche und jeden Raum, sowie die Kühllast genau bestimmen zu können, muss dieses Gleichungssystem in kleinen Zeitschritten gelöst werden. Die Norm gibt dafür eine Zeitschrittlänge von einer Stunde vor.

3.1.3 Software nach ÖNORM H 6040

Software-Produkte nach ÖNORM H 6040 werden nur von einem Hersteller angeboten [Website Pokorny 2009]. Das Programm „Kühllast H6040“ wurde Anfang der 1990er-Jahre im Auftrag des Österreichischen Normungsinstituts entwickelt und als Teil der ÖNORM vertrieben (damals unter dem Namen „H6040“). Eine weiterentwickelte Version des Programms wird derzeit in Kooperation mit dem Österreichischen Normungsinstitut angeboten (siehe [Website Pokorny 2009] und [Website ON 2009]).

3.1.4 Zusammenfassung und Kommentar

Die ÖNORM H 6040 beinhaltet ein komplexes dynamisches Berechnungsverfahren, das in der Software „Kühllast H6040“ umgesetzt wurde.

Die „exakte“ Definition der Rechenvorschriften anhand des abgedruckten Sourcecodes sollte es ermöglichen, dass alle Programme, die sich genau an den angegebenen Rechen-Quellcode halten, genau die gleichen Ergebnisse liefern. Nachteil der Angabe des Sourcecodes ist (nur einige Grundlagen sind in der Norm näher ausgeführt und beschrieben), dass das Rechenverfahren der Norm kaum ohne genaues Studium des Quellcodes nachvollzogen werden kann.

Die Genauigkeit des Verfahrens hinsichtlich der Temperaturberechnung ist mit dem Forschungsauftrag [Deubner 1992] ausreichend bestätigt worden. Ein Ziel dieser Arbeit ist, die Genauigkeit der Berechnung der Kühllast zu überprüfen.

Da es sich bei der Software „Kühllast H6040“ um das offizielle Programm des Österreichischen Normungsinstituts handelt, wird in dieser Arbeit für die praktischen Kapitel (Validierung und Vergleich) davon ausgegangen, dass diese Software mit der Norm gleichgesetzt werden kann, dass also eine Validierung der Software einer Validierung der Norm entspricht.

3.2 Die deutsche Richtlinie VDI 2078

3.2.1 Einleitung

Die Richtlinie „VDI 2078 – Berechnung der Kühllast klimatisierter Räume“ wurde vom Verein Deutscher Ingenieure erarbeitet und veröffentlicht. Die aktuell gültige Fassung stammt aus dem Jahr 1996, wobei diese inhaltlich gleich der Ausgabe von 1994 ist. Ausgabe 1996 wurde nur um eine englischsprachige Übersetzung erweitert.

Das Verfahren ist für Deutschland konzipiert worden, wobei auch eine Nutzung außerhalb Deutschlands angedacht ist. Aus diesem Grund wurde die englische Übersetzung hinzugefügt. Die Richtlinie enthält meteorologische Daten für Deutschland (Klimazonenkarte) und ist grundsätzlich – die klimatologischen Gegebenheiten betreffend – auf mitteleuropäische Verhältnisse zugeschnitten (Sonneneinstrahlung bei 50° geographische Breite, wahre Ortszeit und mittlere hier auftretende atmosphärische Trübungen).

Die Richtlinie enthält zwei Berechnungsverfahren, ein „Kurzverfahren“ und ein „EDV-Verfahren“. Im Vorfeld der Richtlinienerstellung wurden Temperaturgänge und Kühllastgänge von sogenannten „Typräumen“ (d.h. genau definierte, einfach gestaltete Büro-Standardräume) mit Hilfe von nicht näher beschriebenen dynamischen Simulationen ermittelt und daraus einige Korrekturfaktoren abgeleitet. Beide Verfahren der Richtlinie versuchen über Näherungsrechnungen mittels dieser Korrekturfaktoren zu einem guten Ergebnis zu kommen.

Das Kurzverfahren ist für einfache Fälle zur händischen Berechnung konzipiert (konstante Raumlufttemperatur, periodische innere und äußere Belastungen, eingeschwungener Zustand, 24-stündiger Anlagenbetrieb, konstanter Sonnenschutz der Fenster), das EDV-Verfahren ist aufwändiger und daher nur mit Hilfe eines Computers zu bewältigen. Beide Verfahren sollen bei gleichen Randbedingungen zu praktisch gleichen Ergebnissen führen, wobei das EDV-Verfahren flexibler bei den Randbedingungen (z.B. variabler Sonnenschutz, variable Raumtemperatur) ist.

Das EDV-Verfahren ermöglicht außerdem ebenso wie die ÖNORM H 6040 die Bestimmung der Raumlufttemperaturen bei begrenzter Kühlleistung der Anlage oder bei abgeschalteter Anlage.

Die VDI 2078 liefert als Grundinformation die sogenannte Bezugskühllast (Basiskühllast). Diese wird bei einer ersten Auslegungsrechnung bei einer konstanten Raumtemperatur von 22°C und einer durchgehend (24h) laufenden Kühlanlage ermittelt. Diese dient als raumabhängiger Vergleichswert. Unabhängig davon, welche Raumlufttemperatur oder welche Betriebsart der Kühlanlage gewünscht ist, können anhand dieses Wertes die Ergebnisse verschiedenster Räume verglichen werden. Das Verfahren kann aber auch für veränderliche Raumlufttemperaturen angewendet werden.

3.2.2 Grundlagen des Rechenverfahrens

3.2.2.1 Allgemeines

Die VDI unterscheidet zwischen drei verschiedenartigen Wärmeströmen:

- konvektiv an die Raumluft abgegebene Wärme als Folge gebäudeinnerer Raumbelastungen. Das führt zur „Inneren Kühllast“, die sich zusammensetzt aus den Wärmeabgaben von Personen, Beleuchtung, Maschinen, Wärmeaufnahme oder –abgabe beim Stoffdurchsatz durch den Raum (z.B. Kühlwasser bei Maschinen), sonstige Wärmez- oder –abfuhr (z.B. chemische Reaktionen) und Wärmeabgaben von Innenwänden.
- konvektiv an die Raumluft abgegebene Wärme als Folge äußerer Raumbelastungen. Das führt zur „Äußeren Kühllast“. Die äußere Kühllast umfasst die Energie, die über die Gebäudehülle von außen durch Wärmeleitung und Strahlung mehr eintritt als austritt, wobei unterschieden wird zwischen nichttransparenten und strahlungstransparenten Flächen. Der Luftwechsel durch Fugenlüftung am Gebäude wird ebenfalls berücksichtigt.
- konvektive Raumbelastung durch die Kühlanlage, also die durch die Kühlanlage abgeführte Wärme. Sollte dieser Wert rechnerisch negativ werden (Heizlast), so wird keine Wärme zugeführt, sondern der Wert wird auf Null gesetzt.

Die Kühllast ergibt sich aus der Summe der inneren und der äußeren Kühllasten. Die VDI 2078 fordert die „Mitführung“ der latenten Wärme als gesondertes Bilanzglied, da diese unter Umständen, vor allem wenn bestimmte relative Feuchten eingehalten werden sollen, die Kühlleistung der Geräte mitbestimmen. Es wird allerdings nicht näher ausgeführt, wie diese Mitführung bzw. die Berechnungen zu erfolgen haben.

Wärmespeichervorgänge werden bei VDI 2078 durch verschiedene Faktoren berücksichtigt. Bei

beiden VDI-Verfahren werden dabei die Lasten mittels Faktoren mehr oder weniger gedämpft bzw. verzögert, wodurch die Wärmeabgabe etwas auf den Tag verteilt wird:

- Kühllastfaktoren für das Kurzverfahren:

Für innere Lasten (Personen, Beleuchtung und Maschinen) und für Sonneneinstrahlung durch Fenster sind – in Abhängigkeit von den Lastzeiten – Tagesgänge für Kühllastfaktoren in Tabellen angegeben. Diese Faktoren-Tagesgänge werden mit den Leistungen der Lasten multipliziert, um für jede Stunde die im Raum momentan an die Raumluft abgegebene Leistung (=Kühllastanteil) zu ermitteln:

$$\text{Kühllastanteil} = \text{Maximalleistung} \times \text{Kühllastfaktor}$$

Das Kurzverfahren kann dabei nur eine Laststärke pro Last (Maximum der Wärmeabgabe durch z.B. Personen) berücksichtigen. In den Kühllastfaktoren für die Einstrahlung durch Fenster ist der Tagesgang der Sonnenstrahlung bereits eingerechnet (der Kühllastfaktor-Tagesgang wird mit dem monatlichen Maximum der Gesamteinstrahlung durch das Fenster multipliziert). Das Kurzverfahren ist auf eine Raumlufttemperatur (22°C, konst.) beschränkt.

- Gewichtsfaktoren für das EDV-Verfahren:

Für das EDV-Verfahren wurde mit Hilfe der regelungstechnischen Funktion Sprungantwort die Reaktion von einigen Bauteilen ermittelt. Dadurch konnten die sogenannten Gewichtsfaktoren berechnet werden, mit denen der Einfluss der thermischen Trägheit auf die Kühllast besser dargestellt werden kann, als mit Kühllastfaktoren. Über die Gewichtsfaktoren wird die zeitabhängig im Raum auftretende Last berechnet.

Strahlung und Außenlufttemperatur wirken überlagert auf die Außenbauteile und führen entsprechend dem Bauteilaufbau verzögert und gedämpft zu einer Beeinflussung des Innenraums. Diese Verzögerung wird im Kurzverfahren und im EDV-Verfahren durch zwei verschiedene Ansätze berücksichtigt:

- Kurzverfahren:

Für das Kurzverfahren sind „Äquivalente Temperaturdifferenzen“ (für „Standardbelastungen“ durch Einstrahlung und Außenlufttemperatur) als Tagesgänge in Abhängigkeit der Bauartklasse des Bauteils und der Bauteilorientierung angegeben. Dazu wurden sechs Bauartklassen in Abhängigkeit vom Aufbau des Bauteils definiert. Die auf den Raum wirkende Last (=Kühllastanteil) durch einen Außenbauteil wird für jede Stunde folgendermaßen berechnet:

$$\text{Kühllastanteil} = \text{U-Wert} \times \text{Fläche} \times \text{äquivalente Temperaturdifferenz}$$

- EDV-Verfahren:

Bei EDV-Verfahren wird wieder, so wie bei den inneren Lasten und der Sonneneinstrahlung durch Fenster, über die Gewichtsfaktoren der Kühllastanteil berechnet.

3.2.2.2 Innere Belastungen

Für Personen, Beleuchtung (mit Gleichzeitigkeitsfaktor), Maschinen und Stoffdurchsatz werden Vorgaben gemacht, auch hinsichtlich der Aufteilung in konvektiven Anteil und Strahlungsanteil der Wärmeabgabe. Die Temperaturen von unklimatisierten Nachbarräumen werden als konstant angenommen, wobei die VDI die einzusetzenden Werte vorgibt.

3.2.2.3 Äußere Belastungen und außenklimatische Daten

Strahlung, Transmission und Infiltration (Fugenlüftung) werden berücksichtigt. Ihre Auswirkungen werden für Fenster getrennt, für Wände in kombinierter Form berechnet. Da an den Auslegungstagen, also heißen Sommertagen, die Windkräfte auf Gebäude gering sind, wird davon ausgegangen, dass die Infiltration vernachlässigbar ist.

Für die kritischen Auslegungstage (teilweise begrenzt auf die „Auslegungsmonate“ Juli und September) werden Tagesgänge der Außenlufttemperaturen, der Sonnen- und Himmelsstrahlung und der Strahlungsreflexion der Umgebung benötigt:

- Außenlufttemperaturen

Für die Auslegungstage stehen 4 Klimazonen-Daten zur Verfügung, wobei einige Besonderheiten für Höhenlagen angegeben werden.

„Grundlage der Maximal-Auslegungstemperatur und der zugehörigen Tagesgänge im Sommer sind die mittleren Extremtemperaturen und die mittleren Temperaturamplituden der 40 wärmsten Tage in 20 Jahren (1953 bis 1972) an ausgewählten repräsentativen Stationen. Für die anderen Monate werden umgerechnete Daten unter Zuhilfenahme von DIN 4710 gebildet.“ [VDI 2078 (1996), Seite 21]

Es wird darauf hingewiesen, dass in Stadtzentren von Großstädten höhere Temperaturen auftreten können, *„diese lassen sich jedoch aus dem heute verfügbaren Datenmaterial nicht quantifizieren“* [VDI 2078 (1996), Seite 23] und werden daher bei den von der VDI angegebenen Daten nicht weiter berücksichtigt.

- Sonneneinstrahlung

Es werden die Tagesgänge der Gesamt- und Diffusstrahlung für jeweils einen Tag eines jeden Monats in einer Tabelle [VDI 2078 (1996), ab Seite 142] angegeben (für die Berechnung der Strahlungsbelastung von Außenwänden und Dächern). Jedoch folgt der Hinweis, dass die sonstigen Berechnungen der Richtlinie auf Strahlungswerte hinter Doppelverglasung [VDI 2078 (1996), ab Seite 134] ausgelegt sind. Das bedeutet, dass Tabellen mit Werten für die in den Raum eintretende Strahlung vorgegeben werden und die Einstrahlung, die durch die Fenster tatsächlich in den Raum gelangt, wird über diese Werte und Korrekturfaktoren (die tatsächliche Scheibenanzahl, Sonnenschutz etc. berücksichtigen) angenähert.

3.2.2.4 Raumtypen

Für die Berechnungen mittels VDI werden alle Räume in vier Klassen aufgeteilt, abhängig von ihrer Speichermasse. Die VDI stellt dabei fest: „Für die praktische Kühllastberechnung reicht es aus, die unterschiedliche thermische Speicherfähigkeit der Räume in vier Klassen einzuteilen“ [VDI 2078 (1996), Seite 34]: XL (sehr leicht), L (leicht), M (mittel), S (schwer).

„Die Typ-Räume orientieren sich an üblichen Büroräumen.“ [VDI 2078 (1996), Seite 34] Für jede Klasse ist ein Typ-Raum mit identischen Geometrien und Wärmedämmungen, aber unterschiedlichen Wandaufbauten definiert:

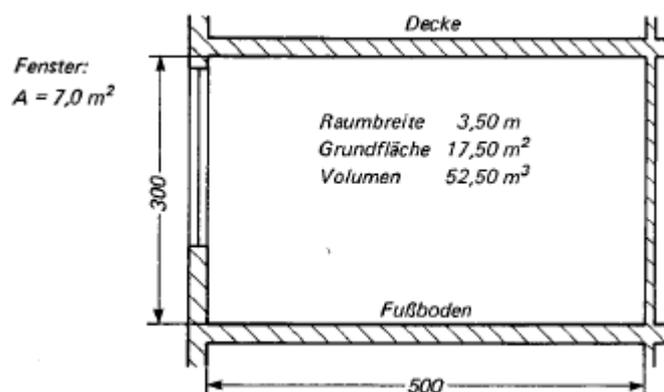


Abb. 3.2: Geometrie der Typ-Räume [VDI 2078 (1996), Seite 34]

Die Auswahl des passenden Raumtyps erfolgt ohne Berechnung durch qualitativen Vergleich des realen Raums mit den Typ-Räumen. Eine Orientierungshilfe wird dafür angeboten.

Es werden auch die Grenzen der Typräume aufgezeigt: „Bei starker Abweichung des zu berechnenden Raums von dem Typ-Raum“ (Raumgeometrie sehr stark unähnlich, Wandbauarten weichen stark ab etc.) „und/oder höheren Anforderungen an die Genauigkeit sollte man speziell für den Raum berechnete Gewichtungsfaktoren verwenden.“ [VDI 2078 (1996), Seite 36]

3.2.3 Software nach VDI 2078

Software-Produkte nach VDI 2078 werden von einigen Herstellern angeboten. Grundsätzlich ist zu unterscheiden zwischen Programmen, die Berechnungen nach dem EDV-Verfahren durchführen und solchen, die das Kurzverfahren einsetzen.

Die VDI 2078 selbst gibt für ein Beispiel einen Vergleich verschiedener Programme an, wobei auch die Ergebnisse einer „direkten Simulation mit entsprechenden Randbedingungen“ [VDI 2078 (1996), Seite 76] (ohne Angabe des Verfahrens oder der Software) angeführt werden:

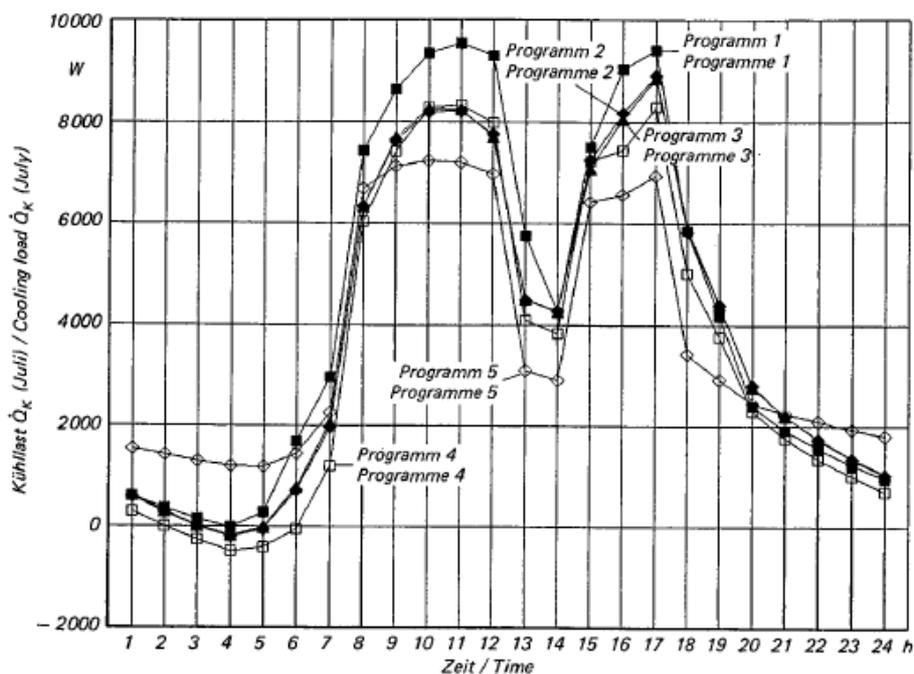


Abb. 3.3: Kühllastverläufe des VDI-Berechnungsbeispiels [VDI 2078 (1996), Seite 78]

In diesem Diagramm stellen die Kurven „Programm 1-4“ die Ergebnisse von vier verschiedenen Programmen nach VDI 2078 dar (Maximum 8,3 kW bis 9,5 kW), die Kurve „Programm 5“ (Maximum ca. 7,2 kW) ist das Ergebnis der direkten Simulation. Im Vergleich dazu ergibt das Kurzverfahren ein Maximum von 9,3 kW, liegt also im Bereich der Ergebnisse des EDV-Verfahrens.

3.2.4 Zusammenfassung und Kommentar

Die beiden Verfahren der VDI sind so ausgelegt, dass sie bei gleichen Randbedingungen die gleichen Ergebnisse liefern. Da die Möglichkeiten des Kurz-Verfahrens aber sehr eingeschränkt sind, wird meistens der Einsatz des Kurz-Verfahrens gar nicht möglich bzw. erlaubt sein. Bei dem später in dieser Arbeit folgenden Vergleich von Berechnungsergebnissen wird sich zeigen, ob sich das öfters (durch Mangel an diesbezüglichen Informationen oder Fehlinformationen) unzulässigerweise eingesetzte Kurz-Verfahren auf die Auslegung von Anlagen negativ auswirkt.

Fraglich ist, ob die grobe Rasterung der Klimadaten (selbst für ein eher einheitlicheres Klima wie in Deutschland) ausreichend ist. Höhere Temperaturen in Stadtzentren werden nicht berücksichtigt, obwohl den Verfassern der Richtlinie bewusst ist, dass dies zu Abweichungen führen kann.

Die VDI rechnet mit einem Erreichen des eingeschwungenen Zustands nach 14 Tagen: „... es sollte ebenfalls grundsätzlich 14 Tage bis zum Erreichen des eingeschwungenen Zustands gerechnet werden.“ [VDI 2078 (1996), Seite 59]. Da eine Anlaufzeit von 14 Tagen bis zum Erreichen des eingeschwungenen Zustands nur für leicht bis durchschnittlich gebaute Gebäude ausreichend ist, wird damit die Auslegung der VDI auf diese Art von Gebäuden wiedergegeben.

Die VDI 2078 ist darauf angewiesen, dass die zu berechnenden Räume ähnlich den vorgerechneten Büro-Standardräumen sind. Das liegt an der zugrundeliegenden Methode: „... und die Ergebnisse der Norm-Rechnung sind von gleicher Qualität wie die der genauen thermischen Simulation, wenn die Kennwerte des Typraums genügend genau den realen Raum widerspiegeln.“ [VDI 2078 (1996), Seite 3]. Je mehr die Eigenschaften des realen Raums von den Typräumen abweichen, desto höher ist die Gefahr, dass das Ergebnis ungenau wird. Es stellt sich daher die Frage, ob die grobe Einteilung in vier Typ-Räume tatsächlich ausreichend für die in der Praxis benötigte Genauigkeit der Kühllastberechnung ist. Der Vergleich der Berechnungsmethoden in dieser Arbeit wird zeigen, inwieweit Abweichungen bei üblichen Bauten auftreten.

Grundsätzlich ist auffallend, dass einige Teile der Berechnungen nicht exakt vorgegeben werden (z.B. VDI 2078 Seite 102, Tabelle A7 Temperaturen angrenzender Dachräume: 40°C bis 50°C) oder für Computerberechnungen nicht direkt umsetzbare Verfahren angegeben werden (z.B. „...ermittelt man die durch andere Gebäude beschatteten Flächen entweder anhand eines maßstäblichen Modells oder graphisch durch Ausnutzen der Gesetzmäßigkeiten der Parallelprojektion“ [VDI 2078 (1996), Seite 38]). Dies zeigt sich auch bei den am Markt erhältlichen

Programmen (z.B. ist bei einigen Programmen das Verhältnis der fremd-beschatteten Außenbauteilfläche in Abhängigkeit von der Uhrzeit anzugeben, ohne dass dem Planer für die Berechnung eine echte Hilfestellung angeboten wird).

An anderen Stellen ist in speziellen Fällen etwas zu beachten oder zu berücksichtigen, ohne dass dies weiter ausgeführt wird (z.B. *„Bei den Strahlungsberechnungen wurde eine mittlere Reflexion der Umgebung $r_u = 0,2$ vorausgesetzt. Bei stärkerer Reflexstrahlung aus der Umgebung ... liegt die Strahlungsbelastung unter Umständen wesentlich höher. In solchen Fällen sollte eine auf die jeweiligen Verhältnisse zugeschnittenen Berechnung durchgeführt werden.“* [VDI 2078 (1996), Seite 29]).

Zusätzlich wird darauf hingewiesen, dass es in einigen Fällen zu Abweichungen von den Vorgaben kommen kann und daher werden Messungen empfohlen. Beispiel Fenster-Sonnenschutz-Kombinationen: die Strahlung durch Fenster mit Sonnenschutz sollte gemessen werden, da die Näherung *„in Einzelfällen allerdings zum Teil erhebliche Abweichungen“* [VDI 2078 (1996), Seite 30] ergeben kann. Solche Messungen sind dem Anwender von Software nach VDI nicht zumutbar, da der Anwender keinen Zugang zu den Fenstern, dem Sonnenschutz oder entsprechenden Messinstrumenten ohne hohe Kosten und entsprechenden Arbeitsaufwand hat.

Durch diese Punkte ist es notwendig, dass für verschiedene Teile des Rechenverfahrens von den Programmherstellern selbst Lösungen erarbeitet werden, womit auch mehrere Lösungswege und unterschiedliche Berechnungsergebnisse möglich sind. Beispielsweise gibt die VDI selbst einige Abweichungen zwischen Programmen an: *„Dennoch werden bei weitergehender Analyse immer wieder Punkte gefunden, die von den Programmen nicht völlig identisch behandelt werden (Strahlung auf Außenwände: Kombinierte Außentemperatur nach Nehring oder Sonnenlufttemperatur nach Mackey und Wright).“* [VDI 2078 (1996), Seite 77] Ein weiterer Unterschied wird angeführt: Ein Programm nimmt an, dass der Sonnenschutz bei Fenstern nur bei direkter Sonneneinstrahlung geschlossen ist, die anderen Programme rechnen mit ganztags aktiviertem Sonnenschutz [VDI 2078 (1996), Seite 78]. Aus diesen Gründen werden mehrere VDI-Programme für die später in dieser Arbeit erfolgenden Vergleichsrechnungen herangezogen, um etwaige Differenzen durch unterschiedliche Berechnungsmethoden erkennen zu können.

Wenn die angeführten Grenzen der Einsetzbarkeit der Typräume überschritten werden, wird von der VDI der Einsatz *„speziell für den Raum berechneter Gewichtsfaktoren.“* [VDI 2078 (1996), Seite 36] empfohlen. Die Ermittlung dieser Gewichtsfaktoren setzt den Einsatz eigener Computersimulationen voraus. Damit stellt sich die Frage, weshalb in einem solchen Fall nicht gleich ein echtes Gebäudesimulationsprogramm eingesetzt werden sollte.

3.3 Die schweizer Norm SN 546 382/2 bzw. SIA V 382/2

3.3.1 Einleitung

Neben der österreichischen Norm und der deutschen Richtlinie ist auch die schweizer Norm SN 546 382/2, herausgegeben vom Schweizerischen Ingenieur- und Architekten-Verein unter der Bezeichnung „SIA V 382/2 – Kühlleistungsbedarf von Gebäuden“, zu nennen. Diese Norm beschreibt aber im Gegensatz zu den beiden anderen Regelwerken nur eine Handmethode, die gültig anwendbar ist, wenn gewisse Randbedingungen erfüllt sind. *„Bei starken Abweichungen zu den Randbedingungen der Handmethode ist eine EDV-Berechnung erforderlich, wobei die Randbedingungen der Berechnung sinngemäß von der hier beschriebenen Methode zu übernehmen sind.“* [SN 546 382/2 (1992), Seite 14].

Die Methode soll die rasche Bestimmung des Kühlleistungsbedarfs ermöglichen, wobei die dabei eingesetzten Kühllasttemperaturdifferenzen und Kühllastfaktoren mit dem amerikanischen Programm DOE-2, laut [Website DOE2 2009] entwickelt von James J. Hirsch und dem Lawrence Berkeley National Laboratory, berechnet worden sind.

Die vorgegebenen Randbedingungen sind:

- Raumabmessungen (z.B. Fensterfläche, Glasfläche, Raumvolumen)
- Beleuchtungssysteme
- Wetterdaten für Juli und September.

Es werden synthetische Wetterdaten eingesetzt, wobei der Tagesmittelwert, das Tagesmaximum und die doppelte Amplitude der Außenlufttemperatur für beide Monate angegeben werden. Als Strahlungsdaten sind die Daten für klare Tage der Station Zürich-Kloten für den 23. Juli (Sommer) und den 23. September (Herbst) angegeben und einzusetzen.

3.3.2 Zusammenfassung und Kommentar

Die vorliegende Norm beschreibt ein händisches Verfahren für sehr eingeschränkte Randbedingungen bzw. – wenn davon abgewichen wird – zur Abschätzung der Kühllast und ist nicht für eine Berechnung der Kühllast für allgemeinere Fälle gedacht. Bei größeren Abweichungen wird auf eine Ermittlung der Kühllast mit einem Simulationsprogramm verwiesen, wobei dies nicht genauer beschrieben wird. Allerdings bezieht sich die Norm immer wieder auf das amerikanische Programm DOE-2.

Da DOE-2 nicht für den deutschsprachigen Raum entwickelt wurde und in Österreich für die Ermittlung der Kühllast auch nicht verbreitet ist, wird auf das Programm DOE-2 in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen. Auch auf die schweizer Norm SN 546 382/2, die nur eine händische Rechenmethode für den schweizer Raum beschreibt, wird nicht weiter eingegangen.

3.4 Die europäische Norm EN 15243

Die „EN 15243 – Lüftung von Gebäuden — Berechnung der Raumtemperaturen, der Last und Energie von Gebäuden mit Klimaanlage“ ist eine Rahmennorm, die die Zusammenhänge verschiedener Berechnungsverfahren für Räume und Gebäude beschreibt. Dazu gehören Heizlast, die sensible und latente Kühllast, sowie Befeuchtungs- und Entfeuchtungslast. Die folgende Abbildung aus der Norm zeigt diese Zusammenhänge der verschiedenen Normen, auf die sich die EN 15243 bezieht. Dabei wird die EN 15255 als Norm für die Berechnung der sensiblen Norm-Kühllast festgelegt.

Außerdem werden Möglichkeiten für die Berechnung der latenten Kühllast angeführt: Für den allgemeinsten Fall, d.h. Berücksichtigung des Feuchtetransports in den Gebäudekomponenten und dem Mobiliar, wird auf ein komplexes Verfahren in der EN 15026 verwiesen. In vielen Fällen kann die Berechnung auch vereinfacht erfolgen, wofür ein kurzes Rechenverfahren im Anhang angeführt wird.

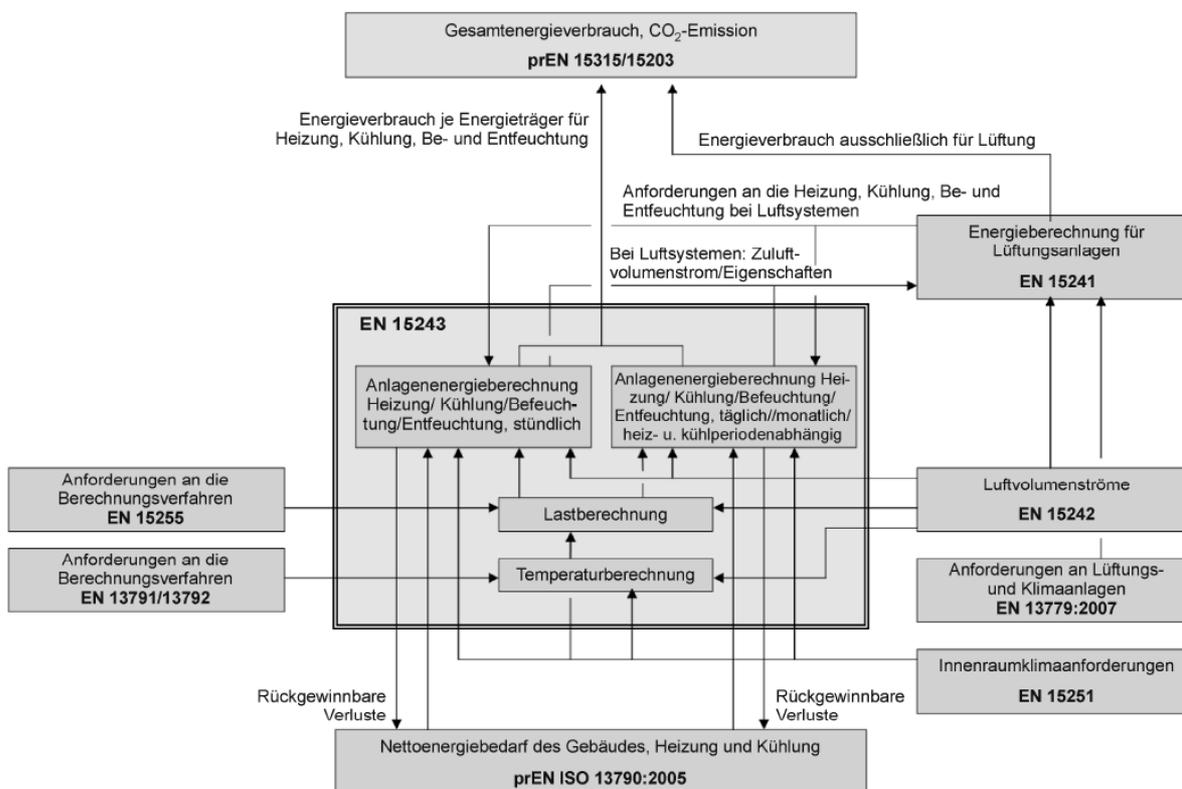


Abb. 3.4: Zusammenhänge zwischen europäischen Normen [EN 15243 (2007), Seite 7]

3.5 Die europäische Norm EN 15255

3.5.1 Einleitung

Die „EN 15255 – Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Berechnung der wahrnehmbaren Raumkühllast – Allgemeine Kriterien und Validierungsverfahren“ legt Voraussetzungen fest für:

- Verfahren zur Berechnung der wahrnehmbaren (sensiblen) Kühllast,
- Verfahren zur Berechnung eines Temperaturprofils bei begrenzter Kühlleistung,
- Verfahren, die Daten für die Optimierung von Gebäuden (Verringerung der Last) bereitstellen, oder
- Verfahren die die Analyse von Teillasten zur Bemessung oder Regelung der Anlage ermöglichen.

Die EN legt weiters die Anforderungen für ein – die realen Gegebenheiten vereinfachendes – Rechenverfahren für die Kühllast fest. Ein Verfahren entspricht der EN, wenn

- mehrere Zonen (Räume) und auch die Summe (Gebäude) berechnet werden können, sowie
- die angegebenen grundlegenden Anforderungen,
- die Anforderungen an die Daten (Klimadaten, Bauteildaten etc.) und
- die Anforderungen an den auszugebenden Berechnungs-Bericht eingehalten werden,
- das Verfahren nach dem angeführten Validierungsverfahren verifiziert werden kann und
- das Verfahren dem Validierungsverfahren der EN ISO 13792:2005, 6.3 entspricht.

Die Norm legt fest, dass zwar aufwändigere Verfahren zur Simulation der Kühllast existieren, diese aber nicht europäisch genormt sind. Das bedeutet aber, dass eine nationale Norm ein genaueres Verfahren festlegen darf.

Die EN weist darauf hin, dass nationale Normen an die Vorgaben der europäischen Norm anzupassen sind. Daher muss die ÖNORM H 6040 an diese Vorgaben angepasst werden, um auch nach EN 15255 gültige Ergebnisse liefern zu können.

3.5.2 Anforderungen an die Berechnungsverfahren

Neben grundlegenden Mindestanforderungen (wie z.B. vollständig durch Umfassungsbauteile abgeschlossene Räume, konstante thermophysikalische Eigenschaften der Baustoffe, eindimensionale Wärmeleitung durch Bauteile, homogene Temperaturverteilung an der Oberfläche eines Bauteils), die von den oben anführten Regelwerken ÖNORM H 6040 und VDI 2078 bereits erfüllt werden, kommen auch neue Anforderungen hinzu. Beispielsweise die Berechnung und Regelung nach der operativen Temperatur und die separate Behandlung der Übertragung langwelliger Strahlungswärme und der Konvektionswärmeübertragung zwischen den Innenoberflächen der Bauteile eines Raums.

Weiters werden die Daten beschrieben, die für die Berechnungen benötigt werden (z.B. stundenbezogene Klimadaten für Außenlufttemperatur und Strahlung). Ebenso werden die Eingangs- und Ausgangsdaten festgelegt, die der vom Verfahren auszugebende Bericht zu enthalten hat.

3.5.3 Validierung und Einstufung der Berechnungsverfahren

Berechnungsverfahren werden entsprechend ihrer Eignung, verschiedene Arten von Kühlanlagen und Regelverfahren zu modellieren, in Klassen eingestuft:

Kühlanlagen, die im Eignungsbereich des Verfahrens liegen		Klassen des Berechnungsverfahrens			
		1	2	3	4
Reine Konvektionsanlage	Unbegrenzte Kühlkapazität, laufender Betrieb	x	x	x	x
	Unbegrenzte Kühlkapazität, laufender Betrieb oder Betrieb mit Unterbrechungen		x	x	x
	Begrenzte Kühlkapazität + bewegliche Sonnenschutzeinrichtung			x	x
Flächen- und Konvektionsanlage					x

Tabelle 3.1: Einstufung der Berechnungsverfahren in Hauptklassen

Für jede dieser Hauptklassen bestehen entsprechend den Regelmöglichkeiten des Programms noch zwei Teilklassen:

- Teilkategorie a: Regelung nach der Lufttemperatur
- Teilkategorie b: Regelung nach der Lufttemperatur und der operativen Temperatur

Die EN definiert 15 Prüffälle, passend zu den verschiedenen Klassen von Berechnungsverfahren. Je mehr Prüffälle mit einem Programm richtig berechnet werden können, desto höher ist die erreichte Klasse.

3.5.4 Zusammenfassung und Kommentar

Die EN 15255 legt Rahmenbedingungen für Kühllastberechnungen fest, ohne ein bestimmtes Rechenverfahren vorzuschreiben. Damit sind Mindestanforderungen definiert, die sowohl die ÖNORM H 6040, als auch die VDI 2078 und die SN 546 382/2 nicht erfüllen. Die nationalen Normen im deutschsprachigen Raum sind daher der EN 15255 möglichst rasch anzupassen.

Die EN 15255 befasst sich hinsichtlich der Bauteile nur mit „Umfassungsbauteilen“. Dabei wird außer Acht gelassen, dass auch in einem Raum liegende Bauteile (z.B. Wände, die in den Raum hineinstehen) einen oft nicht vernachlässigbaren Einfluss auf die Speichermasse des Raums und damit auch auf das thermische Verhalten haben. Die Vernachlässigung dieser Bauteile stellt eine zu hinterfragende Vereinfachung der Norm dar, die gegebenenfalls in den zu entwickelnden nationalen Normen zu beseitigen ist.

Die EN legt einige Vorschriften und Vorgangsweisen recht ungenau fest (z.B. wurden keine Vorgaben für die Nachbarraumtemperaturen gemacht). Dies lässt einerseits einen größeren Gestaltungsspielraum für nationale Normen, andererseits ist dadurch ein Zweck der europäischen Normung, nämlich die Vereinheitlichung von Vorschriften und Rechenverfahren, in Frage gestellt. Daher ist ein Vergleich der Merkmale von Gebäuden – anhand von Berechnungsergebnissen unterschiedlicher Berechnungsverfahren nach EN 15255 – mit Vorsicht zu betrachten.

Die Ergebnisliste der Prüffälle enthält keine Lufttemperaturen, sondern nur operative Temperaturen, wodurch eine Überprüfung der aktuell gültigen ÖNORM H 6040 und der VDI 2078 hinsichtlich der Temperaturberechnungen nicht möglich ist. Da die EN 15255 aber immer die Ausgabe der operativen Temperatur verlangt (die Unterteilung in die Teilklassen a und b beziehen sich nur auf die Regelungsmöglichkeiten), ist die Einhaltung der EN 15255 durch die beiden Regelwerke in der aktuellen Fassung ohnehin schon ausgeschlossen.

3.6 Gegenüberstellung der Regelwerke

Im Folgenden werden einige grundlegende Festlegungen, Vorgaben und Lösungen der Rechenverfahren der verschiedenen Regelwerke gegenübergestellt. Dabei wurde, entsprechend der Aufgabenstellung der Arbeit, nur auf das Verfahren der ÖNORM H 6040 und auf die beiden Verfahren der VDI 2078 eingegangen. Die SN 546 382/2 enthält nur ein händisches Verfahren ohne Österreichbezug und für die EN 15255 steht noch keine nationale Norm für Österreich mit Rechenverfahren zur Verfügung.

Eigenschaft	ÖNORM H 6040	VDI 2078 Kurzverfahren	VDI 2078 EDV-Verfahren
Rechenverfahren	dynamische thermische Simulation	es wurden bei der Entwicklung dynamische thermische Simulations-Berechnungsergebnisse ermittelt und daraus ein Rechenverfahren mit Korrekturfaktoren abgeleitet. Eine echte Simulation gilt als „Analog VDI 2078“.	
Ausrichtung des Verfahrens	jede Art von Raum und Gebäude soll genau berechenbar sein	Bürräume (siehe Definition Typ-Raum [VDI 2078 (1996), Seite 34]) sollen mit der Richtlinie berechnet werden können	
Rechenverfahren überprüft	teilweise, in einem offiziellen Forschungsauftrag des Bundesministeriums für Wissenschaft und Forschung wurde die Berechnung des Temperaturgangs überprüft und verifiziert.	keine Überprüfung bekannt, auch die in der VDI dargestellten Ergebnisse der Berechnungen sind nicht überprüft. Darauf wird ausdrücklich hingewiesen [VDI 2078 (1996), Seite 72]	
Rechnung Österreich	ja, für Salzburg und Wien liegen gemessene meteorologische Daten vor oder mittels halbsynthetisch ermittelten Daten	oft von Softwareherstellern durch Umlegung der deutschen Klimazonen auf Österreich angeboten	
Rechnung Deutschland	ja, mit meteorologischen Messwerten oder mittels halbsynthetisch ermittelten Daten	ja, mehrere Klimazonen (4 Klimazonen für Außenlufttemperaturen)	

Eigenschaft	ÖNORM H 6040	VDI 2078 Kurzverfahren	VDI 2078 EDV-Verfahren
Rechnung Weltweit	ja, mit meteorologischen Messwerten oder mittels halbsynthetisch ermittelten Daten	Richtlinie wurde „auf mitteleuropäische Verhältnisse zugeschnitten, d.h. bei der Sonneneinstrahlung auf 50° geographische Breite, wahre Ortszeit und die mittleren hier auftretenden atmosphärischen Trübungen.“ [VDI 2078 (1996), Seite 5]	
Meteorologische Daten – Temperaturgänge	Mittelwerte der wärmsten Tage der jeweiligen Kalendermonate von ca. 1983 – 1992 [Pokorny 2009]	Für den Sommer: Mittelwerte der 40 wärmsten Tage in den Jahren 1953 – 1972 Andere Monate: umgerechnete Daten unter Zuhilfenahme der DIN 4710 [VDI 2078 (1996), Seite 21]	
Meteorologische Daten – Strahlungsdaten	Tagesgänge der Einstrahlung auf horizontale Fläche für den Projektstandort für jedes Monat für Wien und Salzburg als Messwerte, für andere Orte halbsynthetisch vom Rechenverfahren berechenbar	Tagesgänge der Einstrahlung auf Außenflächen (normal zur Sonne, horizontal und 8 Haupt-Himmelsrichtungen) und hinter Zweifachverglasung für jedes Monat für 50° geographische Breite	
Trübungsfaktoren nach Linke	wird bei gemessenen met. Daten nicht benötigt Synt. = frei eingebbar mit Vorschlagswerten	Trübungsfaktoren fix eingerechnet, unabh. vom Projektstandort allerdings stark abhängig von der Jahreszeit – wirkt sich vermindern auf die Direkt und Gesamtstrahlung, und verstärkend auf die Himmelsstrahlung aus.	
Reflexionsfaktor der Umgebung	Variabel eingebbar mit Vorschlagswerten, 1 Wert pro Projekt	festgelegt für die Strahlungsdaten auf 0,2 Hinweis, dass bei stärkerer Reflexstrahlung „auf die jeweiligen Verhältnisse zugeschnittene Berechnung durchgeführt werden“ sollte [VDI 2078 (1996), Seite 28]	
Berechnungszeitraum	Jänner – Dezember wählbar	Juli und September	Jänner – Dezember wählbar (wenn vom Softwarehersteller angeboten)
Heizung	keine, statt negative Werte werden Werte auf Null gesetzt	keine, statt negative Werte werden Werte auf Null gesetzt	keine, statt negative Werte werden Werte auf Null gesetzt (Ausnahmen möglich)
Berechnung in Stundenschritten	ja	ja	ja

Eigenschaft	ÖNORM H 6040	VDI 2078 Kurzverfahren	VDI 2078 EDV-Verfahren
Berechnung des eingeschwungenen Zustands	ja, 24-h-Periode Abbruchbedingung: 1. Tempdiff. $\leq 0,01K$ 2. Kühllastdiff. $\leq 0,1\%$ 3. max. 365 Tage berechnen	ja, 24-h-Periode	ja, 24-h-Periode Abbruchbedingung: 1. Tempdiff. $\leq 0,1K$ 2. Kühllastdiff. $\leq 1\%$ 3. am 14. Tag der Berechnung
Berechnung für nicht-periodische Änderungen der Lasten, z.B. Betriebspause (Kühlanlage aus) und Verhalten des Raums nach Wiedereinschalten	ja, mit oder ohne: innerer Wärmequellen, automatisch gesteuertem Sonnenschutz, Lüftung während der Betriebspause	nein	nein
Wärmestrom durch Wand	eindimensional normal zur Wandoberfläche		
Speichermasse von Bauteilen	berücksichtigt, direkt stundenweise berechnet und als eigener Kühllastanteil [ÖNORM H6040, Seite 7] eingerechnet	berücksichtigt durch Speicherfunktion der Wärmebelastung. Diese Speicherfunktion ist entweder ein Kühllastfaktor (Tagesgang von Faktoren, die mit der Kühllast multipliziert werden) oder ein Gewichtungsfaktor.	
Rechnung mit begrenzter Kühlleistung	ja	nein	ja
Auslegung von Lüftungsanlagen ohne Kühlung	ja	nein	ja
Berechnung des Raumlufttemperaturgangs	ja, mit Kühlung, begrenzter Kühlung oder ohne Kühlung	nein	ja, mit Kühlung, begrenzter Kühlung oder ohne Kühlung
Soll-Raumlufttemperatur bei Kühlung	Tagesgang	konstante Temperatur, 22°C	Tagesgang

Eigenschaft	ÖNORM H 6040	VDI 2078 Kurzverfahren	VDI 2078 EDV-Verfahren
Wandaufbauten	jede thermisch relevante Schicht kann definiert werden, komplexe Aufbauten aus bis zu 15 homogenen Schichten sind möglich	Auswahl aus 4 Typräumen (verschiedene Räume mit identischen Geometrien und Wärmedämmungen aber unterschiedlichen Wandaufbauten), die sich „an üblichen Büroräumen“ [VDI 2078 (1996), Seite 34] orientieren – der zu berechnende Raum ist einem Typ zuzuordnen. Kurzverfahren: Berechnung nur bei guter Übereinstimmung mit Typraum möglich. EDV-Verfahren: „Bei starker Abweichung des zu berechnenden Raums von dem Typ-Raum“ (Raumgeometrie sehr stark unähnlich, Wandbauarten weichen stark ab etc.) „und/oder höheren Anforderungen an die Genauigkeit sollte man speziell für den Raum berechnete Gewichtungsfaktoren verwenden.“ [VDI 2078 (1996), Seite 36]	
Orientierung der Außenwände	0 – 360° in 1/10tel-Grad-Schritten einstellbar	8 Haupthimmelsrichtungen	
Opake Außenwände – Wärmestrom durch Einstrahlung und Temperaturdifferenz	Wärmestrom dynamisch gerechnet	Wärmestrom mit Hilfe vorbestimmter, in Tabellen angeführten „äquivalenten Temperaturdifferenzen“ berechnet (siehe Kapitel 3.2.2.1)	Wärmestrom mittels Gewichtsfunktionen von einigen vordefinierten Wänden und Dächern ermittelt.
Innenwände zu Nachbarräumen	instationärer Wärmetransport	Wärmestrom bei konstanten, vordefinierten Nachbarräumtemperaturen [VDI 2078 (1996), Seite 102]	stationärer Wärmetransport zu Nachbarräumen [VDI 2078 (1996), Seite 49]
Einstrahlung durch Fenster	aus Diffus- und Direkt-einstrahlung abhängig vom Winkel und Fenster (Scheibenanzahl, Glasart) berechnet	Das Verfahren ist ausgelegt auf 2-Scheiben-Normalglas, wofür Tagesgänge der Einstrahlung hinter der Verglasung angegeben sind (Tagesgänge für jedes Monat für 50° geographische Breite und feste Trübungs-faktoren).	
Fenstergläser	10 verschiedene Glastypeen mit jeweils 1 bis 3 Scheiben	Andere Gläser und auch Fenster-Sonnenschutz-Kombinationen werden über	

Eigenschaft	ÖNORM H 6040	VDI 2078 Kurzverfahren	VDI 2078 EDV-Verfahren
Sonnenschutz für Fenster	Berechnung der Auswirkungen über Reflexions- und Transmissionskoeffizienten	Durchlassfaktoren und weitere Korrekturfaktoren berücksichtigt (diese sind mit den oben angeführten Tagesgängen zu multiplizieren). Es werden keine Faktoren für Wärmeschutzgläser angeführt! <i>„Messungen zeigen in Einzelfällen allerdings zum Teil erhebliche Abweichungen. ... Es wird daher empfohlen – besonders bei Einsatz von Sondergläsern –, den Gesamt-Sonnenschutzfaktor der Fensterkombination durch eine Messung nachzuweisen.“</i> [VDI 2078 (1996), Seite 30]	
Eigenbeschattung, d.h. Beschattung durch Teile derselben Fassade	Schatten auf Fenster durch Fassaden-Vorsprünge (für alle Seiten des Fensters getrennt berücksichtigt);	nein, für Fenster gilt: <i>„bei wandernden Schatten ist die besonnte Fläche zum Zeitpunkt der maximalen Gesamtstrahlung zu berechnen.“</i> [VDI 2078 (1996), Seite 46]	Schatten auf Fenster durch Fassaden-Vorsprünge (nur oberhalb und auf den Seiten der Fenster, links und rechts gleich, Sonnenstand bei 50°geogr. Breite)
Fremdbeschattung, d.h. Beschattung durch Objekte der Umgebung, z.B. andere Gebäude, Berge, Vegetation	automatisch über die Angabe der Horizontüberhöhung; Rechenverfahren ermittelt Schatten auf Fassade und Fenster automatisch	nein wird nicht berücksichtigt	händisch, vorangehende händische Ermittlung der Schatten auf Fassade mittels grafischem Verfahren oder per Modellbau notwendig, keine Vorgaben für ein rechnerisches Verfahren
„unbeabsichtigte“ Infiltration durch Fassade	als vernachlässigbar an den Auslegungstagen für die Kühllastberechnung angesehen, wird daher nicht eingerechnet		
Luftaustausch mit Nachbarräumen	nein, aber indirekt durch eine Lastangabe möglich	keine Angabe	ja, wird angeführt, aber nicht näher ausgeführt, wie er zu berechnen ist [VDI 2078 (1996), Seite 51]

Eigenschaft	ÖNORM H 6040	VDI 2078 Kurzverfahren	VDI 2078 EDV-Verfahren
Personen (innere Last)	Personen „ <i>direkt als konvektiver Anteil in die Kühllast aufgenommen</i> “ [ÖNORM H 6040 (1997), Seite 8]	Personen aufgeteilt in Strahlungs- und konvektiven Anteil, Strahlung wird verzögert eingerechnet (Kühllast- bzw. Gewichtsfaktoren)	
Latente Lasten	nein	nein, keine Rechenvorschriften. Aber „ <i>sie müssen jedoch als gesondertes Bilanzglied mitgeführt werden, da sie unter Umständen – je nach Feuchteanforderungen und Anlagenbetriebsweise – die Kühlleistung der Geräte mitbestimmen.</i> “ [VDI 2078 (1996), Seite 8]	
Beleuchtung (innere Last)	Leistungsaufnahme der Beleuchtung in Watt. Strahlungsanteil wird verzögert eingerechnet durch dynamische Berechnung der Speicherung in den Raumumschließungsflächen	Leistungsaufnahme der Beleuchtung in Watt. Strahlungsanteil wird verzögert eingerechnet über Kühllast- bzw. Gewichtsfaktoren	
Gleichzeitigkeitsfaktor Beleuchtung	nein Kann allerdings durch entsprechende Werteeingabe berücksichtigt werden.	ja (zu vereinbaren mit Bauherrn)	ja (zu vereinbaren mit Bauherrn)
Raumbelastungsgrad Beleuchtung	ja (exakt gleiche Tabelle wie bei VDI 2078)	nein	ja (exakt gleiche Tabelle wie bei ÖNORM H 6040)
Berücksichtigung des Strahlungsanteils von Beleuchtung getrennt (Auswirkung auf Speichermasse)	ja, Prozentsätze für Leuchtstoffröhren und Glühbirnen vorgegeben	ja, Prozentsätze in Abhängigkeit der Montageweise der Beleuchtung (frei hängend oder eingebaut) vorgegeben	
Maschinen (innere Last)	konvektive Wärmeabgabe	wenn nichts näheres bekannt, als konvektive Wärmeabgabe gerechnet	

Tabelle 3.2: Gegenüberstellung der Regelwerke

3.7 Weitere Berechnungsverfahren

3.7.1 Einleitung

Neben den bereits vorgestellten Berechnungsverfahren gibt es noch eine Vielzahl an weiteren Verfahren. Diese sind zu unterteilen in Simulationsverfahren speziell zur Ermittlung der Kühllast, grob abschätzende Kühllastberechnungen (siehe Kapitel 3.7.6) und Gebäudesimulationen.

Für die Ermittlung der Kühllast gibt es viele Verfahren, wobei nur wenige von einer größeren Anzahl von Planern eingesetzt werden. Viele Verfahren konnten sich nicht durchsetzen oder werden nur in speziellen Bereichen eingesetzt. Beispielsweise sei ein Verfahren genannt, das im Rahmen einer Diplomarbeit an der TU-Wien entwickelt wurde (siehe [Bacher 1982]). Andere Verfahren werden im Rahmen von Gebäudesimulationen hauptsächlich im wissenschaftlichen bzw. forschungsnahen Bereich eingesetzt, da die zugehörigen Programme zwar viele Berechnungsmöglichkeiten bieten, der Bearbeitungsaufwand (und oft auch der Einarbeitungsaufwand in solche Softwarepakete) aber oft zu groß für die Nutzung durch Haustechnikplaner ist.

Im Folgenden werden Programme kurz vorgestellt, die wegen ihrer Bekanntheit oder ihrer Lösungsansätze erwähnt werden sollen. Anschließend werden die immer noch verbreiteten, einfach gehaltenen Abschätzungsmethoden kurz erläutert.

3.7.2 GEBA

GEBA ist ein „*Programmpaket zur Simulation des thermischen Verhaltens von GEBAeuden*“ [Website Kreč 2009] und wird von Ao. Univ. Prof. DI Dr. Klaus Kreč, Professor an der Technischen Universität Wien, über sein Büro für Bauphysik, Wien, angeboten. Das Programm kann unter anderem Tagesverläufe von Heiz- und Kühlleistungen ermitteln, die zur Einhaltung vorgegebener Raumlufttemperaturverläufe erforderlich sind. Damit ist auch eine Kühllastberechnung möglich.

„GEBA entstand aus einem von Dr. Walter Heindl, Mathematiker (1927-1994), im Jahr 1968 in Zusammenarbeit mit F. Haferland entworfenen und von H. Fuchs programmierten Programmpaket zur thermischen Simulation von Gebäuden.“ [GEBA Hintergrund 2007, Seite 4] Ab den 1980er-Jahren wurde das Programmpaket von Klaus Kreč in der Forschung und für Optimierungen und Sommertauglichkeitsnachweise eingesetzt und laufend erweitert. *„Mit dem in der Euronorm*

EN 13786 beschriebenen Berechnungsansatz für die Erfassung von Wärmeleitungs- und Wärmespeicherungseffekten in plattenförmigen Bauteilen wird ein von W. Heindl entwickelter Algorithmus (Bauteilmatrizen-Verfahren) wieder aufgenommen. Dieser Berechnungsansatz wurde im Jahre 1975 erstmals in einem Simulationsprogramm, das als „Urversion“ von GEBA bezeichnet werden kann, umgesetzt. Seit nunmehr knapp 25 Jahren hat sich dieser Berechnungsansatz bei einer Vielzahl an Projekten aus der Planungspraxis bestens bewährt.“ [GEBA Hintergrund 2007, Seite 2]

Das Besondere an dem Programm ist der analytische Lösungsansatz. Dabei werden die Verläufe aller zeitabhängigen Größen durch Fourier-Reihen (Überlagerung von Sinusschwingungen) dargestellt. GEBA bietet die Möglichkeit neben der Grundschiwingung bis zu acht Oberschwingungen einzusetzen, womit laut [GEBA Handbuch 2008, Seite 9] Tagesgänge von Temperaturen und Strahlungsintensitäten mit der erforderlichen Genauigkeit erfasst werden können, wenn die Tagesgänge keine abrupten Änderungen aufweisen. Dieser analytische Lösungsansatz führt zu vergleichsweise sehr kurzen Rechenzeiten. GEBA weist dadurch allerdings eine Beschränkung auf: Es können mit GEBA keine Fälle berechnet werden, bei denen die Tagesgänge kurzzeitige, sehr starke Schwankungen aufweisen (z.B. Stoßlüftung).

Das Programm rechnet grundsätzlich nur periodisch eingeschwungene Zustände. Mehrtägige Aufheiz- oder Abkühlvorgänge können daher mit GEBA nicht nachvollzogen und berechnet werden.

Strahlungsaustausch im Raum wird nicht berücksichtigt. Die Tagesgänge der Außenlufttemperatur und die anzunehmende Bestrahlungsstärken durch die Sonneneinstrahlung werden vom Programm errechnet. Der Einfluss von Außen auf das Gebäude (Außenlufttemperatur, Sonneneinstrahlung, langwelliger Strahlungsaustausch mit der Umgebung und der Atmosphäre) wird über die sogenannte Strahlungslufttemperatur gerechnet. Das Programm ermöglicht die Ausgabe der Temperaturverläufe an Bauteiloberflächen und innerhalb von Bauteilen.

3.7.3 GEBSIMU

Das Programm „Thermische Gebäudesimulation GEBSIMU“ wurde Anfang der 1970er-Jahre von Prof. Dr.-Ing. habil. Lothar Rouvel, Professor an der Technischen Universität München, entwickelt.

„Die Zielsetzung von GEBSIMU besteht darin, den Leistungs- und Energiebedarf für ein Gebäude oder eine haustechnische Anlage - zur Raumheizung, zur Raumkühlung, zur Klimatisierung und zur Beleuchtung - zu berechnen und durch die Variation der verschiedenen Parameter zu minimieren.“

[GEBSIMU Einführung 2008, Seite 2] Das Programm kann somit auch Heiz- und Kühllast berechnen. Es handelt sich bei GEBSIMU um ein dynamisches, numerisches Verfahren. Für die Auslegung im Sommer werden extreme Wetterperioden in Anlehnung an die Angaben der VDI 2078 eingesetzt.

Der Programmteil „RO 101“ berechnet Heiz- und Kühllast eines Raums. Das Programm setzt dazu das „n-Kapazitäten-Modell“ von Rouvel ein. Ähnlich dem Ansatz von „Kühllast H6040“ wurde eine Ersatzschaltung nach dem Beuken-Modell (siehe Kapitel 3.1.2) entwickelt, wobei bei GEBSIMU jeder Bauteil durch je zwei Kapazitäten und drei Widerstände beschrieben wird. Diese werden zu einer Kapazität und zwei Widerständen je Bauteil zusammengefasst. Die einzelnen Bauteile eines Raums werden dann zu einem n-Kapazitäten-Modell zusammengeschaltet. Mit n Kapazitäten sind bei Rouvel also n Kapazitäten pro Raum, aber nur eine Kapazität pro Bauteil gemeint. Dies stellt eine Vereinfachung gegenüber dem Ansatz von Kühllast H6040 dar, das im Allgemeinen mit wesentlich mehr Kapazitäten und Widerständen rechnet.

3.7.4 Trnsys

Trnsys („TRaNsient SYstems Simulation program“ [Website Wisconsin 2009]) ist ein dynamisches, modular aufgebautes Simulationswerkzeug zur Gebäude- und Anlagensimulation. Neben der thermischen Gebäudesimulation bietet das Programm auch Möglichkeiten bei der Simulation von Solaranlagen, Lüftungsanlagen und anderen technischen Anlagen. Das Programm wurde an der Universität von Wisconsin entwickelt. In Deutschland wird es exklusiv von Transsolar vertrieben.

Trnsys ist ein komplexes Softwarepaket, das vor allem durch seine Verbreitung im forschungsnahen Bereichen und durch den Einsatz bei umfangreichen Projekten bekannt ist. Wegen der Komplexität des Programms und dem damit einhergehenden Projektbearbeitungsaufwand und der aufzuwendenden Einarbeitungszeit wird diese Software bei der Projektierung von üblichen Kühlanlagen selten eingesetzt, ausgenommen Projekte, bei denen neben der Dimensionierung der Kühlanlage auch eine Reihe anderer Fragestellungen zu lösen sind.

3.7.5 TAS

TAS (Thermal Analysis Software) ist ein modular aufgebautes dynamisches Simulationsprogramm. Das Modul „TAS Building Designer“ dient der thermisch-energetischen Gebäudesimulation. Es handelt sich dabei um ein numerisches, iterativ lösendes Programm mit einem dynamischen Mehrzonen-Mehrknoten-Netzwerk-Modell. Das Programm bietet neben vielen anderen Möglichkeiten auch die Ermittlung der Kühllast, auf Wunsch auch nach VDI 2078.

TAS wurde von EDSL Ltd, England entwickelt und wird seit 1986 vertrieben und laufend weiterentwickelt. „*Tas is an industry-leading building modeling and simulation tool*“ [Website EDSL 2009] mit mehr als 300 verkaufte Lizenzen [Website IFES 2009]. Das Programm wird in Englisch angeboten, wobei die Online-Hilfe auch in Deutsch zur Verfügung gestellt wird.

3.7.6 Kühllast-Abschätzungsmethoden

Auf einigen Webseiten werden Online-Berechnungsmöglichkeiten angeboten – im Folgenden werden diese als Webseiten-Rechner bezeichnet. Sie sind kostenlos, ihre Berechnungsgenauigkeit ist aber aufgrund der geringen Anzahl an Angaben stark in Frage zu stellen. Grundsätzlich kann mit diesen Verfahren nur ein Wert, also die Auslegungskühllast ermittelt werden. Tagesgänge der Kühllast können nicht ermittelt werden. Bei vielen Websites werden die Berechnungsmethoden nicht angegeben. Es liegt nahe, dass Webseiten-Rechner von deutschen Webseiten entweder nach dem VDI 2078 Kurzverfahren oder nach noch einfacheren Methoden versuchen, die Kühllast näherungsweise zu bestimmen.

Neben den Webseiten-Rechnern sind Formblätter eine beliebte und oft angewendete Art der Abschätzung der Auslegungskühllast. Viele Klimaanlage-Hersteller stellen einfache, meist einseitige Formblätter zur Verfügung. Mit diesen Formularen kann nach der Eintragung einiger Daten über feste Faktoren die Auslegungskühllast für einen einzelnen Raum ermittelt werden. Im Prinzip dürften diese Berechnungen oft den in Webseiten-Rechnern eingesetzten Methoden entsprechen. Es wird öfters die Formulierung „*in Anlehnung an die VDI 2078*“ verwendet. Ebenso wie bei Webseiten-Rechnern ist auch bei Formblättern die Genauigkeit der Berechnungen stark zu hinterfragen.

4 Berechnungsgrundlagen für die Validierung

4.1 Einleitung

Im diesem Kapitel werden die Gleichungen und Formeln hergeleitet, die im nächsten Kapitel für die Validierung der Verfahren aus den Regelwerken benötigt werden. Dabei werden die Ergebnisse von Rechnungen nach Regelwerkmethoden mit den Ergebnissen von Berechnungen mit den hier entwickelten Formeln für einige statische Fallbeispiele verglichen.

Die in diesem Kapitel entwickelten Gleichungen entsprechen großteils dem Stand der Technik, teilweise gehen sie auch darüber hinaus (z.B. Herleitung einer Formel für die Rückstrahlung der Sonneneinstrahlung im Raum mit unendlich vielen Reflexionen – siehe Kapitel 4.6).

4.2 Statischer Wärmedurchgang durch eine Wand

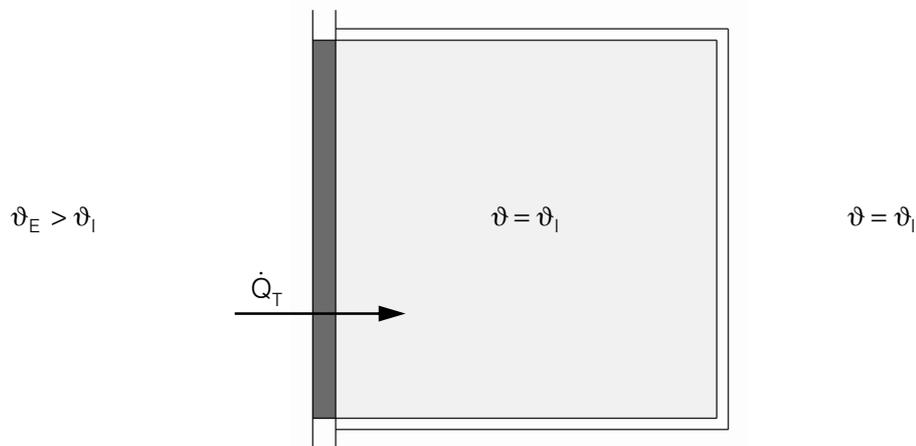


Abb. 4.1: Statischer Wärmedurchgang durch eine Wand

Da es sich um einen statischen Fall handelt (alle Parameter zeitlich unveränderlich), können für den Wärmestrom in den Raum folgende, allgemein bekannte Formeln eingesetzt werden:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_E} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_I}} \quad \text{in W/(m}^2\text{.K)} \quad (4.2-1)$$

Mit dem U-Wert (Wärmedurchgangskoeffizient) ergibt sich die Wärmestromdichte durch die Wand:

$$\dot{q}_T = U \cdot (\vartheta_E - \vartheta_I) \quad \text{in W/m}^2 \quad (4.2-2)$$

Der Gesamt-Wärmestrom wird aus der Wärmestromdichte und der Wandfläche ermittelt:

$$\dot{Q}_T = \dot{q}_T \cdot A \quad \text{in W} \quad (4.2-3)$$

Der Gesamt-Wärmestrom ist in diesem Fall gleich dem Wärmestrom durch die Transmission, da keine Sonneneinstrahlung, Luftzufuhr oder innere Wärmelasten auftreten:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_T \quad (4.2-4)$$

Für die Berechnung des U-Werts werden die beiden Wärmeübergangskoeffizienten α_E und α_I bzw. deren Kehrwerte, die Wärmeübergangswiderstände R_E und R_I benötigt, die die Wärmeübertragung zwischen Bauteiloberflächen und Luft beschreiben. [Recknagel 2009, Seite 419] gibt dazu folgende Werte an:

Wärmeübergangswiderstand $m^2.K/W$	Richtung des Wärmestroms		
	aufwärts	horizontal	abwärts
R_E (äußerer)	0,04		
R_I (innerer)	0,10	0,13	0,17

Tabelle 4.1: Wärmeübergangswiderstände

Aktuelle internationale Normen geben ebenfalls diese Werte an, z.B. [EN ISO 6946 (2008), Seite 9]. Teilweise werden aber auch weniger differenzierte Werte angegeben [EN ISO 10077-1 (2006), Seite 21]:

Lage des Fensters	Wärmeübergangswiderstand	
	raumseitig (R_I) $m^2.K/W$	außenseitig (R_A) $m^2.K/W$
Vertikal oder bei Neigung α der Verglasung zur Horizontalen derart, dass $90^\circ \geq \alpha \geq 60^\circ$ (Richtung des Wärmestroms $\pm 30^\circ$ zur horizontalen Ebene)	0,13	0,04
Horizontal oder bei Neigung α der Verglasung zur Horizontalen derart, dass $60^\circ > \alpha \geq 0^\circ$ (Richtung des Wärmestroms $> 30^\circ$ zur horizontalen Ebene)	0,10	0,04

Tabelle 4.2: Werte für Wärmeübergangswiderstände nach EN ISO 10077-1

Die ÖNORM H 6040 geht von leicht abweichenden Werten aus. Diese betragen für vertikale Bauteile bzw. horizontale Wärmeströme

$$\alpha_E = 23 \text{ W}/(m^2.K) \text{ und } \alpha_I = 8 \text{ W}/(m^2.K) \text{ bzw. } R_E = 0,043 \text{ m}^2.K/W \text{ und } R_I = 0,125 \text{ m}^2.K/W$$

In der Fachliteratur kann eine Veränderung der Werte beobachtet werden. Vor einigen Jahren wurden noch die Werte $\alpha_E = 23 \text{ W}/(m^2.K)$ und $\alpha_I = 8 \text{ W}/(m^2.K)$ für horizontale Wärmeströme angegeben, so wie sie auch in der ÖNORM eingesetzt werden (z.B. [Berber 1979, Seite 15]). In neuerer Literatur werden oft nicht mehr die Wärmeübergangskoeffizienten, sondern die Wärmeübergangswiderstände (also die Kehrwerte) angegeben. Diese betragen laut [Berber 1986, Seite 14; Recknagel, Seite 419 oder EN ISO 10077-1, Seite 21] für horizontale Wärmeströme

$$R_E = 0,04 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W} \text{ und } R_I = 0,13 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$$

[Berber 1986] bezieht sich dabei auf die DIN 4108. Diese Wärmeübergangswiderstände entsprechen den Wärmeübergangskoeffizienten

$$\alpha_E = 25 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}) \text{ und } \alpha_i = 7,69 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$$

Die Überlegungen zu Wärmeübergangswiderständen bzw. -koeffizienten gehen auf die Forschungsarbeit von Dr. Ing. Walter Jürges (Assistent an der Technischen Hochschule Karlsruhe) zurück. Dieser hat bereits 1924 Ergebnisse von Messungen veröffentlicht [Jürges 1924], durch die er Werte für den Wärmeübergang ermitteln konnte. Unter den von Jürges festgelegten Bedingungen:

- ebene senkrechte Wand an ruhender Luft und an einen daran vorbeistreichenden Luftstrom (erzwungene Konvektion),
- Wandgröße 0,5 x 0,5 m,
- Temperatur Wand 50°C,
- Temperatur Luft 20°C,
- 1 Atmosphäre Luftdruck,

ergeben die Messungen die folgenden Werte für die Wärmeübergangskoeffizienten [Jürges 1924, Seite 51] mit v als mittlerer Geschwindigkeit des Luftstroms:

- Hydraulisch glatte Oberfläche: $\alpha = 6,122 v^{0,775} + 4,41 e^{-0,6v} \text{ WE St}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ (4.2-5)

- Gewalzte Oberfläche: $\alpha = 6,137 v^{0,780} + 4,60 e^{-0,6v} \text{ WE St}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ (4.2-6)

- Stark gerauhte Oberfläche: $\alpha = 6,469 v^{0,784} + 5,03 e^{-0,6v} \text{ WE St}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ (4.2-7)

Jürges gibt für die Praxis folgende Näherungsgleichungen an:

Für $v \leq 5 \text{ m/s}$:

- Hydraulisch glatte Oberfläche: $\alpha = 4,8 + 3,4 v \text{ WE St}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ (4.2-8)

- Gewalzte Oberfläche: $\alpha = 5,0 + 3,4 v \text{ WE St}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ (4.2-9)

- Stark gerauhte Oberfläche: $\alpha = 5,3 + 3,6 v \text{ WE St}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ (4.2-10)

Für $v > 5 \text{ m/s}$:

- Hydraulisch glatte Oberfläche: $\alpha = 6,12 v^{0,78} \text{ WE St}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ (4.2-11)

- Gewalzte Oberfläche: $\alpha = 6,14 v^{0,78} \text{ WE St}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ (4.2-12)

- Stark gerauhte Oberfläche: $\alpha = 6,47 v^{0,78} \text{ WE St}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ (4.2-13)

Da die 1924 verwendeten Einheiten nicht den heute einzusetzenden SI-Einheiten entsprechen, ist eine Umrechnung notwendig:

Alte Einheit		SI-Einheit		Umrechnungsfaktor
Kürzel	Bezeichnung	Kürzel	Bezeichnung	
WE (=kcal)	Wärmeeinheit	J	Joule	1 WE = 4186,8 J [Römpp 1998]
St	Stunden	s	Sekunden	1 St = 3600 s
m	Meter	m	Meter	ident
°C	Grad Celsius	K	Kelvin	keine Umrechnung, es handelt sich um Temperaturdifferenzen

Tabelle 4.3: Umrechnungsfaktoren alte Einheiten – SI-Einheiten

Unter Berücksichtigung der Umrechnungsfaktoren ergeben sich mit

$$\alpha_{\text{SI}} = \alpha_{\text{ALT}} \cdot \frac{4186,8}{3600} = \alpha_{\text{ALT}} \cdot 1,163 \quad (4.2-14)$$

folgende Werte:

- Hydraulisch glatte Oberfläche: $\alpha = 7,120 v^{0,775} + 5,13 e^{-0,6v} \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ (4.2-15)

- Gewalzte Oberfläche: $\alpha = 7,137 v^{0,780} + 5,35 e^{-0,6v} \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ (4.2-16)

- Stark gerauhte Oberfläche: $\alpha = 7,523 v^{0,784} + 5,85 e^{-0,6v} \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ (4.2-17)

Und für die Näherungsgleichungen nach Jürges:

Für $w \leq 5 \text{ m/s}$:

- Hydraulisch glatte Oberfläche: $\alpha = 5,6 + 3,9 v \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ (4.2-18)

- Gewalzte Oberfläche: $\alpha = 5,8 + 3,9 v \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ (4.2-19)

- Stark gerauhte Oberfläche: $\alpha = 6,2 + 4,2 v \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ (4.2-20)

Für $w > 5 \text{ m/s}$:

- Hydraulisch glatte Oberfläche: $\alpha = 7,12 v^{0,78} \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ (4.2-21)

- Gewalzte Oberfläche: $\alpha = 7,14 v^{0,78} \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ (4.2-22)

- Stark gerauhte Oberfläche: $\alpha = 7,52 v^{0,78} \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ (4.2-23)

Diese Werte decken sich mit Zitaten der Gleichungen nach Jürges in der Literatur [z.B. Böge, Seite 164], wobei in dieser Arbeit so wie bei Böge bei der Umrechnung tendenziell eher abgerundet wurde, da die vereinfachten Jürges-Gleichungen leicht überhöhte Werte gegenüber den genauen Gleichungen ergeben (z.B. $v=4$ m/s, stark geraut ergibt mit den genauen Gleichungen $\alpha = 22,84$ W/(m².K), mit den vereinfachten Gleichungen $\alpha = 23,00$ W/(m².K)).

Die für die Bauphysik interessanten Gleichungen sind jene für stark geraute Oberflächen. Die Überprüfung der in der Literatur verwendeten äußeren Wärmeübergangskoeffizienten bzw. -widerstände lassen erkennen, dass früher (z.B. [ÖNORM H 6040 (1997)] oder [Berber 1979]) der äußere Wärmeübergangskoeffizient offensichtlich mit einer durchschnittlichen Windgeschwindigkeit von 4 m/s berechnet wurde, mittlerweile (z.B. [Berber 1986]) aber mit einer durchschnittlichen Windgeschwindigkeit von ca. 4,5 m/s gerechnet wird (diese Geschwindigkeit ergibt ein $\alpha_E = 25,1$ W/(m².K) bzw. mit den genaueren Formeln $\alpha_E = 24,86$ W/(m².K)).

Die Angaben über den inneren Wärmeübergangskoeffizienten lassen auf die Annahme von Geschwindigkeiten des Luftstroms von früher 0,43 m/s bzw. jetzt 0,35 m/s schließen.

Die zugrunde gelegten Geschwindigkeiten des Luftstroms sind so gewählt, dass sie möglichst repräsentativ für realistisch auftretende mittlere Windgeschwindigkeiten in Gebäudenähe bzw. im Gebäudeinneren sind. Diese Forderung zeigt schon, dass die Wahl der „richtigen“ Windgeschwindigkeit schwer fällt bzw. kaum möglich sein wird. Beide Werte für den äußeren Wärmeübergangskoeffizienten (früher 4 m/s, jetzt 4,5 m/s) scheinen plausibel, wobei die Erhöhung der gewählten Geschwindigkeit auf den Wunsch nach größeren Sicherheiten in den Berechnungen hinweisen könnte. Höhere Windgeschwindigkeiten und damit geringere Wärmeübergangswiderstände führen im Allgemeinen zu höheren Heizlasten, in vielen Fällen wahrscheinlich auch zu höheren Kühllasten. Dem gegenüber steht wiederum die leichte Verringerung der Windgeschwindigkeit bei der Berechnung des inneren Wärmeübergangskoeffizienten.

Nach den zur Verfügung stehenden Unterlagen ist eine Beurteilung, ob die „alten“ oder die „neuen“ Werte „richtiger“ sind, nicht möglich. Es kann somit davon ausgegangen werden, dass Berechnungen mit den „alten“ Werten durchaus auch als „richtig“ gelten können.

Alle in dieser Arbeit angeführten Wärmeübergangskoeffizienten bzw. -widerstände gelten für die gemeinsame Betrachtung von Konvektion und langwelliger Strahlung. Die aktuelle [EN ISO 6946 (2008)] schlägt zu den bereits genannten Werten auch Berechnungsmethoden für genauere

Wärmeübergangswiderstände vor. Dabei wird zwischen Wärmeübergang durch Konvektion und durch Strahlung unterschieden. Es werden verschiedene Möglichkeiten für Bauteile mit ebenen und solche mit nicht-ebenen Oberflächen angeboten. Auch die weiter oben diskutierte Abhängigkeit des Wärmeübergangswiderstands von der Windgeschwindigkeit wird behandelt, wobei die Ergebnisse der Norm mit den Ergebnissen der Jürges-Gleichungen sehr gut übereinstimmen (für ≥ 3 m/s stimmen die Normergebnisse [EN ISO 6946 (2008), Seite 19, Tabelle A.2] exakt mit den Ergebnissen der Jürges-Gleichungen überein). Nach wie vor ist aber das Problem der Wahl der einzusetzenden Windgeschwindigkeit nicht geklärt. Die EN gibt vor, dass die in Tabelle 4.1 angeführten Standardwerte zu verwenden sind, „*wenn keine besonderen Angaben über Randbedingungen vorliegen*“ [EN ISO 6946 (2008), Seite 8]. Es ist davon auszugehen, dass in den meisten praktischen Fällen solche Randbedingungen (z.B. gemessenen mittlere Windgeschwindigkeiten) nicht vorliegen.

4.3 Statische Wärmezufuhr in einen Raum mit Lüftung

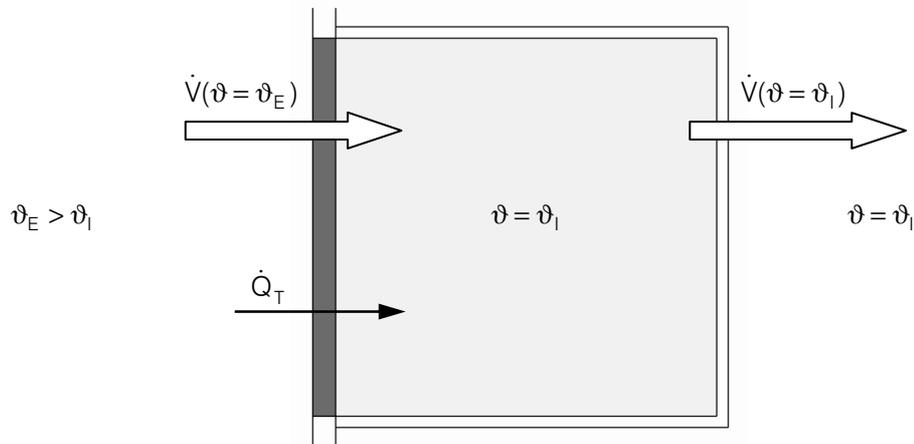


Abb. 4.2: Statische Wärmezufuhr in einen Raum mit Lüftung

Der Gesamt-Wärmestrom \dot{Q} ergibt sich aus der Summe des Transmissionswärmestroms und der zugeführten Wärme durch den Luftstrom:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_T + \dot{Q}_V \quad \text{in W} \quad (4.3-1)$$

Die durch die Außenwand geleitete Wärme infolge der höheren Außenlufttemperatur kann wie im letzten Kapitel berechnet werden.

Der spezifische Wärmestrom durch die Luftzufuhr wird wie folgt berechnet:

$$q_V = c_p \cdot (\vartheta_E - \vartheta_1) \quad \text{in kJ/kg} \quad (4.3-2)$$

Da die Luft mit Außenlufttemperatur zugeführt wird und mit Innenlufttemperatur den Raum wieder verlässt, wird für c_p der Wert für die mittlere Temperatur zwischen Außenluft- und Innenlufttemperatur eingesetzt.

Für die Berechnung der Gesamt-Wärmezufuhr durch die Lüftung wird der Massenstrom benötigt. Dieser wird über die Luftdichte bei Außenlufttemperatur berechnet, da von der Messung des Volumenstroms in der Nähe der Einlassöffnungen der Lüftungsanlagen – und damit bei annähernd Außenlufttemperatur – ausgegangen wird.

$$\dot{m} = \dot{V} \cdot \rho_{\text{Luft, Außentemp}} \quad (4.3-3)$$

Damit ergibt sich für den gesamten Wärmestrom über die Luftzufuhr:

$$\dot{Q}_V = q_V \cdot \dot{m} \quad \text{in kJ/h} \quad (4.3-4)$$

bzw.

$$\dot{Q}_V = q_V \cdot \dot{m} \cdot \frac{1000}{3600} \quad \text{in W} \quad (4.3-5)$$

4.4 Statischer Wärmedurchgang durch eine Wand mit Einstrahlung

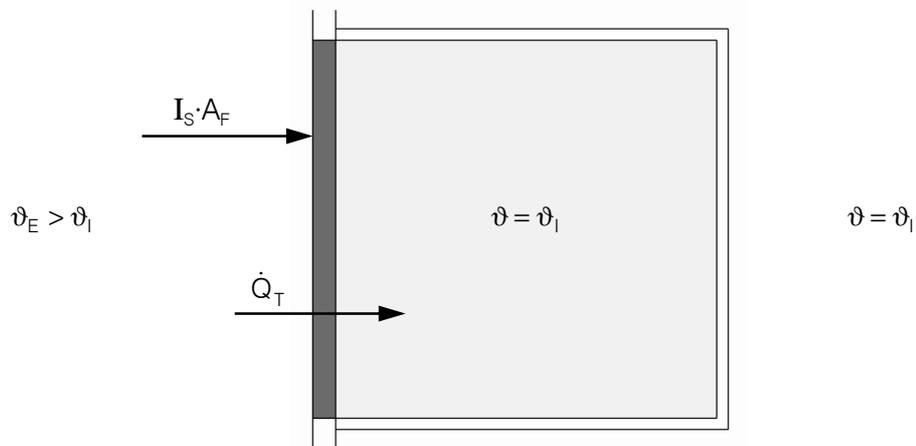


Abb. 4.3: Statischer Wärmedurchgang durch eine Wand mit Einstrahlung

Die händische Berechnung erfolgt nach dem Schema der folgenden Skizze:

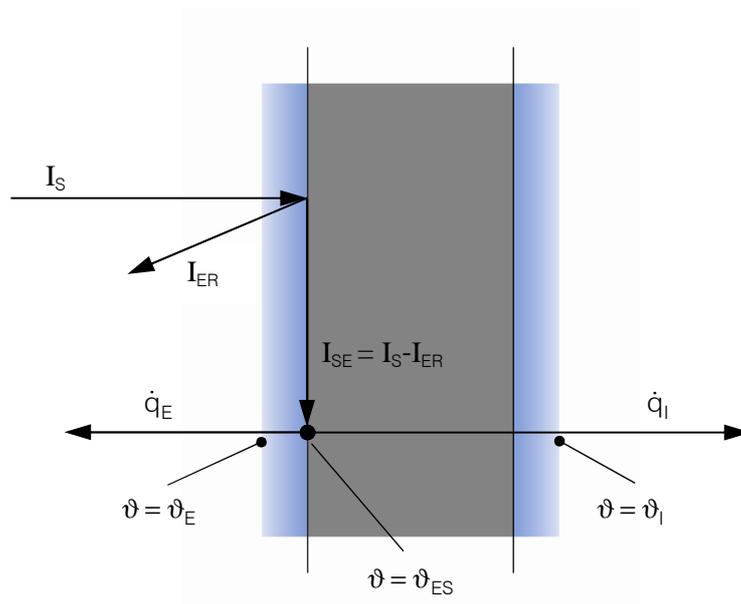


Abb. 4.4: Skizze der Außenwand – Berechnungsschema

Es wird ein „Knoten“ an der äußeren Oberfläche der Außenwand angenommen, in den die Energie der Einstrahlung zugeführt wird und entsprechend den Wärmeleit- und Wärmeübergangs-

widerständen aufgeteilt in die Umgebung und in den Innenraum abfließt. Abhängig von der Außenlufttemperatur und der Einstrahlung kann dabei \dot{q}_E auch negativ sein (d.h. durch eine hohe Außenlufttemperatur fließt von außen Energie dem Knoten zu). Die durch die Wand transmittierte Wärmestromdichte \dot{q}_T infolge der Außenluft-Innenluft-Temperaturdifferenz (siehe Kapitel 4.2) ist hier somit schon in \dot{q}_E enthalten. Aus dem Schema folgen die Gleichungen:

Gleichgewicht im Knoten:

$$I_{SE} = \dot{q}_E + \dot{q}_I \quad (4.4-1)$$

Der absorbierte Teil der Einstrahlung errechnet sich aus der Einstrahlung und dem Absorptionsgrad der Außenoberfläche der Wand:

$$I_{SE} = I_S - I_{ER} = I_S \cdot \alpha_{Wand} \quad (4.4-2)$$

Die Wärmestromdichten werden so wie in den vorigen Kapiteln berechnet, wobei statt dem Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) mit Teil-Wärmedurchgangswiderständen gerechnet wird. Da der Knoten an der äußeren Wandoberfläche liegt, entspricht der äußere Teil-Wärmedurchgangswiderstand R_{UE} dabei dem äußeren Wärmeübergangswiderstand, der innere Teil-Wärmedurchgangswiderstand R_{UI} beinhaltet den Widerstand der Wand und den inneren Wärmeübergangswiderstand:

$$\dot{q}_I = (\vartheta_{ES} - \vartheta_I) \cdot \frac{1}{R_{UI}} \quad (4.4-3)$$

$$\dot{q}_E = (\vartheta_{ES} - \vartheta_E) \cdot \frac{1}{R_{UE}} \quad (4.4-4)$$

$$R_{UI} = \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_I} \quad (4.4-5)$$

$$R_{UE} = \frac{1}{\alpha_E} \quad (4.4-6)$$

Der Zusammenhang zwischen U-Wert und Wärmedurchgangswiderständen ist einfach darstellbar:

$$U = \frac{1}{R_{UE} + R_{UI}} \quad (4.4-7)$$

Durch Umformen wird eine Formel für \dot{q}_I abgeleitet:

$$(4.4-4) \quad \vartheta_{ES} = \dot{q}_E \cdot R_{UE} + \vartheta_E \quad (4.4-8)$$

$$(4.4-8) + (4.4-1) \quad \vartheta_{ES} = (I_{SE} - \dot{q}_I) \cdot R_{UE} + \vartheta_E \quad (4.4-9)$$

$$(4.4-3) + (4.4-9) \quad \dot{q}_I = [(I_{SE} - \dot{q}_I) \cdot R_{UE} + \vartheta_E - \vartheta_I] \cdot \frac{1}{R_{UI}} \quad (4.4-10)$$

$$\dot{q}_I = \frac{I_{SE} \cdot R_{UE} + \vartheta_E - \vartheta_I}{R_{UI} + R_{UE}} \quad (4.4-11)$$

Diese Berechnungsmethode entspricht im Prinzip der Verwendung der sogenannten „Sonnenlufttemperatur“ ϑ_{SL} :

$$\vartheta_{SL} = \vartheta_E + \frac{\alpha_{Wand} \cdot I_S}{\alpha_E} \quad [\text{Berber 1986, Seite 21}] \quad (4.4-12)$$

Bei dieser Methode wird die Temperatur berechnet, die die Außenluft besitzen müsste, um ohne Einstrahlung den gleichen Wärmestrom durch die Wand hervorzurufen. Die Sonnenlufttemperaturmethode ergibt idente Ergebnisse im Vergleich zu der hier gezeigten Methode.

Der Gesamt-Wärmestrom in den Raum wird wieder aus der Wärmestromdichte und der Wandfläche ermittelt:

$$\dot{Q}_I = \dot{q}_I \cdot A \quad \text{in W} \quad (4.4-13)$$

4.5 Statischer Wärmedurchgang durch ein Fenster ohne Einstrahlung

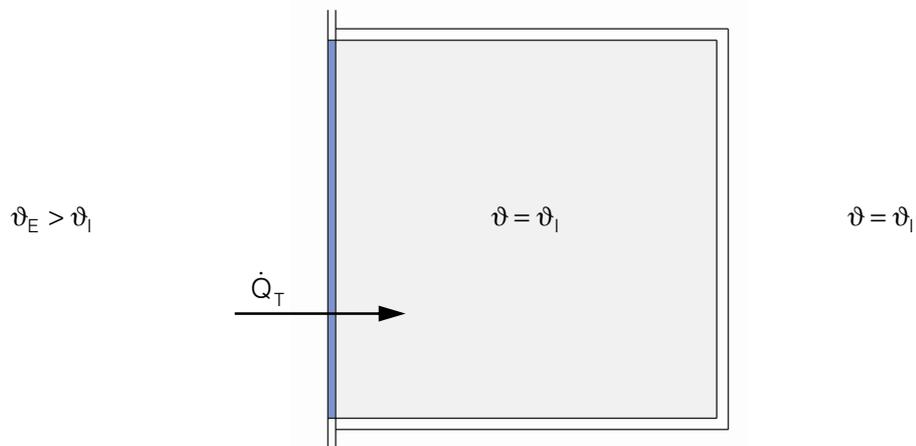


Abb. 4.5: Statischer Wärmedurchgang durch ein Fenster ohne Einstrahlung

Da es sich um einen statischen Fall handelt (alle Parameter konstant) und keine Einstrahlung auftritt, können für den Wärmestrom in den Raum so wie bei einem opaker Bauteil die im Kapitel 4.2 angeführten Formeln verwendet werden.

4.6 Statischer Wärme- und Strahlungsdurchgang durch ein Fenster

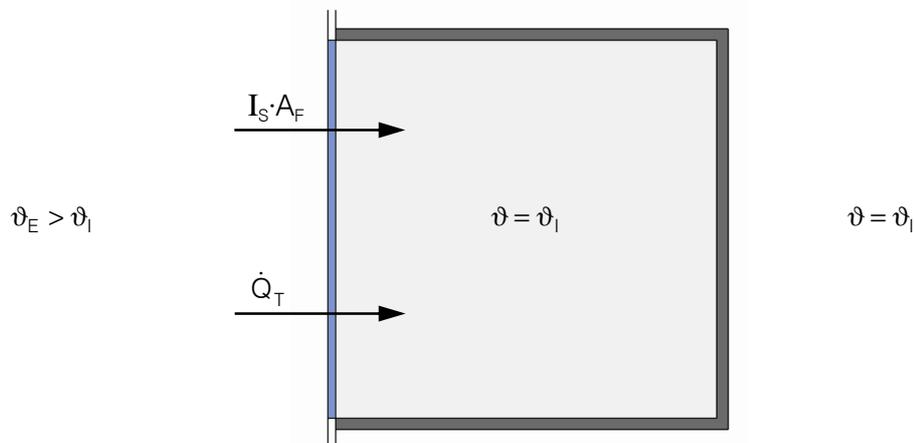


Abb. 4.6: Statischer Wärme- und Strahlungsdurchgang durch ein Fenster

4.6.1 Allgemeines

Beim Wärme- und Strahlungsdurchgang durch ein Fenster müssen mehrere Punkte berücksichtigt werden. Angenommen wird hier eine einfache Glasscheibe ohne Fensterrahmen, die sich über die gesamte Front des Raums erstreckt. Ein Teil der Sonneneinstrahlung I_S wird im Glas absorbiert, ein Teil gelangt in den Raum. Dort wird ein Großteil der Einstrahlung durch Absorption an den Wänden und an der Möblierung in Wärme umgewandelt. Ein kleiner Teil wird allerdings reflektiert und erreicht wieder das Fenster. Dadurch, dass ein Teil dieser Strahlung durch das Fenster nach außen gelangt, wird die Kühllast ein wenig reduziert. Durch die im Fenster absorbierte Einstrahlung und Reflexstrahlung erhöht sich die Temperatur der Fensterscheibe. Das beeinflusst auch den Wärmefluss, der durch die Temperaturdifferenz zwischen Außenluft- und Innenlufttemperatur entsteht.

Es müssen hier also die Außenlufttemperatur, die Einstrahlung, die Wechselwirkungen zwischen beiden, die Auswirkungen im Innenraum und der Einfluss der Rückstrahlung aus dem Raum berücksichtigt werden. Da die Zusammenhänge und Wechselwirkungen dieser Vorgänge sehr komplex sind, kann eine händische Rechnung nur eine Näherung darstellen. Auch computerunterstützte Berechnungen stellen im Allgemeinen nur Näherungen dar. Es ist davon auszugehen, dass in sehr einfachen Fällen – sozusagen unter Laborbedingungen – eine exakte

Berechnung möglich ist. Um realitätsnahe Ergebnisse zu erhalten, werden in dieser Arbeit aber möglichst viele Einflussfaktoren berücksichtigt.

Manche, vor kurzem veröffentlichte Normen beruhen auf einem neuen Berechnungsansatz. Dabei werden die Wärmeabgaben durch Konvektion, Leitung und Strahlung getrennt berechnet (z.B. ist die Berechnung der Strahlung nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz durchzuführen). Da dieser Ansatz noch nicht weit verbreitet ist, obwohl durch ihn in einigen Fällen eine Erhöhung der Genauigkeit erzielt werden könnte, sind wenige bis keine gesicherten Daten im Zusammenhang mit Gebäuden und deren Umgebung (z.B. langwellige Einstrahlung aus der Umgebung oder vom Himmel) erhältlich. Daher konnte dieser Ansatz in dieser Arbeit noch nicht angewendet werden.

Für eine bessere Übersicht wird das System Raum in zwei Teilsysteme unterteilt. Das erste Teilsystem beinhaltet das Fenster (siehe Kapitel 4.6.2), das zweite Teilsystem den Innenraum (siehe Kapitel 4.6.4). Dadurch kann in beiden Systemen mit flächenspezifischen Größen gerechnet werden. Im Teilsystem Fenster beziehen sich die Größen auf einen m^2 Fensterfläche, im Teilsystem Innenraum beziehen sie sich auf einen m^2 Wandoberfläche. An der Systemgrenze (siehe Kapitel 4.6.3) zwischen den beiden Teilsystemen werden die Größen umgerechnet. Durch diese Vorgaben und der damit verbundenen Möglichkeit, in beiden Teilsystemen mit spezifischen Größen rechnen zu können, wird die Ableitung der Gleichungen wesentlich erleichtert und verkürzt.

Beide Teilsysteme zusammen bilden das System Raum, das durch die Systemgrenze an der äußeren Fensterglasoberfläche von der Umgebung abgegrenzt wird (siehe Kapitel 4.6.5). Da die Innenwände als adiabatisch angenommen werden (in den Nachbarräumen herrschen die gleichen Bedingungen), können nur an der Grenzfläche zwischen Fensterglasscheibe und Umgebung Energieströme entstehen.

4.6.2 Teilsystem Fenster

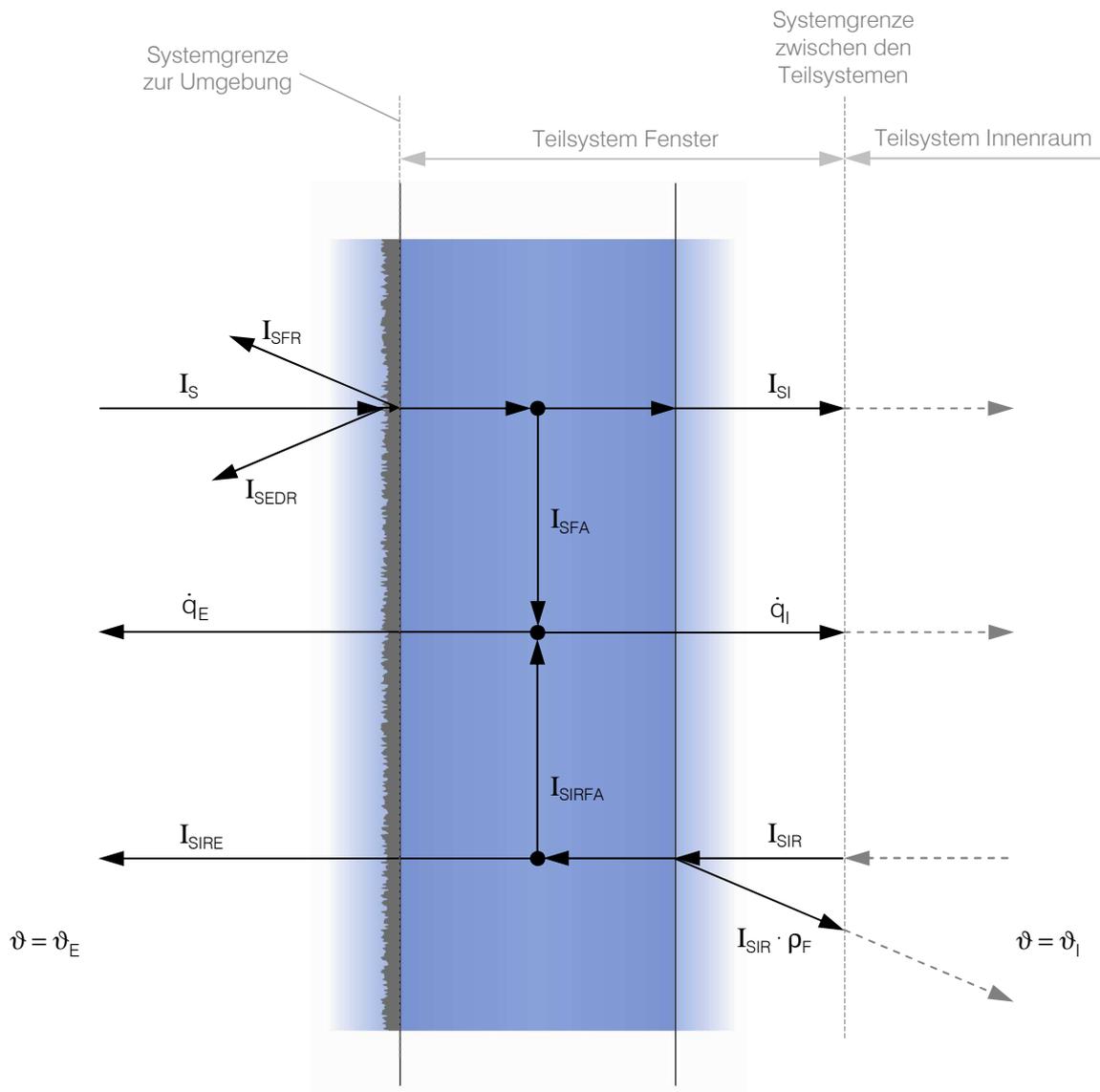


Abb. 4.7: Teilsystem Fenster

In der Glasscheibe fallen mehrere Wärme- und Strahlungsströme zusammen. Die Vorgänge werden anhand der Skizze erläutert (alle flächenspezifischen Größen beziehen sich in diesem Teilsystem auf einen m^2 Fensterfläche):

Die von außen senkrecht einfallende Sonneneinstrahlung I_s wird auf ihrem Weg bis in den Raum mehrmals abgeschwächt. Dabei muss davon ausgegangen werden, dass jedes der Umwelt

ausgesetzte Fensterglas von einer dünnen Staub- bzw. Schmutzschicht überzogen ist, die die Einstrahlung durch Reflexion und Absorption abschwächt (I_{SEDR}). Danach erfolgt die Reflexion an der Glasoberfläche. Von der restlichen Strahlung wird ein Teil beim Durchgang durch das Glas absorbiert (I_{SFA}). An der gegenüber liegenden Oberfläche des Glases erfolgt wieder eine Reflexion. Der dabei reflektierte Einstrahlungsanteil durchläuft wieder das Glas, dabei wird ein Teil absorbiert und der Rest wird wieder an der außen liegenden Oberfläche des Glases reflektiert. Dieser Vorgang wiederholt sich so lange, bis die gesamte Einstrahlung durch Absorption in Wärme umgewandelt wurde oder das Glas verlassen hat. I_{SFR} stellt dabei die Summe der in die Umgebung zurückreflektierten Einstrahlung dar, I_{SFA} ist die Summe der absorbierten Einstrahlung und I_{SI} ist die Summe der in den Raum gelangenden Einstrahlung.

Der absorbierte Anteil der Einstrahlung (I_{SFA}) führt zu einer Erwärmung des Glases und damit zu einer teilweise an den Innenraum abgegebenen Wärmestrahlung (sekundäre Wärmestrahlung). Mit der Erwärmung des Glases beeinflusst die Absorption auch den Wärmestrom (infolge der Temperaturdifferenz zwischen Außenluft und Innenluft) durch das Glas. Auch die Strahlung, die durch Reflexion der Sonneneinstrahlung an den Umschließungsflächen des Raums von innen zum Fenster zurückreflektiert wird (I_{SIR}), erhöht durch Absorption die Glastemperatur.

Die Einstrahlung I_{SI} beinhaltet die sekundäre Abstrahlung des Glases durch eine erhöhte Glastemperatur nicht. Diese ist in dieser Betrachtungsweise im Wärmestrom enthalten (der Wärmestrom beinhaltet den Energietransport in den Raum durch Konvektion, Wärmeleitung und sekundäre Strahlung).

Werden die Gleichungen für das Gleichgewicht in einem Knoten im Fenster aufgestellt, führt das Lösen dieser Gleichungen zu dem Wärmestrom in den Raum, der durch die absorbierte Strahlung und den Temperaturunterschied zwischen Außen- und Innenluft ($\vartheta_E - \vartheta_I$) verursacht wird.

Im Folgenden werden die beschriebenen Vorgänge durch Gleichungen dargestellt:

Gleichgewicht im Knoten:

$$I_{SFA} + I_{SIRFA} = \dot{q}_E + \dot{q}_I \quad (4.6-1)$$

Der in den Raum gelangende Anteil der Sonneneinstrahlung I_{SI} :

$$I_{SI} = I_S - I_{SEDR} - I_{SFR} - I_{SFA} \quad (4.6-2)$$

I_{SI} kann aber auch über die Transmissionsgrade berechnet werden:

$$I_{SI} = I_S \cdot \tau_D \cdot \tau_{F,Dir} \quad (4.6-3)$$

Der Transmissionsgrad für den Staub τ_D wird nur bei der Einstrahlung von außen berücksichtigt. Der Effekt auf die gering ausfallende Rückstrahlung vom Raum nach außen ist vernachlässigbar klein, ebenso wie die Auswirkung auf den Wärmeüber- bzw. Wärmedurchgang. Ebenso wird die Erwärmung des Staubes durch die absorbierte Einstrahlung und deren Auswirkung auf die Temperatur des Glases vernachlässigt. Da der Staub nur stellenweise das Glas verdeckt und keine Messwerte diesbezüglich verfügbar sind, wird auch die Auswirkung der Staubschicht auf den Reflexionsgrad der Fensterscheibe vernachlässigt.

Die Auswirkungen der im Inneren einer Glasscheibe auftretenden Reflexionen getrennt zu betrachten ist sehr aufwändig. Herstellerangaben zu Reflexion, Transmission und Absorption für Energiewerte (nicht zu verwechseln mit Lichtwerten, da diese nur den sichtbaren Strahlungsanteil berücksichtigen) beziehen sich aber auf die Gesamtwirkung des Glases auf die Einstrahlung. Die Werte I_{SFR} , I_{SFA} und I_{SI} berücksichtigen bzw. beinhalten diese Effekte also bereits, wenn mit den Energiewerten der Hersteller gerechnet wird.

Die Anteile der Sonneneinstrahlung von außen und der aus dem Raum rückreflektierten Sonneneinstrahlung, die durch Absorption im Glas zu einer Erhöhung der Glastemperatur führen, werden mit Hilfe der Absorptionsgrade des Glases ermittelt. Dabei wird für die senkrecht einfallende Sonneneinstrahlung der entsprechende Messwert des Herstellers eingesetzt ($\alpha_{F,Dir}$), für die diffus aus dem Innenraum einfallende Rückstrahlung muss der Messwert entsprechend adaptiert werden (α_F , siehe 4.6.6):

$$I_{SFA} = I_S \cdot \tau_D \cdot \alpha_{F,Dir} \quad (4.6-4)$$

$$I_{SIRFA} = I_{SIR} \cdot \alpha_F \quad (4.6-5)$$

Für die aus dem Knoten abfließenden Wärmeströme werden die gleichen Formeln eingesetzt wie in Kapitel 4.4, wobei die Wärmedurchgangswiderstände entsprechend adaptiert werden müssen. Dabei wird näherungsweise die Wärmeleitung zwischen Scheibenmitte und Scheibenoberfläche eingesetzt:

$$\dot{q}_E = (\vartheta_F - \vartheta_E) \cdot \frac{1}{R_{UE}} \quad (4.6-6)$$

$$\dot{q}_I = (\vartheta_F - \vartheta_I) \cdot \frac{1}{R_{UI}} \quad (4.6-7)$$

$$R_{UE} = \frac{\frac{1}{2}d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_E} \quad (4.6-8)$$

$$R_{UI} = \frac{\frac{1}{2}d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_I} \quad (4.6-9)$$

Der Zusammenhang zwischen U-Wert und Wärmedurchgangswiderständen ist wieder:

$$U = \frac{1}{R_{UE} + R_{UI}} \quad (4.6-10)$$

Aus Gleichungen 4.6-1 bis 4.6-10 kann eine Formel für den Wärmestrom in den Raum abgeleitet werden:

$$(4.6-6) \quad \vartheta_F = \dot{q}_E \cdot R_{UE} + \vartheta_E \quad (4.6-11)$$

$$(4.6-1) \quad \dot{q}_E = I_{SFA} + I_{SIRFA} - \dot{q}_I \quad (4.6-12)$$

$$(4.6-12) + (4.6-7) \quad \dot{q}_E = I_{SFA} + I_{SIRFA} - (\vartheta_F - \vartheta_I) \cdot \frac{1}{R_{UI}} \quad (4.6-13)$$

$$+ (4.6-4), (-5), (-11) \quad \dot{q}_E = I_S \cdot \tau_D \cdot \alpha_{F,Dir} + I_{SIR} \cdot \alpha_F - (\dot{q}_E \cdot R_{UE} + \vartheta_E - \vartheta_I) \cdot \frac{1}{R_{UI}} \quad (4.6-14)$$

$$(4.6-14) \quad \dot{q}_E = \frac{I_S \cdot \tau_D \cdot \alpha_{F,Dir} + I_{SIR} \cdot \alpha_F - (\vartheta_E - \vartheta_I) \cdot \frac{1}{R_{UI}}}{1 + \frac{R_{UE}}{R_{UI}}} \quad (4.6-15)$$

Der Strahlungsdurchgang durch das Glas kann grundsätzlich auch mit dem von Herstellern meist angegebenen g-Wert (Gesamtenergiedurchlassgrad) gerechnet werden. Der g-Wert wird laut [EN 410 (1998), Seite 6] definiert als: „die Summe des direkten Strahlungstransmissionsgrades τ_e , und des sekundären Wärmeabgabegrades q_i , der Verglasung nach innen berechnet, letzterer bedingt durch den Wärmetransport infolge Konvektion und langwelliger IR-Strahlung des Anteils der auftretenden Strahlung, der von der Verglasung absorbiert wird: $g = \tau_e + q_i$ “. Der g-Wert berücksichtigt damit also auch die durch die Absorption im Glas (und damit durch die Glas-erwärmung) in den Innenraum abgegebene Wärmestrahlung (sekundäre Wärmestrahlung).

Da aber bei der Überlagerung von Sonneneinstrahlung und Lufttemperaturdifferenz zwischen Umgebung und Innenraum getrennte Werte für Absorption und Strahlungstransmission benötigt werden, ist der Einsatz des g-Wertes hier nicht zielführend (q_i beinhaltet die sekundäre Wärmestrahlung bereits, daher müsste diese separat wieder abgezogen werden). In dieser Arbeit wird deshalb die Transmission und die Absorption des Glases mit Hilfe des Absorptionsgrades und des Transmissionsgrades getrennt berechnet.

4.6.3 Systemgrenze Fenster – Innenraum

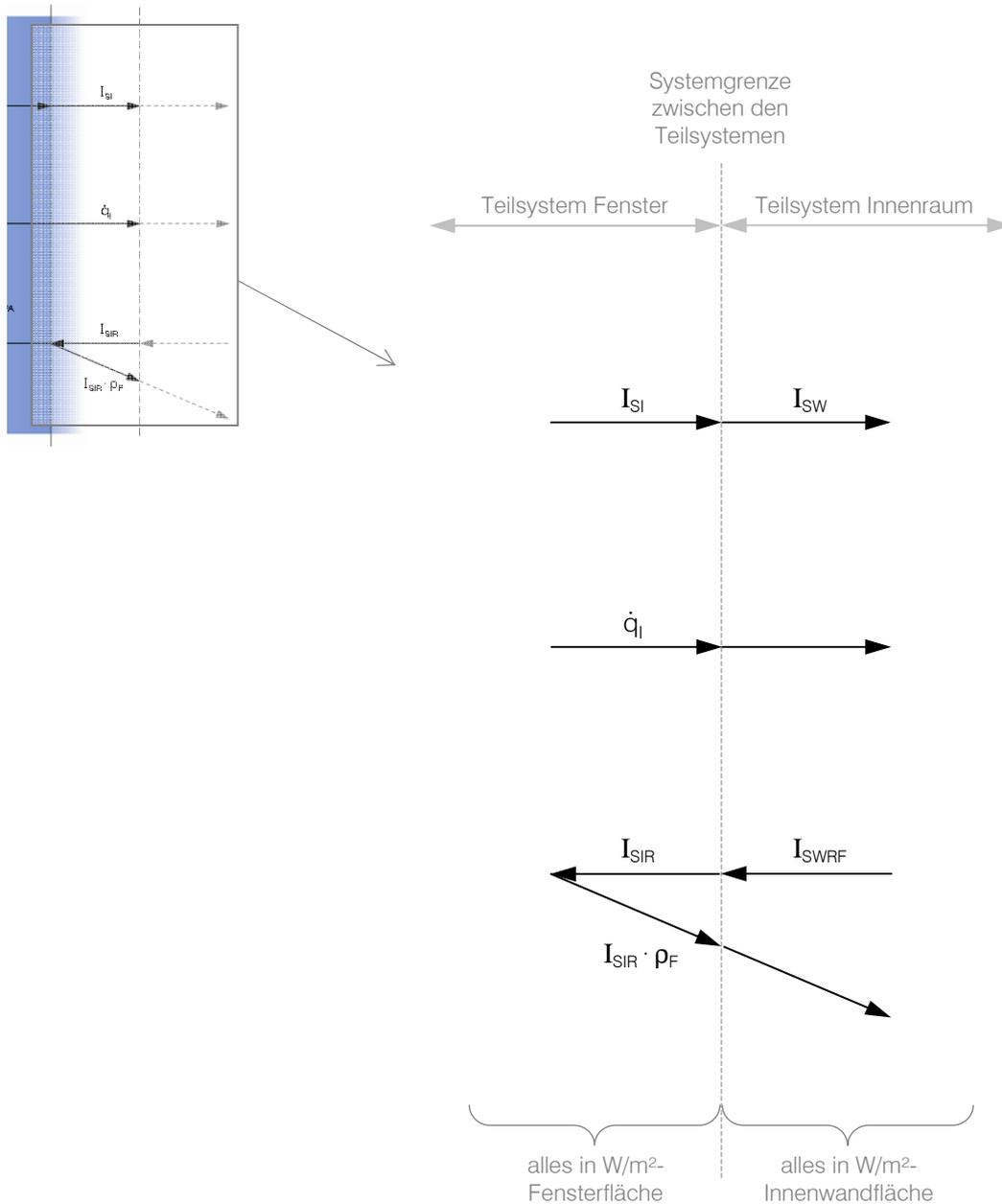


Abb. 4.8: Systemgrenze Fenster – Innenraum

Die Systemgrenze wird extra behandelt, da hier Umrechnungen zwischen den Größen des Teilsystems Fenster und des Teilsystems Innenraum erfolgen müssen. Im Teilsystem Fenster beziehen sich die Größen auf die Fensterfläche (alle Größen in W/m²-Fensterfläche), im Teilsystem

Innenraum beziehen sich die Größen auf die Innenwandfläche (alle Größen in W/m^2 -Innenwandfläche). Diese Vorgehensweise erlaubt es, in beiden Systemen in W/m^2 zu rechnen.

Wie die Skizze der Systemgrenze zwischen Fenster und Innenraum zeigt, sind für die Berechnungen im Innenraum I_{SI} und \dot{q}_I ausschlaggebend. Da aber im Innenraum (vereinfachend betrachtet) \dot{q}_I vollständig als Wärme freigesetzt wird, wird nur I_{SI} bei den Berechnungen im Innenraum benötigt. Als Ergebnis der Berechnungen im Teilsystem Innenraum wird I_{SIR} an die Berechnungen des Teilsystems Fenster zurückgegeben.

Die vollständige Freisetzung von \dot{q}_I als Wärme im Innenraum erfolgt allerdings nur unter der vereinfachenden Annahme, dass keine erhöhte Wärmerückstrahlung aus dem Raum auf das Fenster erfolgt. Eine Berücksichtigung dieser Rückstrahlung wäre nur bei getrennter Betrachtung von konvektivem, leitendem und strahlendem Wärmeaustausch zwischen Fenster und Innenraum bzw. zwischen Innenraum und Innenwänden und damit auch zwischen Fenster und Umgebung möglich. Dieser Ansatz ist noch sehr neu. Da dafür – wie bereits in Kapitel 4.6.1 erwähnt – einige wesentliche Daten (z.B. langwellige Strahlung vom Himmel) nicht zur Verfügung stehen, konnte eine Berechnung nach diesem neuen Ansatz in dieser Arbeit noch nicht durchgeführt werden. Daher wird vereinfachend angenommen, dass der Wärmestrom in den Raum vollständig an die Raumluft abgegeben wird. Da die Raumluft auf konstanter Temperatur gehalten wird, wird die zugeführte Wärme damit von der Kühlanlage sofort abgeführt und kann somit vollständig in die Kühllast eingerechnet werden kann.

An der Systemgrenze zwischen Fenster und Innenraum werden die Größen umgerechnet, um in beiden Systemen in W/m^2 rechnen zu können. Im Teilsystem Fenster wird somit in W/m^2 -Fensterfläche gerechnet, im Teilsystem Innenraum in W/m^2 -Innenwandfläche:

$$I_{SI} \cdot \frac{A_F}{A_W} = I_{SW} \quad (4.6-16)$$

$$I_{SIR} = I_{SWRF} \cdot \frac{A_W}{A_F} \quad (4.6-17)$$

4.6.4 Teilsystem Innenraum – Ableitung für die Rückstrahlung aus dem Raum

Im Teilsystem Innenraum müssen der durch das Glas in den Raum eintretende Wärmestrom, die Sonneneinstrahlung und die (durch diffuse Reflexion der Sonneneinstrahlung an den Innenwänden) wieder zum Fenster gelangende Rückstrahlung berücksichtigt werden. Es wird wieder angenommen, dass in den umliegenden Räumen die gleichen Bedingungen (Strahlung und Lufttemperatur) herrschen, wie im betrachteten Raum. Dadurch können die Innenwände als adiabab angesehen werden.

Die flächenspezifischen Größen in diesem Teilsystem (ausgenommen \dot{q}_l) beziehen sich auf einen m^2 Innenwandoberfläche.

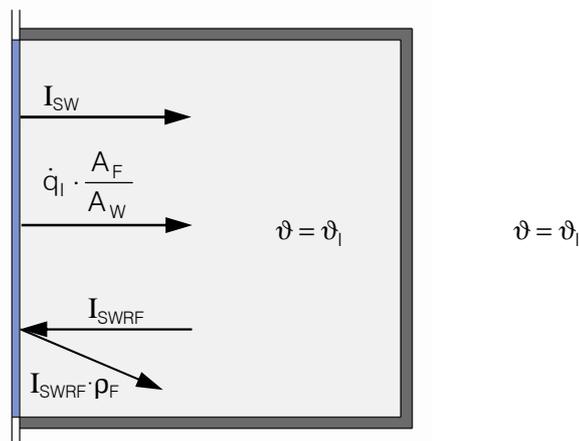


Abb. 4.9: Teilsystem Innenraum

Auf den eintretenden Wärmestrom muss hier nicht näher eingegangen werden, da er (vereinfacht gesehen) vollständig durch die Kühlanlage abtransportiert wird. Der eintretende Wärmestrom wird also unverändert komplett in der Kühlleistung berücksichtigt.

Die eintretende Sonneneinstrahlung muss dagegen näher betrachtet werden. Zwar fließt der größte Teil nach Absorption an den Wänden als Wärme in die Kühlleistung ein. Ein kleiner Teil erreicht aber nach diffuser Reflexion an den Wänden wieder das Fenster. Der beim Durchqueren des Glases absorbierte Anteil dieser reflektierten Strahlung wirkt sich im Fensterglas durch Erhöhung der beiden abfließenden Teil-Wärmeströme aus (dies wird im Teilsystem Fenster berücksichtigt). Da dabei auch der nach außen abfließende Wärmestrom ein wenig erhöht wird, führt die Berücksichtigung dieser Reflexion der Sonneneinstrahlung an den Wänden zu einer

geringfügigen Verringerung der Kühllast. Der Unterschied ist proportional dem Verhältnis aus Gesamt-Innenwandfläche und Fensterfläche. Je größer das Fenster im Vergleich zu den Innenwandflächen ist, desto mehr der von Innenflächen reflektierten Strahlung trifft auf das Fenster.

Die folgende Grafik veranschaulicht die Reflexionsvorgänge in einem Raum – alle weiteren Betrachtungen in diesem Kapitel beziehen sich allein auf Strahlung im Bereich des Sonnenspektrums. Auf dieses beziehen sich auch die angegebenen Absorptions- und Reflexionsgrade:

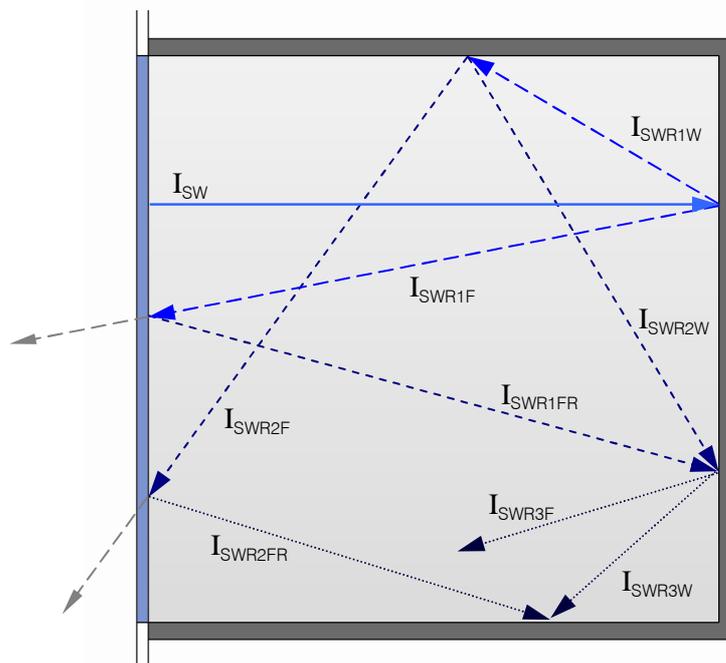


Abb. 4.10: Sonneneinstrahlung und diffuse Reflexionen im Innenraum – „realistische“ Darstellung

Die pro m^2 Innenwandfläche eintretende Strahlung I_{SW} gelangt an eine Innenwand und wird an dieser diffus reflektiert. Ein Teil (I_{SWR1F}) strahlt zurück zum Fenster, der Rest der reflektierten Strahlung (I_{SWR1W}) trifft andere Innenwände. Der an der Innenwand absorbierte Teil von I_{SW} erhöht die Temperatur der Innenwandoberfläche. Da die Innenwände als adiabat angenommen werden können, wird die absorbierte Wärme an die Innenraumluft abgegeben.

Näherungsweise wird hier angenommen, dass der Anteil der Strahlung, der bei der Reflexion an der Wand wieder in Richtung zu den übrigen Innenwänden hin reflektiert wird (hier also I_{SWR1W}), im nächsten Schritt gleich wieder an der gesamten Fläche der Innenwände reflektiert wird. Das ist zwar in üblichen Räumen aus ebenen Wänden nicht möglich, da bei ebenen Wänden die reflektierte Strahlung nur auf die umliegenden Wände treffen kann, aber nicht direkt auf die Wand,

von der die Strahlung ausgeht. Aber in der Praxis ist es kaum möglich und auch für die benötigte Genauigkeit der Berechnung nicht notwendig, jede Reflexion in die Anteile der strahlenden Wände und der angestrahlten Wände zu unterteilen. Daher wird als legitim angenommen, die reflektierte Strahlung auf die gesamte Innenwandfläche aufzuteilen.

Zweiter Schritt – Reflexionen zweiter Ordnung:

1. Die zum Fenster hin reflektierte Strahlung (I_{SWR1F}) wird an der Glasscheibe teilweise zurück in den Raum reflektiert (I_{SWR1FR}).
2. Die zu den Wänden hin reflektierte Strahlung (I_{SWR1W}) wird wieder an den Innenwänden reflektiert. Die dabei reflektierte Strahlung wird wieder unterteilt in den Teil, der das Fenster erreicht (I_{SWR2F}) und den Teil, der wieder zu den Innenwänden reflektiert wird (I_{SWR2W}).

Dritter Schritt – Reflexionen dritter Ordnung:

1. Die zum Fenster hin reflektierte Strahlung 2. Ordnung (I_{SWR2F}) wird an der Glasscheibe teilweise zurück in den Raum reflektiert (I_{SWR2FR}).
2. Die zu anderen Wänden hin reflektierte Strahlung 2. Ordnung (I_{SWR2W}) wird, so wie die im zweiten Schritt vom Fenster zurückreflektierte Strahlung 2. Ordnung (I_{SWR1FR}), wieder an den Innenwänden reflektiert. Die dabei reflektierte Strahlung wird wieder unterteilt in den Teil, der das Fenster erreicht (I_{SWR3F}) und den Teil, der wieder zu einer Innenwand reflektiert wird (I_{SWR3W}). Hier kann also I_{SWR2W} und I_{SWR1FR} vor der Reflexion an der Wand zusammengerechnet werden, da beide Strahlungen, statistisch über den gesamten Raum betrachtet, in gleicher Weise an den Wänden reflektiert bzw. absorbiert werden.

Die weiteren Schritte bzw. die Reflexionen höherer Ordnung verlaufen so wie der dritte Schritt.

Das Ziel ist die Ableitung einer Formel für die Summe über alle Ordnungen der zum Fenster gelangenden Rückstrahlungsanteile, um die gesamte Energie ermitteln zu können, die durch diese Rückstrahlung das Teilsystem Innenraum wieder verlässt.

Da es sich um eine unendliche Anzahl von Reflexionen handelt, kann die an der Glasscheibe reflektierte Strahlung einer Ordnung (z.B. I_{SWR1FR}) zum reflektierten Strahlungsanteil derselben Ordnung, die zur Wand hin reflektiert wird (z.B. I_{SWR1W}), hinzugezählt werden – statt wie in der Realität (so wie in der oben angeführten Darstellung) erst zum reflektierten Strahlungsanteil der nächsten Ordnung (z.B. I_{SWR2W}), die zur Wand hin reflektiert wird, hinzugezählt zu werden:

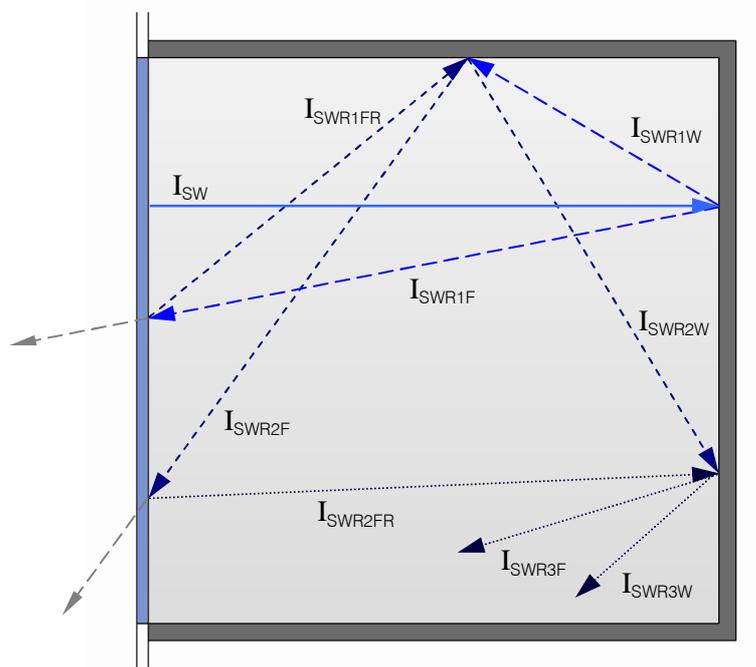


Abb. 4.11: Sonneneinstrahlung und diffuse Reflexionen im Innenraum für die Ableitung

Auf diese Weise ist es möglich, eine sehr schöne und kurze Formel für die Summe der Rückstrahlung zum Fenster abzuleiten:

Die Reflexion der ersten Ordnung wird berechnet mit:

$$I_{\text{SWR1}} = I_{\text{SW}} \cdot \rho_{\text{W}} \quad (4.6-18)$$

wobei sich diese aufteilt in zwei Anteile. Der erste Anteil (4.6-20) trifft auf das Fenster, der zweite Anteil (4.6-21) trifft wieder auf die Innenwände:

$$I_{\text{SWR1}} = I_{\text{SWR1F}} + I_{\text{SWR1W}} \quad (4.6-19)$$

mit:

$$I_{\text{SWR1F}} = I_{\text{SW}} \cdot \rho_{\text{W}} \cdot \frac{A_{\text{F}}}{A_{\text{G}}} \quad (4.6-20)$$

$$I_{\text{SWR1W}} = I_{\text{SW}} \cdot \rho_{\text{W}} \cdot \frac{A_{\text{W}}}{A_{\text{G}}} \quad (4.6-21)$$

Die zum Fenster hin reflektierte Strahlung wird vom Fenster wieder teilweise in den Raum zurückreflektiert. Dabei trifft die Strahlung auf die gesamte Wand:

$$I_{\text{SWR1FR}} = I_{\text{SWR1FR}} \cdot \rho_F \quad (4.6-22)$$

Die Reflexion der zweiten Ordnung berechnet sich zu:

$$I_{\text{SWR2F}} = (I_{\text{SWR1W}} + I_{\text{SWR1FR}}) \cdot \rho_W \cdot \frac{A_F}{A_G} \quad (4.6-23)$$

$$(4.6-23), (-21) + (-22) \quad I_{\text{SWR2F}} = I_{\text{SW}} \cdot \rho_W \cdot \frac{A_W}{A_G} \cdot \rho_W \cdot \frac{A_F}{A_G} + I_{\text{SWR1F}} \cdot \rho_F \cdot \rho_W \cdot \frac{A_F}{A_G} \quad (4.6-24)$$

$$(4.6-24) + (-20) \quad I_{\text{SWR2F}} = I_{\text{SWR1F}} \cdot \rho_W \cdot \frac{A_W}{A_G} + I_{\text{SWR1F}} \cdot \rho_F \cdot \rho_W \cdot \frac{A_F}{A_G} \quad (4.6-25)$$

$$I_{\text{SWR2F}} = I_{\text{SWR1F}} \cdot \rho_W \cdot \underbrace{\left(\frac{A_W}{A_G} + \rho_F \cdot \frac{A_F}{A_G} \right)}_B \quad (4.6-26)$$

Da I_{SWR2F} nur von der vorigen Ordnung, also von I_{SWR1F} , und von einer Konstanten abhängt, kann daraus geschlossen werden, dass I_{SWRnF} in jeder Ordnung n von der vorhergehenden Ordnung $(n-1)$, also von $I_{\text{SWR}(n-1)F}$, abhängt:

$$I_{\text{SWR}(n+1)F} = I_{\text{SWRnF}} \cdot B \quad (4.6-27)$$

Um dies verifizieren zu können, wird ein Beweis durch vollständige Induktion durchgeführt [Repetitorium 1995, Seite 20]: (4.6-27) gilt für $n=2$. Wenn (4.6-27) auch für $n=3$ gilt, gilt es nach dem Prinzip der vollständigen Induktion auch für alle $n > 3$. Es ist also zu überprüfen, ob (4.6-27) für $n=3$ gilt:

$$I_{\text{SWR3F}} = (I_{\text{SWR2W}} + I_{\text{SWR2FR}}) \cdot \rho_W \cdot \frac{A_F}{A_G} \quad (4.6-28)$$

$$+ (-20), (-21) \quad I_{\text{SWR3F}} = \left(I_{\text{SWR2W}} \cdot \frac{A_G}{A_F} \cdot \frac{A_W}{A_G} + I_{\text{SWR2F}} \cdot \rho_F \right) \cdot \rho_W \cdot \frac{A_F}{A_G} \quad (4.6-29)$$

$$I_{\text{SWR3F}} = I_{\text{SWR2F}} \cdot \frac{A_W}{A_G} \cdot \rho_W \cdot \frac{A_F}{A_G} + I_{\text{SWR2F}} \cdot \rho_F \cdot \rho_W \cdot \frac{A_F}{A_G} \quad (4.6-30)$$

$$I_{\text{SWR3F}} = I_{\text{SWR2F}} \cdot \rho_W \cdot \left(\frac{A_W}{A_G} + \rho_F \cdot \frac{A_F}{A_G} \right) \quad (4.6-31)$$

Damit ist bewiesen, dass (4.6-27) für alle $n > 1$ gilt.

Außerdem kann gezeigt werden, dass gilt:

$$I_{\text{SWR2F}} = I_{\text{SWR1F}} \cdot B \quad (4.6-32)$$

$$I_{\text{SWR3F}} = I_{\text{SWR2F}} \cdot B = (I_{\text{SWR1F}} \cdot B) \cdot B = I_{\text{SWR1F}} \cdot B^2 \quad (4.6-33)$$

$$I_{\text{SWR4F}} = I_{\text{SWR3F}} \cdot B = (I_{\text{SWR2F}} \cdot B) \cdot B = [(I_{\text{SWR1F}} \cdot B) \cdot B] \cdot B = I_{\text{SWR1F}} \cdot B^3 \quad (4.6-34)$$

$$\vdots$$

$$\vdots$$

$$\vdots$$

$$I_{\text{SWR}(n+1)\text{F}} = I_{\text{SWR1F}} \cdot B^n \quad (4.6-35)$$

Die insgesamt zum Fenster zurückreflektierte Strahlung entspricht der Summe über alle Ordnungen n ($1 \leq n \leq \infty$). Aus (4.6-35) ist ersichtlich, dass diese Summe über eine geometrische Reihe [Repetitorium 1995, Seite F3] ermittelt werden kann:

Geometrische Reihe:
$$\sum_{n=0}^{\infty} x^n = 1 + x + x^2 + x^3 + \dots = \frac{1}{1-x} \quad (4.6-36)$$

Daraus folgt die Summe I_{SWRF} über alle Ordnungen:

$$I_{\text{SWRF}} = I_{\text{SWR1F}} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} B^n = I_{\text{SWR1F}} \cdot \frac{1}{1-B} \quad (4.6-37)$$

$$I_{\text{SWRF}} = I_{\text{SWR1F}} \cdot \frac{1}{1 - \rho_W \cdot \left(\frac{A_W}{A_G} + \rho_F \cdot \frac{A_F}{A_G} \right)} \quad (4.6-38)$$

$$(4.6-38) + (4.6-20) \quad I_{\text{SWRF}} = I_{\text{SW}} \cdot \rho_W \cdot \frac{A_F}{A_G} \cdot \frac{1}{1 - \rho_W \cdot \left(\frac{A_W}{A_G} + \rho_F \cdot \frac{A_F}{A_G} \right)} \quad (4.6-39)$$

$$(4.6-39) \quad I_{\text{SWRF}} = I_{\text{SW}} \cdot \frac{\rho_W \cdot A_F}{A_G - \rho_W \cdot (A_W + \rho_F \cdot A_F)} \quad (4.6-40)$$

Mit Hilfe von (4.6-40) ist die Auswirkung der Berechnung mit unendlichen Ordnungen auf die Kühllast leicht erkennbar:

Berechnung nur mit der Reflexion erster Ordnung:

$$I_{\text{SWRF}} = I_{\text{SW}} \cdot \frac{\rho_W \cdot A_F}{A_G} \quad (4.6-41)$$

Berechnung mit der Summe der Reflexionen aller Ordnungen:

$$(4.6-40) \quad I_{\text{SWRF}} = I_{\text{SW}} \cdot \frac{\rho_W \cdot A_F}{A_G - \underbrace{\rho_W \cdot (A_W + \rho_F \cdot A_F)}} \quad (4.6-42)$$

Änderung gegenüber der Berechnung
nur mit der Reflexion erster Ordnung

Durch die Summe der Reflexionen wird die berechnete Rückstrahlung größer. Dadurch verlässt – bei Berücksichtigung alle unendlich vielen Reflexionen – durch das Fenster mehr Strahlung den Raum, als bei Berücksichtigung nur der ersten Reflexion (bisher allgemein übliche Annahme). Außerdem wird in der Glasscheibe mehr Energie absorbiert, wodurch wiederum mehr Energie durch die Wärmeabgabe der Glasscheibe den Raum verlässt (Wärmestromdichte \dot{q}_E wird größer).

4.6.5 Zusammenführung der Teilsysteme – Kühllast-Berechnung

Durch Zusammenfassen der beiden Teilsysteme und Einführung einer weiteren Systemgrenze zwischen betrachtetem Raum und Umgebung, kann nun der Gesamt-Energiestrom in den Raum (dies entspricht der Kühllast) ermittelt werden. Die Systemgrenze zur Umgebung wird an die Außenoberfläche des Glases gelegt:

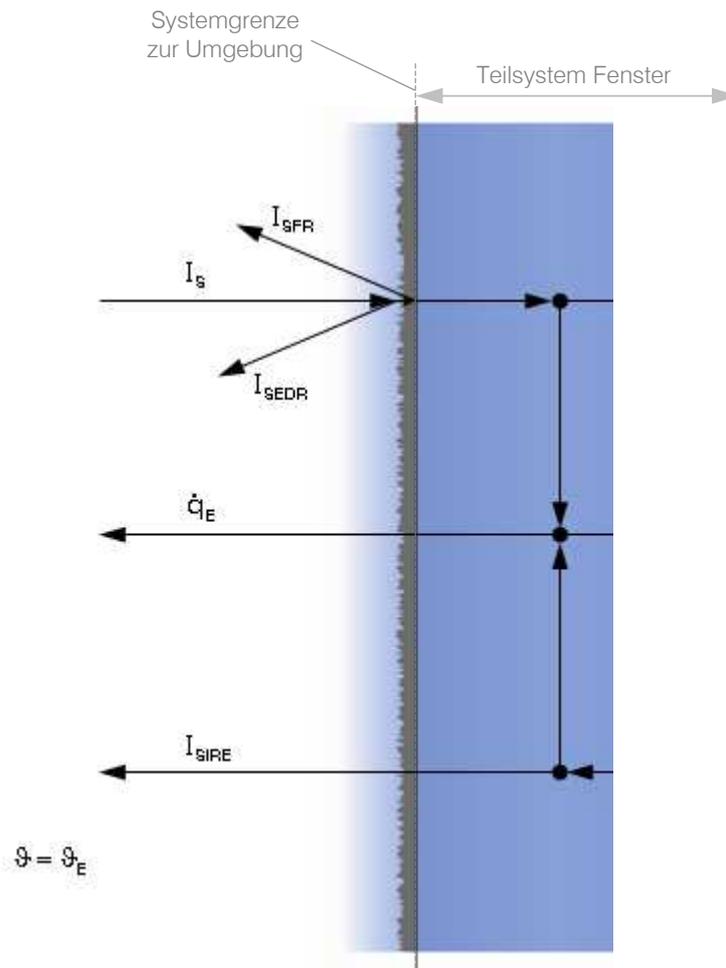


Abb. 4.12: Zusammenführung der Teilsysteme – Systemgrenze zur Umgebung

Der Gesamt-Energiestrom in den Raum:

$$\dot{q} = I_S - I_{SEDR} - I_{SFRR} - \dot{q}_E - I_{SIRE} \quad \text{in W/m}^2\text{-Fensterfläche} \quad (4.6-43)$$

bzw.

$$\dot{Q} = [I_S - I_{SEDR} - I_{SFRR} - \dot{q}_E - I_{SIRE}] \cdot A_F \quad \text{in W} \quad (4.6-44)$$

Die benötigten Größen aus den Teilsystemen müssen noch ergänzt bzw. umgerechnet werden:

\dot{q}_E – der Wärmestrom nach außen:

$$(4.6-15) \quad \dot{q}_E = \frac{I_S \cdot \tau_D \cdot \alpha_{F,Dir} + I_{SIR} \cdot \alpha_F - (\vartheta_E - \vartheta_I) \cdot \frac{1}{R_{UI}}}{1 + \frac{R_{UE}}{R_{UI}}} \quad (4.6-45)$$

Um \dot{q}_E berechnen zu können wird I_{SIR} benötigt:

$$(4.6-17) \quad I_{SIR} = I_{SWRF} \cdot \frac{A_W}{A_F} \quad (4.6-46)$$

$$+ (4.6-40) \quad I_{SIR} = I_{SW} \cdot \frac{\rho_W \cdot A_F}{A_G - \rho_W \cdot (A_W + \rho_F \cdot A_F)} \cdot \frac{A_W}{A_F} \quad (4.6-47)$$

$$+ (4.6-16) \quad I_{SIR} = I_{SI} \cdot \frac{A_F}{A_W} \cdot \frac{\rho_W \cdot A_F}{A_G - \rho_W \cdot (A_W + \rho_F \cdot A_F)} \cdot \frac{A_W}{A_F} \quad (4.6-48)$$

$$I_{SIR} = I_{SI} \cdot \underbrace{\frac{\rho_W \cdot A_F}{A_G - \rho_W \cdot (A_W + \rho_F \cdot A_F)}}_D \quad (4.6-49)$$

$$I_{SIR} = I_S \cdot \tau_D \cdot \tau_{F,Dir} \cdot D \quad (4.6-50)$$

$$(4.6-15) + (4.6-50) \quad \dot{q}_E = \frac{I_S \cdot \tau_D \cdot \alpha_{F,Dir} + I_S \cdot \tau_D \cdot \tau_{F,Dir} \cdot D \cdot \alpha_F - (\vartheta_E - \vartheta_I) \cdot \frac{1}{R_{UI}}}{1 + \frac{R_{UE}}{R_{UI}}} \quad (4.6-51)$$

I_{SIRE} – die reflektierte Sonneneinstrahlung nach außen:

$$I_{SIRE} = I_{SIR} \cdot \tau_F \quad (4.6-52)$$

$$+ (4.6-50) \quad I_{SIRE} = I_S \cdot \tau_D \cdot \tau_{F,Dir} \cdot D \cdot \tau_F \quad (4.6-53)$$

Mit (4.6-51) und (4.6-53) kann nun die Gesamt-Energiestromdichte berechnet werden:

$$(4.6-43) \quad \dot{q} = I_S - I_{SEDR} - I_{SFR} - \dot{q}_E - I_{SIRE} \quad (4.6-54)$$

$$\dot{q} = I_S \cdot \tau_D \cdot (1 - \rho_{F,Dir}) - I_{SFR} - \dot{q}_E - I_{SIRE} \quad (4.6-55)$$

Einsetzen von (4.6-50) und (4.6-52):

$$\dot{q} = I_S \cdot \tau_D \cdot (1 - \rho_{F,Dir}) - \frac{I_S \cdot \tau_D \cdot \alpha_{F,Dir} + I_S \cdot \tau_D \cdot \tau_{F,Dir} \cdot D \cdot \alpha_F - (\vartheta_E - \vartheta_I) \cdot \frac{1}{R_{UI}}}{1 + \frac{R_{UE}}{R_{UI}}} - I_S \cdot \tau_D \cdot \tau_{F,Dir} \cdot D \cdot \tau_F \quad (4.6-56)$$

$$\dot{q} = I_S \cdot \tau_D \cdot \left(1 - \rho_{F,Dir} - \frac{\alpha_{F,Dir} + \tau_{F,Dir} \cdot D \cdot \alpha_F}{1 + \frac{R_{UE}}{R_{UI}}} - \tau_{F,Dir} \cdot D \cdot \tau_F \right) + \frac{(\vartheta_E - \vartheta_I) \cdot \frac{1}{R_{UI}}}{1 + \frac{R_{UE}}{R_{UI}}} \quad (4.6-57)$$

$$\dot{q} = I_S \cdot \tau_D \cdot \left(1 - \rho_{F,Dir} - \tau_{F,Dir} \cdot \tau_F \cdot D - \frac{\alpha_{F,Dir} + \alpha_F \cdot \tau_{F,Dir} \cdot D}{1 + \frac{R_{UE}}{R_{UI}}} \right) + \frac{(\vartheta_E - \vartheta_I)}{R_{UE} + R_{UI}} \quad (4.6-58)$$

Mit $U=R_{UE}+R_{UI}$ folgt

$$\dot{q} = I_S \cdot \tau_D \cdot \underbrace{\left(1 - \rho_{F,Dir} - \tau_{F,Dir} \cdot \tau_F \cdot D - \frac{\alpha_{F,Dir} + \alpha_F \cdot \tau_{F,Dir} \cdot D}{1 + \frac{R_{UE}}{R_{UI}}} \right)}_{\text{Sonneneinstrahlungsanteil}} + \underbrace{(\vartheta_E - \vartheta_I) \cdot U}_{\text{Wärmeleitungsanteil}} \quad (4.6-59)$$

Anhand Gleichung (4.6-59) ist ersichtlich, dass sich die beiden Effekte Sonneneinstrahlung und Energiezufuhr durch den Temperaturunterschied zwischen Außenluft- und Innenlufttemperatur überlagern. Beide sind proportional zur Fensterfläche. Damit ergibt sich der Gesamt-Energiestrom bzw. die Kühllast zu:

$$\dot{Q} = \left[I_S \cdot \tau_D \cdot \left(1 - \rho_{F,Dir} - \tau_{F,Dir} \cdot \tau_F \cdot D - \frac{\alpha_{F,Dir} + \alpha_F \cdot \tau_{F,Dir} \cdot D}{1 + \frac{R_{UE}}{R_{UI}}} \right) + (\vartheta_E - \vartheta_I) \cdot U \right] \cdot A_F \quad (4.6-60)$$

mit

$$D = \frac{\rho_W \cdot A_F}{A_G - \rho_W \cdot (A_W + \rho_F \cdot A_F)} \quad (4.6-61)$$

$$(4.6-8), (4.6-9) \quad R_{UE} = \frac{\frac{1}{2}d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_E} \quad \text{und} \quad R_{UI} = \frac{\frac{1}{2}d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_I}$$

$$(4.6-10) \quad U = \frac{1}{R_{UE} + R_{UI}}$$

4.6.6 Parameter

τ_D – Transmissionsgrad der Staubschicht an einer Fensteroberfläche:

[Baustoffe 1979]¹ geht von einer eher geringeren Abschwächung der Einstrahlung durch den Staub aus als z.B. [Lehrbuch Bauphysik 2008, Seite 534]. Dort werden nur für Wohnräume geringere Werte angegeben ($\tau_D = 0,95-1,00$). Für Arbeitsräume teilweise umso größere:

- regelmäßig gereinigt: $\tau_D = 0,95-1,00$
- normal: $\tau_D = 0,80-0,85$
- selten gereinigt: $\tau_D = 0,75-0,80$

mit dem Hinweis [Lehrbuch Bauphysik 2008, Seite 537], dass in anderen Literaturstellen noch ungünstigere Werte genannt werden.

In dieser Arbeit wird ein mittlerer Wert von $\tau_D = 0,80$ angenommen.

α_W – Absorptionsgrad der Wandoberflächen im Innenraum (diffus):

Oft wird, so wie auch in dieser Arbeit, ein durchschnittlicher Absorptionsgrad für alle Bauteile im Innenraum (Ausnahme Fenster und sonstige Glasscheiben) angenommen.

Der Absorptionsgrad für Flächen mit hellem Anstrich ist in [Bauphysik Kalender 2006, Seite 184] für Sonneneinstrahlung mit $\alpha_{W,Dir} = 0,40$ angegeben. Das entspricht auch den Angaben von [Licht 1972, Seite 184] für Baustoffe in hellgrau: $\alpha_{W,Dir} = 0,40$ bis $0,60$.

Für einen durchschnittlichen Absorptionsgrad muss berücksichtigt werden, dass Fußböden meist dunkler sind und damit mehr Einstrahlung absorbieren (z.B. Eiche hell, poliert: $\alpha_{Fußboden,Dir} = 0,65-0,75$; Eiche dunkel, poliert: $\alpha_{Fußboden,Dir} = 0,85-0,90$ [Licht 1972, Seite 184]). Teppichböden haben

¹ [Baustoffe, Seite 12]: „Für die Berechnung von Wärmegewinnen aus der Sonneneinstrahlung ist die gesamte Strahlungsdurchlässigkeit der Verglasung zur Berücksichtigung der Auswirkung ihrer Verschmutzung um 10% (Mittelwert) abzumindern.“

neben der geringeren Helligkeit auch durch die große Rauigkeit einen höheren Absorptionsgrad.

Außerdem absorbieren Möbel unter anderem durch Vergrößerung der Fläche zusätzlich einen Teil der Einstrahlung und verringern damit den Anteil der Einstrahlung, der den Raum wieder verlassen kann.

Absorptionsgrade werden meist für senkrechte Einstrahlung auf Flächen angegeben. Da spätestens nach der ersten diffusen Reflexion kaum eine genau senkrechte Einstrahlung auftritt, ist der Reflexionsgrad der folgenden Reflexionen und damit auch der durchschnittliche Reflexionsgrad etwas höher. Dieser Effekt verringert den Absorptionsgrad etwas.

Zusammengefasst muss ein einheitlicher Absorptionsgrad deutlich höher angesetzt werden als $\alpha_{W,Dir} = 0,40$. In dieser Arbeit wird mit einem Absorptionsgrad von $\alpha_W = 0,70$ gerechnet.

α_F – Absorptionsgrad des Fensterglases (diffus):

Die Rückstrahlung aus dem Raum durch die an den Innenwänden diffus reflektierte Sonneneinstrahlung ist nicht gerichtet sondern diffus. Der Transmissionsgrad wird in der Regel für senkrecht auf das Glas auftreffende Strahlung angegeben. Der Transmissionsgrad für diffus aus dem Raum eintreffende Strahlung ist etwas geringer anzusetzen.

Eine Abschätzungsmöglichkeit liefert [Lehrbuch Bauphysik 2008, Seite 535]. Angegeben wird ein Transmissionsgrad für „diffus aus dem Halbraum davor auftreffendes Licht“ von $\tau_F = 0,70$ bei einem $\tau_{F,Dir} \approx 0,81$ für eine „farblos klare Doppelscheibe“. Da bei einer Doppelscheibe der Transmissionsgrad stärker winkelabhängig ist als bei einer einzelnen Scheibe, wird τ_F bei einer einzelnen Scheibe zwischen 0,86 und 1,00 von $\tau_{F,Dir}$ liegen.

Für diese Arbeit wird bei einem Glas mit $\tau_{F,Dir} = 0,79$ von einem $\tau_F = 0,73$ (das entspricht 92,4% von $\tau_{F,Dir}$) ausgegangen. Die Verringerung der Transmission wird zu gleichen Teilen auf die Absorption ($\alpha_F = 0,17$) und die Reflexion ($\rho_F = 0,10$) aufgeteilt, da beide bei diffuser Strahlung einen etwas höheren Wert annehmen.

5 Validierung der Rechenverfahren

5.1 Einleitung

Da es eine Vielzahl an Rechenverfahren zur Ermittlung der Kühllast von Räumen gibt – die oben angeführten Verfahren können nur einen Teil der zur Verfügung stehenden Rechenmethoden darstellen – wird die Validierung bzw. der Vergleich entsprechend der Aufgabenstellung auf eine Auswahl an Verfahren begrenzt.

Die Aufgabenstellung legt folgende Kriterien zur Auswahl der Verfahren fest:

- Beschränkung auf in Normen und Richtlinien dargestellte Verfahren zur Ermittlung der sensiblen Kühllast für die Kühlung mit Luftkühlung.
- Beschränkung auf Verfahren für den deutschsprachigen Raum.
- Beschränkung auf in der Praxis anwendbare Werkzeuge für den österreichischen Raum
- Beschränkung auf Standard-Softwareprodukte, zuzüglich kostenlos angebotene Webseitenrechner und Formblätter

Diese Kriterien führen zur Auswahl folgender Verfahren:

- ÖNORM H 6040 (Ausgabe 01.03.1997)
- VDI 2078 Kurzverfahren (Ausgabe Juli 1996)
- VDI 2078 EDV-Verfahren (Ausgabe Juli 1996)
- Webseitenrechner und Formblätter

Webseitenrechner und Formblätter erfüllen zwar nicht das erste der oben angeführten Kriterien. Da diese einfachen Hilfsmittel aber wahrscheinlich die am häufigsten eingesetzten Auslegungsmethoden für Kühlanlagen sind und sie außerdem oft als „in Anlehnung an die VDI 2078“ bezeichnet werden, ist ein Vergleich mit diesen einfachen Verfahren wesentlich für diese Arbeit.

Die Validierung wird anhand von Sonderfällen durchgeführt, die so ausgelegt sind, dass zur Verifizierung der Ergebnisse der verschiedenen Verfahren auch eine analytische Ermittlung der Kühllast (händisch, mit Hilfe eines einfachen Taschenrechners) möglich ist. Diese Validierungsfälle weichen von in der Realität zu beobachtenden Vorgängen ab, da sie vereinfacht und statisch sind.

Daher können nur Verfahren mit dieser Methode validiert werden, die auch unter solchen Umständen korrekte Lösungen liefern können. Vom theoretischen Ansatz der ausgewählten Rechenverfahren erfüllt nur das Verfahren nach ÖNORM H 6040 dieses Kriterium, da es sich dabei um eine echte dynamische Simulation handelt, die somit auch ungewöhnliche Vorgaben berücksichtigen kann. Für die Verfahren nach VDI 2078 wurden im Vorfeld der Erstellung der Richtlinie einige Messwerte ermittelt, dadurch wurden sie auf „*mitteleuropäische Verhältnisse zugeschnitten, d.h. bei der Sonnenstrahlung auf 50° geografische Breite...*“ [VDI 2078 (1996), Seite 5]. Laut dem VDI liefert die Richtlinie Ergebnisse „*gleicher Qualität wie die der genauen thermischen Simulation, wenn die Kennwerte des Typraums genügend genau den realen Raum widerspiegeln*“ [VDI 2078 (1996), Seite 3]. Da die Validierungsfälle diesen Vorgaben nicht entsprechen, ist eine Validierung der VDI 2078 anhand derartiger statischer Sonderfälle nicht durchführbar. Eine Validierung der Webseitenrechner und der Formblätter in dieser Art muss aufgrund der stark eingeschränkten Vorgabemöglichkeiten auch ausgeschlossen werden.

Somit ergibt sich folgende Vorgangsweise:

1. Validierung des Rechenverfahrens der ÖNORM H 6040 anhand von analytisch und händisch lösbaren Sonderfällen (in diesem Kapitel).

Bei erfolgreicher Verifizierung des Verfahrens der ÖNORM H 6040 kann dieses Verfahren als korrekt (unter Angabe der ermittelten Toleranzen) angesehen werden und somit als Referenzverfahren für Vergleiche mit weiteren Verfahren herangezogen werden:

2. Vergleich von Ergebnissen der Verfahren nach VDI 2078, der Webseitenrechner und Formblätter mit Ergebnissen der ÖNORM H 6040 für realitätsnahe Beispiele (Kapitel 6).

Da es sich bei der Software „Kühllast H6040“ um das offizielle Programm des Österreichischen Normungsinstituts handelt und daher der Norm entsprechen müsste, wird in dieser Arbeit für die Validierung und den Vergleich davon ausgegangen, dass diese Software mit der Norm gleichgesetzt werden kann, dass also eine Validierung der Software einer Validierung der Norm entspricht.

Webseitenrechner und Formblätter sind in größerer Anzahl (auch kostenlos) im Internet zu finden. Stellvertretend wurden einige kostenlose Vertreter dieser Ermittlungsmethoden zufällig ausgewählt und für die vergleichenden Berechnungen eingesetzt. Mit der Wahl erfolgt keine Beurteilung, ob diese genauere oder ungenauere Ergebnisse liefern als andere Webseitenrechner oder Formblätter und ob die Auswahl repräsentativ für diese Berechnungsmethoden ist.

5.2 Die Validierungsfälle

Die Validierung erfolgt anhand von fünf Sonderfällen. Diese sind so gestaltet, dass möglichst viele Kühllast-beeinflussende Parameter (Temperaturdifferenz Außenluft–Innenluft, Sonneneinstrahlung, Luftwechsel etc.) getrennt untersucht werden können.

Für die Berechnungen nach ÖNORM H 6040 wird die Software „Kühllast H6040 Version 4“, die auch vom Österreichischen Normungsinstitut als offizielle Software vertrieben wird, eingesetzt.

Die folgende Tabelle listet die wesentlichen Vorgaben der verschiedenen Fälle auf:

Fall	Außenbauteil	Beschreibung
1	Stahlbeton	keine Lüftung, keine Sonneneinstrahlung
2	Stahlbeton	Lüftung konstant, keine Sonneneinstrahlung
3	Stahlbeton	keine Lüftung, Sonneneinstrahlung konstant
4	Glas	keine Lüftung, keine Sonneneinstrahlung
5	Glas	keine Lüftung, Sonneneinstrahlung konstant

Tabelle 5.1: Übersicht über die Validierungsfälle

Für die fünf Fälle werden die Parameter so gewählt, dass eine statische Berechnung möglich ist (konstante Parameter, d.h. zeitlich unveränderliche Umgebungsbedingungen, innere Lasten und Zufuhr von Luft mit Außentemperatur).

Die Angabe von meist vier Nachkommastellen bei den Ergebnissen dient nur dem Vergleich zwischen analytischer Berechnung und Berechnung nach ÖNORM und ist kein Anhaltspunkt für die Genauigkeit der Berechnungen.

5.3 Fall 1 – Wärmedurchgang durch eine Wand

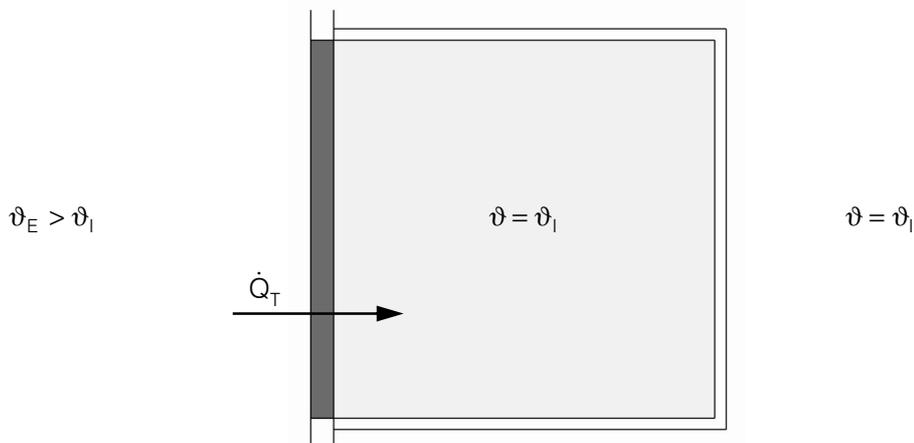


Abb. 5.1: Skizze Fall 1

5.3.1 Analytische Berechnung

Für diesen Fall wird ein Raum ähnlich der oben dargestellten Skizze gewählt:

Außenwand	Stahlbeton, $d = 20 \text{ cm}$, $A = 10 \text{ m}^2$, $\lambda = 2,3 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ bei 20°C [Bauteilkatalog IBO 2008, S. 328]
Innenwände	adiabat (Nachbarräume besitzen gleiche Lufttemperatur wie der betrachtete Raum)
Raum	$\vartheta_I = 24^\circ\text{C}$ (konstant)
Lüftung	keine Lüftung
Umgebung	$\vartheta_E = 30^\circ\text{C}$ (konstant), keine Sonneneinstrahlung

Tabelle 5.2: Angaben für Fall 1

Da es sich um einen statischen Fall handelt (alle Parameter konstant), können für den Wärmestrom in den Raum die Formeln aus Kapitel 4.2 eingesetzt werden:

Das Einsetzen der oben angeführten Werte ergibt für diesen Fall:

$$(4.2-1) \quad U = \frac{1}{0,04 + \frac{0,2}{2,3} + 0,13} = 3,8917 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad (5.3-1)$$

$$(4.2-2) \quad \dot{q}_T = 3,8917 \cdot (30 - 24) = 23,3503 \frac{W}{m^2} \quad (5.3-2)$$

$$(4.2-3) + (4.2-4) \quad \dot{Q} = 23,3503 \cdot 10 = 233,5025W \quad (5.3-3)$$

5.3.2 Berechnungen nach ÖNORM

Für die Berechnungen nach ÖNORM H 6040 werden folgende Werte in das Programm „Kühllast H6040“ eingegeben:

Kühlung	Eingeschaltet von 0-24h
Außenwand	Stahlbeton (Katalog Nr. 38), d = 20 cm, A = 10 m ² Azimut = 0°, Höhenwinkel = 0°
Innenwände	keine (können unberücksichtigt bleiben, da stationär und Innenwände adiabat – Nachbarräume besitzen gleiche Lufttemperatur wie der betrachtete Raum)
Raum	ϑ _i = 24°C von 0h bis 24h, keine inneren Lasten
Zuluft	0

Tabelle 5.3: Eingabewerte „Kühllast H6040“ für Fall 1

Die weiteren Eingabewerte des Programms haben in diesem Fall (keine Einstrahlung, statisch) keinen Einfluss auf das Ergebnis.

Die meteorologischen Daten können von der Benutzeroberflächen nicht entsprechend dem vorliegenden Sonderfall angepasst werden. Aus diesem Grund wurde eine Schnittstelle programmiert, mit deren Hilfe alle benötigten meteorologischen Daten (Außenlufttemperatur, Global- und Himmelsstrahlung, Sonnenstand) stundenweise vorgegeben werden können.

Für dieses Beispiel wurden die meteorologischen Daten so vorgegeben, dass die Außenlufttemperatur konstant 30°C beträgt und keine direkte Sonneneinstrahlung oder diffuse Einstrahlung auftritt (Global- und Himmelsstrahlung gleich Null).

Damit ergeben die Berechnungen nach ÖNORM einen Wärmestrom bzw. eine Kühllast von:

$$\dot{Q}_{H6040} = 234,8936W \quad (5.3-4)$$

5.3.3 Wiederholung der Berechnung mit angepassten Parametern

Wie schon im Kapitel 4.2 angeführt, werden in der ÖNORM H 6040 abweichende Werte für die Wärmeübergangskoeffizienten eingesetzt [ÖNORM H 6040 (1997)]. Die Abweichung der ÖNORM-Berechnung von der analytischen Rechnung kann damit erklärt werden. In der ÖNORM betragen die Wärmeübergangskoeffizienten für vertikale Bauteile bzw. horizontale Wärmeströme

$$\alpha_E = 23 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)} \text{ und } \alpha_i = 8 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)} \text{ bzw. } R_E = 0,043 \text{ m}^2\cdot\text{K/W} \text{ und } R_i = 0,125 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$$

Die Wärmeübergangswiderstände in der ÖNORM H 6040 entsprechen noch den vor einigen Jahren üblichen Werten. Diese erscheinen aber genauso realistisch wie die heutzutage üblicherweise gewählten Widerstände. Daher dürften Berechnungen mit den „alten“ Werten durchaus auch als korrekt angesehen werden.

Für die Überprüfung des Rechenverfahrens der ÖNORM ist es daher durchaus zweckmäßig, wenn für die analytische Berechnung die gleichen Werte eingesetzt werden. Es kann sonst nicht unterschieden werden, ob Abweichungen durch die anders gewählten Parameter entstehen oder von Ungenauigkeiten des Rechenverfahrens herrühren.

Die analytische Berechnung mit den früher üblichen und in der ÖNORM verwendeten Wärmeübergangswiderständen führt zu den folgenden Ergebnissen:

$$(4.2-1) \quad U = \frac{1}{\frac{1}{23} + \frac{0,2}{2,3} + \frac{1}{8}} = 3,9149 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad (5.3-5)$$

$$(4.2-2) \quad \dot{q}_T = 3,9149 \cdot (30 - 24) = 23,4894 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad (5.3-6)$$

$$(4.2-3) + (4.2-4) \quad \dot{Q} = 23,4894 \cdot 10 = 234,8936 \text{ W} \quad (5.3-7)$$

5.3.4 Vergleich und Diskussion der Ergebnisse

Die Differenz aus der Kühllastberechnung nach ÖNORM und der analytischen Kontrollrechnung beträgt somit ohne Anpassung der Parameter:

$$\Delta\dot{Q} = \dot{Q}_{H6040} - \dot{Q} = 234,8936 - 233,5025 = 1,3911\text{ W} \quad (5.3-8)$$

oder

$$\Delta\dot{Q} = \frac{\dot{Q} - \dot{Q}_{H6040}}{\dot{Q}} = \frac{233,5025 - 234,8936}{233,5025} = 0,00595 \quad (5.3-9)$$

Bei einer Berechnung mit gleichen Wärmeübergangskoeffizienten wird folgende Differenz erreicht:

$$\Delta\dot{Q} = \dot{Q}_{H6040} - \dot{Q} = 0,23 \cdot 10^{-6} \text{ W} \quad (5.3-10)$$

oder

$$\Delta\dot{Q} = \frac{\dot{Q}_{H6040} - \dot{Q}}{\dot{Q}} = \frac{0,23 \cdot 10^{-6}}{234,8936} = 1 \cdot 10^{-9} \quad (5.3-11)$$

Parameter der analytischen Berechnungen	Abweichung Kühllast $\Delta\dot{Q} = \dot{Q}_{H6040} - \dot{Q}$	
Wärmeübergangswiderstände laut aktueller Literatur	1,3911 W	0,595 %
Wärmeübergangswiderstände laut ÖNORM	$0,23 \cdot 10^{-6} \text{ W}$	$1 \cdot 10^{-7} \%$

Tabelle 5.4: Vergleich der Ergebnisse Fall 1

Die Differenz der Ergebnisse der analytischen Berechnung und der Berechnung nach ÖNORM mit gleichen Wärmeübergangswiderständen ergibt sich dabei durch die Grenzen des eingesetzten Taschenrechners bzw. des in der Software eingesetzten Variablentyps.

Die Rechenmethode nach ÖNORM liefert für den Validierungsfall 1 korrekte Ergebnisse.

Eine Angleichung der Wärmeübergangskoeffizienten wäre im Zuge einer Überarbeitung der ÖNORM sinnvoll, um den Vorgaben der europäischen Normung zu entsprechen. Vom bauphysikalischen Standpunkt wäre eine solche Anpassung aber nicht unbedingt notwendig, da sowohl die Annahmen der EN als auch die der ÖNORM in einem möglichen Bereich liegen.

5.4 Fall 2 – Wärmedurchgang durch eine Wand, mit Lüftung

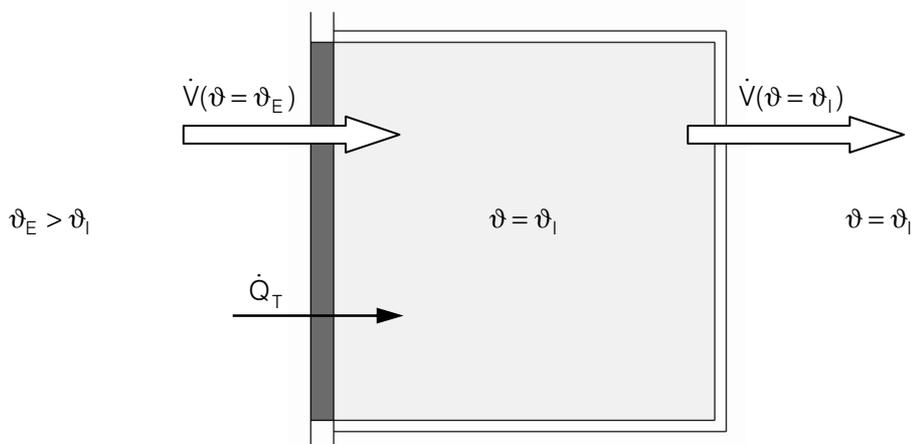


Abb. 5.2: Skizze Fall 2

5.4.1 Analytische Berechnung

Für diesen Fall wird ein Raum ähnlich der oben dargestellten Skizze gewählt:

Außenwand	Stahlbeton, $d = 20 \text{ cm}$, $A = 10 \text{ m}^2$, $\lambda = 2,3 \text{ W/(m.K)}$ bei 20°C [Bauteilkatalog IBO 2008, S. 328]
Innenwände	adiabat (Nachbarräume besitzen gleiche Lufttemperatur wie der betrachtete Raum)
Raum	$\vartheta_I = 24^\circ\text{C}$ (konstant)
Lüftung	$100 \text{ m}^3/\text{h}$ mit Außenlufttemperatur
Umgebung	$\vartheta_E = 30^\circ\text{C}$ (konstant), Luftdruck 1 bar, keine Sonneneinstrahlung

Tabelle 5.5: Angaben für Fall 2

Die Berechnungsmethode wird in Kapitel 4.3 angeführt und die Werte von \dot{Q}_T können dem Fall 1 entnommen werden:

$$\text{Mit } \alpha_E \text{ und } \alpha_I \text{ nach aktueller Literatur:} \quad \dot{Q}_T = 233,5025\text{W} \quad (5.4-1)$$

$$\text{Mit } \alpha_E \text{ und } \alpha_I \text{ nach ÖNORM:} \quad \dot{Q}_T = 234,8936\text{W} \quad (5.4-2)$$

Für den Wärmestrom durch die Luftzufuhr wird davon ausgegangen, dass die zugeführte Luft Außenlufttemperatur besitzt (Messung des Massenstroms bei Außenlufttemperatur) und die gleiche Masse an Luft den Raum mit Innenlufttemperatur verlässt.

Für c_p wird der Wert für die mittlere Temperatur zwischen Außenluft- und Innenlufttemperatur eingesetzt. Für eine Außenlufttemperatur von 30°C und eine Innenlufttemperatur von 24°C ergibt das folgenden Wert:

$$c_p(20^\circ\text{C}) = 1,0064 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad [\text{Wärmeatlas 2006, Dbb 2}] \quad (5.4-3)$$

$$c_p(30^\circ\text{C}) = 1,0067 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad [\text{Wärmeatlas 2006, Dbb 2}] \quad (5.4-4)$$

$$c_p(27^\circ\text{C}) = \frac{c_p(20^\circ\text{C}) \cdot 3 + c_p(30^\circ\text{C}) \cdot 7}{10} = 1,0066 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad (5.4-5)$$

Für die Berechnung der Gesamt-Wärmezufuhr durch die Lüftung wird der Massenstrom benötigt. Dieser wird über die Luftdichte bei Außenlufttemperatur berechnet, da von der Messung des Volumenstroms in der Nähe der Einlassöffnungen der Lüftungsanlagen – und damit bei annähernd Außenlufttemperatur – ausgegangen wird. Daher wird die Dichte bei Außenlufttemperatur eingesetzt:

$$\rho_{\text{Luft}}(30^\circ\text{C}) = 1,1492 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad [\text{Wärmeatlas 2006, Dbb 2}] \quad (5.4-6)$$

Mit diesen Werten wird der Wärmestrom über die Luftzufuhr berechnet:

$$(4.3-2) \quad q_v = c_p \cdot (\vartheta_E - \vartheta_I) = 1,0066 \cdot (30 - 24) = 6,0396 \text{kJ/kg} \quad (5.4-7)$$

$$(4.3-3) \quad \dot{m} = \dot{V} \cdot \rho_{\text{Luft},25^\circ\text{C}} = 100 \cdot 1,1492 = 114,92 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \quad (5.4-8)$$

$$(4.3-4) + (4.3-5) \quad \dot{Q}_v = q_v \cdot \dot{m} = 6,0396 \cdot 114,92 = 694,0708 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} = 192,7975 \text{W} \quad (5.4-9)$$

Das ergibt den Gesamtwärmestrom:

$$\text{Mit } \alpha \text{ nach aktueller Literatur: } \dot{Q} = \dot{Q}_T + \dot{Q}_V = 233,5025 + 192,7975 = 426,3000\text{W} \quad (5.4-10)$$

$$\text{Mit } \alpha \text{ nach ÖNORM: } \dot{Q} = \dot{Q}_T + \dot{Q}_V = 234,8936 + 192,7975 = 427,6911\text{W} \quad (5.4-11)$$

5.4.2 Berechnungen nach ÖNORM

Für die Berechnungen nach ÖNORM H 6040 werden folgende Werte in das Programm „Kühllast H6040“ eingegeben:

Kühlung	Eingeschaltet von 0-24h
Außenwand	Stahlbeton (Katalog Nr. 38), d = 20 cm, A = 10 m ² Azimut = 0°, Höhenwinkel = 0°
Innenwände	keine (können unberücksichtigt bleiben, da stationär und Innenwände adiabat – Nachbarräume besitzen gleiche Lufttemperatur wie der betrachtete Raum)
Raum	ϑ ₁ = 24°C von 0h bis 24h, keine inneren Lasten
Zuluft	100 m ³ /h

Tabelle 5.6: Eingabewerte „Kühllast H6040“ für Fall 2

Die weiteren Eingabewerte des Programms haben in diesem Fall (keine Einstrahlung, statisch) keinen Einfluss auf das Ergebnis.

Es wurden die gleichen meteorologischen Daten vorgegeben, wie im Fall 1 (Außenlufttemperatur konstant 30°C, keine Einstrahlung).

Damit ergeben die Berechnungen nach ÖNORM einen Wärmestrom bzw. eine Kühllast von:

$$\dot{Q}_{H6040} = 435,8936\text{W} \quad (5.4-12)$$

5.4.3 Überprüfung der Parameter

Die Überprüfung der Parameter ergibt, dass die ÖNORM mit dem Produkt aus c_p und ρ_{LUFT}

$$c_{p,H6040} \cdot \rho_{\text{Luft,H6040}} = 1,206 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \cdot \text{K}} \quad (5.4-13)$$

rechnet. Das führt zu dem Schluss, dass die ÖNORM Werte für Standardbedingungen (25 °C, 101325 Pa) einsetzt.

5.4.4 Wiederholung der Berechnung mit angepassten Parametern

Um die Berechnungsmethode der ÖNORM überprüfen zu können, werden die Parameter c_p und ρ_{LUFT} bei der analytischen Berechnung wiederum an die Vorgaben der ÖNORM angepasst:

$$(4.3-1): \quad \dot{Q} = \dot{Q}_T + \dot{Q}_V \quad (5.4-14)$$

$$(4.2-3): \quad \dot{Q}_T = 23,4894 \cdot 10 = 234,8936\text{W} \quad (5.4-15)$$

$$(4.3-2): \quad q_V = c_p \cdot (\vartheta_E - \vartheta_I) \quad (5.4-16)$$

$$(4.3-3): \quad \dot{m} = \dot{V} \cdot \rho_{\text{Luft}} \quad (5.4-17)$$

$$(4.3-5): \quad \dot{Q}_V = q_V \cdot \dot{m} = c_p \cdot (\vartheta_E - \vartheta_I) \cdot \dot{V} \cdot \rho_{\text{Luft}} = 1,206 \cdot (30 - 24) \cdot 100 = 723,6 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} = 201,00\text{W} \quad (5.4-18)$$

Das ergibt den Gesamtwärmestrom

$$\text{Mit } \alpha \text{ nach aktueller Literatur: } \dot{Q} = \dot{Q}_T + \dot{Q}_V = 233,5025 + 201,00 = 434,5025\text{W} \quad (5.4-19)$$

$$\text{Mit } \alpha \text{ nach älterer Literatur: } \dot{Q} = \dot{Q}_T + \dot{Q}_V = 234,8936 + 201,00 = 435,8936\text{W} \quad (5.4-20)$$

5.4.5 Vergleich und Diskussion der Ergebnisse

Die Differenz aus der Kühllastberechnung nach ÖNORM und analytischen Kontrollrechnung beträgt somit mit

$$\Delta\dot{Q} = \dot{Q}_{H6040} - \dot{Q} \quad \text{in W} \quad (5.4-21)$$

bzw.

$$\Delta\dot{Q} = \left(\frac{\dot{Q}_{H6040} - \dot{Q}}{\dot{Q}} \right) \cdot 100 \quad \text{in \%} \quad (5.4-22)$$

Parameter der analytischen Berechnungen	Abweichung Kühllast $\Delta\dot{Q} = \dot{Q}_{H6040} - \dot{Q}$	
Wärmeübergangswiderstände, spez. Wärmekapazität und Dichte bei 1 bar	9,5936 W	2,25 %
Wärmeübergangswiderstände laut ÖNORM, spez. Wärmekapazität und Dichte bei 1 bar	8,2025 W	1,92 %
Wärmeübergangswiderstände laut aktueller Literatur, spez. Wärmekapazität und Dichte laut ÖNORM	1,3911 W	0,3 %
Wärmeübergangswiderstände, spez. Wärmekapazität und Dichte laut ÖNORM	$2 \cdot 10^{-7}$ W	$5 \cdot 10^{-8}$ %

Tabelle 5.7: Vergleich der Ergebnisse Fall 2

Diese Ergebnisse führen zu zwei Erkenntnissen:

1. Das Rechenverfahren der ÖNORM an sich ist auch in diesem Fall exakt gleich der analytischen Berechnung (die Abweichung von $2 \cdot 10^{-7}$ W ist durch die Grenzen des Taschenrechners und der verwendeten Variablen in der Software zu erklären).
2. Abweichungen durch die eingesetzten Wärmeübergangskoeffizienten fallen wesentlich kleiner aus, als Abweichungen durch die gewählten Stoffwerte (spezifische Wärmekapazität und Dichte) – zumindest in diesem Fallbeispiel.

Die in der ÖNORM gewählten Stoffwerte beziehen sich vermutlich auf Standardbedingungen (25 °C, 101325 Pa). Für Berechnungen von Gebäuden in Österreich sind diese Werte allerdings zu hinterfragen. Der zugrundeliegende Luftdruck (1 atm = 101325 Pa) tritt in Österreich kaum auf.

Im Folgenden sind Messwerte der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik angeführt:

Mittelwerte Luftdruck in hPa	Messstation Wien – Innere Stadt, 2006 [ZAMG 2006]	Messstation Wien – Innere Stadt, 2005 [ZAMG 2005]	Messstation Wien – Innere Stadt, 2000 [ZAMG 2000]	Messstation Andau 2006 [ZAMG 2006]
Jänner	1005,9	1001,1	1001,2	1012,4
Februar	994,3	996,7	999,4	1000,6
März	991,0	996,6	995,3	996,9
April	993,2	994,4	987,8	998,9
Mai	996,1	996,3	994,5	1002,1
Juni	998,6	997,4	997,3	1003,9
Juli	998,4	994,7	991,1	1003,8
August	990,7	995,7	996,0	996,5
September	997,3	998,9	994,8	1003,3
Oktober	996,7	1003,0	995,6	1003,0
November	998,3	998,8	990,6	1004,6
Dezember	1006,1	996,0	993,8	1012,6
Jahresmittelwert	997,2	997,4	994,8	1003,2

Tabelle 5.8: Mittelwerte Luftdruck Wien und Andau

Diese Daten zeigen, dass weder in Wien (Innere Stadt, Seehöhe 171m), noch in der am tiefsten gelegenen Messstation Österreichs in Andau (Seehöhe 122m), ein Luftdruck von 1 atm erreicht wird. In Andau wird der Wert zwar zeitweise fast erreicht, der Jahresdurchschnitt liegt aber deutlich unter 1 atm. Es kann also davon ausgegangen werden, dass der Luftdruck im Durchschnitt in Österreich knapp unter 1 bar liegt.

Für eine Neufassung der ÖNORM sollte daher überlegt werden, ob für Berechnungen in Österreich Stoffwerte der Luft für einen niedrigeren Luftdruck geeigneter wären. Die eine Möglichkeit ist, Stoffdaten für einen Luftdruck von 1 bar einzusetzen. Besser wäre eine ortsabhängige Wahl der Stoffwerte in Abhängigkeit vom Durchschnitt der tatsächlich an dem Ort gemessenen Luftdrücke.

5.5 Fall 3 – Wärmedurchgang durch eine Wand, mit Einstrahlung

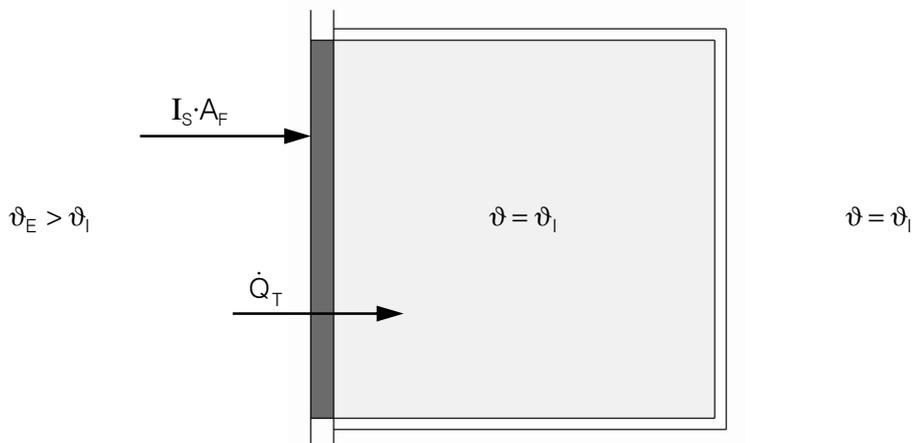


Abb. 5.3: Skizze Fall 3

5.5.1 Analytische Berechnung

Für diesen Fall wird ein Raum ähnlich der oben dargestellten Skizze gewählt:

Außenwand	Stahlbeton, $d = 20 \text{ cm}$, $A = 10 \text{ m}^2$, $\lambda = 2,3 \text{ W/(m.K)}$ bei 20°C [Bauteilkatalog IBO 2008, S. 328] $\alpha_{\text{Wand}} = 0,7$
Innenwände	adiabat (Nachbarräume besitzen gleiche Lufttemperatur wie der betrachtete Raum)
Raum	$\vartheta_1 = 24^\circ\text{C}$ (konstant)
Lüftung	keine Lüftung
Umgebung	$\vartheta_E = 30^\circ\text{C}$ (konstant), Sonneneinstrahlung $I = 500 \text{ W/m}^2$ senkrecht auf die Außenwand Keine Reflexion der Einstrahlung an Flächen in der Umgebung

Tabelle 5.9: Angaben für Fall 3

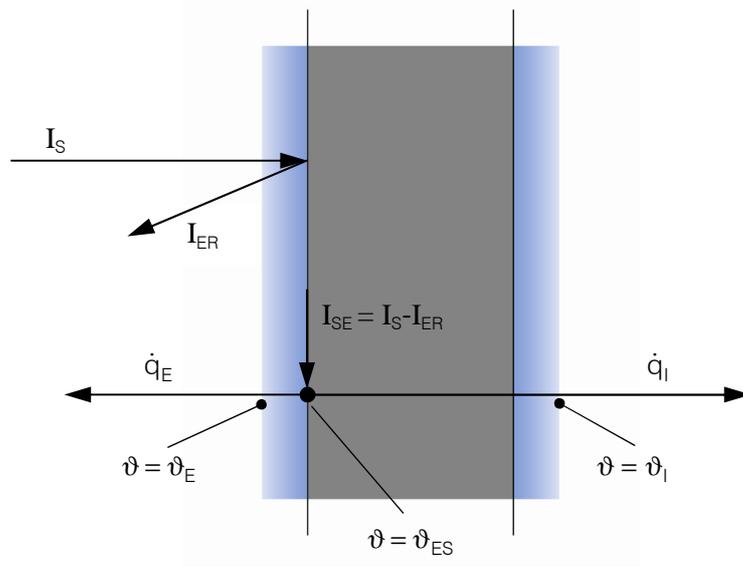


Abb. 5.4: Skizze der Außenwand – Berechnungsschema

Die händische Berechnung erfolgt nach dem Schema der Skizze (Abb. 5.4). Die Gleichungen für diesen Fall sind in Kapitel 4.4 angeführt.

Durch Einsetzen der oben angeführten Zahlenwerte ergibt sich der Wärmestrom in den Raum:

Mit α_E und α_I nach aktueller Literatur:

$$(4.4-6) \quad R_{UE} = 0,04 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \quad (5.5-1)$$

$$(4.4-5) \quad R_{UI} = \frac{0,2}{2,3} + 0,13 = 0,2170 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \quad (5.5-2)$$

$$(4.4-11) \quad \dot{q}_I = \frac{500 \cdot 0,7 \cdot 0,04 + 30 - 24}{0,2170 + 0,04} = 77,8342 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad (5.5-3)$$

$$(4.4-13) \quad \dot{Q}_I = \dot{q}_I \cdot A = 77,8342 \cdot 10 = 778,3418 \text{W} \quad (5.5-4)$$

Mit α_E und α_i nach ÖNORM:

$$(4.4-6) \quad R_{UE} = \frac{1 \text{ m}^2\text{K}}{23 \text{ W}} \quad (5.5-5)$$

$$(4.4-5) \quad R_{UI} = \frac{0,2}{2,3} + \frac{1}{8} = 0,2120 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \quad (5.5-6)$$

$$(4.4-11) \quad \dot{q}_l = \frac{500 \cdot 0,7 \cdot 0,043 + 30 - 24}{0,2120 + 0,043} = 83,0638 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad (5.5-7)$$

$$(4.4-13) \quad \dot{Q}_l = \dot{q}_l \cdot A = 83,0638 \cdot 10 = 830,6383\text{W} \quad (5.5-8)$$

5.5.2 Berechnungen nach ÖNORM

Für die Berechnungen nach ÖNORM H 6040 werden folgende Werte in das Programm „Kühllast H6040“ eingegeben:

Kühlung	Eingeschaltet von 0-24h
Außenwand	Stahlbeton (Katalog Nr. 38) d = 20 cm, A = 10 m ² , $\alpha_{\text{Wand}} = 0,7$ Azimut = 270°, Höhenwinkel = 90°
Innenwände	keine (können unberücksichtigt bleiben, da stationär und Innenwände adiabatisch – Nachbarräume besitzen gleiche Lufttemperatur wie der betrachtete Raum)
Raum	$\vartheta_i = 24^\circ\text{C}$ von 0h bis 24h, keine inneren Lasten
Zuluft	0 m ³ /h

Tabelle 5.10: Eingabewerte „Kühllast H6040“ für Fall 3

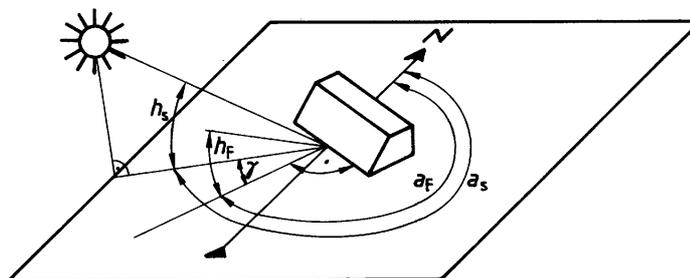
Die weiteren Eingabewerte des Programms haben in diesem Fall (keine Lüftung, statisch) keinen Einfluss auf das Ergebnis.

Es wurde die gleichen meteorologischen Daten vorgegeben, wie im Fall 1 (Außenlufttemperatur konstant 30°C), nur die Direktstrahlung wird so vorgegeben, dass 500 W/m² senkrecht auf die Außenwand fällt.

Das Beispiel wurde so ausgelegt, als würde die Außenwand senkrecht stehen (z.B. entsprechende Wärmeübergangskoeffizienten). Im Programm wurde allerdings die Außenwand als horizontale Fläche eingegeben (gerechnet wurde mit Wärmeübergangskoeffizienten gleich denen bei vertikalen Bauteilen), um zwei Einflüsse auszuschalten, die die Ergebnisse verfälschen würden:

1. Die meteorologischen Daten sind in der ÖNORM als Strahlungsdaten auf die horizontale Ebene definiert: „Die Strahlungsanteile auf Bauteiloberflächen müssen aus den Strahlungsdaten auf die horizontale Ebene errechnet werden.“ [ÖNORM H 6040 (1997), Seite 4]

NORD (N) = 0°
 OST (E) = 90°
 SÜD (S) = 180°
 WEST (W) = 270°



a_s = Azimut der Sonne

a_F = Azimut der Wand (Winkel zwischen Nordrichtung und Projektion der Flächennormalen auf die Horizontalebene)

h_s = Sonnenhöhe

h_F = Höhenwinkel der Flächennormalen

$\gamma = a_s - a_F$ (positiv verwenden)

Abb. 5.5: Sonnenstand nach [ÖNORM H 6040 (1997), Seite 5]

Eine senkrechte Einstrahlung auf die vertikalen Wand (d.h. Einstrahlung mit Höhenwinkel 0°) von 500 W/m² müsste dabei zuerst auf einen entsprechenden Wert auf horizontale Fläche umgerechnet werden. Dieser Wert könnte dann dem Programm übergeben werden und würde vom Programm wieder auf die Einstrahlung normal auf die vertikale Wand umgerechnet. Dabei treten Ungenauigkeiten auf, die durch die Definition der Einstrahlung auf die horizontale Ebene bedingt sind – für eine exakte Berechnung müsste der Höhenwinkel der Einstrahlung 0° (=horizontal) betragen. Da bei einem Höhenwinkel von 0° sogar bei unendlich starker Sonneneinstrahlung keine Einstrahlung auf die horizontale Fläche auftritt, muss ein Höhenwinkel größer Null gewählt werden.

Um dadurch auftretende Ungenauigkeiten ausschließen zu können, muss eine horizontal ausgerichtete Außenwand gewählt werden, da bei einer horizontalen Fläche keine Umrechnung erforderlich ist und somit dem Programm direkt 500 W/m² übergeben werden können.

2. Die ÖNORM berücksichtigt die Reflexstrahlung durch die Umgebung. Da diese für nicht-horizontale Flächen nicht ganz ausgeschaltet werden kann, kann nur mit einer horizontalen Fläche diese Verfälschung gegenüber der analytischen Rechnung verhindert werden.

Damit ergeben die Berechnungen nach ÖNORM einen Wärmestrom bzw. eine Kühllast von:

$$\dot{Q}_{H6040} = 830,6383W \quad (5.5-9)$$

5.5.3 Vergleich und Diskussion der Ergebnisse

Die Differenz aus der Kühllastberechnung nach ÖNORM und analytischen Kontrollrechnung beträgt somit mit

$$\Delta\dot{Q} = \dot{Q}_{H6040} - \dot{Q} \quad \text{in W} \quad (5.5-10)$$

bzw.

$$\Delta\dot{Q} = \left(\frac{\dot{Q}_{H6040} - \dot{Q}}{\dot{Q}} \right) \cdot 100 \quad \text{in \%} \quad (5.5-11)$$

Parameter der analytischen Berechnungen	Abweichung Kühllast	
	$\Delta\dot{Q} = \dot{Q}_{H6040} - \dot{Q}$	
Wärmeübergangswiderstände laut aktueller Literatur	52,2965 W	6,72 %
Wärmeübergangswiderstände laut ÖNORM	$5 \cdot 10^{-7}$ W	$7 \cdot 10^{-8}$ %

Tabelle 5.11: Vergleich der Ergebnisse Fall 3

Die Abweichungen durch die in neuerer Literatur gegenüber der ÖNORM anders gewählten Wärmeübergangswiderstände wirken sich in diesem Validierungsfall stärker aus. Allerdings zeigt die Berechnung mit gleichen Wärmeübergangswiderständen, dass die Berechnungsmethode der ÖNORM selbst exakt den Ergebnissen der händischen Berechnung entspricht.

5.6 Fall 4 – Wärmedurchgang durch ein Fenster

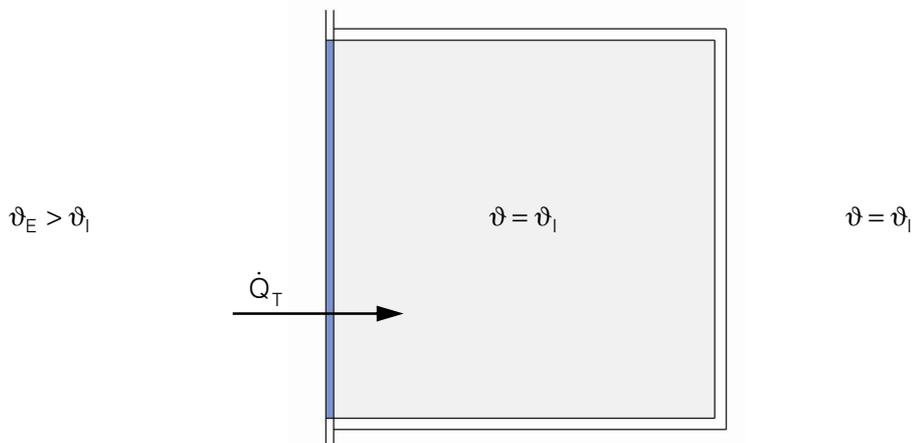


Abb. 5.6: Skizze Fall 4

5.6.1 Analytische Berechnung

Für diesen Fall wird ein Raum ähnlich der oben dargestellten Skizze gewählt:

Außenfenster	1-Scheiben-Normalglas (unbeschichtet), $d = 0,6 \text{ cm}$, $A = 10 \text{ m}^2$ $\lambda = 0,81 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ bei 20°C [Bauteilkatalog IBO 1999, S. 273] $U\text{-Wert} = 5,7 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ für 6 mm-Glas [Saint-Gobain 2009, Seite 2]
Innenwände	adiabat (Nachbarräume besitzen gleiche Lufttemperatur wie betrachteter Raum)
Raum	$\vartheta_I = 24^\circ\text{C}$ (konstant)
Lüftung	keine Lüftung
Umgebung	$\vartheta_E = 30^\circ\text{C}$ (konstant)

Tabelle 5.12: Angaben für Fall 4

Da es sich um einen statischen Fall handelt (alle Parameter konstant), können für den Wärmestrom in den Raum wieder die im Kapitel 4.2 angeführten Formeln eingesetzt werden.

Das Einsetzen der oben angeführten Werte ergibt für diesen Fall:

$$(4.2-1) \quad U_{\text{Berechnet}} = \frac{1}{0,04 + \frac{0,006}{0,81} + 0,13} = 5,6367 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad (5.6-1)$$

Um in weiterer Folge keinen Widerspruch zu erhalten, wird nicht der berechnete U-Wert, sondern der von [Saint-Gobain 2009] angegebene U-Wert = 5,7 W/(m².K) eingesetzt. Der vom Hersteller vermutlich gemessene Wert liegt nahe bei dem theoretischen Wert. Es besteht also kein Widerspruch zwischen Herstellerangabe und berechnetem Wert.

$$(4.2-2) \quad \dot{q}_T = 5,7 \cdot (30 - 24) = 34,200 \frac{W}{m^2} \quad (5.6-2)$$

$$(4.2-3) + (4.2-4) \quad \dot{Q} = 34,2 \cdot 10 = 342,0000W \quad (5.6-3)$$

Da für die Berechnung nach ÖNORM der U-Wert der Fenster eine Eingabegröße ist, muss in diesem Validierungsfall nicht zwischen verschiedenen Wärmeübergangskoeffizienten unterschieden werden.

5.6.2 Berechnungen nach ÖNORM

Für die Berechnungen nach ÖNORM H 6040 werden folgende Werte in das Programm „Kühllast H6040“ eingegeben:

Kühlung	Eingeschaltet von 0-24h
Außenfenster	U-Wert = 5,7 W/(m ² .K) für 6 mm-Glas [Saint-Gobain 2009, Seite 2] Breite = 4 m, Höhe = 2,5 m, Glasanteil = 100 % kein Sonnenschutz, keine Vorsprünge Azimut = 0°, Höhenwinkel = 0°
Innenwände	keine (können unberücksichtigt bleiben, da stationär und Innenwände adiabat – Nachbarräume besitzen gleiche Lufttemperatur wie der betrachtete Raum)
Raum	$\vartheta_i = 24^\circ\text{C}$ von 0h bis 24h, keine inneren Lasten
Zuluft	0

Tabelle 5.13: Eingabewerte „Kühllast H6040“ für Fall 4

Die weiteren Eingabewerte des Programms haben in diesem Fall (keine Einstrahlung, statisch) keinen Einfluss auf das Ergebnis.

Es wurde die gleichen meteorologischen Daten vorgegeben, wie im Fall 1 (Außenlufttemperatur konstant 30°C, keine Einstrahlung).

Damit ergeben die Berechnungen nach ÖNORM einen Wärmestrom bzw. eine Kühllast von:

$$\dot{Q}_{H6040} = 342,0000W \quad (5.6-4)$$

5.6.3 Vergleich und Diskussion der Ergebnisse

Die Differenz aus der Kühllastberechnung nach ÖNORM und der analytischen Kontrollrechnung beträgt somit mit

$$\Delta\dot{Q} = \dot{Q}_{H6040} - \dot{Q} \quad \text{in W} \quad (5.6-5)$$

bzw.

$$\Delta\dot{Q} = \left(\frac{\dot{Q}_{H6040} - \dot{Q}}{\dot{Q}} \right) \cdot 100 \quad \text{in \%} \quad (5.6-6)$$

Parameter	Abweichung Kühllast $\Delta\dot{Q} = \dot{Q}_{H6040} - \dot{Q}$	
Wärmeübergangswiderstände laut Herstellerangaben	0,0000 W	0,00 %

Tabelle 5.14: Vergleich der Ergebnisse Fall 4

Die Berechnung nach ÖNORM entspricht in diesem Fall der analytischen Berechnung exakt, da der U-Wert nicht vom Programm berechnet wird, sondern vom Benutzer vorzugeben ist.

5.7 Fall 5 – Wärme- und Strahlungsdurchgang durch ein Fenster

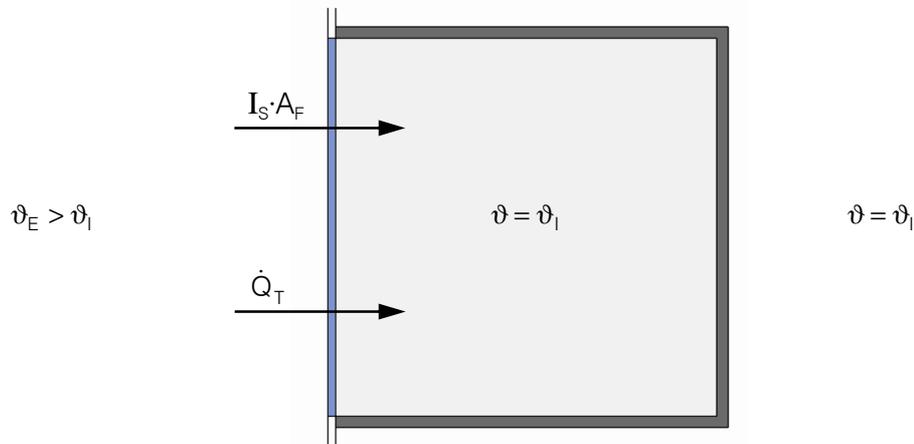


Abb. 5.7: Skizze Fall 5

Um möglichst genau rechnen zu können und die Rechnung trotzdem überschaubar zu halten, wird eine einfache Glasscheibe als Fenster angenommen, die sich über die gesamte Zimmerfront erstreckt. Damit wird der Einfluss des Glaszwischenraums (wie er bei Mehrscheibengläsern auftritt) und des Fensterrahmens ausgeschaltet. Die Bedingungen (Strahlung, Lufttemperatur) in den umliegenden Räumen werden als gleich den Bedingungen im betrachteten Raum angenommen. Das bedeutet, dass die Innenwände als adiabatisch gelten.

5.7.1 Analytische Berechnung

Für diesen Fall wird ein Raum ähnlich der oben dargestellten Skizze gewählt:

Außenfenster	1-Scheiben-Normalglas (unbeschichtet), $d = 0,6 \text{ cm}$, $A_F = 10 \text{ m}^2$, $\lambda = 0,81 \text{ W/(m.K)}$ bei 20°C [Bauteilkatalog IBO 1999, S. 273] $\tau_D = 0,8$ (siehe Kapitel 4.6.6) Energiewerte (d.h. für Sonnenlicht): Senkrecht auf Glas [Saint-Gobain 2009]: $\alpha_{F,Dir} = 0,14$; $\tau_{F,Dir} = 0,79$; $\rho_{F,Dir} = 0,07$ Diffus: $\alpha_F = 0,17$; $\tau_F = 0,73$; $\rho_F = 0,10$;
Innenwände	adiabat, weiß gestrichen ($\alpha_{Wv} = 0,7$ – siehe Kapitel 4.6.6)
Raum	$\vartheta_I = 24^\circ\text{C}$ (konstant)
Lüftung	keine Lüftung
Umgebung	$\vartheta_E = 30^\circ\text{C}$ (konstant)

Tabelle 5.15: Daten für Fall 4

Die Grundlagen für die folgenden Berechnungen sind in Kapitel 4.6 angeführt. Mit der dort angeführten Formel für die gesamte Kühllast des Raums kann hier sehr schnell die Kühllast ermittelt werden:

$$(4.6-8) \quad R_{UE,Berechnet} = \frac{\frac{1}{2} \cdot 0,006}{0,81} + 0,04 = 0,0437 \quad \text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W} \quad (5.7-1)$$

$$(4.6-9) \quad R_{UI,Berechnet} = \frac{\frac{1}{2} \cdot 0,006}{0,81} + 0,13 = 0,1337 \quad \text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W} \quad (5.7-2)$$

$$(4.6-10) \quad U_{Berechnet} = \frac{1}{R_{UE} + R_{UI}} = 5,6367 \quad \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (5.7-3)$$

Der Hersteller gibt als U-Wert des Glases 5,7 W/(m²·K) an. Da dieser Wert für die Berechnung nach ÖNORM eingesetzt wird, wird auch für die händische Berechnung der vorgegebene statt dem berechneten U-Wert eingesetzt. Daher werden die Anteile R_{UE} und R_{UI} entsprechend angepasst:

$$U = \frac{1}{R_{UE} + R_{UI}} = 5,7 \quad \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (5.7-4)$$

$$\frac{U_{Hersteller}}{U_{Berechnet}} = 1,011 \quad (5.7-5)$$

$$R_{UE} = R_{UE,Berechnet} \cdot \frac{U_{Hersteller}}{U_{Berechnet}} = 0,044194156 \quad \text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W} \quad (5.7-6)$$

$$R_{UI} = R_{UI,Berechnet} \cdot \frac{U_{Hersteller}}{U_{Berechnet}} = 0,135204156 \quad \text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W} \quad (5.7-7)$$

$$(4.6-61) \quad D = \frac{0,3 \cdot 10}{60 - 0,3 \cdot (50 + 0,1 \cdot 10)} = \frac{1}{14,9} = 0,0671 \quad (5.7-8)$$

$$\dot{Q} = \left[500 \cdot 0,8 \cdot \left(1 - 0,07 - 0,79 \cdot 0,73 \cdot \frac{1}{14,9} - \frac{0,14 + 0,79 \cdot 0,17 \cdot \frac{1}{14,9}}{1 + \frac{0,0442}{0,1352}} \right) + (30 - 24) \cdot 5,7 \right] \cdot 10 \quad (5.7-9)$$

$$\dot{Q} = 3457,9633W \quad (5.7-10)$$

5.7.2 Berechnungen nach ÖNORM

Für die Berechnungen nach ÖNORM H 6040 werden folgende Werte in das Programm „Kühllast H6040“ eingegeben:

Kühlung	Eingeschaltet von 0-24h
Außenfenster	U-Wert = 5,7 W/(m ² .K) für 6 mm-Glas [Saint-Gobain 2009, Seite 2], Breite = 4 m, Höhe = 2,5 m, Glasanteil = 100 %, g-Wert = 82% für 6 mm-Glas [Saint-Gobain 2009, Seite 2] kein Sonnenschutz, keine Vorsprünge Azimut = 90°, Höhenwinkel = 0°
Innenwände	U-Wert ≈ 0,00 W/(m ² .K) – die Innenwand ist als adiabat anzunehmen, da stationär und Innenwände adiabat – Nachbarräume besitzen gleiche Lufttemperatur und Einstrahlung wie der betrachtete Raum Fläche = 50 m ²
Raum	ϑ _i = 24°C von 0h bis 24h, keine inneren Lasten
Zuluft	0

Tabelle 5.16: Eingabewerte „Kühllast H6040“ für Fall 4

Das Beispiel wurde so ausgelegt, als würde die Außenwand bzw. das Fenster senkrecht stehen. Im Programm wurde allerdings analog zu Fall 3 das Fenster als horizontale Fläche eingegeben, um Einflüsse auszuschalten, die die Ergebnisse verfälschen würden (siehe Fall 3, Kapitel 5.5.2).

Die weiteren Eingabewerte des Programms haben in diesem Fall (statisch) keinen Einfluss auf das Ergebnis.

Damit ergeben die Berechnungen nach ÖNORM einen Wärmestrom bzw. eine Kühllast von:

$$\dot{Q}_{H6040} = 3626,9474W \quad (5.7-11)$$

5.7.3 Vergleich und Diskussion der Ergebnisse

Die Differenz aus der Kühllastberechnung nach ÖNORM und analytischer Kontrollrechnung beträgt somit mit

$$\Delta\dot{Q} = \dot{Q}_{H6040} - \dot{Q} \quad \text{in W} \quad (5.7-12)$$

bzw.

$$\Delta\dot{Q} = \left(\frac{\dot{Q}_{H6040} - \dot{Q}}{\dot{Q}} \right) \cdot 100 \quad \text{in \%} \quad (5.7-13)$$

Parameter	Abweichung Kühllast	
	$\Delta\dot{Q} = \dot{Q}_{H6040} - \dot{Q}$	
Wärmeübergangswiderstände laut Herstellerangaben	168,9841 W	4,89 %

Tabelle 5.17: Vergleich der Ergebnisse Fall 4

Laut ÖNORM ist die Kühllast um 4,89 % größer als nach der analytischen Berechnung. Die Differenz der Ergebnisse kann einige Ursachen haben. Die ÖNORM berücksichtigt nur die Reflexion erster Ordnung der Sonneneinstrahlung im Inneren. Dadurch wird weniger Einstrahlung zurück durch das Fenster ins Freie reflektiert, wodurch mehr Energie im Raum bleibt. Weiters rechnet Kühllast H6040 mit dem g-Wert, die analytische Rechnung erfolgte hingegen mittels Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrad. Durch diese grundsätzlich unterschiedliche Herangehensweise wird eine Abweichung entstanden sein, noch dazu werden aber Messwerte verwendet, deren ungenaue Angabe auch zu einer Differenz der Ergebnisse führen kann. Außerdem wird nach ÖNORM die im Glas absorbierte Energie nicht nach berechneten Wärmeströmen ins Innere und nach außen aufgeteilt, sondern nach einem festen Schema.

5.8 Diskussion der Ergebnisse der Validierung

Laut Aufgabenstellung dieser Arbeit sollen die Methoden der ÖNORM H 6040, der VDI 2078 und einiger Webseitenrechner und Formblätter validiert werden. Für die Validierung kam allerdings nur die ÖNORM in Frage, da nur diese auch die Berechnung von Fällen, die vom normalen Betrieb abweichen, ermöglicht und erlaubt. Anhand fünf solcher Fälle wurden die Simulationsergebnisse des Verfahrens der ÖNORM (vertreten durch das Programm „Kühllast H6040“ als Umsetzung der ÖNORM H 6040) mit einer analytischen Methode verglichen.

Im Folgenden sind die Ergebnisse der fünf Validierungsfälle zusammengefasst. Dabei dient die Angabe von vier Nachkommastellen bei den Ergebnissen nur dem Vergleich zwischen analytischer Berechnung und Berechnung nach ÖNORM und soll keinen Anhaltspunkt für die Genauigkeit der Berechnungen darstellen:

Validierungsfall mit Parametern der analytischen Berechnungen		Ermittelte Kühllast		Abweichung (gerundet)	
		analytisch	Kühllast H6040	absolut	in %
Fall 1	α laut aktueller Literatur	233,5025 W	234,8936 W	1,39 W	0,60 %
	α laut ÖNORM	234,8936 W		0,00 W	0,00 %
Fall 2	α laut aktueller Literatur, c_p und p bei 1bar	426,3000 W	435,8936 W	9,59 W	2,25 %
	α laut ÖNORM, c_p und p bei 1bar	427,6911 W		8,20 W	1,92 %
	α laut aktueller Literatur, c_p und p laut ÖNORM	434,5025 W		1,39 W	0,3 %
	α laut ÖNORM, c_p und p laut ÖNORM	435,8936 W		0,00 W	0,00 %
Fall 3	α laut aktueller Literatur	778,3418 W	830,6383 W	52,30 W	6,72 %
	α laut ÖNORM	830,6383 W		0,00 W	0,00 %
Fall 4	α laut Hersteller	342,0000 W	342,0000 W	0,00 W	0,00 %
Fall 5	α laut Hersteller	3457,9633 W	3626,9474 W	168,98 W	4,89 %

Tabelle 5.18: Die Ergebnisse der Validierungsfälle

In den ersten drei Fällen entstehen Unterschiede zwischen den Ergebnissen der analytischen Berechnung und der Simulation durch die unterschiedlichen Wärmeübergangskoeffizienten. Das liegt daran, dass die ÖNORM zu einem Zeitpunkt veröffentlicht wurde, zu dem allgemein mit andere Koeffizienten gerechnet wurde als heute. Da allerdings sowohl die alten als auch die aktuell üblichen Werte in einem begründbaren Bereich liegen, kann der Einsatz der alten Werte in der ÖNORM nicht als Fehler angesehen werden. Der Einsatz der ÖNORM-gemäßen Wärmeübergangskoeffizienten in den analytischen Berechnungen führt bei Fall 1 und Fall 3 zu Abweichungen, die unter der Genauigkeit der im Programm eingesetzten Variablentypen liegt.

Bei Fall 2 fällt noch ein Unterschied auf: für die spezifische Wärmekapazität c_p und die Luftdichte ρ werden in der ÖNORM Werte eingesetzt, die zu dem Schluss führen, dass bei Standardbedingungen (25 °C, 101325 Pa) gerechnet wird. Da der Luftdruck in Österreich laut den Daten der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik im Monatsdurchschnitt deutlich unter Standardbedingungen bleibt, ist die Wahl dieses Luftdrucks zu hinterfragen. Da der Luftdruck im Durchschnitt in Österreich knapp unter 1 bar liegt, wäre 1 bar als Luftdruck für die Berechnungen eine bessere Wahl. Die durch den Luftdruck beeinflussten Daten (unter anderem die spezifische Wärmekapazität c_p und die Luftdichte ρ) müssten daher bei einer Überarbeitung der ÖNORM entsprechend angepasst werden. Fall 2 lässt die Vermutung zu, dass die Abweichungen durch die eingesetzten Wärmeübergangskoeffizienten wesentlich kleiner ausfallen als Abweichungen durch die gewählten Stoffwerte (spezifische Wärmekapazität und Dichte).

Für Fall 4 entspricht das Ergebnis der Berechnungen nach ÖNORM exakt der analytischen Berechnung. Der Fall 5 mit Fenster und Sonneneinstrahlung führt zu der größten Abweichung (4,89%), wobei das auch der komplexeste Fall ist und somit einige Unterschiede in der Berechnung (die ÖNORM rechnet mit dem g-Wert, die analytische Rechnung erfolgte hingegen mittels Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrad – Abweichungen können auch aus den ungenauen Glashersteller-Angaben entstanden sein) leicht zu der insgesamt doch moderaten Abweichung führen können.

Bei allen Fällen ist auffallend, dass die Ergebnisse der ÖNORM nur Abweichungen in positiver Richtung aufweisen.

Zusammenfassend ist erkennbar, dass die Ergebnisse der Berechnungen der ÖNORM bei den Fällen 1 bis 3 sehr genau den Ergebnissen der analytischen Validierungsrechnungen entsprechen. Die Anpassung der Wärmeübergangskoeffizienten in der ÖNORM an die in der aktuellen Literatur und den aktuellen europäischen Normen eingesetzten Werte wäre sinnvoll, um vergleichbare Rechenergebnisse zu erhalten. Die Änderung des zugrundegelegten Luftdrucks in der ÖNORM auf 1 bar für Projektstandorte innerhalb Österreichs ist hingegen eindeutig zu empfehlen. Noch besser wäre eine ortsabhängige Wahl der Stoffwerte in Abhängigkeit vom Durchschnitt der tatsächlich an dem Ort gemessenen Luftdrücke. Die Fälle 4 und 5 führen zu dem Schluss, dass die ÖNORM auch bei komplexeren Berechnungen mit Einstrahlung auf Fenster gute Ergebnisse liefert.

Die Validierung der ÖNORM H 6040 kann nach der Durchführung der

- theoretischen Validierung in dieser Arbeit und der
- praktischen Validierung im Rahmen einer Forschungsarbeit für das Bundesministerium für Wissenschaft und Forschung (siehe Kapitel 3.1.1)

mit einem positiven Ergebnis abgeschlossen werden. Die Abweichungen der Ergebnisse der ÖNORM sind gegenüber den analytischen Berechnungen sehr klein ($<4,89\%$, ausgenommen Fall 3 bei von der ÖNORM abweichenden Wärmeübergangskoeffizienten. Diese etwas größere Abweichung entsteht durch die Parameter und nicht durch das Rechenverfahren selbst), wobei nur positive Abweichungen auftreten! Eine Unterdimensionierung von Kühlanlagen kann daher ausgeschlossen werden. Auch die Abweichungen im Rahmen der Forschungsarbeit (Messwerte gegenüber berechneten Temperaturen) sind sehr klein und liegen im Bereich der Messtoleranzen.

Die ÖNORM H 6040 ist somit in der Theorie und in der Praxis hinreichend verifiziert.

6 Vergleich der Rechenverfahren

6.1 Einleitung

Im letzten Kapitel konnte das Verfahren der ÖNORM H 6040 zur Ermittlung der sensiblen Kühllast erfolgreich verifiziert werden. Es wird daher in diesem Kapitel als Referenzverfahren für Vergleiche mit den Verfahren der VDI 2078, sowie Webseitenrechnern und Formblättern herangezogen.

Da es sich bei der Software „Kühllast H6040“ um das offizielle Programm des Österreichischen Normungsinstituts handelt, wird in dieser Arbeit für die Validierung und den Vergleich davon ausgegangen, dass diese Software mit der Norm gleichgesetzt werden kann, dass also eine Berechnung der Software einer Rechnung nach Norm entspricht.

Webseitenrechner und Formblätter sind viele (auch kostenlose) im Internet zu finden. Stellvertretend wurden einige kostenlose Vertreter dieser Ermittlungsmethoden zufällig ausgewählt und für die vergleichenden Berechnungen eingesetzt. Es wird nicht beurteilt, ob diese genauere oder ungenauere Ergebnisse liefern als andere Webseitenrechner oder Formblätter und ob die Auswahl repräsentativ für diese Art der Berechnungsmethoden ist.

Für die Vergleichsrechnungen werden folgende Programme und Rechenvorschriften eingesetzt (die Hersteller der Programme werden – bis auf das Programm nach ÖNORM – nicht genannt):

- ÖNORM Kühllast H6040 Version 4 nach ÖNORM H 6040 (1997)
- VDI-EDV 1 } Programme nach VDI 2078 EDV-Verfahren
- VDI-EDV 2 } von drei verschiedenen Herstellern
- VDI-EDV 3 }
- VDI-Kurz 1 Programm nach VDI 2078 Kurzverfahren
(laut Angabe des Anbieters nach „*dem erweiterten Kurzverfahren*“)
- VDI-Kurz 2 Programm nach VDI 2078 Kurzverfahren
- Web 1 Webseitenrechner von einem österreichischen Anbieter
- Web 2 Webseitenrechner von einem österreichischen Anbieter
- Web 3 Webseitenrechner von einem deutsch/österreichischen Anbieter
(laut dessen Angaben wird „*in Anlehnung an die VDI 2078*“ gerechnet)

- Web 4 Webseitenrechner von einem deutschen Anbieter
- Web 5 Webseitenrechner von einem deutschen Anbieter
- Formblatt 1 Formblatt von einem österreichischen Anbieter
- Formblatt 2 Formblatt von einem deutschen Anbieter („in Anlehnung an VDI 2078“)
- Formblatt 3 Formblatt von einem deutschen Anbieter (VDI 2078 wurde zugrunde gelegt)

6.2 Projekt- und Eingabedaten

Für die Vergleichsrechnungen wurden mehrere realistische Versuchsanordnungen gewählt. Die Details sind bei den jeweiligen Fällen angeführt. Es wurde versucht, allen Rechenverfahren bzw. Rechenprogrammen möglichst idente Objekteigenschaften (Maße, Baustoffe etc.) ein- bzw. vorzugeben, um die Ergebnisse nicht durch abweichende Ausgangsdaten zu verfälschen. Allerdings ist das nur so weit möglich, wie es die Verfahren erlauben (bei den vereinfachenden Verfahren sind viele Eigenschaften nicht eingebbar bzw. wählbar).

Außerdem wurden Teile der Berechnungen, bei denen die verschiedenen Methoden von anderen Berechnungsansätzen ausgehen und über die keine Beurteilung erfolgen soll, welche die „richtigere“ Lösung ist, möglichst umgangen. Beispielsweise wurde kein Sonnenschutz eingesetzt, da dieser von den verschiedenen Verfahren unterschiedlich gesteuert wird.

Es werden folgende Fälle berechnet und die Abweichungen zum Referenzverfahren beobachtet:

- Fall 1: Büroraum in einem größeren Gebäude
- Fall 2: Wohnraum in einem größeren Gebäude
- Fall 3: Büroraum in einem Gründerzeithaus
- Fall 4: Wohnraum mit Flachdach
- Sonderfall 1: Büroraum in einem größeren Gebäude ohne innere Lasten
- Sonderfall 2: Wohnraum mit Flachdach ohne innere Lasten

Alle sechs Fälle werden jeweils vier mal gerechnet, wobei der Unterschied in der Orientierung besteht. Alle Räume werden in alle vier Haupthimmelsrichtungen gedreht. Bei den Sonderfällen werden die Fälle 1 (Sonderfall 1) und 4 (Sonderfall 2) noch einmal gerechnet, allerdings ohne innere Lasten und ohne Frischluftzufuhr (Zuluft mit Außentemperatur). Damit kann untersucht werden, wie weit die Abweichungen von inneren Lasten und Frischluftzufuhr abhängen.

Da die Aufgabenstellung dieser Arbeit von den Rechenverfahren fordert, dass sie (auch) für den österreichischen Raum konzipiert sind, wird als Projektstandort Wien gewählt. Einige nach VDI rechnende Programme bieten Wien als Standort an, andere rechnen mit den in der VDI vorgegebenen Klimazonen. Diese Klimazonen sind so gestaltet, dass Wien als in Zone 3 liegend angenommen werden kann.

Bei Verfahren, die keine sich über den Tag verändernden inneren Lasten oder Solltemperaturen berücksichtigen können, wurde die am Tag auftretende maximale Last angenommen.

Als Ergebnisse werden die mit den verschiedenen Verfahren ermittelten Auslegungskühllasten (Nutzungszeitraum des Gebäudes: Jänner bis Dezember) bzw. die maximalen Nennkühllasten (wenn der Nutzungszeitraum nicht angegeben oder nicht vollständig berechnet werden kann) angeführt. Zusätzlich wird die Differenz zum Ergebnis der ÖNORM-Berechnungen angegeben:

$$\frac{\text{Verfahrensergebnis} - \text{ÖNORMErgebnis}}{\text{ÖNORMErgebnis}} \cdot 100 \quad \text{in \%} \quad (6.2-1)$$

Im Folgenden wird eine Übersicht über die Eingabe- bzw. Angabemöglichkeiten der eingesetzten Verfahren gegeben:

Eingabewert	ÖNORM	VDI-EDV 1	VDI-EDV 2	VDI-EDV 3	VDI-Kurz 1	VDI-Kurz 2	Web 1	Web 2	Web 3 *	Web 4	Web 5	Formblatt 1	Formblatt 2	Formblatt 3
Meteorologische Daten														
Wien – Messwerte	x													
Auswahl aus Orts-Liste keine Angabe, welche Art von Daten		x			x									
Auswahl österr. Ort nicht möglich Zone 3 gewählt, da Wien laut mehreren VDI-Programmen in dieser Zone liegt			x	x		x								
keine Angabemöglichkeit							x	x	x	x	x	x	x	x
Reflexionsfaktor Umgebung														
für jeden Außenbauteil extra		x												
einheitlich für das ganze Projekt	x	+												
keine Angabemöglichkeit			x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Berechnungszeitraum														
Jänner bis Dezember wählbar	x	x	x											

Eingabewert	ÖNORM	VDI-EDV 1	VDI-EDV 2	VDI-EDV 3	VDI-Kurz 1	VDI-Kurz 2	Web 1	Web 2	Web 3 *	Web 4	Web 5	Formblatt 1	Formblatt 2	Formblatt 3
Mai bis September wählbar	+	+	+	x										
Vorgabe Juli und September	+	+	+	+	x	x								
unbekannte Vorgabe	+	+	+	+	+	+	x	x	x	x	x	x	x	x
Kühlbetriebszeiten wählbar	x	x	x	x										
Raumangaben:														
Raubbreite		x	x	x		x			x					
Raumtiefe		x	x	x		x			x					
Raumhöhe		x	x			x			x ¹					
Geschosshöhe			x	x	x	x								
Deckendicke			x	x										
Raumluftvolumen	x		x	x				x						
Art des Raums (z.B. Büroraum)					x									
Angabe eines Raumtyps nach VDI 2078 (sehr leicht, leicht, mittel, schwer)		x	x	x	x	x								
Beschränkung der Eingabe auf die Auswahl aus 4 Raumtypen (wenig bis viele Lasten bzw. Wärmedämmung; Serverräume), sonst keine nähere Definition des Raums, bis auf die Raumgröße	+	+	+	+	+	+	+	x	+	+	+	+	+	+
Kunstlicht-Raubbelastungsgrad	x	x	x	x	x									
Gleichzeitigkeitsfaktor Lasten		x	x	x	x									
Tagesabschnitte	4	24	24	24	2 ²	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Pro Abschnitt:														
Personenabwärme in W bei 20°C (Programm berechnet automatisch Änderung bei anderen Temperaturen)	x	x			x									
Personenanzahl (Leistungsbe-rechnung durch Faktoren, Auswahl Tätigkeit leicht, mittel, schwer)		x	x	x										
Personenanzahl (Leistungsbe-rechnung durch einen festen Faktor)						x	x		x	x	x	x	x	x ³
Maschinenabwärme in W	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x
Glühlampen in W	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x
Zuluft mit Außenlufttemp. in m ³ /h	x	x	x	x			x		x				x	
Zuluft mit konst. Temp. in m ³ /h		x	x											
Raumluft-Solltemperatur in °C	x	x	x	x	x	x								

Eingabewert	ÖNORM	VDI-EDV 1	VDI-EDV 2	VDI-EDV 3	VDI-Kurz 1	VDI-Kurz 2	Web 1	Web 2	Web 3 *	Web 4	Web 5	Formblatt 1	Formblatt 2	Formblatt 3
Bauteilangaben:														
Bauteile alle einzeln zu definieren	x	x	x	x	x	x								
Bauteilfläche:														
einzeln anzugeben	x	x	x	x	x	x			? ⁴	x				
Unterteilung in Außenwände, mit dem Fenster mit der höchsten Last, und andere Außenwände	+	+	+	+	+	+					x	x	x	x
südseitige Außenwände und Summe anderer Außenwände	+	+	+	+	+	+	x							
Bauteile, die berücksichtigt werden:														
Außenwände	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x
Fenster	x	x	x	x	x	x	x		x ⁵	x	x	x	x	x
Innenwände	x	x	x	x	x	x			x	x ⁶	x	x	x	x
Decken (in den Fällen 1 bis 3)	x	x	x	x	x	x					x			
Decke wenn Flachdach	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x
Fußböden (in den Fällen 1 bis 3)	x	x	x	x	x	x	x							
Erdberührter Fußboden	x	x	x	x	x									
weitere	x	x	x	x	x									
Opake Bauteile:														
Aufbau:														
Alle Schichten einzeln anzugeben	x		x ⁷	x ⁷										
Jede Schicht genau definiert (Wärmeleitf., Wärmekap., Dichte, Dicke)	x													
Jede Schicht definiert (Wärmeleitfähigkeit, Dichte, Dicke)	+		x ⁷	x ⁷										
Eingabe des U-Werts	+	x	x	x	x	x								
Einteilung nur nach „leichter“ und „schwerer“ Bauweise	+	+	+	+	+	+				x		x		
keine Unterscheidung nach Aufbau	+	+	+	+	+	+	x	x	x	+	x	+	x	x
Innenbauteile:														
Nachbarraum:														
berechnete Temperaturen eines anderen Raums		x												
Soll-Temperaturen eines anderen Raums				x										

Eingabewert	ÖNORM	VDI-EDV 1	VDI-EDV 2	VDI-EDV 3	VDI-Kurz 1	VDI-Kurz 2	Web 1	Web 2	Web 3 *	Web 4	Web 5	Formblatt 1	Formblatt 2	Formblatt 3
gleich aktuellem Raum	x			x										
Temperaturverlauf		x	x											
konstante Temperatur	x		x	x	x									
klimatisiert oder nicht klimatisiert									x					
einheitlich alle gemeinsam klimatisiert oder nicht klimatisiert						x			+	x				
keine nähere Definition	+	+	+	+	+	+			+	+	x	x	x	x
Decke:									? ⁴					
Berücksichtigung mit den gleichen Angaben wie andere Innenbauteile	x	x	x	x	x	x								
Berücksichtigung ohne weitere Angaben	+	+	+	+	+	+	x							
so eingeschränkt, dass in den Fällen 1 bis 3 nicht berücksichtigt	+	+	+	+	+	+				x	x	x	x	x
Fußböden:														
Berücksichtigung mit den gleichen Angaben wie andere Innenbauteile	x	x	x	x	x	x								
Berücksichtigung ohne weitere Angaben	+	+	+	+	+	+								
so eingeschränkt, dass in den Fällen 1 bis 4 nicht berücksichtigt	+	+	+	+	+	+	x	x	x	x	x	x	x	x
Außenbauteile:														
Eingabe der „Bauartklasse“ und der „Zeitkorrektur“ nach VDI 2078 durch Auswahl aus einer VDI 2078-Tabelle (aus dem Jahr 1994)	+	x		x	x	x								
Eingabe der „Bauartklasse“	+	+	x	x										
Absorptionskoeffizient Außenoberfläche	x	x	x	x	x									
Orientierungsangabe														
in Grad	x													
16 Himmelsrichtungen	+		x											

Eingabewert	ÖNORM	VDI-EDV 1	VDI-EDV 2	VDI-EDV 3	VDI-Kurz 1	VDI-Kurz 2	Web 1	Web 2	Web 3 *	Web 4	Web 5	Formblatt 1	Formblatt 2	Formblatt 3
8 Himmelsrichtungen	+	x	+	x	x	x			x	x				
Unterscheidung zwischen südseitigen und anderen	+	+	+	+	+	+	x		+	+				
Keine Orientierungsangabe	+	+	+	+	+	+	+	x	+	+	x	x	x	x
Neigung in Grad	x	x	x	x										
Dach:														
Gleiche Angaben wie für andere Außenbauteile	x	x	x	x	x	x								
Berücksichtigung von Dach mit und Dach ohne Wärmeschutz, Steildach oder Flachdach, ohne weitere Angaben	+	+	+	+	+	+			x					
Berücksichtigung von Dach mit und Dach ohne Wärmeschutz, ohne weitere Angaben	+	+	+	+	+	+	x		+		x	x	x	x
Flachdach ohne weitere Angaben	+	+	+	+	+	+	+		+	x	+	+	+	+
Erdberührter Fußboden:														
Mittlere Tiefe unter Erdoberfl	x													
Fenster:														
U-Wert gesamt in W/(m ² .K)	x	x	x	x	x	x								
Größe in m ² oder Breite und Höhe in m	x	x	x	x	x	x	x		x ⁵	x	x	x	x	x
Glasflächenanteil	x	x	x	x	x									
Unterscheidung der Glastypeen:														
Glastype (z.B. Wärmeschutzglas) und Aufbau (1 bis 3 Scheiben)	x	x												
isolierverglast/doppelt/einfach	+	+				x			x				x	x
keine Unterscheidung	+	+	x	x	x	+	x	x	+	x	x	x	+	+
b-Wert (Mittlerer Durchlassfaktor der Sonneneinstrahlung: für VDI-Rechnungen als Hilfsgröße benötigt, aber nicht für ÖNORM, da diese mit den echten physikalischen Glaswerten rechnet)	+	x	x	x										
g-Wert (da g in der VDI nicht vorkommt, wird bei den VDI-Programmen ev. der Wert zur Errechnung von b eingesetzt, wenn b nicht bekannt ist)	x	x	x	x	x									
Absorptionskoeffizient Rahmen	x													

Eingabewert	ÖNORM	VDI-EDV 1	VDI-EDV 2	VDI-EDV 3	VDI-Kurz 1	VDI-Kurz 2	Web 1	Web 2	Web 3 *	Web 4	Web 5	Formblatt 1	Formblatt 2	Formblatt 3
Beschattung durch Vorsprünge	x	x	x	x	x									
Vorsprünge – seitlicher Abstand:	x													
oben in m	x	x	x	x	x									
unten in m	x													
links in m	x	x	x	x	x									
rechts in m	x	x	x	x	x									
Vorsprünge – Tiefe des Vorsprungs:	x													
oben in m	x	x	x	x	x									
unten in m	x													
links in m	x	x	x	x	x									
rechts in m	x	x	x	x	x									
Orientierungsangabe														
in Grad	x													
16 Himmelsrichtungen	+		x											
8 Himmelsrichtungen	+	x	+	x	x	x			x	x	x	x	x	x
Keine Orientierungsangabe	+	+	+	+	+	+	x	x	+	+	+	+	+	+
Neigung in Grad	x	x	x	x										

Tabelle 6.1: Eingabe- bzw. Auswahlmöglichkeiten der Berechnungsverfahren

Legende: xBerechnungsverfahren/Programm entspricht genau diesem Punkt
 +Berechnungsverfahren/Programm ist besser oder genauer als dieser Punkt
 ?Eigenschaft des Verfahrens/Programms in diesem Punkt nicht feststellbar

* Bei diesem Verfahren werden die Daten über eine grafische Maske eingegeben. Es handelt sich auch um den einzigen Webseitenrechner, der statt den Bauteilflächen die Raumabmessungen abfragt. Daher kann nicht genau festgestellt werden, welche Angaben für welche Berechnungen genutzt werden.

¹ Raumhöhenangabe auf 3,5 m beschränkt (Bei Fall 4 werden 4 m benötigt)

² Eingabe auf bestimmte Zeitabschnitte eingeschränkt (z.B. Personenlast entweder 24h oder von 8-16 Uhr)

³ Hinweis, dass Faktor 120 W/Person einer leichten Tätigkeit entspricht und Angabe anderer Möglichkeiten für diesen Faktor

⁴ Bauteilflächen werden ev. über die Raumbreite, -länge und -höhe berechnet

⁵ Angabe der „Glasfläche“ beschränkt auf Auswahlmöglichkeiten 0 bis 14 m² (0,5 m²-Schritte)

⁶ Es werden nur Innenwände zu nicht klimatisierten Nachbarräumen berücksichtigt

⁷ Eingabe wird bei der Kühllastberechnung nur für die Ermittlung des U-Wertes des Bauteils verwendet (teilweise kann auch alternativ der U-Wert eingegeben werden)

6.3 Fall 1 – Büroraum in einem größeren Gebäude

6.3.1 Vorgaben

Ein typischer Büroraum. Der Raum ist ganztags gleich besetzt, wodurch keine unterschiedlichen Tagesabschnitte auftreten und dieser Fall praktisch mit statischen inneren Lasten gerechnet wird. Rund um den Raum befinden sich weitere Büroräume mit den gleichen Eigenschaften, gleichen Lufttemperaturen und gleichen Einstrahlungswerten wie der aktuelle Raum. Beschattungen durch Objekte in der Umgebung werden in den Berechnungen nicht berücksichtigt.

Die vollständige Beschreibung des Objekts wird im Folgenden angeführt (die physikalischen Daten der Bauteilschichten – Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität und Dichte – sind dem Baustoffkatalog aus [ÖNORM H 6040 Beiblatt 2 (1997)] zu entnehmen):

Beschreibung	Wert
Meteorologische Daten	Wien
Reflexionsfaktor Umgebung	0,25 – Rasen
Kühlbetrieb	0 – 24 Uhr
Raumangaben:	
Höhe über Erdreich	6 m
Raubbreite (Außenwand)	4 m
Raumtiefe	5 m
Raumhöhe	3 m
Geschosshöhe	3,305 m
Raumgrundfläche	20 m ²
Raumluftvolumen	60 m ³
Kunstlicht-Raumbelastungsgrad	1
Gleichzeitigkeitsfaktor(en) Last(en)	1
Tagesabschnitte	1 Tagesabschnitt
Pro Abschnitt:	
Personenabwärme trocken, bei 20°C	230 W (2 Personen, leichte Tätigkeit)
Maschinenabwärme	200 W
Glühlampen	240 W (4 x 60 W)
Zuluft mit Außenlufttemperatur	60 m ³ /h

Beschreibung	Wert
Raumluft-Solltemperatur	24,0°C
Bauteilangaben:	
Bauteil 1 – Decke:	
Bauteilfläche	20 m ²
U-Wert (bei ÖNORM von Norm selbst berechnet)	0,60 W/(m ² .K)
Schichtaufbau (Baustoff und Dicke):	
Schicht 1 (oben)	Textiler Teppich 1,0 cm
Schicht 2	Estrichbeton 5,5 cm
Schicht 3	Mineralwolle TSDP 4,0 cm
Schicht 4	Stahlbeton 18,0 cm
Schicht 5 (unten)	Gipsputz 0,2 cm
Nachbarraum	ident zu aktuellem Raum
Bauteil 2 – Fußboden:	gleich Bauteil 1 - Decke
Bauteil 3 – Außenwand:	
Bauteilfläche inkl. Fensterfläche	12 m ²
Bauteilfläche exkl. Fensterfläche	9 m ²
U-Wert (bei ÖNORM von Norm selbst berechnet)	0,22 W/(m ² .K)
Absorptionskoeffizient der Bauteiloberfläche	0,7
Schichtaufbau (Baustoff und Dicke):	
Schicht 1 (außen)	Kunsthartzementputz 0,2 cm
Schicht 2	EPS Hartschaum 12,0 cm
Schicht 3	Porosierter HLZ m. KZ Mörtel 25,0 cm
Schicht 4 (innen)	Gipsputz 1,5 cm
Orientierung – Azimut (gegen Norden)	Nord 0° / Ost 90° / Süd 180° / West 270°
Neigung – Höhenwinkel der Flächennormalen	0,0°
Bauteil 4 – Fenster:	
Bauteilfläche (Breite x Höhe)	3 m ² (2,0 x 1,5 m)
U-Wert gesamt	1,1 W/(m ² .K)
Glasanteil	75,00 %
Glastyp	Wärmeschutzglas beschichtet
Aufbau	2 Scheiben
b-Wert für VDI-Rechnungen	0,75
g-Wert	60 %

Beschreibung	Wert
Absorptionskoeffizient Rahmen	0,7
Sonnenschutz	nicht vorhanden
Vorsprünge – Abstand vom Fensterrahmen:	
oben	0 m
unten	0 m
links	0 m
rechts	0 m
Vorsprünge – Tiefe des Vorsprungs:	
oben	0 m
unten	0 m
links	0 m
rechts	0 m
Orientierung – Azimut (gegen Norden)	Nord 0° / Ost 90° / Süd 180° / West 270°
Neigung – Höhenwinkel der Flächennormalen	0,0°
Horizontüberhöhung	0,0°
Bauteil 5 – Innenwand:	
Bauteilfläche	15 m ²
U-Wert (bei ÖNORM von Norm selbst berechnet)	1,71 W/(m ² .K)
Schichtaufbau (Baustoff und Dicke):	
Schicht 1	Kalk-Sand-Innenputz 1,5 cm
Schicht 2	Düwa Ziegel 10,0 cm
Schicht 3	Kalk-Sand-Innenputz 1,5 cm
Nachbarraum	ident zu aktuellem Raum
Bauteil 6 – Innenwand:	gleich Bauteil 5 - Innenwand
Bauteil 7 – Innenwand:	
Bauteilfläche	12 m ²
U-Wert (bei ÖNORM von Norm selbst berechnet)	1,71 W/(m ² .K)
Schichtaufbau (Baustoff und Dicke):	
Schicht 1	Kalk-Sand-Innenputz 1,5 cm
Schicht 2	Düwa Ziegel 10,0 cm
Schicht 3	Kalk-Sand-Innenputz 1,5 cm
Nachbarraum	ident zu aktuellem Raum

Tabelle 6.2: Objektdaten Fall 1 – Büroraum in einem größeren Gebäude

6.3.2 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Berechnungen nach den verschiedenen Verfahren und den verschiedenen Orientierungen angeführt. Zusätzlich zur Kühllast wird die Abweichung zum Ergebnis des Verfahrens der ÖNORM H 6040 in Prozenten angegeben:

Fall 1	Ergebnisse							
	Nordorientierung		Ostorientierung		Südorientierung		Westorientierung	
	Kühllast	Differenz	Kühllast	Differenz	Kühllast	Differenz	Kühllast	Differenz
ÖNORM	1233 W	–	1743 W	–	1946 W	–	1882 W	–
VDI-EDV 1	906 W	-27%	1181 W	-32%	1260 W	-35%	1307 W	-31%
VDI-EDV 2	920 W	-25%	1166 W	-33%	1281 W	-34%	1368 W	-27%
VDI-EDV 3	898 W	-27%	1056 W	-39%	1174 W	-40%	1253 W	-33%
VDI-Kurz 1	722 W	-41%	1089 W	-38%	1161 W	-40%	1131 W	-40%
VDI-Kurz 2	889 W	-28%	1295 W	-26%	1437 W	-26%	1404 W	-25%
Web 1	1950 W	58%	1950 W	12%	1995 W	3%	1950 W	4%
Web 2	1920 W	56%	1920 W	10%	1920 W	-1%	1920 W	2%
Web 3	1380 W	12%	1680 W	-4%	1710 W	-12%	1700 W	-10%
Web 4	650 W	-47%	1595 W	-8%	1310 W	-33%	1685 W	-10%
Web 5	2313 W	88%	3093 W	77%	3003 W	54%	3753 W	99%
Formblatt 1	1950 W	58%	2730 W	57%	2640 W	36%	3420 W	82%
Formblatt 2	1885 W	53%	2245 W	29%	2275 W	17%	2260 W	20%
Formblatt 3	1185 W	-4%	1545 W	-11%	1575 W	-19%	1560 W	-17%

Tabelle 6.3: Ergebnisse Fall 1 – Büroraum in einem größeren Gebäude

In den folgenden Grafiken werden die Ergebnisse, getrennt nach Orientierung, einander gegenübergestellt:

- grüner Balken: Abweichung vom Ergebnis des Referenzverfahren kleiner als +/- 10 %
- oranger Balken: Abweichung größer als + 10% (starke Überdimensionierung)
- roter Balken: Abweichung größer als – 10 % (starke Unterdimensionierung)

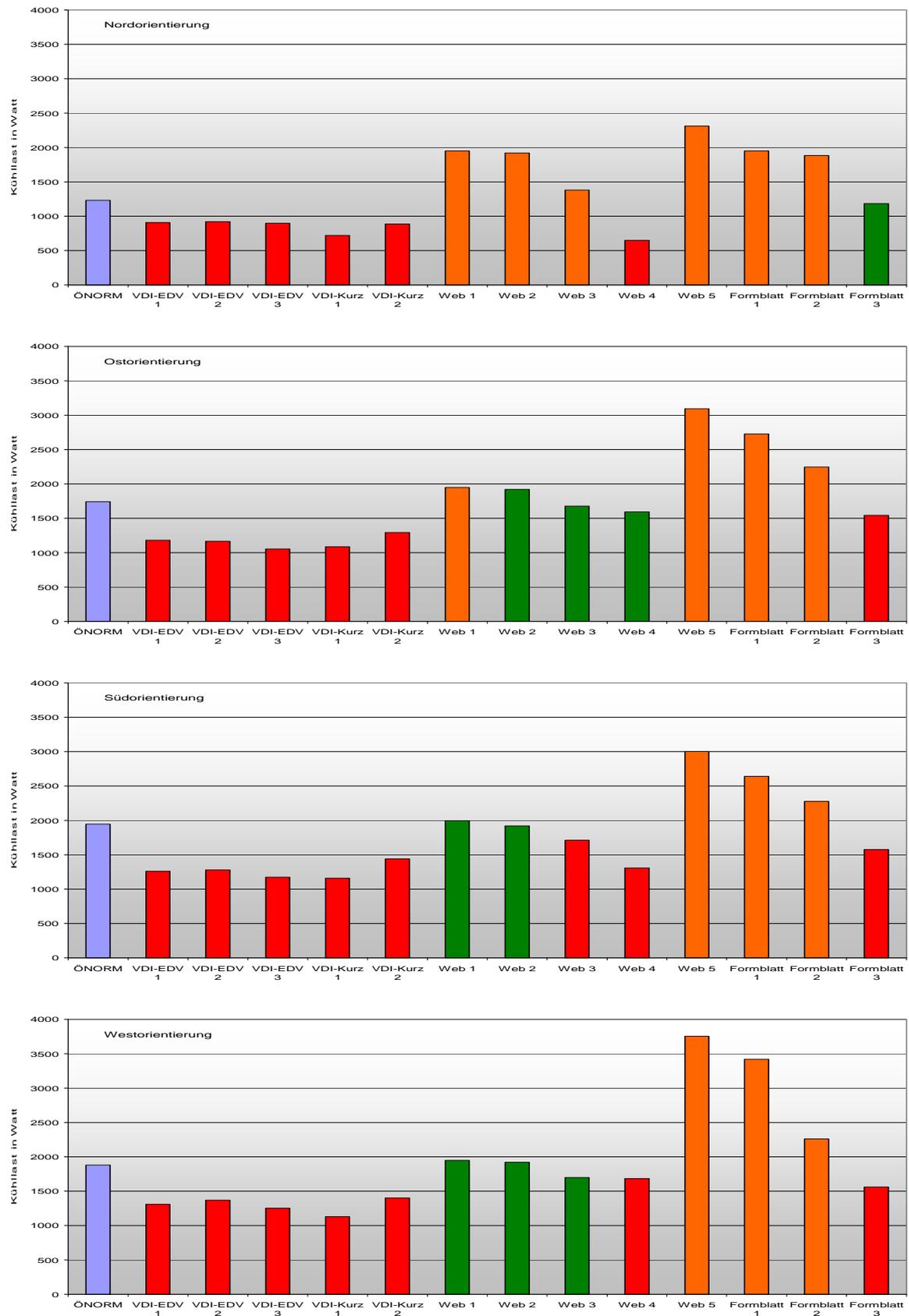


Abb. 6.1: Ergebnisse Fall 1

6.4 Fall 2 – Wohnraum in einem größeren Gebäude

6.4.1 Vorgaben

Es wird der gleiche Raum wie in Fall 1 angenommen. Der Unterschied besteht in der anderen Nutzung als Wohnraum. Es gibt mehrere Tagesabschnitte mit unterschiedlichen inneren Lasten, Luftwechseln und Solltemperaturen. Die Kühlanlage ist nicht durchgehen in Betrieb.

Die vollständige Beschreibung des Objekts wird im Folgenden angeführt (die physikalischen Daten der Bauteilschichten – Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität und Dichte – sind dem Baustoffkatalog aus [ÖNORM H 6040 Beiblatt 2 (1997)] zu entnehmen):

Beschreibung	Wert			
Meteorologische Daten	Wien			
Reflexionsfaktor Umgebung	0,25 – Rasen			
Kühlbetrieb	16 – 24 Uhr			
Raumangaben:				
Raubbreite (Außenwand)	4 m			
Raumtiefe	5 m			
Raumhöhe	3 m			
Raumgrundfläche	20 m ²			
Raumluftvolumen	60 m ³			
Kunstlicht-Raumbelastungsgrad	1			
Gleichzeitigkeitsfaktor(en) Last(en)	1			
Tagesabschnitte	4 Tagesabschnitte			
Abschnitte (von Uhrzeit bis Uhrzeit)	0 – 6	6 – 16	16 – 22	22 – 24
Personenabwärme trocken, bei 20°C	95 W ¹	0 W	230 W ²	95 W
Maschinenabwärme	0 W	0 W	200 W	0 W
Glühlampen	0 W	0 W	240 W	0 W
Zuluft mit Außenlufttemperatur	120 m ³ /h	60 m ³ /h	60 m ³ /h	60 m ³ /h

¹ 1 Person, schlafend

² 2 Personen, leichte bis mäßig schwere Tätigkeit

Beschreibung	Wert			
	Raumluft-Solltemperatur	22,0°C	27,0°C	24,0°C
Bauteilangaben:				
Bauteil 1 – Decke:				
Bauteilfläche	20 m ²			
U-Wert (bei ÖNORM von Norm selbst berechnet)	0,60 W/(m ² .K)			
Schichtaufbau (Baustoff und Dicke):				
Schicht 1 (oben)	Textiler Teppich	1,0 cm		
Schicht 2	Estrichbeton	5,5 cm		
Schicht 3	Mineralwolle TSDP	4,0 cm		
Schicht 4	Stahlbeton	18,0 cm		
Schicht 5 (unten)	Gipsputz	0,2 cm		
Nachbarraum	ident zu aktuellem Raum			
Bauteil 2 – Fußboden:	gleich Bauteil 1 - Decke			
Bauteil 3 – Außenwand:				
Bauteilfläche inkl. Fensterfläche	12 m ²			
Bauteilfläche exkl. Fensterfläche	9 m ²			
U-Wert (bei ÖNORM von Norm selbst berechnet)	0,22 W/(m ² .K)			
Absorptionskoeffizient der Bauteiloberfläche	0,7			
Schichtaufbau (Baustoff und Dicke):				
Schicht 1 (außen)	Kunsthartzementputz	0,2 cm		
Schicht 2	EPS Hartschaum	12,0 cm		
Schicht 3	Porosierter HLZ m. KZ Mörtel	25,0 cm		
Schicht 4 (innen)	Gipsputz	1,5 cm		
Orientierung – Azimut (gegen Norden)	Nord 0° / Ost 90° / Süd 180° / West 270°			
Neigung – Höhenwinkel der Flächennormalen	0,0°			
Bauteil 4 – Fenster:				
Bauteilfläche (Breite x Höhe)	3 m ² (2,0 x 1,5 m)			
U-Wert gesamt	1,1 W/(m ² .K)			
Glasanteil	75,00 %			
Glastyp	Wärmeschutzglas beschichtet			
Aufbau	2 Scheiben			
b-Wert für VDI-Rechnungen	0,75			
g-Wert	60 %			

Beschreibung	Wert
Absorptionskoeffizient Rahmen	0,7
Sonnenschutz	nicht vorhanden
Vorsprünge – Abstand vom Fensterrahmen:	
oben	0 m
unten	0 m
links	0 m
rechts	0 m
Vorsprünge – Tiefe des Vorsprungs:	
oben	0 m
unten	0 m
links	0 m
rechts	0 m
Orientierung – Azimut (gegen Norden)	Nord 0° / Ost 90° / Süd 180° / West 270°
Neigung – Höhenwinkel der Flächennormalen	0,0°
Horizontüberhöhung	0,0°
Bauteil 5 – Innenwand:	
Bauteilfläche	15 m ²
U-Wert (bei ÖNORM von Norm selbst berechnet)	1,71 W/(m ² .K)
Schichtaufbau (Baustoff und Dicke):	
Schicht 1	Kalk-Sand-Innenputz 1,5 cm
Schicht 2	Düwa Ziegel 10,0 cm
Schicht 3	Kalk-Sand-Innenputz 1,5 cm
Nachbarraum	ident zu aktuellem Raum
Bauteil 6 – Innenwand:	gleich Bauteil 5 - Innenwand
Bauteil 7 – Innenwand:	
U-Wert (bei ÖNORM von Norm selbst berechnet)	1,71 W/(m ² .K)
Bauteilfläche	12 m ²
Schichtaufbau (Baustoff und Dicke):	
Schicht 1	Kalk-Sand-Innenputz 1,5 cm
Schicht 2	Düwa Ziegel 10,0 cm
Schicht 3	Kalk-Sand-Innenputz 1,5 cm
Nachbarraum	ident zu aktuellem Raum

Tabelle 6.4: Objektdaten Fall 2 – Wohnraum in einem größeren Gebäude

6.4.2 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Berechnungen nach den verschiedenen Verfahren und den verschiedenen Orientierungen angeführt. Zusätzlich zur Kühllast wird die Abweichung zum Ergebnis des Verfahrens der ÖNORM H 6040 in Prozenten angegeben:

Fall 2	Ergebnisse							
	Nordorientierung		Ostorientierung		Südorientierung		Westorientierung	
	Kühllast	Differenz	Kühllast	Differenz	Kühllast	Differenz	Kühllast	Differenz
ÖNORM	1297 W	–	2024 W	–	1999 W	–	2172 W	–
VDI-EDV 1	965 W	-26%	1193 W	-41%	1249 W	-38%	1531 W	-30%
VDI-EDV 2	1112 W	-14%	1370 W	-32%	1435 W	-28%	1715 W	-21%
VDI-EDV 3	1054 W	-19%	1308 W	-35%	1255 W	-37%	1360 W	-37%
VDI-Kurz 1 ¹	722 W	-44%	1089 W	-46%	1161 W	-42%	1131 W	-48%
VDI-Kurz 2 ¹	889 W	-31%	1295 W	-36%	1437 W	-28%	1404 W	-35%
Web 1 ¹	1950 W	50%	1950 W	-4%	1995 W	0%	1950 W	-10%
Web 2 ¹	1920 W	48%	1920 W	-5%	1920 W	-4%	1920 W	-12%
Web 3 ¹	1380 W	6%	1680 W	-17%	1710 W	-14%	1700 W	-22%
Web 4 ¹	650 W	-50%	1595 W	-21%	1310 W	-34%	1685 W	-22%
Web 5 ¹	2313 W	78%	3093 W	53%	3003 W	50%	3753 W	73%
Formblatt 1 ¹	1950 W	50%	2730 W	35%	2640 W	32%	3420 W	57%
Formblatt 2 ¹	1885 W	45%	2245 W	11%	2275 W	14%	2260 W	4%
Formblatt 3 ¹	1185 W	-9%	1545 W	-24%	1575 W	-21%	1560 W	-28%

Tabelle 6.5: Ergebnisse Fall 2 – Wohnraum in einem größeren Gebäude

In den folgenden Grafiken werden die Ergebnisse, getrennt nach Orientierung, einander gegenübergestellt:

- grüner Balken: Abweichung vom Ergebnis des Referenzverfahren kleiner als +/- 10 %
- oranger Balken: Abweichung größer als + 10% (starke Überdimensionierung)
- roter Balken: Abweichung größer als – 10 % (starke Unterdimensionierung)

¹ Ergebnisse sind gleich den Ergebnissen von Fall 1, da bei diesen Verfahren nicht zwischen verschiedenen Tagesabschnitten unterschieden werden kann

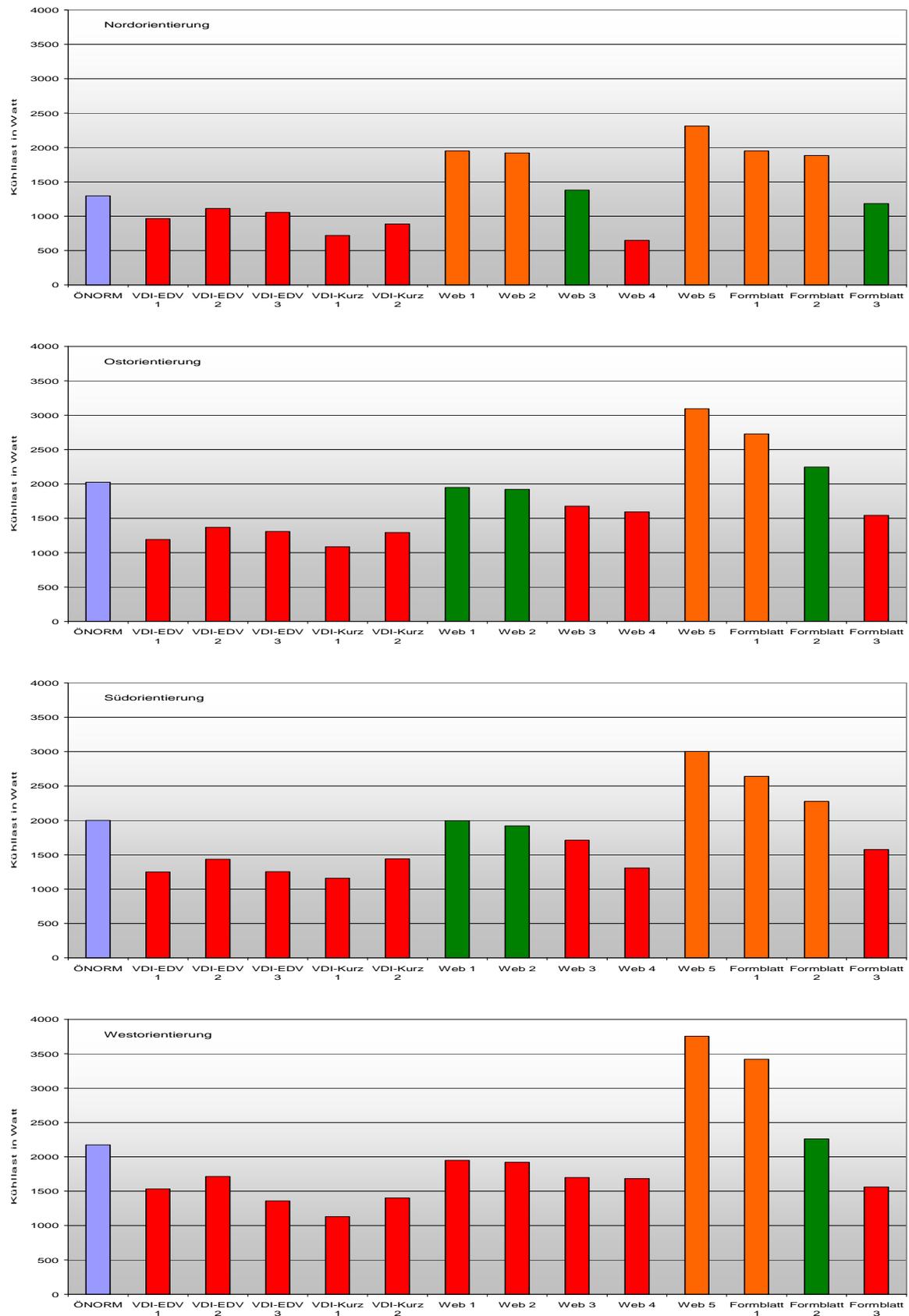


Abb. 6.2: Ergebnisse Fall 2

6.5 Fall 3 – Büroraum in einem Gründerzeithaus

6.5.1 Vorgaben

Bei diesem Fall wird die Kühllast für einen Büroraum in einem Gründerzeithaus ermittelt. Dieser Gebäudetyp wurde gewählt, da dies ein typischer Berechnungsfall für die Nachrüstung von Büroräumen in Wien mit kleinen bis mittleren Kühlanlagen ist.

Die vollständige Beschreibung des Objekts wird im Folgenden angeführt (die physikalischen Daten der Bauteilschichten – Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität und Dichte – sind dem Baustoffkatalog aus [ÖNORM H 6040 Beiblatt 2 (1997)] zu entnehmen):

Beschreibung	Wert		
Meteorologische Daten	Wien		
Reflexionsfaktor Umgebung	0,25 – Rasen		
Kühlbetrieb	10 – 17 Uhr		
Raumangaben:			
Raubbreite (Außenwand)	6 m		
Raumtiefe	5 m		
Raumhöhe	4 m		
Geschosshöhe	4,5 m		
Raumluftvolumen	120 m ³		
Kunstlicht-Raubbelastungsgrad	1		
Gleichzeitigkeitsfaktor(en) Last(en)	1		
Tagesabschnitte	3 Tagesabschnitte		
Abschnitte (von Uhrzeit bis Uhrzeit)	8 – 10 Uhr	10 – 17 Uhr	17 – 8 Uhr
Personenabwärme trocken, bei 20°C	460 W ¹	460 W	0 W
Maschinenabwärme	1000 W	1000 W	0 W
Glühlampen	0 W	0 W	0 W
Zuluft mit Außenlufttemperatur	360 m ³ /h ²	120 m ³ /h	60 m ³ /h

¹ 4 Personen, leichte bis mäßig schwere Tätigkeit

² hoher Luftwechsel durch Lüften bei offenen Fenstern

Beschreibung	Wert		
Raumluft-Solltemperatur	24,0°C	24,0°C	24,0°C
Bauteilangaben:			
Bauteil 1 – Decke:			
Bauteilfläche	30 m ²		
U-Wert (bei ÖNORM von Norm selbst berechnet)	0,53 W/(m ² .K)		
Schichtaufbau (Baustoff und Dicke):			
Schicht 1 (oben)	Stabparkett Eiche	2,0 cm	
Schicht 2	Weichholz	2,5 cm	
Schicht 3	Hochofenschlacke	10,0 cm	
Schicht 4	Weichholz	2,5 cm	
Schicht 5	Träme zwischen Luft	25,0 cm	
Schicht 6	Weichholz	2,5 cm	
Schicht 7	Holzwohle Leichtbauplatte	3,5 cm	
Schicht 8 (unten)	Gipsputz	2,0 cm	
Nachbarraum	ident zu aktuellem Raum		
Bauteil 2 – Fußboden:	gleich Bauteil 1 - Decke		
Bauteil 3 – Außenwand:			
Bauteilfläche inkl. Fensterfläche	24,00 m ²		
Bauteilfläche exkl. Fensterfläche	19,68 m ²		
U-Wert (bei ÖNORM von Norm selbst berechnet)	1,01 W/(m ² .K)		
Absorptionskoeffizient der Bauteiloberfläche	0,7		
Schichtaufbau (Baustoff und Dicke):			
Schicht 1 (außen)	Kalk-Zement-Sand-Putz	2,0 cm	
Schicht 2	Vollziegel	60,0 cm	
Schicht 3 (innen)	Kalk-Zement-Sand-Putz	2,0 cm	
Orientierung – Azimut (gegen Norden)	Nord 0° / Ost 90° / Süd 180° / West 270°		
Neigung – Höhenwinkel der Flächennormalen	0,0°		
Bauteil 4 – Fenster:			
Bauteilfläche (Breite x Höhe)	2 x 2,16 m ² (1,2 x 1,8 m)		
U-Wert gesamt	2,4 W/(m ² .K)		
Glasanteil	75,00 %		
Glastyp	Glas unbeschichtet		
Aufbau	2 Scheiben Kastenfenster		

Beschreibung	Wert
b-Wert (nur für VDI-Rechnungen benötigt)	0,87
g-Wert	70 %
Absorptionskoeffizient Rahmen	0,7
Sonnenschutz	nicht vorhanden
Vorsprünge – Abstand vom Fensterrahmen:	
oben / unten / links / rechts	0 m
Vorsprünge – Tiefe des Vorsprungs:	
oben / unten / links / rechts	0,25 m
unten	0,25 m
links	0,25 m
rechts	0,25 m
Orientierung – Azimut (gegen Norden)	Nord 0° / Ost 90° / Süd 180° / West 270°
Neigung – Höhenwinkel der Flächennormalen	0,0°
Horizontüberhöhung	0,0°
Bauteil 5 – Innenwand:	
Bauteilfläche	20 m ²
U-Wert (bei ÖNORM von Norm selbst berechnet)	1,60 W/(m ² .K)
Schichtaufbau (Baustoff und Dicke):	
Schicht 1	Kalk-Sand-Innenputz 1,5 cm
Schicht 2	Vollziegel 25,0 cm
Schicht 3	Kalk-Sand-Innenputz 1,5 cm
Nachbarraum	ident zu aktuellem Raum
Bauteil 6 – Innenwand:	gleich Bauteil 5 - Innenwand
Bauteil 7 – Innenwand:	
Bauteilfläche	24 m ²
U-Wert (bei ÖNORM von Norm selbst berechnet)	1,60 W/(m ² .K)
Schichtaufbau (Baustoff und Dicke):	
Schicht 1	Kalk-Sand-Innenputz 1,5 cm
Schicht 2	Vollziegel 25,0 cm
Schicht 3	Kalk-Sand-Innenputz 1,5 cm
Nachbarraum	ident zu aktuellem Raum

Tabelle 6.6: Objektdaten Fall 3 – Büroraum in einem Gründerzeithaus

6.5.2 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Berechnungen nach den verschiedenen Verfahren und den verschiedenen Orientierungen angeführt. Zusätzlich zur Kühllast wird die Abweichung zum Ergebnis des Verfahrens der ÖNORM H 6040 in Prozenten angegeben:

Fall 3	Ergebnisse							
	Nordorientierung		Ostorientierung		Südorientierung		Westorientierung	
	Kühllast	Differenz	Kühllast	Differenz	Kühllast	Differenz	Kühllast	Differenz
ÖNORM	2824 W	–	4229 W	–	3397 W	–	3708 W	–
VDI-EDV 1	1939 W	-31%	2492 W	-41%	2529 W	-26%	2609 W	-30%
VDI-EDV 2	2082 W	-26%	2945 W	-30%	2895 W	-15%	3032 W	-18%
VDI-EDV 3	2161 W	-23%	2878 W	-32%	2822 W	-17%	3005 W	-19%
VDI-Kurz 1	1457 W	-48%	2077 W	-51%	2143 W	-37%	2064 W	-44%
VDI-Kurz 2	1743 W	-38%	2182 W	-48%	2398 W	-29%	2417 W	-35%
Web 1	3626 W	28%	3626 W	-14%	3725 W	10%	3626 W	-2%
Web 2	3840 W	36%	3840 W	-9%	4560 W	34%	3840 W	4%
Web 3	2830 W	0%	3820 W	-10%	3910 W	15%	3870 W	4%
Web 4	1270 W	-55%	2732 W	-35%	2355 W	-31%	2928 W	-21%
Web 5	4158 W	47%	5281 W	25%	5152 W	52%	6232 W	68%
Formblatt 1	3670 W	30%	4793 W	13%	4664 W	37%	5787 W	56%
Formblatt 2	3756 W	33%	4707 W	11%	4793 W	41%	4750 W	28%
Formblatt 3	2326 W	-18%	3277 W	-23%	3363 W	-1%	3320 W	-10%

Tabelle 6.7: Ergebnisse Fall 3 – Büroraum in einem Gründerzeithaus

In den folgenden Grafiken werden die Ergebnisse, getrennt nach Orientierung, einander gegenübergestellt:

- grüner Balken: Abweichung vom Ergebnis des Referenzverfahren kleiner als +/- 10 %
- oranger Balken: Abweichung größer als + 10% (starke Überdimensionierung)
- roter Balken: Abweichung größer als – 10 % (starke Unterdimensionierung)

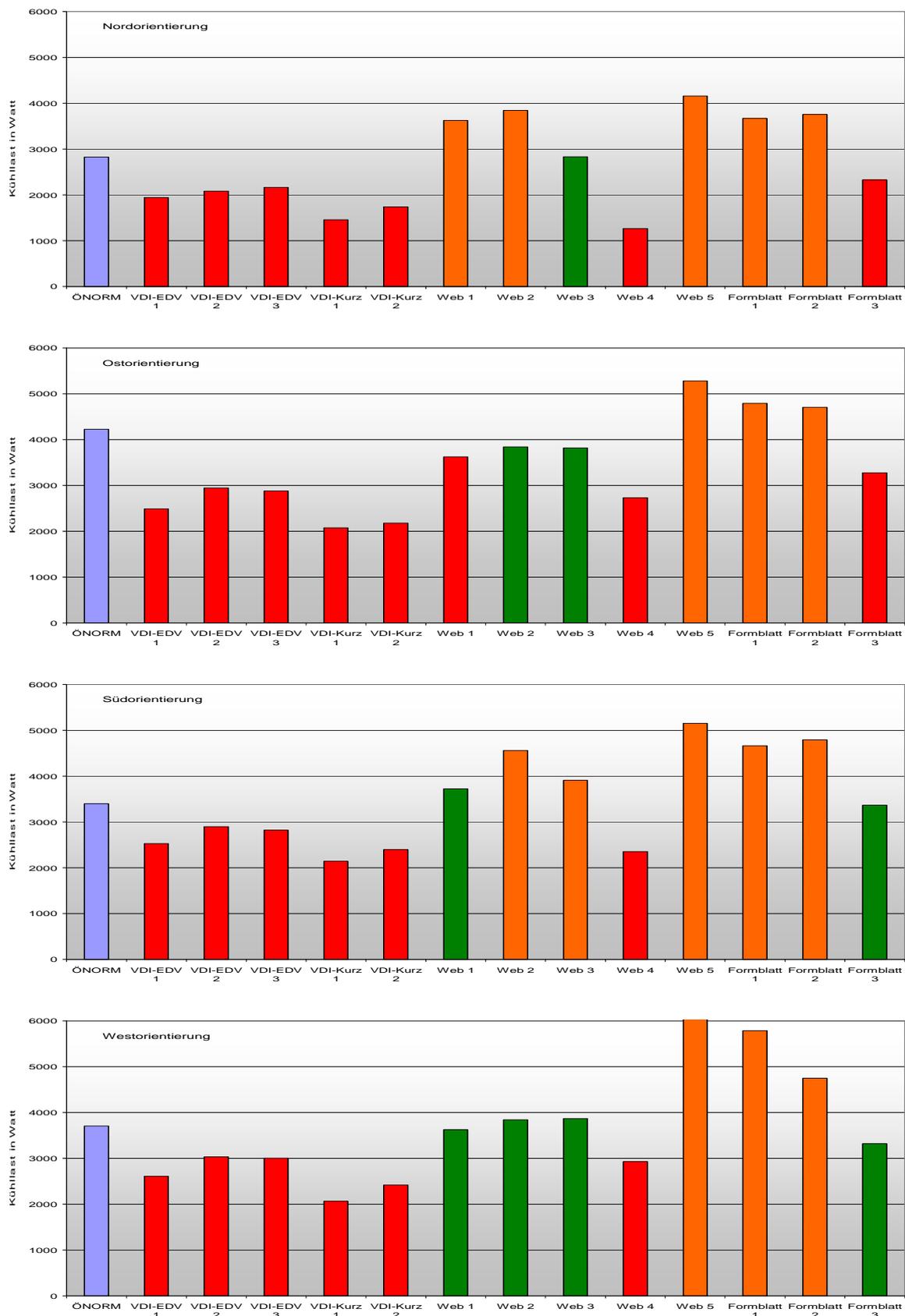


Abb. 6.3: Ergebnisse Fall 3

6.6 Fall 4 – Wohnraum mit Flachdach

6.6.1 Vorgaben

Bei diesem Fall wird das komplexeste der hier angeführten Objekte berechnet:

Ein Raum mit einem Vordach über dem Fenster, einem Flachdach über dem Raum und einem erdberührten Fußboden, ähnlich wie der mittlere Raum (Fenster in der Mitte) in der folgenden Skizze (der Baum wurde in den Berechnungen nicht berücksichtigt). Die weiteren Vorgaben entsprechen größtenteils den Angaben von Fall 2.

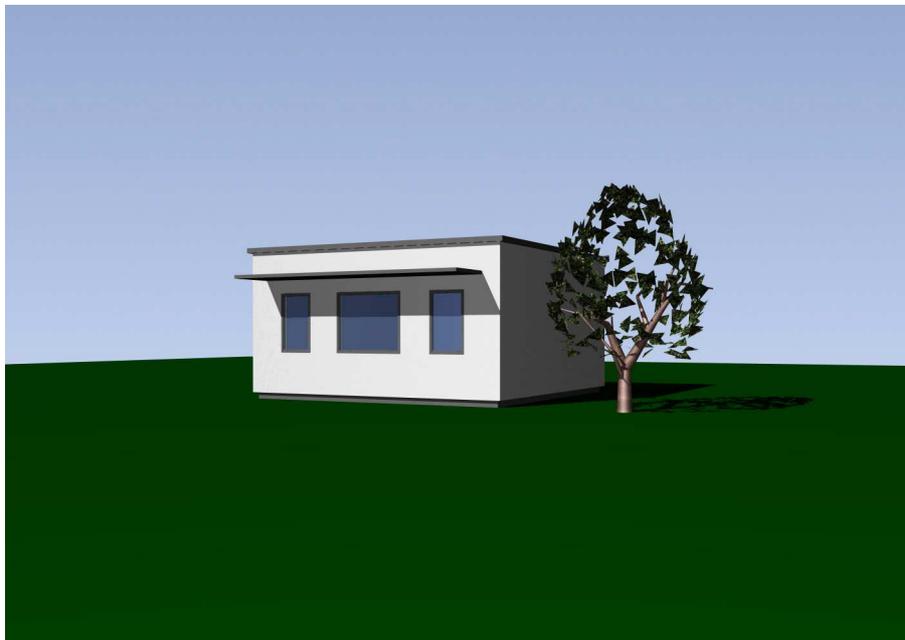


Abb. 6.4: Fall 4 – Wohnraum mit Flachdach – Skizze des Gebäudes

Die vollständige Beschreibung des Objekts wird im Folgenden angeführt (die physikalischen Daten der Bauteilschichten – Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität und Dichte – sind dem Baustoffkatalog aus [ÖNORM H 6040 Beiblatt 2 (1997)] zu entnehmen):

Beschreibung	Wert
Meteorologische Daten	Wien
Reflexionsfaktor Umgebung	0,25 – Rasen
Kühlbetrieb	16 – 24 Uhr

Beschreibung	Wert			
Raumangaben:				
Raubbreite (Außenwand)	4 m			
Raumtiefe	5 m			
Raumhöhe	3 m			
Raumgrundfläche	20 m ²			
Raumluftvolumen	60 m ³			
Kunstlicht-Raubbelastungsgrad	1			
Gleichzeitigkeitsfaktor(en) Last(en)	1			
Tagesabschnitte	4 Tagesabschnitte			
Abschnitte (von Uhrzeit bis Uhrzeit)	0 – 6	6 – 16	16 – 22	22 – 24
Personenabwärme trocken, bei 20°C	95 W ¹	0 W	230 W ²	95 W
Maschinenabwärme	0 W	0 W	200 W	0 W
Glühlampen	0 W	0 W	240 W	0 W
Zuluft mit Außenlufttemperatur	120 m ³ /h	60 m ³ /h	60 m ³ /h	60 m ³ /h
Raumluft-Solltemperatur	22,0°C	27,0°C	24,0°C	22,0°C
Bauteilangaben:				
Bauteil 1 – Decke/Dach:				
Bauteilfläche	20 m ²			
U-Wert (bei ÖNORM von Norm selbst berechnet)	0,17 W/(m ² .K)			
Absorptionskoeffizient der Bauteiloberfläche	0,6			
Schichtaufbau (Baustoff und Dicke):				
Schicht 1 (oben)	Kies trocken	6,0 cm		
Schicht 2	XPS Hartschaum	18,0 cm		
Schicht 3	Polymerbitubahn m. Glasvlies	1,5 cm		
Schicht 4	Stahlbeton	18,0 cm		
Schicht 5 (unten)	Gipsputz	0,3 cm		
Neigung – Höhenwinkel der Flächennormalen	90,0°			
Bauteil 2 – Erdberührter Fußboden:				
Bauteilfläche	20 m ²			

¹ 1 Person, schlafend

² 2 Personen, leichte bis mäßig schwere Tätigkeit

Beschreibung	Wert
U-Wert (bei ÖNORM von Norm selbst berechnet)	0,16 W/(m ² .K)
Mittlere Tiefe unter der Erdoberfläche	0 m
Schichtaufbau (Baustoff und Dicke):	
Schicht 1 (oben)	Stabparkett Eiche 2,0 cm
Schicht 2	Estrichbeton 5,5 cm
Schicht 3	Mineralwolle TSDP 2,0 cm
Schicht 4	Sand trocken 4,0 cm
Schicht 5	Stahlbeton 18,0 cm
Schicht 6	XPS Hartschaum 16,0 cm
Schicht 7 (unten)	Kies feucht 20,0 cm
Bauteil 3 – Außenwand:	
Bauteilfläche inkl. Fensterfläche	12 m ²
Bauteilfläche exkl. Fensterfläche	9 m ²
U-Wert (bei ÖNORM von Norm selbst berechnet)	0,22 W/(m ² .K)
Absorptionskoeffizient der Bauteiloberfläche	0,7
Schichtaufbau (Baustoff und Dicke):	
Schicht 1 (außen)	Kunstharz Zementputz 0,2 cm
Schicht 2	EPS Hartschaum 12,0 cm
Schicht 3	Porosierter HLZ m. KZ Mörtel 25,0 cm
Schicht 4 (innen)	Gipsputz 1,5 cm
Orientierung – Azimut (gegen Norden)	Nord 0° / Ost 90° / Süd 180° / West 270°
Neigung – Höhenwinkel der Flächennormalen	0,0°
Bauteil 4 – Fenster:	
Bauteilfläche (Breite x Höhe)	3 m ² (2,0 x 1,5 m)
U-Wert gesamt	1,1 W/(m ² .K)
Glasanteil	75,00 %
Glastyp	Wärmeschutzglas beschichtet
Aufbau	2 Scheiben
b-Wert für VDI-Rechnungen	0,75
g-Wert	60 %
Absorptionskoeffizient Rahmen	0,7
Sonnenschutz	nicht vorhanden
Vorsprünge – Abstand vom Fensterrahmen:	

Beschreibung	Wert
oben	0,4 m
unten / links / rechts	0 m
Vorsprünge – Tiefe des Vorsprungs:	
oben	1,0 m
unten / links / rechts	0 m
Orientierung – Azimut (gegen Norden)	Nord 0° / Ost 90° / Süd 180° / West 270°
Neigung – Höhenwinkel der Flächennormalen	0,0°
Horizontüberhöhung	0,0°
Bauteil 5 – Innenwand:	
Bauteilfläche	15 m ²
U-Wert (bei ÖNORM von Norm selbst berechnet)	1,71 W/(m ² .K)
Schichtaufbau (Baustoff und Dicke):	
Schicht 1	Kalk-Sand-Innenputz 1,5 cm
Schicht 2	Düwa Ziegel 10,0 cm
Schicht 3	Kalk-Sand-Innenputz 1,5 cm
Nachbarraum	30°C konstant
Bauteil 6 – Innenwand:	
Bauteilfläche	15 m ²
U-Wert (bei ÖNORM von Norm selbst berechnet)	1,71 W/(m ² .K)
Schichtaufbau (Baustoff und Dicke):	
Schicht 1	Kalk-Sand-Innenputz 1,5 cm
Schicht 2	Düwa Ziegel 10,0 cm
Schicht 3	Kalk-Sand-Innenputz 1,5 cm
Nachbarraum	ident zu aktuellem Raum
Bauteil 7 – Innenwand:	
U-Wert (bei ÖNORM von Norm selbst berechnet)	1,71 W/(m ² .K)
Bauteilfläche	12 m ²
Schichtaufbau (Baustoff und Dicke):	
Schicht 1	Kalk-Sand-Innenputz 1,5 cm
Schicht 2	Düwa Ziegel 10,0 cm
Schicht 3	Kalk-Sand-Innenputz 1,5 cm
Nachbarraum	20°C konstant

Tabelle 6.8: Objektdaten Fall 4 – Wohnraum mit Flachdach

6.6.2 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Berechnungen nach den verschiedenen Verfahren und den verschiedenen Orientierungen angeführt. Zusätzlich zur Kühllast wird die Abweichung zum Ergebnis des Verfahrens der ÖNORM H 6040 in Prozenten angegeben:

Fall 4	Ergebnisse							
	Nordorientierung		Ostorientierung		Südorientierung		Westorientierung	
	Kühllast	Differenz	Kühllast	Differenz	Kühllast	Differenz	Kühllast	Differenz
ÖNORM	1439 W	–	1746 W	–	1565 W	–	1919 W	–
VDI-EDV 1	1037 W	-28%	1212 W	-31%	1115 W	-29%	1490 W	-22%
VDI-EDV 2	1174 W	-18%	1374 W	-21%	1270 W	-19%	1661 W	-13%
VDI-EDV 3	1118 W	-22%	1139 W	-35%	1137 W	-27%	1144 W	-40%
VDI-Kurz 1	801 W	-44%	1158 W	-34%	1213 W	-22%	1212 W	-37%
VDI-Kurz 2	1414 W	-2%	1757 W	1%	1850 W	18%	1929 W	1%
Web 1	2200 W	53%	2200 W	26%	2245 W	43%	2200 W	15%
Web 2	1920 W	33%	1920 W	10%	1920 W	23%	1920 W	0%
Web 3	2500 W	74%	2800 W	60%	2830 W	81%	2820 W	47%
Web 4	1655 W	15%	2600 W	49%	2315 W	48%	2690 W	40%
Web 5	2313 W	61%	3093 W	77%	3003 W	92%	3753 W	96%
Formblatt 1	2450 W	70%	3230 W	85%	3140 W	101%	3920 W	104%
Formblatt 2	2485 W	73%	2845 W	63%	2875 W	84%	2860 W	49%
Formblatt 3	1785 W	24%	2145 W	23%	2175 W	39%	2160 W	13%

Tabelle 6.9: Ergebnisse Fall 4 – Wohnraum mit Flachdach

In den folgenden Grafiken werden die Ergebnisse, getrennt nach Orientierung, einander gegenübergestellt:

- grüner Balken: Abweichung vom Ergebnis des Referenzverfahren kleiner als +/- 10 %
- oranger Balken: Abweichung größer als + 10% (starke Überdimensionierung)
- roter Balken: Abweichung größer als – 10 % (starke Unterdimensionierung)

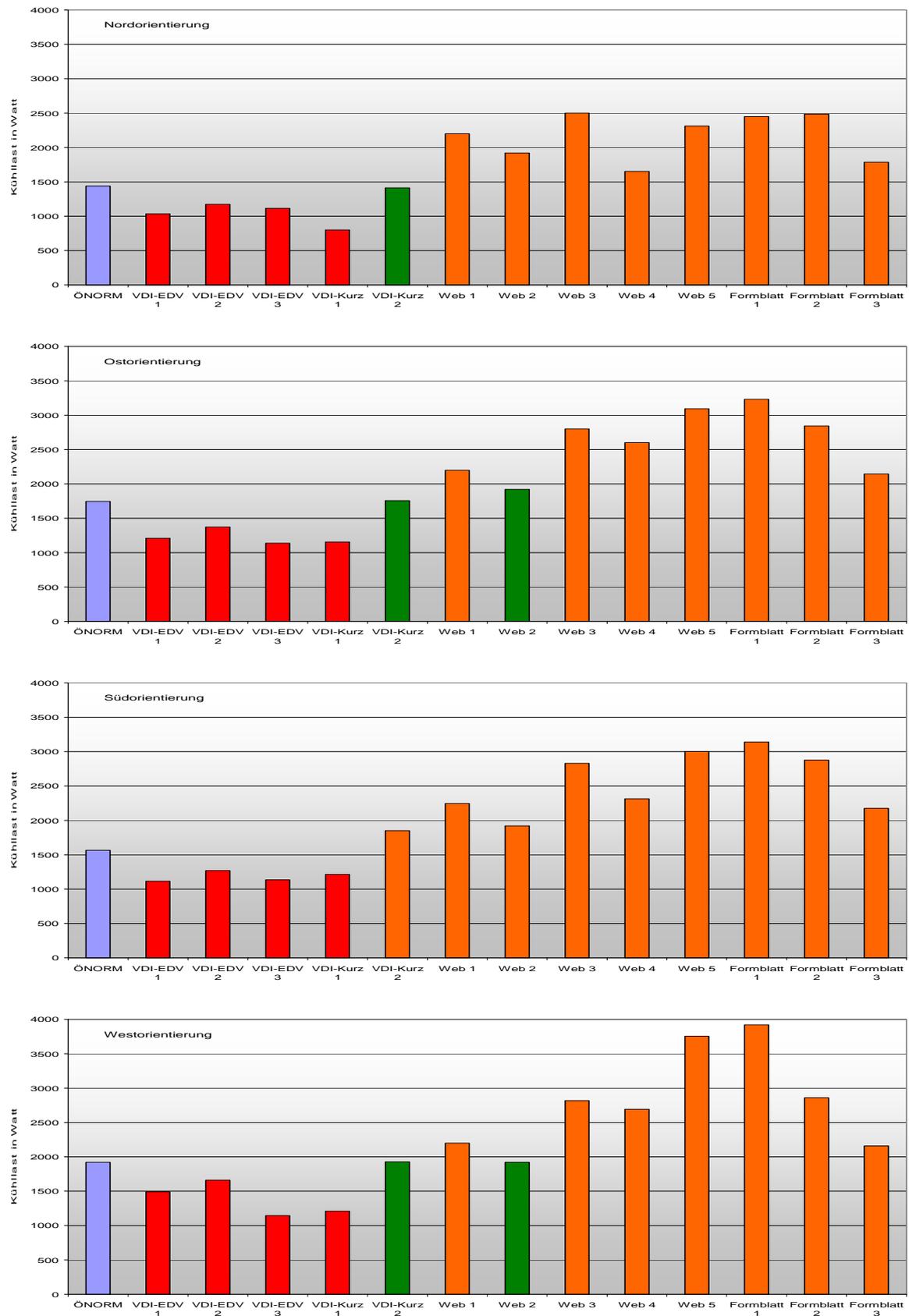


Abb. 6.5: Ergebnisse Fall 4

6.7 Sonderfall 1 – Büroraum in größerem Gebäude ohne innere Lasten

6.7.1 Vorgaben

Um die Unterschiede bei der Berücksichtigung von inneren Lasten auszuklammern (Watt pro Person, feste Gleichzeitigkeitsfaktoren, Aufteilung der Wärmeabgabe in Strahlung und Konvektion etc.), werden die beiden Sonderfälle berechnet. In diesen werden der Fall 1 (Sonderfall 1) und der Fall 4 (Sonderfall 2) noch einmal gerechnet, allerdings ohne innere Lasten (Personen, Maschinen, Beleuchtung) und ohne Frischluftzufuhr (Zuluft mit Außentemperatur). Damit können die Unterschiede in den Ergebnissen bei der alleinigen Berücksichtigung der äußeren Klimateinwirkungen auf das Gebäude verdeutlicht werden.

Die vollständige Beschreibung des Objekts wird im Folgenden angeführt (die physikalischen Daten der Bauteilschichten – Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität und Dichte – sind dem Baustoffkatalog aus [ÖNORM H 6040 Beiblatt 2 (1997)] zu entnehmen):

Beschreibung	Wert
Meteorologische Daten	Wien
Reflexionsfaktor Umgebung	0,25 – Rasen
Kühlbetrieb	0 – 24 Uhr
Raumangaben:	
Höhe über Erdreich	6 m
Raubbreite (Außenwand)	4 m
Raumtiefe	5 m
Raumhöhe	3 m
Geschosshöhe	3,305 m
Raumgrundfläche	20 m ²
Raumluftvolumen	60 m ³
Kunstlicht-Raumbelastungsgrad	1
Gleichzeitigkeitsfaktor(en) Last(en)	1
Tagesabschnitte	1 Tagesabschnitt
Pro Abschnitt:	
Personenabwärme trocken, bei 20°C	0 W
Maschinenabwärme	0 W

Beschreibung	Wert
Glühlampen	0 W
Zuluft mit Außenlufttemperatur	0 m ³ /h
Raumluft-Solltemperatur	24,0°C
Bauteilangaben:	
Bauteil 1 – Decke:	
Bauteilfläche	20 m ²
U-Wert (bei ÖNORM von Norm selbst berechnet)	0,60 W/(m ² .K)
Schichtaufbau (Baustoff und Dicke):	
Schicht 1 (oben)	Textiler Teppich 1,0 cm
Schicht 2	Estrichbeton 5,5 cm
Schicht 3	Mineralwolle TSDP 4,0 cm
Schicht 4	Stahlbeton 18,0 cm
Schicht 5 (unten)	Gipsputz 0,2 cm
Nachbarraum	ident zu aktuellem Raum
Bauteil 2 – Fußboden:	gleich Bauteil 1 - Decke
Bauteil 3 – Außenwand:	
Bauteilfläche inkl. Fensterfläche	12 m ²
Bauteilfläche exkl. Fensterfläche	9 m ²
U-Wert (bei ÖNORM von Norm selbst berechnet)	0,22 W/(m ² .K)
Absorptionskoeffizient der Bauteiloberfläche	0,7
Schichtaufbau (Baustoff und Dicke):	
Schicht 1 (außen)	Kunstharz Zementputz 0,2 cm
Schicht 2	EPS Hartschaum 12,0 cm
Schicht 3	Porosierter HLZ m. KZ Mörtel 25,0 cm
Schicht 4 (innen)	Gipsputz 1,5 cm
Orientierung – Azimut (gegen Norden)	Nord 0° / Ost 90° / Süd 180° / West 270°
Neigung – Höhenwinkel der Flächennormalen	0,0°
Bauteil 4 – Fenster:	
Bauteilfläche (Breite x Höhe)	3 m ² (2,0 x 1,5 m)
U-Wert gesamt	1,1 W/(m ² .K)
Glasanteil	75,00 %
Glastyp	Wärmeschutzglas beschichtet
Aufbau	2 Scheiben

Beschreibung	Wert
b-Wert für VDI-Rechnungen	0,75
g-Wert	60 %
Absorptionskoeffizient Rahmen	0,7
Sonnenschutz	nicht vorhanden
Vorsprünge – Abstand vom Fensterrahmen:	
oben / unten / links / rechts	0 m
Vorsprünge – Tiefe des Vorsprungs:	
oben / unten / links / rechts	0 m
Orientierung – Azimut (gegen Norden)	Nord 0° / Ost 90° / Süd 180° / West 270°
Neigung – Höhenwinkel der Flächennormalen	0,0°
Horizontüberhöhung	0,0°
Bauteil 5 – Innenwand:	
Bauteilfläche	15 m ²
U-Wert (bei ÖNORM von Norm selbst berechnet)	1,71 W/(m ² .K)
Schichtaufbau (Baustoff und Dicke):	
Schicht 1	Kalk-Sand-Innenputz 1,5 cm
Schicht 2	Düwa Ziegel 10,0 cm
Schicht 3	Kalk-Sand-Innenputz 1,5 cm
Nachbarraum	ident zu aktuellem Raum
Bauteil 6 – Innenwand:	gleich Bauteil 5 - Innenwand
Bauteil 7 – Innenwand:	
Bauteilfläche	12 m ²
U-Wert (bei ÖNORM von Norm selbst berechnet)	1,71 W/(m ² .K)
Schichtaufbau (Baustoff und Dicke):	
Schicht 1	Kalk-Sand-Innenputz 1,5 cm
Schicht 2	Düwa Ziegel 10,0 cm
Schicht 3	Kalk-Sand-Innenputz 1,5 cm
Nachbarraum	ident zu aktuellem Raum

Tabelle 6.10: Objektdaten Sonderfall 1 – Büroraum in einem größeren Gebäude ohne innere Lasten

6.7.2 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Berechnungen nach den verschiedenen Verfahren und den verschiedenen Orientierungen angeführt. Zusätzlich zur Kühllast wird die Abweichung zum Ergebnis des Verfahrens der ÖNORM H 6040 in Prozenten angegeben:

Sonderfall 1	Ergebnisse							
	Nordorientierung		Ostorientierung		Südorientierung		Westorientierung	
	Kühllast	Differenz	Kühllast	Differenz	Kühllast	Differenz	Kühllast	Differenz
ÖNORM	316 W	–	923 W	–	1237 W	–	1071 W	–
VDI-EDV 1	153 W	-52%	546 W	-41%	639 W	-48%	597 W	-44%
VDI-EDV 2	137 W	-57%	547 W	-41%	626 W	-49%	600 W	-44%
VDI-EDV 3	129 W	-59%	443 W	-52%	494 W	-60%	487 W	-55%
VDI-Kurz 1	132 W	-58%	499 W	-46%	571 W	-54%	541 W	-49%
VDI-Kurz 2	174 W	-45%	641 W	-31%	741 W	-40%	696 W	-35%
Web 1	910 W	188%	910 W	-1%	955 W	-23%	910 W	-15%
Web 2 ¹	1500 W	375%	1500 W	63%	1500 W	21%	1500 W	40%
Web 3	210 W	-34%	510 W	-45%	540 W	-56%	530 W	-51%
Web 4	0 W	-100%	945 W	2%	660 W	-47%	1035 W	-3%
Web 5	1523 W	382%	2303 W	150%	2213 W	79%	2963 W	177%
Formblatt 1	1110 W	251%	1890 W	105%	1800 W	46%	2580 W	141%
Formblatt 2	615 W	95%	975 W	6%	1005 W	-19%	990 W	-8%
Formblatt 3	615 W	95%	975 W	6%	1005 W	-19%	990 W	-8%

Tabelle 6.11: Ergebnisse Sonderfall 1 – Büroraum in einem größeren Gebäude ohne innere Lasten

In den folgenden Grafiken werden die Ergebnisse, getrennt nach Orientierung, einander gegenübergestellt:

- grüner Balken: Abweichung vom Ergebnis des Referenzverfahren kleiner als +/- 10 %
- oranger Balken: Abweichung größer als + 10% (starke Überdimensionierung)
- roter Balken: Abweichung größer als – 10 % (starke Unterdimensionierung)

¹ Das Ergebnis ist nicht eindeutig. Nach den Angaben zur Auswahl des Raumtyps könnte auch der Raum mit der nächst höheren Kühllast gewählt werden. Das Ergebnis wäre dann 1920 W.

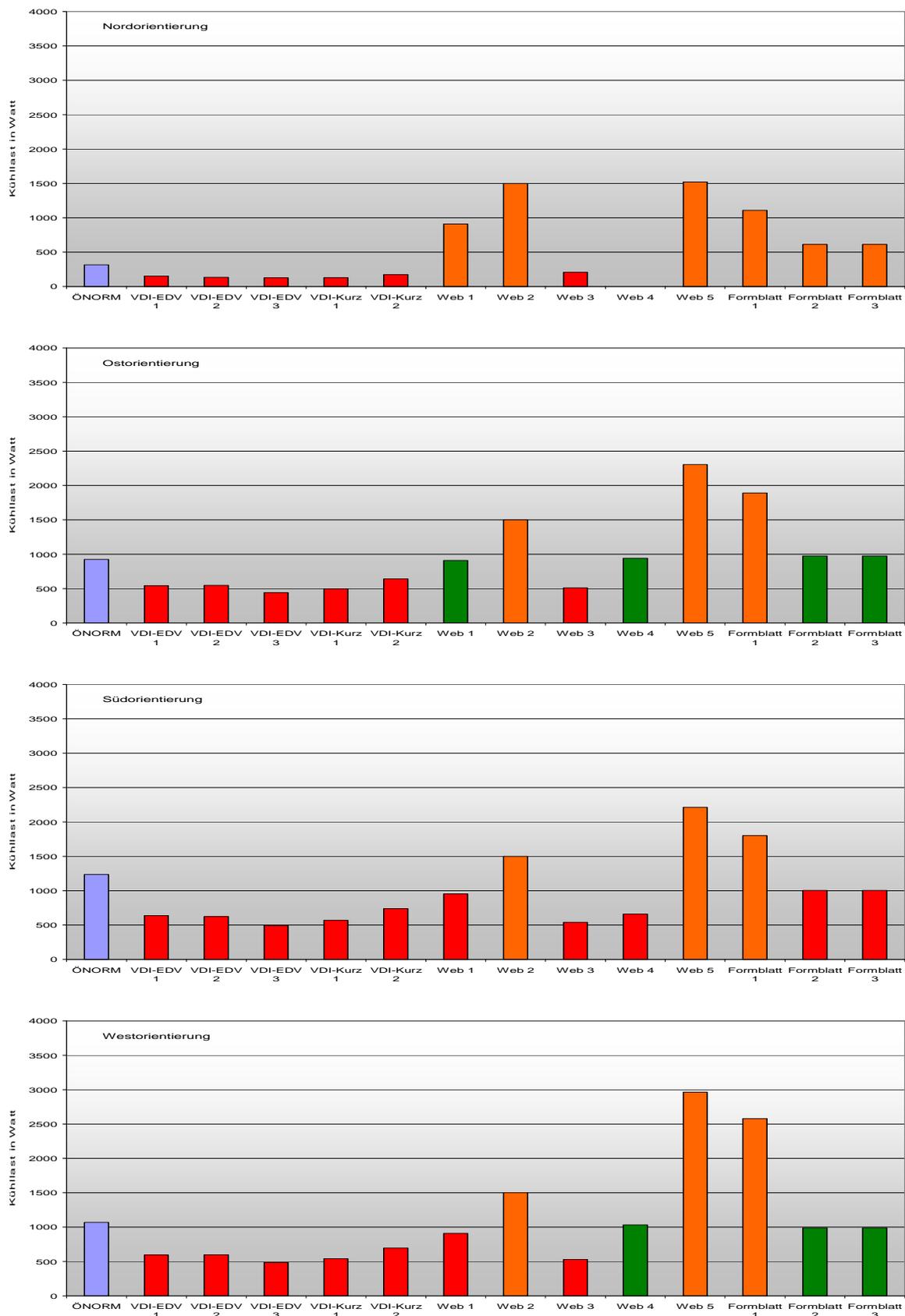


Abb. 6.6: Ergebnisse Sonderfall 1

6.8 Sonderfall 2 – Wohnraum mit Flachdach ohne innere Lasten

6.8.1 Vorgaben

Wie bei Sonderfall 1 beschrieben, wird hier noch einmal der Raum von Fall 4 berechnet, ohne innere Lasten und ohne Frischluftzufuhr.

Die vollständige Beschreibung des Objekts wird im Folgenden angeführt (die physikalischen Daten der Bauteilschichten – Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität und Dichte – sind dem Baustoffkatalog aus [ÖNORM H 6040 Beiblatt 2 (1997)] zu entnehmen):

Beschreibung	Wert			
Meteorologische Daten	Wien			
Reflexionsfaktor Umgebung	0,25 – Rasen			
Kühlbetrieb	16 – 24 Uhr			
Raumangaben:				
Raumbreite (Außenwand)	4 m			
Raumtiefe	5 m			
Raumhöhe	3 m			
Raumgrundfläche	20 m ²			
Raumluftvolumen	60 m ³			
Kunstlicht-Raumbelastungsgrad	1			
Gleichzeitigkeitsfaktor(en) Last(en)	1			
Tagesabschnitte	4 Tagesabschnitte			
Abschnitte (von Uhrzeit bis Uhrzeit)	0 – 6	6 – 16	16 – 22	22 – 24
Personenabwärme trocken, bei 20°C	0 W	0 W	0 W	0 W
Maschinenabwärme	0 W	0 W	0 W	0 W
Glühlampen	0 W	0 W	0 W	0 W
Zuluft mit Außenlufttemperatur	0 m ³ /h	0 m ³ /h	0 m ³ /h	0 m ³ /h
Raumluft-Solltemperatur	22,0°C	27,0°C	24,0°C	22,0°C
Bauteilangaben:				
Bauteil 1 – Decke/Dach:				
Bauteilfläche	20 m ²			
U-Wert (bei ÖNORM von Norm selbst berechnet)	0,17 W/(m ² .K)			

Beschreibung	Wert
Absorptionskoeffizient der Bauteiloberfläche	0,6
Schichtaufbau (Baustoff und Dicke):	
Schicht 1 (oben)	Kies trocken 6,0 cm
Schicht 2	XPS Hartschaum 18,0 cm
Schicht 3	Polymerbitubahn m. Glasvlies 1,5 cm
Schicht 4	Stahlbeton 18,0 cm
Schicht 5 (unten)	Gipsputz 0,3 cm
Neigung – Höhenwinkel der Flächennormalen	90,0°
Bauteil 2 – Erdberührter Fußboden:	
Bauteilfläche	20 m ²
U-Wert (bei ÖNORM von Norm selbst berechnet)	0,16 W/(m ² .K)
Mittlere Tiefe unter der Erdoberfläche	0 m
Schichtaufbau (Baustoff und Dicke):	
Schicht 1 (oben)	Stabparkett Eiche 2,0 cm
Schicht 2	Estrichbeton 5,5 cm
Schicht 3	Mineralwolle TSDP 2,0 cm
Schicht 4	Sand trocken 4,0 cm
Schicht 5	Stahlbeton 18,0 cm
Schicht 6	XPS Hartschaum 16,0 cm
Schicht 7 (unten)	Kies feucht 20,0 cm
Bauteil 3 – Außenwand:	
Bauteilfläche inkl. Fensterfläche	12 m ²
Bauteilfläche exkl. Fensterfläche	9 m ²
U-Wert (bei ÖNORM von Norm selbst berechnet)	0,22 W/(m ² .K)
Absorptionskoeffizient der Bauteiloberfläche	0,7
Schichtaufbau (Baustoff und Dicke):	
Schicht 1 (außen)	Kunstharz Zementputz 0,2 cm
Schicht 2	EPS Hartschaum 12,0 cm
Schicht 3	Porosierter HLZ m. KZ Mörtel 25,0 cm
Schicht 4 (innen)	Gipsputz 1,5 cm
Orientierung – Azimut (gegen Norden)	Nord 0° / Ost 90° / Süd 180° / West 270°
Neigung – Höhenwinkel der Flächennormalen	0,0°
Bauteil 4 – Fenster:	

Beschreibung	Wert
Bauteilfläche (Breite x Höhe)	3 m ² (2,0 x 1,5 m)
U-Wert gesamt	1,1 W/(m ² .K)
Glasanteil	75,00 %
Glastyp	Wärmeschutzglas beschichtet
Aufbau	2 Scheiben
b-Wert für VDI-Rechnungen	0,75
g-Wert	60 %
Absorptionskoeffizient Rahmen	0,7
Sonnenschutz	nicht vorhanden
Vorsprünge – Abstand vom Fensterrahmen:	
oben	0,4 m
unten / links / rechts	0 m
Vorsprünge – Tiefe des Vorsprungs:	
oben	1,0 m
unten / links / rechts	0 m
Orientierung – Azimut (gegen Norden)	Nord 0° / Ost 90° / Süd 180° / West 270°
Neigung – Höhenwinkel der Flächennormalen	0,0°
Horizontüberhöhung	0,0°
Bauteil 5 – Innenwand:	
Bauteilfläche	15 m ²
U-Wert (bei ÖNORM von Norm selbst berechnet)	1,71 W/(m ² .K)
Schichtaufbau (Baustoff und Dicke):	
Schicht 1	Kalk-Sand-Innenputz 1,5 cm
Schicht 2	Düwa Ziegel 10,0 cm
Schicht 3	Kalk-Sand-Innenputz 1,5 cm
Nachbarraum	30°C konstant
Bauteil 6 – Innenwand:	
Bauteilfläche	15 m ²
U-Wert, Schichtaufbau und Nachbarraum	wie Bauteil 5
Bauteil 7 – Innenwand:	
Bauteilfläche	12 m ²
U-Wert, Schichtaufbau und Nachbarraum	wie Bauteil 5

Tabelle 6.12: Objektdaten Sonderfall 2 – Wohnraum mit Flachdach ohne innere Lasten

6.8.2 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Berechnungen nach den verschiedenen Verfahren und den verschiedenen Orientierungen angeführt. Zusätzlich zur Kühllast wird die Abweichung zum Ergebnis des Verfahrens der ÖNORM H 6040 in Prozenten angegeben:

Sonderfall 2	Ergebnisse							
	Nordorientierung		Ostorientierung		Südorientierung		Westorientierung	
	Kühllast	Differenz	Kühllast	Differenz	Kühllast	Differenz	Kühllast	Differenz
ÖNORM	1081 W	–	1255 W	–	1523 W	–	1231 W	–
VDI-EDV 1	644 W	-40%	737 W	-41%	687 W	-55%	915 W	-26%
VDI-EDV 2	729 W	-33%	838 W	-33%	778 W	-49%	955 W	-22%
VDI-EDV 3	556 W	-49%	579 W	-54%	577 W	-62%	584 W	-53%
VDI-Kurz 1	211 W	-80%	568 W	-55%	623 W	-59%	622 W	-49%
VDI-Kurz 2	701 W	-35%	1103 W	-12%	1154 W	-24%	1234 W	0%
Web 1	1160 W	7%	1160 W	-8%	1205 W	-21%	1160 W	-6%
Web 2 ¹	1500 W	39%	1500 W	20%	1500 W	-2%	1500 W	22%
Web 3	1330 W	23%	1630 W	30%	1660 W	9%	1650 W	34%
Web 4	1005 W	-7%	1950 W	55%	1665 W	9%	2040 W	66%
Web 5	1523 W	41%	2303 W	84%	2213 W	45%	2963 W	141%
Formblatt 1	1610 W	49%	2390 W	90%	2300 W	51%	3080 W	150%
Formblatt 2	1215 W	12%	1575 W	25%	1605 W	5%	1590 W	29%
Formblatt 3	1215 W	12%	1575 W	25%	1605 W	5%	1590 W	29%

Tabelle 6.13: Ergebnisse Sonderfall 2 – Wohnraum mit Flachdach ohne innere Lasten

In den folgenden Grafiken werden die Ergebnisse, getrennt nach Orientierung, einander gegenübergestellt:

- grüner Balken: Abweichung vom Ergebnis des Referenzverfahren kleiner als +/- 10 %
- oranger Balken: Abweichung größer als + 10% (starke Überdimensionierung)
- roter Balken: Abweichung größer als – 10 % (starke Unterdimensionierung)

¹ Das Ergebnis ist nicht eindeutig. Nach den Angaben zur Auswahl des Raumtyps könnte auch der Raum mit der nächst höheren Kühllast gewählt werden. Das Ergebnis wäre dann 1920 W.

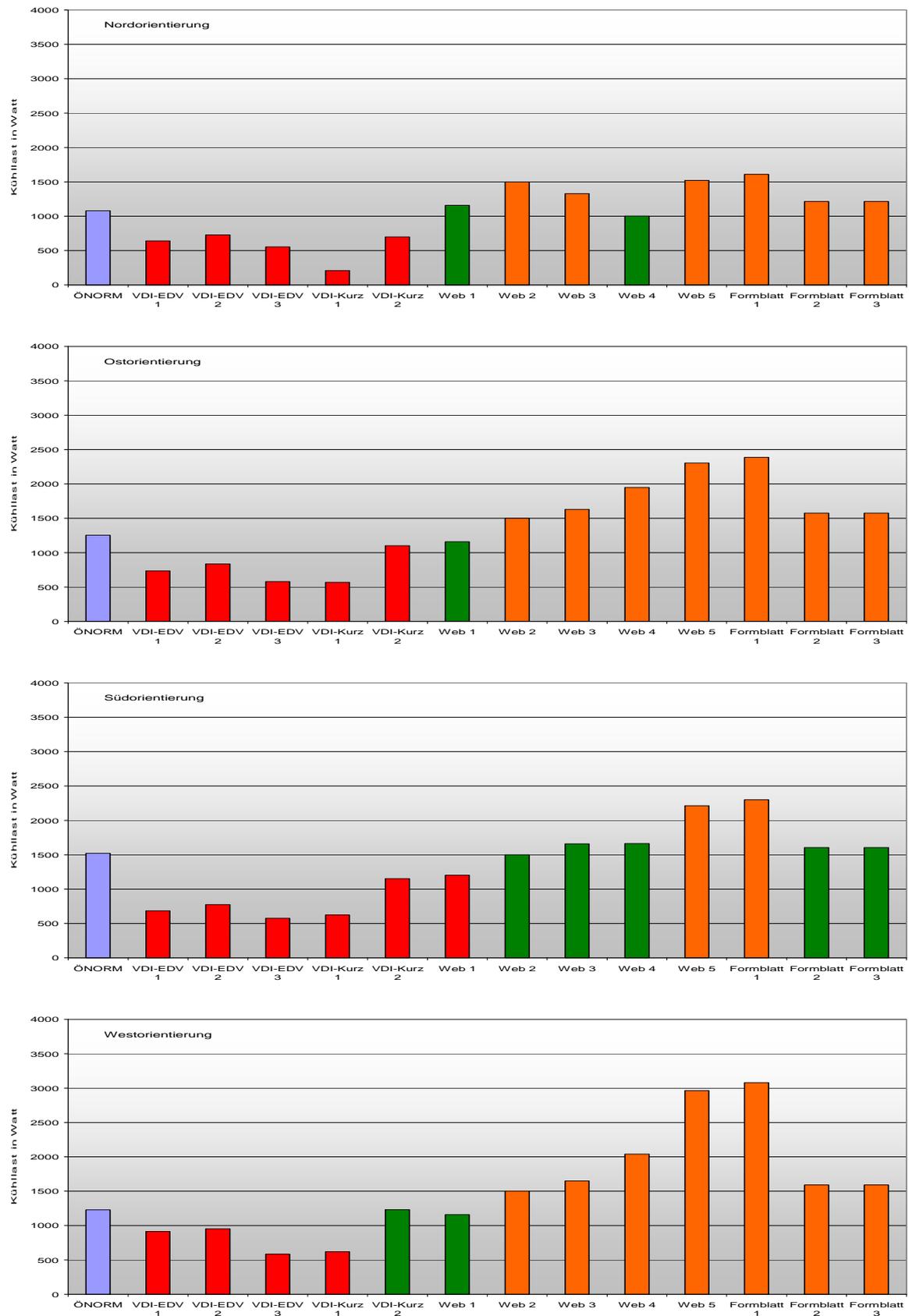


Abb. 6.7: Ergebnisse Sonderfall 2

6.9 Diskussion der Ergebnisse der Vergleichsrechnungen

Die Liste der Eingabe- bzw. Auswahlmöglichkeiten (siehe Kapitel 6.2) zeigt schon einige starke Unterschiede zwischen den verschiedenen Verfahren. Zwischen dem ÖNORM- und dem VDI-EDV-Verfahren liegen nur ein paar wenige, aber dafür wesentliche Unterschiede. Das VDI-EDV-Verfahren stützt seine Berechnungen auf Angaben wie Raumtypen und Bauartklassen. Es soll damit die Eingabe des genauen Aufbaus der Bauteile durch abschätzende Faktoren ersetzt werden, um den Benutzer zu entlasten. Im Gegensatz dazu müssen bei der ÖNORM für jeden Bauteil alle Schichten eingegeben werden, wodurch der Eingabeaufwand für ÖNORM H 6040 zwar größer ist, dafür steht der Haustechniker nicht vor der Schwierigkeit die passenden Faktoren zu wählen und die Angaben sind genauer.

Der Unterschied der einzugebenden Daten zwischen ÖNORM- und VDI-Kurz-Verfahren ist um einiges größer. Eine starke Einschränkung des Kurzverfahrens ist die Festlegung des Berechnungszeitraums auf Juli und September. Damit entstehen größere Abweichungen bei Räumen, deren maximale Kühllast in anderen Monaten liegt. Auch können beim Kurzverfahren keine sich über den Tag verändernden inneren Lasten oder Solltemperaturen angegeben werden.

Die Webseitenrechner und die Formblätter benötigen die wenigsten Angaben. Damit berücksichtigen sie nur wenige Eigenschaften der Räume. Außerdem führt die Veränderung einer einzigen Angabe oft zu stark unterschiedlichen Ergebnissen. Der Planer kann meist nur schwer entscheiden, ob die eine oder die andere Wahl besser zum Raum passt. Auch gehen diese Verfahren nicht auf unterschiedliche Standorte, und die damit verbundenen Unterschiede der klimatischen Umgebungsbedingungen, ein (die Wahl eines Ortes ist nicht möglich).

Alle Ergebnisse des VDI-EDV- und des VDI-Kurz-Verfahrens (bis auf eine Ausnahme von VDI-Kurz 2 bei Fall 4) liegen leicht bis weit unter den Ergebnissen des Referenzverfahrens. Bei den Fällen 1 bis 4 weichen die Programmergebnisse nach dem EDV-Verfahren bis zu -41%, und die nach dem Kurzverfahren bis zu -51% von den Referenzwerten ab. Die Sonderfälle dienen zur Überprüfung, ob die Abweichungen durch die anders berücksichtigten inneren Lasten entstehen. Das Gegenteil ist der Fall. Ohne innere Lasten und ohne Frischluftzufuhr sind die Abweichungen noch viel größer, nämlich bis zu -62% beim EDV-Verfahren und bis zu -80% beim Kurzverfahren.

Die Abweichungen bei den Webseitenrechnern und den Formblättern sind noch größer, allerdings weichen sie meist ins positive ab. Das ist insofern besser, weil damit die Anlagen zumindest nicht

unterdimensioniert werden. Allerdings ermitteln auch diese Verfahren, seltener aber doch, zu geringe Auslegungskühllasten. Die Fälle 1 bis 4 zeigen positive Abweichungen bis +104 % und negative Abweichungen bis zu -55 %. Große Unterschiede zur Qualität der Ergebnisse der VDI-Verfahren ergeben sich bei unüblich genutzten (z.B. keine inneren Lasten durch Personen oder Maschinen), aber dennoch realistischen Räumen: die Berechnungen von Sonderfall 1 (Nordraum) ergeben Abweichungen vom Referenzverfahren von +382 % bis -100 % (also 0 Watt als Ergebnis). Erstaunlich ist, dass verschiedene Webseitenrechner bei ein und demselben Raum so stark abweichende Ergebnisse ermitteln.

Ein wesentliches Ergebnis dieser Vergleiche ist, dass die allgemein verbreitete Meinung – ein Haustechniker, der mit einer einfachen Abschätzungsmethode (die große Sicherheitszuschläge beinhaltet) rechnet, liegt immer auf der sicheren Seite (siehe dazu beispielsweise auch eine aktuelle Dissertation [Reim 2006, Seite 66]) – falsch ist. Auch die einfachen Methoden führen zwar seltener, aber dafür zu noch viel stärkeren Unterdimensionierungen. Umso gefährlicher ist es, wenn Anbieter bzw. Klimaanlagehersteller mit Sätzen, wie *„Mit dem Kühllast-Rechner ist das gar kein Problem. Einfach die vorhandenen Felder Schritt für Schritt ausfüllen und schon bekommen Sie ein präzises Ergebnis!“* für ihren Kühllastrechner werben.

Lediglich der Webseitenrechner 5 und das Formblatt 1 weisen bei allen Fällen und Sonderfällen nur positive Abweichungen auf, würden also ein Unterdimensionierung verhindern. Allerdings mit so starken Zuschlägen (Webseitenrechner 5 bis zu +382 % und Formblatt 1 bis zu +251 %), dass nicht mehr von einer „Berechnung“ der Kühllast gesprochen werden kann.

Wenn man einzelne Webseitenrechner oder Formblätter betrachtet, dann zeigt sich, dass auch einfache Verfahren bei Standardfällen für kleine Einzelkühlanlagen akzeptable Ergebnisse liefern können. Beispielsweise ergibt das Formblatt 2 bei den Fällen 1 bis 3 Leistungen mit Abweichungen unter +55%. Allerdings stellt sich die Frage, ob bei komplexeren Räumen auch noch gute Ergebnisse erbracht werden können, da auch schon bei Fall 4 deutlich größere Abweichungen auftreten. Außerdem müsste der Planer das für den entsprechenden Anwendungsfall geeignete Formblatt verwenden. Und es ist unklar, wie er das jeweils richtige Formblatt auswählen sollte.

Ein zu beachtendes Detail: Laut Webseitenrechner 4 benötigen Räume, die nur Fenster und Außenwände in Nordrichtung besitzen und keine inneren Lasten aufweisen, grundsätzlich keine Kühlung. Das dürfte auf einen weit verbreiteten Irrglauben hinweisen. Oft wird bei Nordräumen

davon ausgegangen, dass sie kühl sind und ohne Klimaanlage auskommen. Wie die Berechnungen nach ÖNORM beweisen, trifft das aber auf keinen der in dieser Arbeit berechneten Fälle zu. Es ist zu hoffen, dass mehr und mehr Planer auf diesen Irrtum aufmerksam werden.

Sonderfall 1 soll noch einmal extra betrachtet werden. Dieser Sonderfall ist nämlich dem Validierungsfall 5 (Kapitel 5.7) sehr ähnlich. Laut der Validierung liegt die ÖNORM um 4,89 % über der analytischen Berechnung. Selbst unter Berücksichtigung dieser Differenz, ist die Abweichung der anderen Methoden unvorhergesehen hoch:

- VDI-EDV-Verfahren: -60% bis -41%
- VDI-Kurz-Verfahren: -58% bis -31%
- Webseitenrechner: -100% bis +382%
- Formblätter: -19% bis +251%

Dies führt zu dem Schluss, dass die angeführten Verfahren von den Validierungsergebnissen stark abweichen würden.

Nach der Auswertung der Ergebnisse stellt sich die Frage, wie die starken Abweichungen bei den VDI-Verfahren zustande kommen. Die VDI-Verfahren dürften vor allem zwei große Problemstellen aufweisen. Die erste ist, dass die Berechnungen für bestimmte Typräume ausgelegt sind. Das lässt vermuten, dass bei größeren Abweichungen von solchen Typräumen auch größere Fehler bei den Berechnungen entstehen. Die zweite Problemstelle sind die meteorologischen Daten und ihre Interpretation in der VDI. Es ist fraglich, ob die grobe Unterteilung Deutschlands in 4 bzw. 5 Temperatur-Klimazonen und ein einziger Datensatz pro Monat für die Einstrahlungswerte ausreichend sind (im Gegensatz dazu setzt die ÖNORM direkt Messwerte der österreichischen ZAMG für den jeweiligen Standort ein – in den in dieser Arbeit berechneten Fällen sind das Messwerte für Wien – oder ein halbsynthetischen Verfahren, das für jeden Standort den Temperatur- und Strahlungsverlauf berechnet). Offensichtlich ist jedenfalls, dass diese grobe Einteilung, die noch dazu für das Klima in Deutschland entwickelt wurde, auf Österreich nicht direkt umgelegt werden kann. Außerdem sind der VDI Temperaturdaten aus den Jahren 1953 bis 1972 [VDI 2078 (1996), Seite 21] zugrunde gelegt. Der ÖNORM sind hingegen laut [Pokorny 2009] 10 Jahre kurz vor Fertigstellung der ersten Fassung der ÖNORM H 6040 im Jahre 1994 zugrunde gelegt, also ca. 1983 bis 1992. Die steigenden Temperaturen in den letzten Jahren werden in den Daten der ÖNORM besser berücksichtigt sein, wobei eine Aktualisierung auch der ÖNORM-Daten sinnvoll erscheint.

Der Sonnenstand in Deutschland (die VDI ist ausgelegt auf „50° *geographische Breite*“ [VDI 2078 (1996), Seite 5]) weicht von dem in Österreich ab (z.B. Wien zwischen 48° und 48,5°, Klagenfurt auf 46,6° nördlicher Breite). Außerdem ist der Reflexionsgrad der Umgebung mit fest vorgegebenen (und in die Strahlungsdaten fix eingerechneten) 0,2 sehr klein. Dieser Wert entspricht ungefähr dem Reflexionsgrad einer Wiese. In bebautem Gebiet können wesentlich höhere Werte auftreten (z.B. 0,6 für hellen Beton). Die VDI gibt dazu an: *„In solchen Fällen sollte ein auf die jeweiligen Verhältnisse zugeschnittene Berechnung durchgeführt werden.“* [VDI 2078 (1996), Seite 28]. Eventuell kann es durch die Abweichungen der meteorologischen Daten und wenn ein erhöhter Reflexionsgrad der Umgebung nicht berücksichtigt wird, zu den größeren Unterschieden in den Ergebnissen kommen.

Eine Anpassung der VDI-Verfahren an die Bedingungen außerhalb Deutschlands ist dabei aber sehr aufwändig. Durch die starke direkte Einbindung von umgerechneten meteorologische Daten in die VDI ist es nicht möglich, gemessene meteorologische Daten direkt in das Verfahren einzubauen. *„Die allgemeinen Berechnungsalgorithmen dieser Richtlinie sind jedoch auf Strahlungswerte hinter Doppelverglasung abgestellt. Damit wird die winkelabhängige Transmissionscharakteristik der Gläser korrekt erfasst.“* [VDI 2078 (1996), Seite 26]. Die in der VDI angegebenen Strahlungswerte können daher als Teil der VDI-Verfahren angesehen werden. Messdaten (meist Global- und Himmelsstrahlung) müssten zuerst in Gesamt- und Diffusstrahlung (das heißt Global- bzw. Himmelsstrahlung zuzüglich Reflexstrahlung) umgerechnet werden und danach in äquivalente Temperaturdifferenzen (Kurzverfahren) bzw. Gewichtungsfaktoren (EDV-Verfahren) für Außenbauteile bzw. in Strahlungsdaten hinter Doppelverglasung mit Berücksichtigung der Winkelabhängigkeit für transparente Bauteile. Die VDI 2078 bietet dafür keine Rechenvorschriften an. Dass diese Berechnungen für Softwarehersteller offensichtlich kaum durchführbar sind (und für den Anwender meist grundsätzlich ausgeschlossen werden können), zeigen auch viele der am Markt erhältlichen Programme. Diese bieten entweder keine Lösung für Österreich an, oder setzen die deutschen Klimazonen für Österreich ein (teilweise mit Korrekturfaktoren), oder überlassen dem Anwender die Eingabe von Strahlungsdaten hinter Doppelverglasung (inklusive Berücksichtigung der Winkelabhängigkeit).

Daraus ist zu schließen, dass die Abweichungen in den Ergebnissen vermutlich entweder durch die grobe Einteilung in Typräume oder durch für Projekte in Österreich meist unpassende meteorologische Daten (die allerdings vom Softwarehersteller schwer und vom Softwareanwender so gut wie unmöglich geändert werden können) stammen.

Offensichtlich werden die Abweichungen durch innere Lasten etwas geringer. Das lässt wiederum vermuten, dass die inneren Lasten stärker in die Ergebnisse einfließen als bei der ÖNORM. Bedenklich sind die größtenteils negativen Abweichungen. Diese können zu erheblichen Unterdimensionierungen führen. Dabei sollte der Sinn aufwändigerer Verfahren gerade auch darin liegen, Unterdimensionierung zu verhindern.

Vermutlich führt die Tatsache, dass für verschiedene Teile des Rechenverfahrens der VDI von den Programmherstellern selbst Lösungen erarbeitet werden müssen (siehe Kapitel 3.2.4), zu den Abweichungen zwischen einzelnen Programmen nach VDI-EDV. Diese Abweichungen sind nicht sehr groß. Allerdings sollten gar keine Abweichungen auftreten, wenn nach dem selben Verfahren gerechnet wird.

Unklar ist, warum die Abweichungen des EDV-Verfahren kaum kleiner sind als die des Kurzverfahrens, obwohl das EDV-Verfahren viel genauere Daten über den Raum und dessen Nutzung benötigt. Es stellt sich somit für den Planer die Frage, weshalb mit wesentlich mehr Aufwand und höheren Kosten eine Software nach dem EDV-Verfahren verwenden, wenn auch das Kurzverfahren ähnliche Ergebnisse liefert.

Noch viel unzuverlässiger, da sprunghafter bei den Ergebnissen, sind die Webseitenrechner und Formblätter. Es gibt zwar Ausnahmen, diese liefern aber auch nur für ein schmales Band an Standardfällen und nur für kleine Einzelanlagen akzeptable Kühllasten. Das ist allerdings eine Erkenntnis, die nicht überrascht, da viel zu wenige Eigenschaften der Räume berücksichtigt werden.

Zusammenfassend kann die vorliegende Untersuchung nicht mit einer positiven Bilanz abgeschlossen werden. Weder die Berechnungsverfahren nach VDI, noch die Webseitenrechner oder die Formblätter liefern allgemein gültig ausreichend genaue Ergebnisse für Projekte in Österreich. Diese Verfahren können daher durch die Vergleichsrechnungen nicht als verifiziert betrachtet werden.

7 Thermische Optimierung

7.1 Einleitung

In diesem Kapitel soll untersucht werden, inwieweit Methoden zur Berechnung der Kühllast auch zur thermischen Optimierung von Gebäuden für die Sommermonate in Österreich geeignet sind. Dabei werden entsprechend der Aufgabenstellung dieser Arbeit nur Rechenverfahren geprüft, die in Normen oder Richtlinien dargestellt werden und für die anwendbare Werkzeuge für den österreichischen Raum angeboten werden. Weiters werden nur die Verfahren untersucht, die in dieser Arbeit verifiziert werden konnten (siehe Kapitel 5 und 6). Da lediglich das Verfahren der ÖNORM H 6040 diesen Kriterien entspricht, wird auch nur dieses (und das zugehörige Programm „Kühllast H6040“ in der Version 4) in diesem Kapitel eingesetzt.

Es wird mit Hilfe des Berechnungsverfahrens nach ÖNORM versucht, einen Büroraum so zu optimieren, dass die Auslegungskühllast möglichst gering ausfällt bzw. (wenn realisierbar) keine Kühlanlage benötigt wird. Dazu werden nacheinander verschiedene Möglichkeiten überprüft.

Dieses Kapitel soll die Tauglichkeit von Kühllastberechnungstools für die thermische Optimierung darstellen. Es ist nicht das Ziel, allgemeine Aussagen über die Brauchbarkeit bzw. Wirkung von baulichen (z.B. Vorteile von schweren Bauweisen gegenüber von Leichtbauweisen) oder anderen Maßnahmen auf die Kühllast zu treffen. Dazu wurden bereits mehrfach Untersuchungen angestellt. Es werden daher in dieser Arbeit vorerst einige einfache Maßnahmen zur Reduktion der Kühllast ausgewählt. Mit Hilfe des Rechenverfahrens wird versucht, die Auslegungskühllast mit den ausgewählten Maßnahmen möglichst zu verringern und zwischen Aufwand (Investitions- und Betriebskosten für die Maßnahmen) und Nutzen (Verringerung der Kühllast) abzuwägen. Sollte die Auslegungskühllast damit nicht stark genug verringert werden können, werden dann noch weitere Methoden ausprobiert. Am Ende sollte eine Aussage über die Brauchbarkeit der Kühllast-simulation nach ÖNORM H 6040 zur thermischen Optimierung getroffen werden können.

Es wurden folgende Maßnahmen zur Reduktion der Kühllast ausgewählt:

- Außen über dem Fenster angebrachter, horizontaler, Sonnenlicht-undurchlässiger Sonnenschutz (Vordach oder Markise). Optimiert wird über die Länge des Sonnenschutzes.
- Außen vor dem Fenster angebrachter, variabler, vertikaler Sonnenschutz (Rollladen,

Jalousie oder Außenrollo). Optimiert wird über die Transparenz des Sonnenschutzes.

- Erhöhter Luftwechsel außerhalb der Bürozeiten, wenn die Außenlufttemperatur unter das Niveau der Raumlufthtemperatur fällt (Nachtluftwechsel). Optimiert wird über die Höhe des Luftwechsels außerhalb der Bürozeiten.

Zum Schluss werden noch Kombinationen untersucht, falls eine Methoden allein nicht ausreicht, um den Raum ohne Kühlung auf der gewünschten Temperatur zu halten.

Die Optimierungsversuche werden für die Orientierung des Raums in die vier Haupthimmelsrichtungen vorgenommen. Dafür wird schrittweise von keiner Änderung (z.B. 100 % transparenter Sonnenschutz) auf große Änderungen (z.B. 0 % transparenter Sonnenschutz) übergegangen. Für jeden Schritt werden die Ergebnisse der Rechnungen (und somit die Auswirkungen der Änderungen) dokumentiert.

Die Optimierungsversuche werden an einem Raum für zwei Personen in einem modernen Bürogebäude durchgeführt (großflächige Verglasung – der Rahmen liegt in den umliegenden Wänden. Das bedeutet 100 % Fenster-Glasanteil. Die Glasfläche erstreckt sich über die gesamte Raumbreite ab Parapet in 110 cm Höhe bis zur Decke). Die umliegenden Räume sind alle gleich aufgebaut, gleich belastet und besitzen die gleiche Raumlufthtemperatur und die gleichen Einstrahlungswerte wie der berechnete Raum.

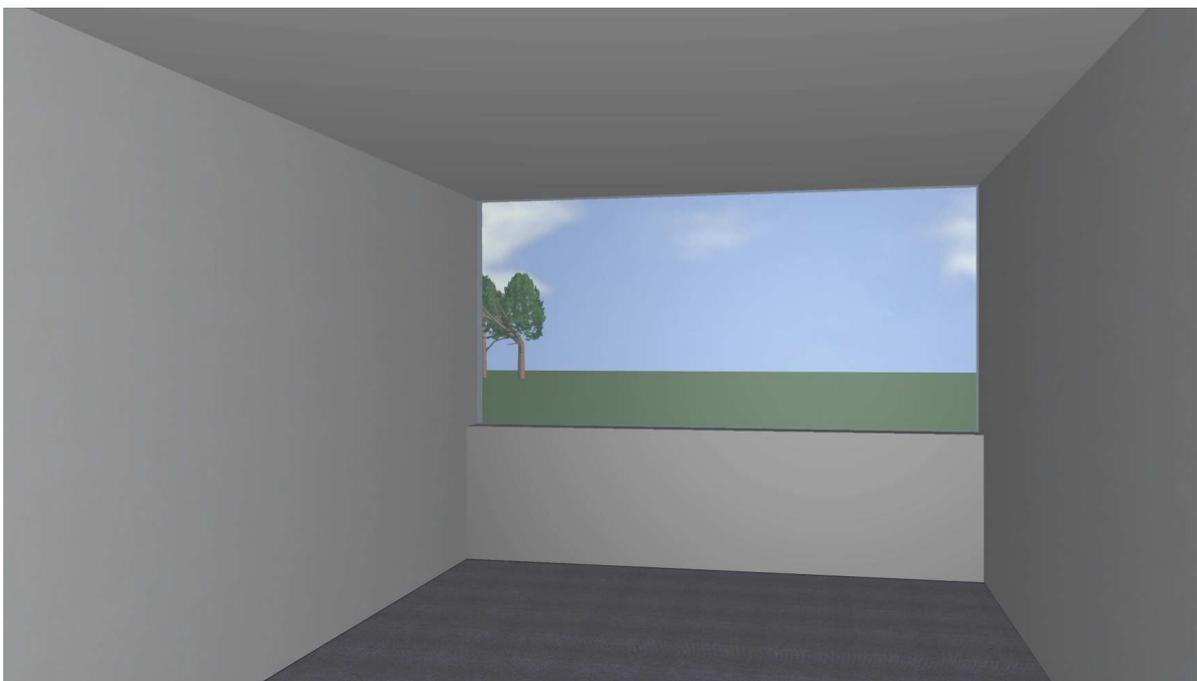


Abb. 7.1: Skizze des Raums vor den Optimierungen

Die vollständige Beschreibung des Raums bzw. des Gebäudes ohne Optimierungsmaßnahmen wird im Folgenden angeführt (die physikalischen Daten der Bauteilschichten – Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität und Dichte – sind dem Baustoffkatalog aus [ÖNORM H 6040 Beiblatt 2 (1997)] zu entnehmen). Die jeweiligen Änderungen gegenüber diesen Daten durch die Optimierungsmaßnahmen sind im Kapitel des jeweiligen Falls angeführt:

Beschreibung	Wert	
Meteorologische Daten	Wien	
Reflexionsfaktor Umgebung	0,25 – Rasen	
Kühlbetrieb	0 – 24 Uhr	
Raumangaben:		
Raubbreite (Außenwand)	4 m	
Raumtiefe	5 m	
Raumhöhe	3 m	
Geschosshöhe	3,287 m	
Raumgrundfläche	20 m ²	
Raumluftvolumen	60 m ³	
Kunstlicht-Raumbelastungsgrad	1	
Gleichzeitigkeitsfaktor(en) Last(en)	1	
Tagesabschnitte	2 Tagesabschnitte	
Abschnitte (von Uhrzeit bis Uhrzeit)	8 – 17	17 – 8
Personenabwärme trocken, bei 20°C	230 W ¹	0 W
Maschinenabwärme	500 W	0 W
Glühlampen	0 W	0 W
Zuluft mit Außenlufttemperatur	60 m ³ /h (LW 1 h ⁻¹)	60 m ³ /h (LW 1 h ⁻¹)
Raumluft-Solltemperatur	24,0°C	24,0°C
Bauteilangaben:		
Bauteil 1 – Decke:		
Bauteilfläche	20 m ²	
U-Wert	0,60 W/(m ² .K)	
Schichtaufbau (Baustoff und Dicke):		
Schicht 1 (oben)	Textiler Teppich	1,0 cm

¹ 2 Personen, leichte bis mäßig schwere Tätigkeit

Beschreibung	Wert
Schicht 2	Estrichbeton 5,5 cm
Schicht 3	Mineralwolle TSDP 4,0 cm
Schicht 4	Stahlbeton 18,0 cm
Schicht 5 (unten)	Gipsputz 0,2 cm
Nachbarraum	ident zu aktuellem Raum
Bauteil 2 – Fußboden:	gleich Bauteil 1 - Decke
Bauteil 3 – Außenwand:	
Bauteilfläche inkl. Fensterfläche	12 m ²
Bauteilfläche exkl. Fensterfläche	4,4 m ²
U-Wert (bei ÖNORM von Norm selbst berechnet)	0,22 W/(m ² .K)
Absorptionskoeffizient der Bauteiloberfläche	0,7
Schichtaufbau (Baustoff und Dicke):	
Schicht 1 (außen)	Kunstharz Zementputz 0,2 cm
Schicht 2	EPS Hartschaum 12,0 cm
Schicht 3	Porosierter HLZ m. KZ Mörtel 25,0 cm
Schicht 4 (innen)	Gipsputz 1,5 cm
Orientierung – Azimut (gegen Norden)	Nord 0° / Ost 90° / Süd 180° / West 270°
Neigung – Höhenwinkel der Flächennormalen	0,0°
Bauteil 4 – Fenster:	
Bauteilfläche (Breite x Höhe)	7,6 m ² (4,0 x 1,9 m)
U-Wert gesamt	1,1 W/(m ² .K)
Glasanteil	100,00 %
Glastyp	Wärmeschutzglas beschichtet
Aufbau	2 Scheiben
g-Wert	60 %
Sonnenschutz	nicht vorhanden
Vorsprünge – Abstand vom Fensterrahmen:	
oben	0 m
unten	0 m
links	0 m
rechts	0 m
Vorsprünge – Tiefe des Vorsprungs:	
oben	0 m

Beschreibung	Wert
unten	0 m
links	0 m
rechts	0 m
Orientierung – Azimut (gegen Norden)	Nord 0° / Ost 90° / Süd 180° / West 270°
Neigung – Höhenwinkel der Flächennormalen	0,0°
Horizontüberhöhung	0,0°
Bauteil 5 – Innenwand (seitlich):	
Bauteilfläche	15 m ²
U-Wert	2,31 W/(m ² .K)
Schichtaufbau (Baustoff und Dicke):	
Schicht 1	Gipsbauplatte 10,0 cm
Nachbarraum	ident zu aktuellem Raum
Bauteil 6 – Innenwand (seitlich):	gleich Bauteil 5 - Innenwand
Bauteil 7 – Innenwand (Rückwand):	
Bauteilfläche	12 m ²
U-Wert	3,02 W/(m ² .K)
Schichtaufbau (Baustoff und Dicke):	
Schicht 1	Gipsputz 0,2 cm
Schicht 2	Stahlbeton 15,0 cm
Schicht 3	Gipsputz 0,2 cm
Nachbarraum	ident zu aktuellem Raum

Tabelle 7.1: Objektdaten thermische Optimierung – Büroraum in einem größeren Gebäude

7.2 Optimierung 1 - Horizontaler Sonnenschutz

7.2.1 Vorgaben

Bei dieser Optimierung wird ein außen über dem Fenster angebrachter, horizontaler, Sonnenlicht- und durchlässiger Sonnenschutz angenommen. Beispielsweise entspricht ein Vordach oder eine dichte Markise diesen Vorgaben. Beim Optimierungsversuch wird die Ausladung von Null (kein Sonnenschutz) in 10 cm-Schritten auf 4 m erhöht. Außerdem wird zur Kontrolle noch mit den hypothetischen Ausladungen 100 m und 999 m gerechnet. Als Ergebnisse werden für jeden Schritt und jede Haupthimmelsrichtung die Auslegungskühllast und der Monat, in dem diese auftritt, angeführt.

In der folgenden Tabelle sind die Änderungen gegenüber den ursprünglichen Raumdaten (siehe Einleitung) angeführt:

Beschreibung	Wert
Bauteil 4 – Fenster:	
Vorsprünge – Abstand vom Fensterrahmen:	
oben	0,05 m
Vorsprünge – Tiefe des Vorsprungs:	
oben	0 - 4 m, 100 m, 999 m

Tabelle 7.2: Änderungen an den Objektdaten bei Optimierung 1

7.2.2 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Berechnungen für die verschiedenen Orientierungen angeführt. Zusätzlich zur Auslegungskühllast wird der Monat angegeben, in dem diese auftritt:

Ausladung	Nordorientierung		Ostorientierung		Südorientierung		Westorientierung	
	Kühllast in Watt	Monat	Kühllast in Watt	Monat	Kühllast in Watt	Monat	Kühllast in Watt	Monat
0 cm	1765	Juli	3509	Juli	4398	Oktober	3510	August
10 cm	1765	Juli	3457	Juli	4384	Oktober	3466	August
20 cm	1764	Juli	3354	Juli	4283	Oktober	3373	August

30 cm	1763	Juli	3250	Juli	4182	Oktober	3302	Oktober
40 cm	1762	Juli	3147	Juli	4081	Oktober	3272	Oktober
50 cm	1761	Juli	3070	Juli	3980	Oktober	3243	Oktober
100 cm	1757	Juli	2687	Juli	3471	Oktober	3096	Oktober
150 cm	1755	Juli	2306	Juli	2960	Oktober	2939	Oktober
180 cm	1754	Juli	2080	Juli	2651	Oktober	2844	Oktober
190 cm	1754	Juli	2005	Juli	2575	November	2813	Oktober
200 cm	1754	Juli	1940	August	2516	November	2781	Oktober
250 cm	1752	Juli	1858	Juli	2220	November	2652	Oktober
300 cm	1749	Juli	1834	Juli	1959	November	2527	Oktober
340 cm	1749	Juli	1815	Juli	1755	November	2427	Oktober
350 cm	1748	Juli	1813	Juli	1732	Juli	2402	Oktober
400 cm	1748	Juli	1804	Juli	1732	Juli	2294	Oktober
10000 cm	1730	Juli	1733	Juli	1732	Juli	1733	Juli
99900 cm	1730	Juli	1733	Juli	1732	Juli	1733	Juli

Tabelle 7.3: Ergebnisse Optimierung 1 – Horizontaler Sonnenschutz

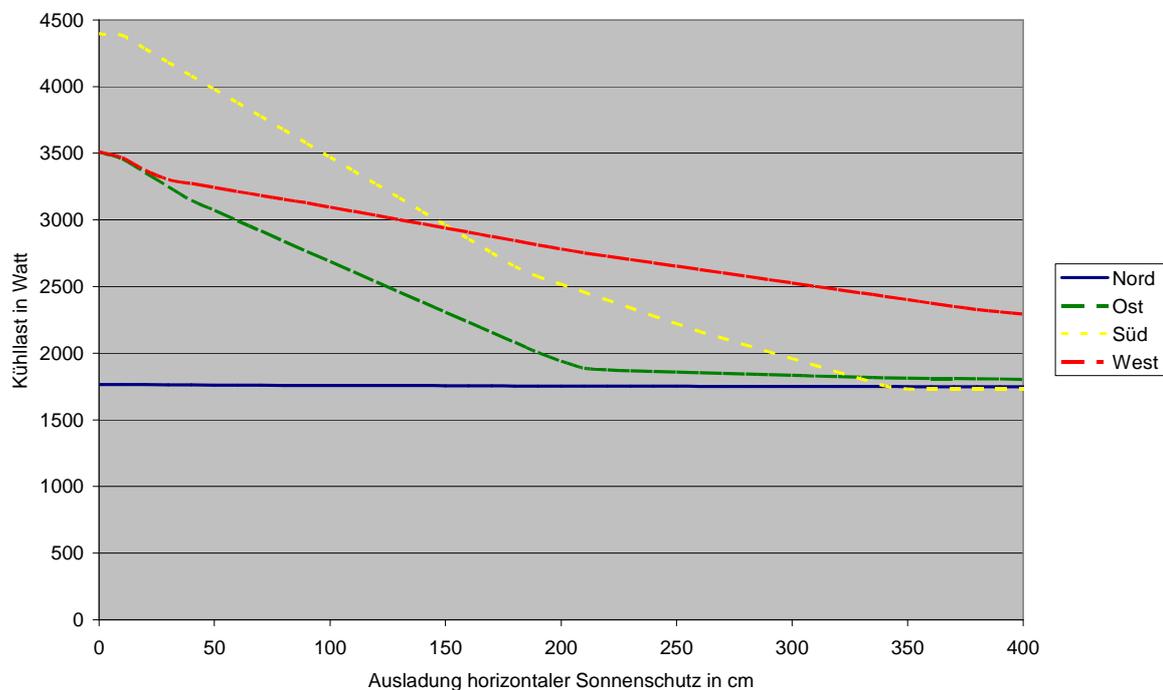


Abb. 7.2: Ergebnisse Optimierung 1 – Horizontaler Sonnenschutz

7.3 Optimierung 2 – Vertikaler Sonnenschutz

7.3.1 Vorgaben

Bei dieser Optimierung wird ein außen vor dem Fenster angebrachter, variabler, vertikaler Sonnenschutz angenommen. Beispielsweise entspricht ein Rollladen, eine Jalousie oder eine Außenrollo diesen Vorgaben. Beim Optimierungsversuch wird die Transparenz des Sonnenschutzes von 100 % (kein Sonnenschutz) in 10 %-Schritten auf 0 % (völlig Sonnenlicht- undurchlässiger Sonnenschutz) verringert. Der Sonnenschutz wird entsprechend der ÖNORM gesteuert. Das bedeutet, dass der Sonnenschutz vollständig geschlossen ist (Sonnenschutz deckt vollflächig die Fensterglasfläche ab), wenn direkte Sonneneinstrahlung auf das Fenster trifft. Ansonsten ist er vollständig geöffnet. Als Ergebnisse werden für jeden Schritt und jede Haupthimmelsrichtung die Auslegungskühllast und der Monat, in dem diese auftritt, angeführt.

In der folgenden Tabelle sind die Änderungen gegenüber den ursprünglichen Raumdaten (siehe Einleitung) angeführt:

Beschreibung	Wert
Bauteil 4 – Fenster:	
Sonnenschutz	außen, Transparenz 100% bis 0% (Reflexion und Absorption im Verhältnis 3:7)

Tabelle 7.4: Änderungen an den Objektdaten bei Optimierung 2

7.3.2 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Berechnungen für die verschiedenen Orientierungen angeführt. Zusätzlich zur Auslegungskühllast wird der Monat angegeben, in dem diese auftritt:

Transparenz	Nordorientierung		Ostorientierung		Südorientierung		Westorientierung	
	Kühllast in Watt	Monat	Kühllast in Watt	Monat	Kühllast in Watt	Monat	Kühllast in Watt	Monat
100%	1765	Juli	3509	Juli	4398	Oktober	3510	August
90%	1759	Juli	3236	Juli	4007	Oktober	3260	August
80%	1753	Juli	2964	Juli	3614	Oktober	3009	August
70%	1748	Juli	2691	Juli	3219	Oktober	2759	August
60%	1742	Juli	2419	Juli	2822	Oktober	2509	August
50%	1736	Juli	2145	Juli	2420	Oktober	2258	August
40%	1730	Juli	1872	Juli	2017	September	2007	August
30%	1724	Juli	1720	Juli	1676	September	1754	August
20%	1716	Juli	1644	Juli	1377	August	1627	Juli
10%	1706	Juli	1574	Juli	1100	Aug	1603	Juli
5%	1700	Juli	1537	Juli	978	Juli	1589	Juli
0%	1693	Juli	1495	Juli	867	Juli	1574	Juli

Tabelle 7.5: Ergebnisse Optimierung 2 – Vertikaler Sonnenschutz

„Kühllast H6040“ gibt als Ergebnis auch die Stellung des Sonnenschutzes (gesteuert nach den ÖNORM-Vorgaben) an. Da diese nur vom Monat und der Orientierung abhängig ist, können allgemein gültig folgende Zeiten, in denen der Sonnenschutz geschlossen ist, angegeben werden:

Monat	Zeiten mit geschlossenem vertikalem Sonnenschutz			
	Nordorientierung	Ostorientierung	Südorientierung	Westorientierung
Juli	5h - 8h & 18h - 21h	5h bis 13h	8h bis 18h	13h bis 21h
August	–	–	8h bis 20h	13h bis 20h
September	–	–	7h bis 19h	–
Oktober	–	–	8h bis 18h	–

Tabelle 7.6: Zeiten mit geschlossenem vertikalem Sonnenschutz

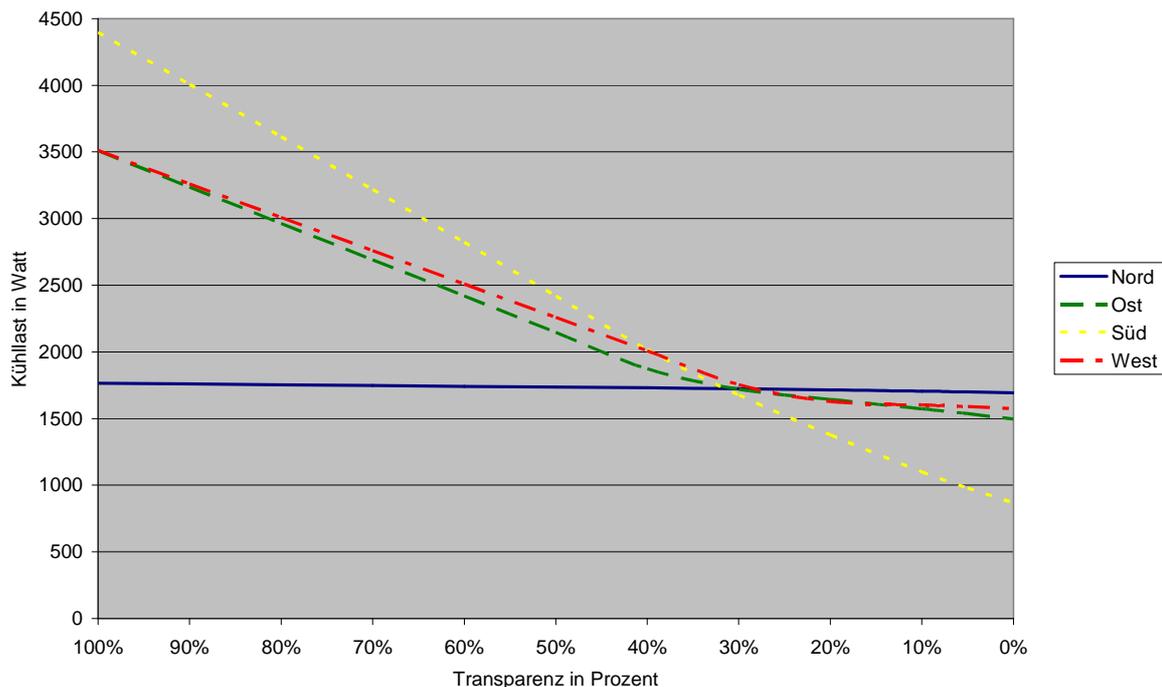


Abb. 7.3: Ergebnisse Optimierung 2 – Vertikaler Sonnenschutz

7.3.3 Ergebnisse bei modifizierter Sonnenschutzsteuerung

Der Sonnenschutz wird im Verfahren nach ÖNORM danach gesteuert, ob direkte Sonneneinstrahlung auf das Fenster trifft oder nicht. Das bedeutet, dass ohne Direkteinstrahlung, auch wenn die diffuse Einstrahlung hoch ist, der Sonnenschutz immer offen ist. Das soll nun geändert werden, um die maximal mögliche Verringerung der Kühllast mit Hilfe eines vertikalen Sonnenschutzes zu ermitteln. Der Sonnenschutz wird dabei (durch Veränderungen im Programm Kühllast H6040) nach der Globalstrahlung gesteuert. Sobald die Globalstrahlung das Niveau der Strahlung in der Nacht überschreitet, wird der Sonnenschutz geschlossen. Der Sonnenschutz ist also den ganzen Tag über geschlossen, in der Nacht ist er geöffnet, unabhängig von der Orientierung:

Monat	Zeiten mit geschlossenem vertikalem Sonnenschutz			
	Nordorientierung	Ostorientierung	Südorientierung	Westorientierung
Juli	5h bis 21h			
August	6h bis 20h			
September	6h bis 20h			
Oktober	7h bis 19h			

Tabelle 7.7: Zeiten mit geschlossenem vertikalem Sonnenschutz (modifizierte Steuerung)

Das Ergebnis wird mit dieser Sonnenschutzsteuerung die maximal mögliche Verringerung der Kühllast mittels vertikalem Sonnenschutz zeigen. Im Folgenden werden die Ergebnisse (Auslegungskühllast und der Monat, in dem diese auftritt) für die vier Orientierungen angeführt:

Transparenz	Nordorientierung		Ostorientierung		Südorientierung		Westorientierung	
	Kühllast in Watt	Monat	Kühllast in Watt	Monat	Kühllast in Watt	Monat	Kühllast in Watt	Monat
100%	1765	Juli	3509	Juli	4398	Oktober	3510	August
90%	1675	Juli	3232	Juli	4007	Oktober	3245	August
80%	1584	Juli	2955	Juli	3614	Oktober	2979	August
70%	1493	Juli	2678	Juli	3218	Oktober	2714	August
60%	1402	Juli	2400	Juli	2820	Oktober	2449	August
50%	1311	Juli	2121	Juli	2418	Oktober	2182	August
40%	1218	Juli	1840	Juli	2011	Oktober	1913	August
30%	1121	Juli	1559	Juli	1674	September	1641	August
20%	1019	Juli	1272	Juli	1353	August	1365	August
10%	917	Juli	992	Juli	1071	August	1093	Juli
5%	866	Juli	901	Juli	936	August	955	Juli
0%	815	Juli	819	Juli	818	Juli	819	Juli

Tabelle 7.8: Ergebnisse Optimierung 2 – Vertikaler Sonnenschutz mit modifizierter Sonnenschutz-Steuerung

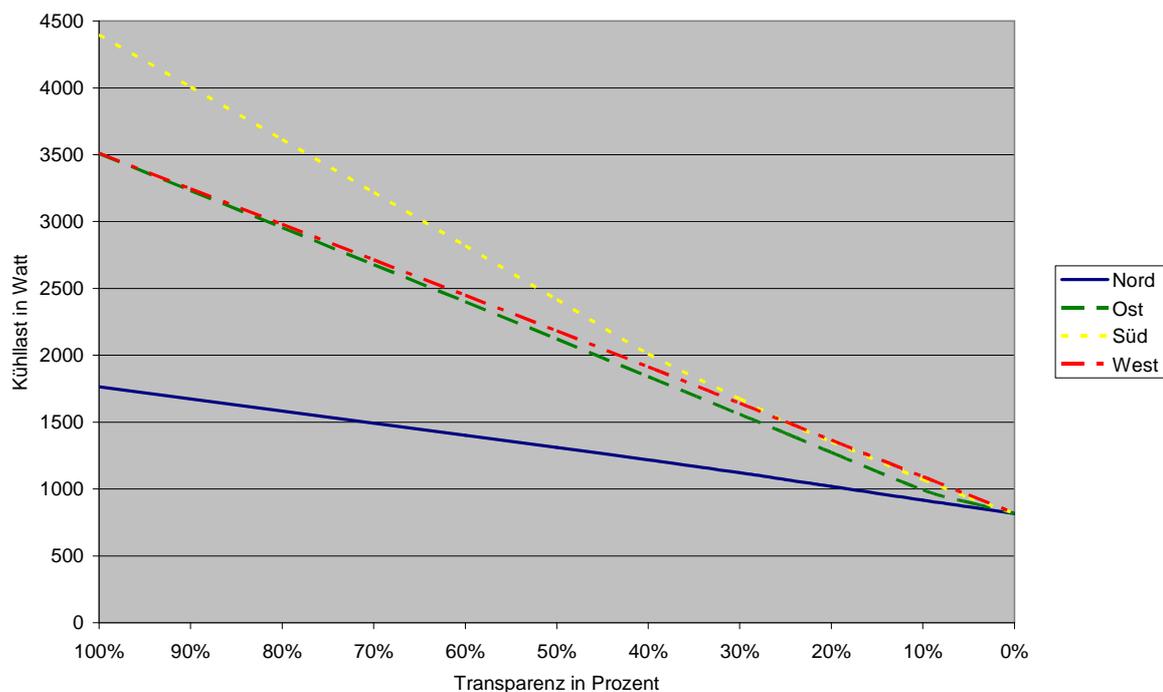


Abb. 7.4: Ergebnisse Optimierung 2 – Vertikaler Sonnenschutz mit modifizierter Sonnenschutz-Steuerung

7.4 Optimierung 3 – Erhöhter Nachtluftwechsel

7.4.1 Vorgaben

Bei dieser Optimierung wird der Luftwechsel (ohne Einsatz eines Sonnenschutzes) optimiert. Dazu wird außerhalb der Bürozeiten und nur dann, wenn die Außenlufttemperatur kleiner ist als die Raumlufttemperatur (Nachtluftwechsel), der Luftwechsel pro Stunde von Null (kein Luftwechsel, 0 m³/h) in 0,5 LW-Schritten auf 10 (600 m³/h) erhöht. Laut [Reim 2006, Seite 127] kann bei Fensterlüftung mit Luftwechselraten bis über 10 h⁻¹ gerechnet werden, bei einer mechanischen Lüftungsanlage nur bis zu 4 h⁻¹ (darüber werden die Investitions- und die Betriebskosten für die Anlage meist zu hoch). Außerdem wird zur Kontrolle noch mit den hypothetischen Luftwechselraten 100 h⁻¹ (6000 m³/h) und 100000 h⁻¹ (6000000 m³/h) gerechnet. Der Luftwechsel zu Bürozeiten (8h bis 17h) wird konstant mit 1 h⁻¹ (60 m³/h) angenommen. Wenn die Raumlufttemperatur außerhalb der Bürozeiten unter der Außenlufttemperatur liegt, dann erfolgt kein Luftwechsel (es muss kein hygienischer Mindestluftwechsel eingehalten werden, da sich keine Personen im Raum befinden).

Als Ergebnisse werden für jeden Schritt und jede Haupthimmelsrichtung die Auslegungskühllast und der Monat, in dem diese auftritt, angeführt.

In der folgenden Tabelle sind die Änderungen gegenüber den ursprünglichen Raumdaten (siehe Einleitung) angeführt:

Beschreibung	Wert	
Tagesabschnitte	2 oder mehr Tagesabschnitte	
Abschnitte (von Uhrzeit bis Uhrzeit)	8 – 17	17 – 8
Zuluft mit Außenlufttemperatur	60 m ³ /h (LW 1 h ⁻¹)	LW 0 h ⁻¹ – 10 h ⁻¹ , (100 h ⁻¹ , 100000 h ⁻¹)

Tabelle 7.9: Änderungen an den Objektdaten bei Optimierung 3

7.4.2 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Berechnungen für die verschiedenen Orientierungen angeführt. Zusätzlich zur Auslegungskühllast wird der Monat angegeben, in dem diese auftritt:

Luftwechsel pro Stunde	Nordorientierung		Ostorientierung		Südorientierung		Westorientierung	
	Kühllast in Watt	Monat	Kühllast in Watt	Monat	Kühllast in Watt	Monat	Kühllast in Watt	Monat
0	1767	Juli	3509	Juli	4408	Oktober	3510	August
1	1765	Juli	3509	Juli	4398	Oktober	3510	August
2	1755	Juli	3504	Juli	4319	Oktober	3510	August
3	1742	Juli	3490	Juli	4216	Oktober	3501	August
4	1719	Juli	3473	Juli	4107	Oktober	3481	August
5	1694	Juli	3455	Juli	3993	Oktober	3459	August
6	1667	Juli	3431	Juli	3882	Oktober	3438	August
7	1643	Juli	3405	Juli	3781	Oktober	3418	August
8	1621	Juli	3375	Juli	3689	Oktober	3399	August
9	1601	Juli	3342	Juli	3648	September	3382	August
10	1582	Juli	3313	Juli	3610	September	3365	August
100	1290	Juli	2629	Juli	2951	September	3036	August
100000	1216	Juli	2452	Juli	2841	August	2947	August

Tabelle 7.10: Ergebnisse Optimierung 3 – Nachtluftwechsel

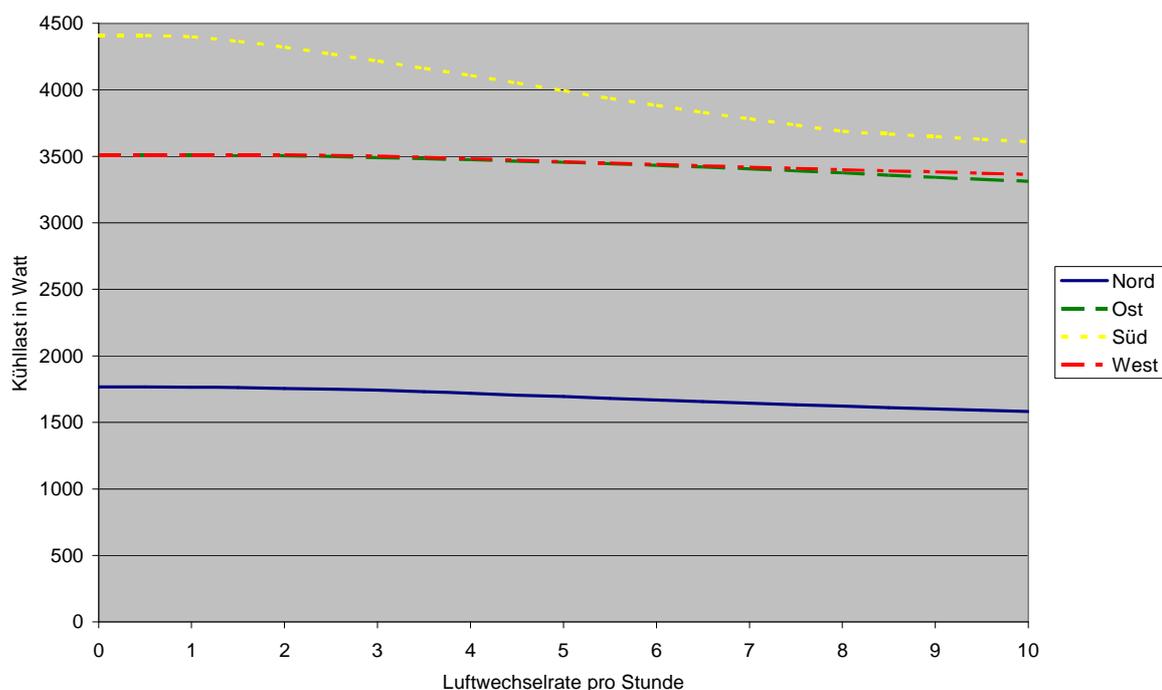


Abb. 7.5: Ergebnisse Optimierung 3 – Erhöhter Nachtluftwechsel

7.5 Analyse der Ergebnisse der Fälle 1 bis 3

Optimierung 1 zeigt eine deutliche Verringerung der Kühllast durch einen horizontalen Sonnenschutz für den ostorientierten (bis zu einer Ausladung von 2 m), den südorientierten (bis 3,5 m) und den westorientierten (bis über 4 m) Raum. Die im Diagramm (Abb. 7.2) dargestellten Auslegungskühllastkurven weisen Knicke auf. Die Steigungen der Nennkühllastgeraden (als Funktionen der Ausladung) von unterschiedlichen Monaten weisen unterschiedliche Neigungen auf. Sobald die Nennkühllastgerade eines Monats unter die Gerade eines anderen Monats fällt, tritt die Auslegungskühllast in dem anderen Monat auf, die Auslegungskühllastkurve macht einen Knick und besitzt ab da eine andere Neigung. Stärkere Knicke könnten auch dadurch auftreten, dass der Sonnenschutz ab einer bestimmten Ausladung das Fenster soweit verdeckt, dass keine Direktstrahlung mehr das Fenster treffen kann. Da die Wirkung eines horizontalen Sonnenschutzes ab einer gewissen Ausladung auf die diffuse Strahlung nur noch einen geringen Einfluss hat, könnten daher Knicke und (beispielsweise beim Ostraum bei ca. 2 m Ausladung) danach flachere Auslegungskühllastverläufe entstehen.

Optimierung 2 zeigt, dass ein vertikaler Sonnenschutz sehr effektiv sein kann. Allerdings wird der Effekt durch die von der ÖNORM vorgeschriebene Steuerung teilweise stark vermindert. Der direkte Vergleich zu den Berechnungen mit am ganzen Tag geschlossenem Sonnenschutz verdeutlicht den Unterschied in der Verringerung der Auslegungskühllast:

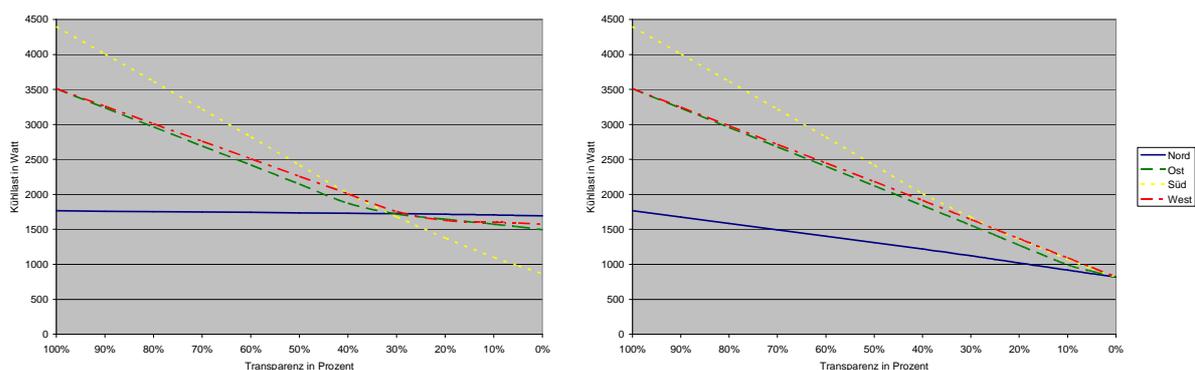


Abb. 7.6: Auslegungskühllasten mit ÖNORM- und mit modifizierter Sonnenschutz-Steuerung

Für den Nordraum ist der Unterschied am größten: nur bei der modifizierten Steuerung führt der Sonnenschutz zu einer Verringerung der Kühllast. Auch für den Ost- und den Westraum ist eine Verbesserung ab einer Transparenz unter 40 % erkennbar. Fast kein Unterschied ergibt sich für

den Südraum. Das kommt daher, dass beim Südraum die beiden Steuerungen fast gleich arbeiten. Grundsätzlich kann aber davon ausgegangen werden, dass die Auslegungskühllast durch die modifizierte Sonnenschutz-Steuerung um einiges verringert werden kann.

Ein Vergleich der Ergebnisse aus Optimierung 1 und Optimierung 2 (modifizierte Sonnenschutzsteuerung) führt zu dem Schluss, dass der vertikale Sonnenschutz hier für jede Orientierung besser geeignet ist als ein horizontaler Sonnenschutz, vor allem mit der modifizierten Steuerung. Beim vertikalen Sonnenschutz kann mit einer Transparenz von 20 % gerechnet werden. Das ist durchaus im Bereich des Möglichen bei einer so großen Fensterfläche (38 % der Fußbodenfläche. Das ist weit über der von der OIB-Richtlinie 3 [OIB 3 (2007), Kapitel 9.1.1] geforderten Mindestfläche von 10 % für Aufenthaltsräume bis 5 m Raumtiefe). Damit ist bei jeder Raumorientierung die Kühllast kleiner als mit einem horizontalen Sonnenschutz maximal möglich ist (berechnet bei hypothetischen 999 m Ausladung):

Sonnenschutz-Vergleich	Ergebnisse							
	Nordorientierung		Ostorientierung		Südorientierung		Westorientierung	
	Kühllast in Watt	Reduktion						
horizontal maximal erreichbare Wirkung	1730 im Juli	-2 %	1733 im Juli	-51 %	1732 im Juli	-61 %	1733 im Juli	-51 %
vertikal mit 20 % Transparenz	1019 im Juli	-42 %	1272 im Juli	-64 %	1353 im August	-69 %	1365 im Juli	-61 %

Tabelle 7.11: Vergleich zwischen horizontalem und vertikalem Sonnenschutz

Optimierung 3 zeigt die Auswirkungen einer erhöhten Nachtlüftung. Bei allen Orientierungen hat diese Maßnahme zu einer Verringerung der Kühllast geführt, wobei beim Südraum der größte Effekt erzielt wurde (-18 % mit einem Luftwechsel von 10 h^{-1}), beim Westraum der kleinste (-4 %).

Da keine Einzelmaßnahme zu einer so starken Reduktion der Kühllast führt, dass keine Kühlung mehr benötigt wird, muss eine Kombination von Optimierungsmaßnahmen überprüft werden.

7.6 Optimierung 4 – Sonnenschutz und Nachtluftwechsel

7.6.1 Vorgaben

Da die vorigen Fälle gezeigt haben, dass eine Einzelmaßnahme die Auslegungskühllast nicht in ausreichend großem Maß vermindern kann, wird bei diesem Optimierungsversuch ein vertikaler Sonnenschutz mit einer erhöhten Luftwechselrate außerhalb der Bürozeiten (und wenn die Außenlufttemperatur geringer als die Innenlufttemperatur ist) kombiniert.

Der vertikale Sonnenschutz wird dabei mit einer Transparenz von 20 % angenommen. Die Steuerung erfolgt entsprechend der Modifizierung von Optimierung 2 (am Tag vollständig geschlossen, in der Nacht vollständig geöffnet). Der Nachtluftwechsel wird mit einer Luftwechselrate von 4 h^{-1} (stärkere mechanische Lüftung) angenommen.

Als Ergebnisse werden für jede Haupthimmelsrichtung die Auslegungskühllasten und die Reduktion im Vergleich zu dem Raum ohne Maßnahmen angeführt.

In der folgenden Tabelle sind die Änderungen gegenüber den ursprünglichen Raumdaten (siehe Einleitung) angeführt:

Beschreibung	Wert	
Tagesabschnitte	2 oder mehr Tagesabschnitte	
Abschnitte (von Uhrzeit bis Uhrzeit)	8 – 17	17 – 8
Zuluft mit Außenlufttemperatur	60 m ³ /h (LW 1 h ⁻¹)	LW 4 h ⁻¹
Bauteil 4 – Fenster:		
Sonnenschutz	außen, Transparenz 20% Reflexion 24% Absorption 56% (Reflexion und Absorption im Verhältnis 3:7)	

Tabelle 7.12: Änderungen an den Objektdaten bei Optimierung 4

7.6.2 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Berechnungen für die verschiedenen Orientierungen angeführt. Zusätzlich zur Auslegungskühllast wird deren Reduktion durch die Kombination der Maßnahmen angegeben:

Nordorientierung		Ostorientierung		Südorientierung		Westorientierung	
Kühllast in Watt	Reduktion						
926 im Juli	-48 %	1117 im Juli	-68 %	1236 im August	-72 %	1285 im Juli	-63 %

Tabelle 7.13: Ergebnisse Optimierung 4 – Kombination Sonnenschutz und Luftwechsel

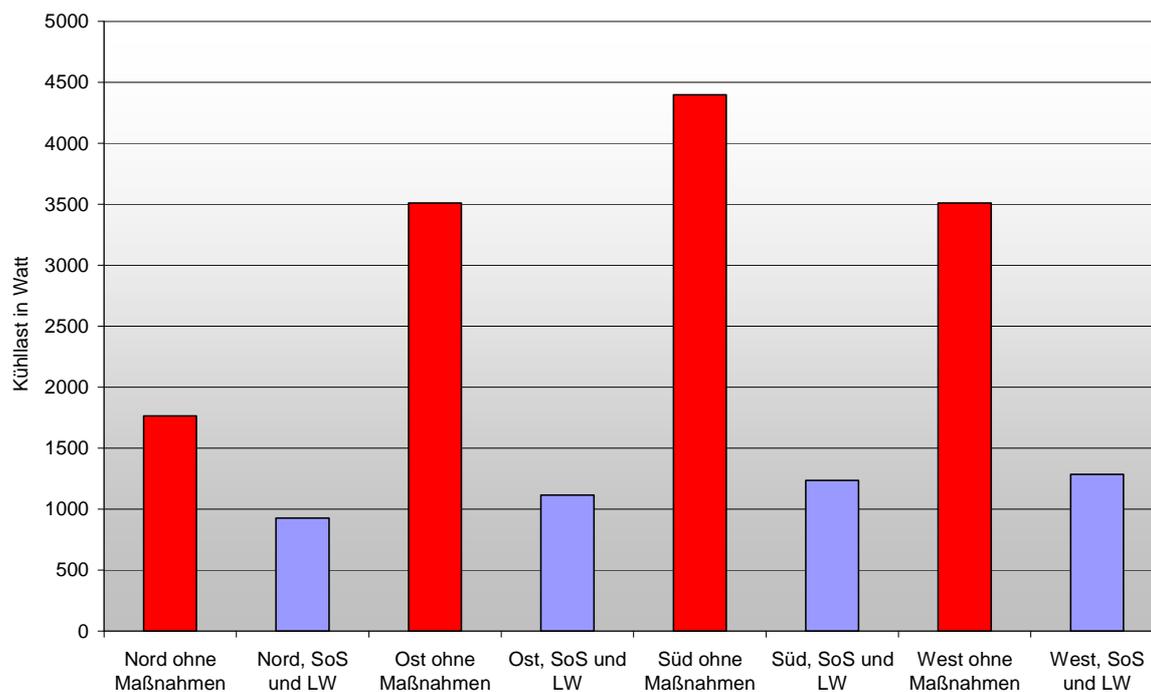


Abb. 7.7: Ergebnisse Optimierung 4 – Kombination von Sonnenschutz und erhöhtem Nachtluftwechsel

7.7 Optimierung 5 – Weitere Optimierungen

Die Optimierung 4 hat gezeigt, dass die Kombination der bisher eingesetzten Maßnahmen nicht ausreicht, um die laut Aufgabestellung geringe Auslegungskühllast zu erreichen oder um idealerweise ohne Kühlanlage auszukommen. Aus diesem Grund wird nun mit weiteren Maßnahmen versucht, die Kühllast zu reduzieren.

7.7.1 Erhöhung der Solltemperatur

Als erstes werden die Solltemperaturen auf die nach ÖNORM B 8110-3 erlaubten 27°C [ÖNORM B 8110-3 (1999), Seite 6] erhöht. Diese Temperatur ist zwar nicht so komfortabel wie die zuerst gewählten 24°C, bei einer Hitzewelle ist diese Temperatur allerdings durchaus vertretbar. Diese Maßnahme führt – zusammen mit der damit früher möglichen Umstellung auf Nachtlüftung (z.B. im Juli um 20h statt um 22h) – zu den folgenden Ergebnissen:

Nordorientierung		Ostorientierung		Südorientierung		Westorientierung	
Kühllast in Watt	Reduktion						
665 im Juli	-62 %	790 im Juli	-77 %	964 im August	-78 %	1054 im Juli	-70 %

Tabelle 7.14: Ergebnisse Optimierung 5 – Erhöhung der Solltemperaturen

7.7.2 Senkung der Luftwechselrate am Tag

Die Senkung der Luftwechselrate während des Tages würde die Kühllast zwar etwas vermindern, allerdings ist das durch die Notwendigkeit der Einhaltung des hygienischen Mindestluftwechsels für Büroräume (1 h^{-1} , siehe [EN 12831 (2003), Seite 70]) nicht möglich.

Die mit der Frischluft (Außenlufttemperatur) zugeführte Energiemenge, kann durch den Einsatz eines Wärmeaustauschers vermindert werden (Frischluft und Abluft im Gegenstrom). Durch den geringen Temperaturunterschied steht der Aufwand aber oft in keinem Verhältnis zum Nutzen.

7.7.3 Erhöhung der Speichermassen

Bei der Analyse der Kühllastverläufe fallen die Schwankungen über den Tag auf:

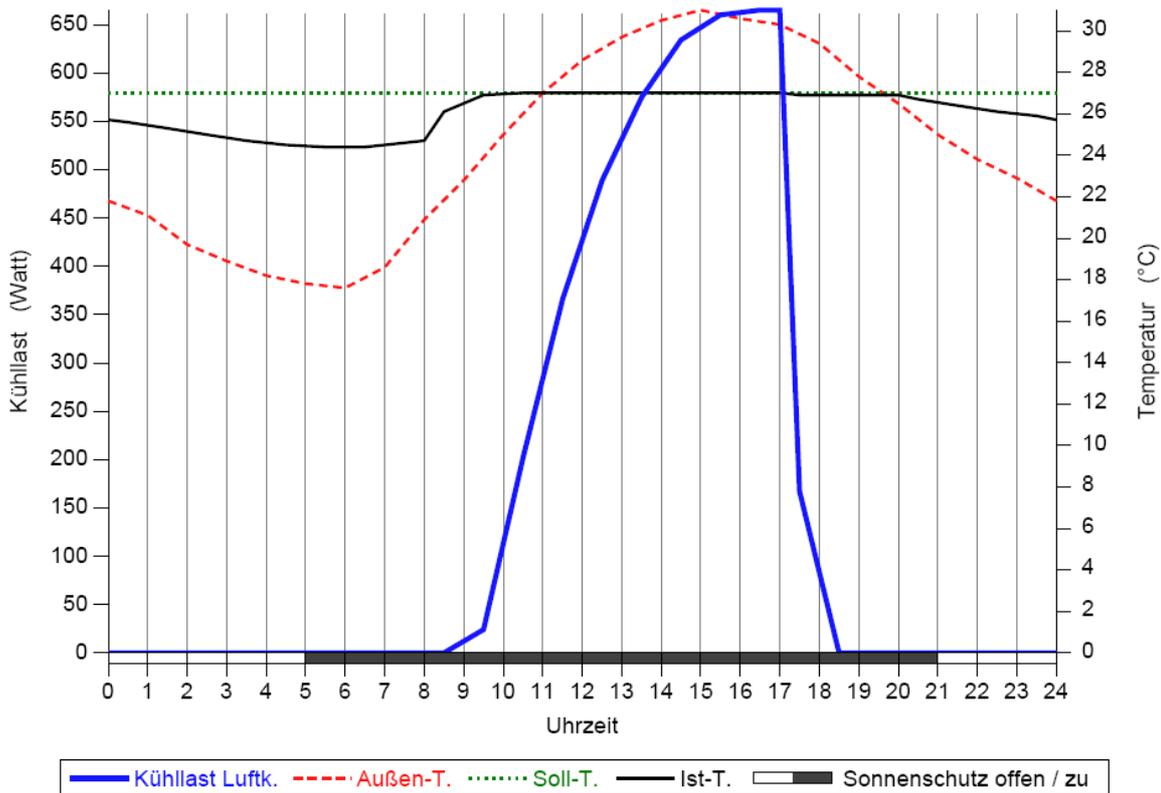


Abb. 7.8: Ergebnisse nach der Erhöhung der Solltemperatur (Nordraum, Juli)

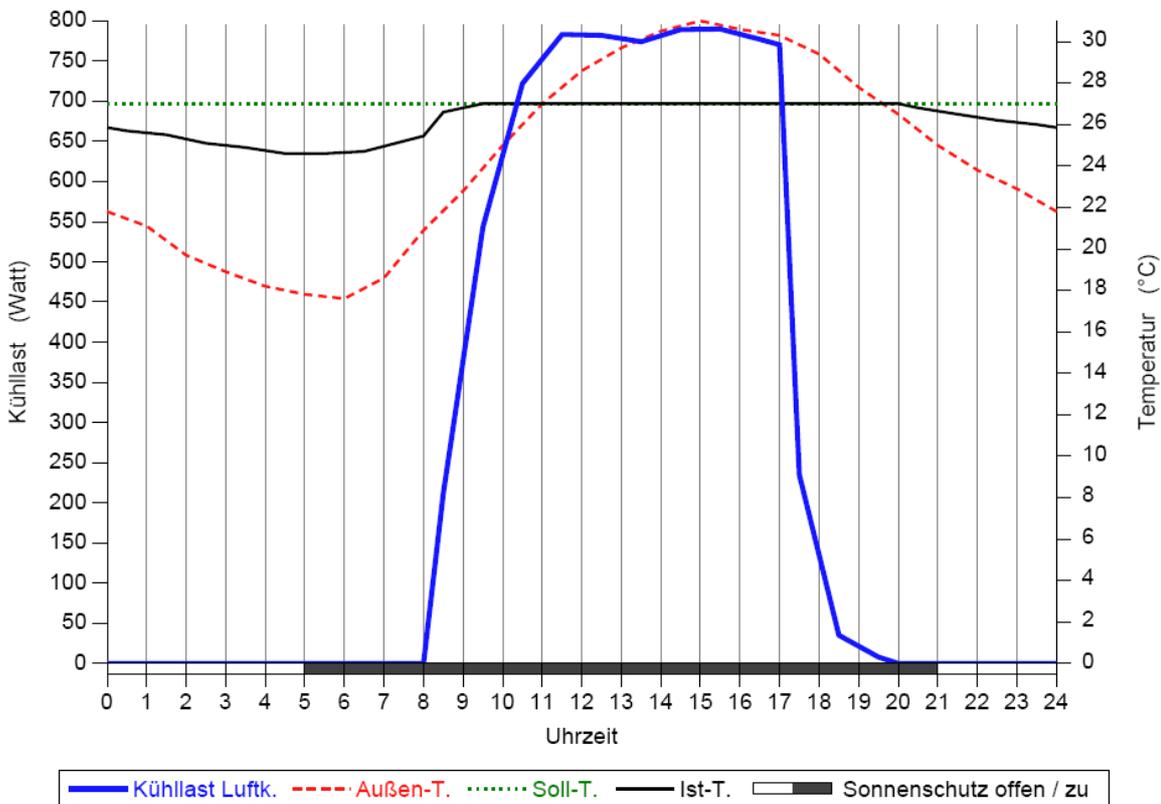


Abb. 7.9: Ergebnisse nach der Erhöhung der Solltemperatur (Ostraum, Juli)

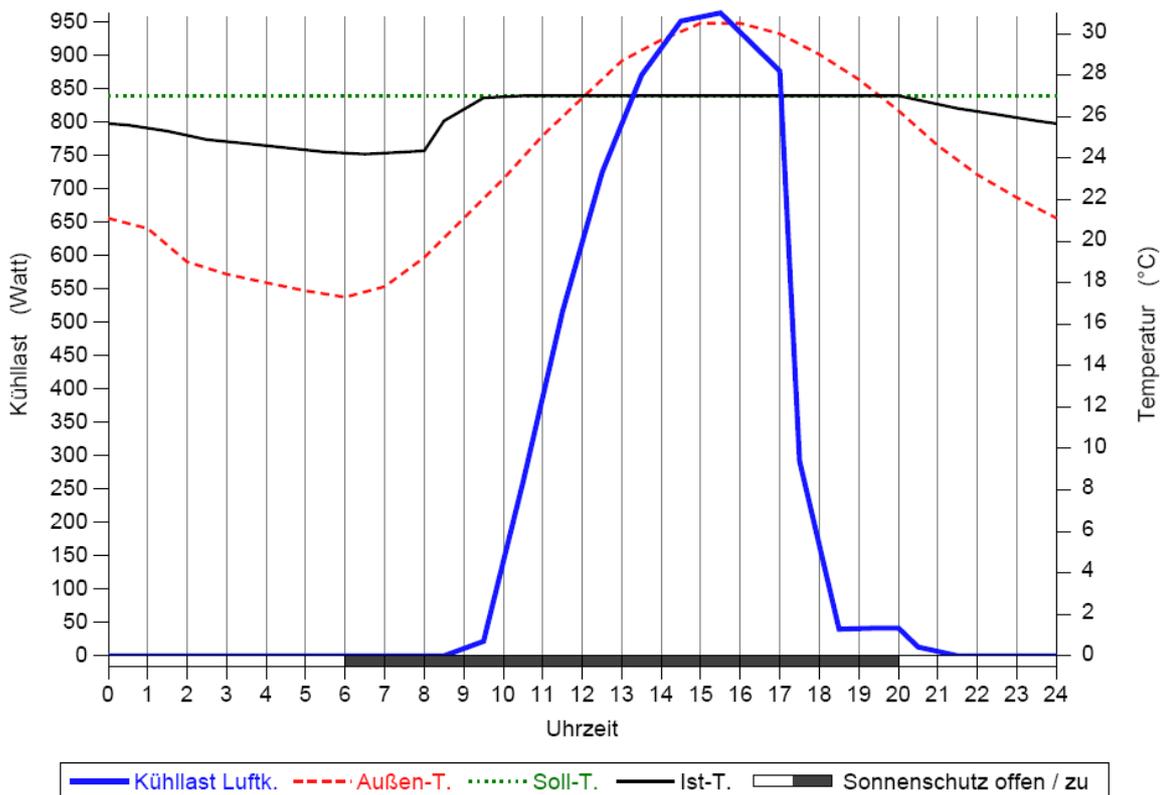


Abb. 7.10: Ergebnisse nach der Erhöhung der Solltemperatur (Südraum, August)

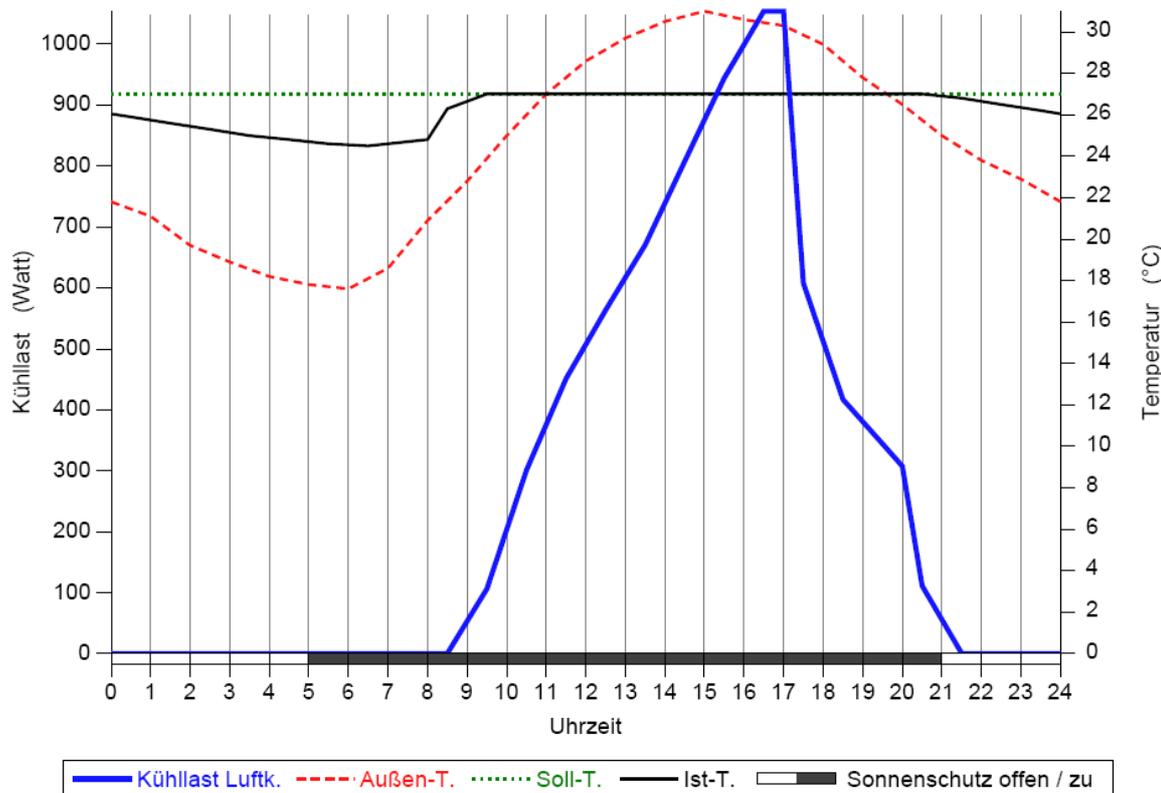


Abb. 7.11: Ergebnisse nach der Erhöhung der Solltemperatur (Westraum, Juli)

Diese Schwankungen könnten auf ein Missverhältnis zwischen den Raumdimensionen bzw. der Raumnutzung und den vorhandenen Speichermassen hinweisen. Bei Vergrößerung der Speichermassen werden Schwankungen im Tagesverlauf gedämpft. Aus diesem Grund, und da nicht über den ganzen Tag gekühlt werden muss und auch die Temperatur in der Nacht unter die Solltemperatur fällt, ist es naheliegend, die Speichermassen zu erhöhen.

Wenn die seitlichen Wände statt aus Gipsbauplatten aus 15 cm Stahlbeton hergestellt werden (so wie die Rückwand), dann ergeben sich folgende Auslegungskühllasten (eine Erhöhung der Wandstärke führt kaum mehr zu einer Verbesserung, eine Erhöhung der Wandoberfläche könnte noch eine Verringerung der Kühllast bewirken. Da der Übergang der Wärme von der Raumluft auf die Speichermassen und umgekehrt stark vom Wärmeübergangskoeffizienten abhängt, kann eine Erhöhung der Wandoberfläche zu einem erhöhten Wärmeaustausch und damit zu einer verbesserten Nutzung der Speichermassen führen):

Nordorientierung		Ostorientierung		Südorientierung		Westorientierung	
Kühllast in Watt	Reduktion						
602 im Juli	-66 %	757 im Juli	-78 %	868 im August	-80 %	960 im Juli	-73 %

Tabelle 7.15: Ergebnisse Optimierung 5a – Erhöhung der Speichermassen

7.7.4 Verkleinerung der Fensterfläche

Da die Einstrahlung über Fenster üblicherweise einen großen Anteil an der Kühllast ausmacht, kann die Verkleinerung der Fensterfläche einen größeren Beitrag liefern. Bei dem vorliegenden Raum wird das Fenster von der Decke abgesetzt und ein opaker Bauteil (Fenstersturz) 30 cm von der Decke heruntergezogen. Die Fensterglasfläche wird dadurch von 7,6 m² um 1,2 m² auf 6,4 m² (32 % der Fußbodenfläche) verringert, siehe Skizze:

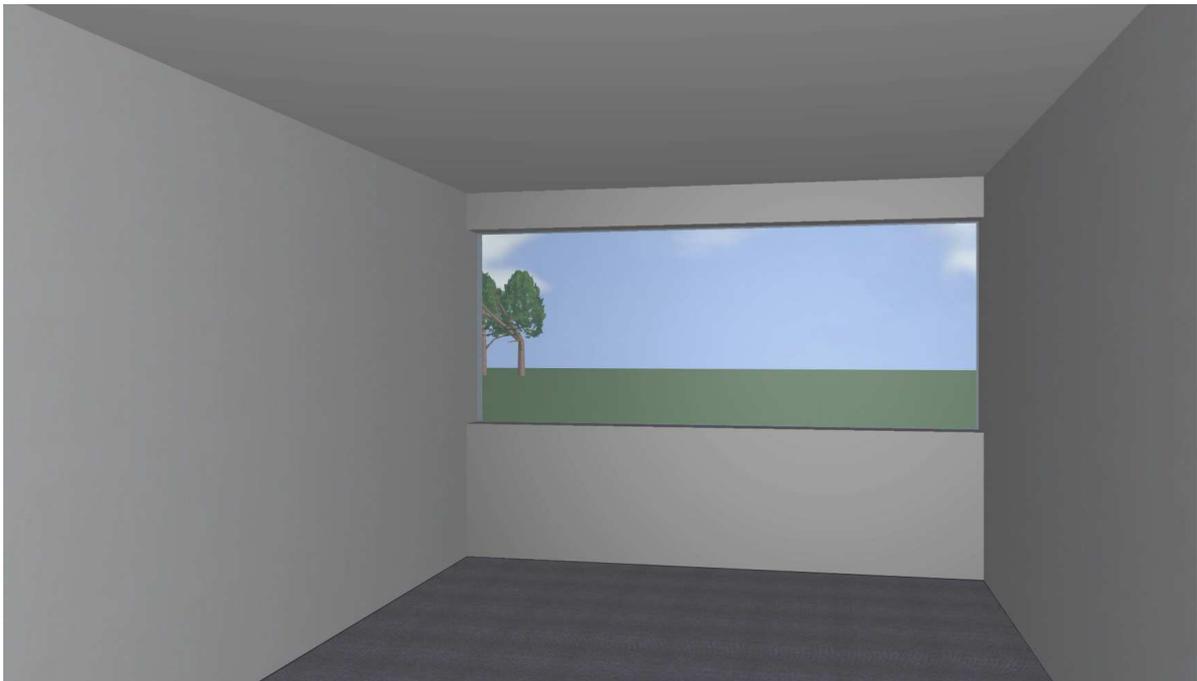


Abb. 7.12: Skizze des Raums nach verkleinerter Fensterfläche (Sonnenschutz geöffnet)

Das führt zu den folgenden Auslegungskühllasten:

Nordorientierung		Ostorientierung		Südorientierung		Westorientierung	
Kühllast in Watt	Reduktion						
567 im Juli	-68 %	704 im Juli	-80 %	791 im August	-82 %	883 im Juli	-75 %

Tabelle 7.16: Ergebnisse Optimierung 5b – Verringerung der Fenstergröße

7.7.5 Verminderung der freigesetzten Maschinenabwärme

Im Raum freigesetzte Wärme wirkt sich stark auf das Raumklima aus und ist schwer zu kompensieren. Das führt zu der Idee, einen ungewöhnlichen Ansatz zu überprüfen.

Im Nutzungsprofil des Raums sind zwei innere Lasten angeführt: die Abwärme von zwei Personen und von Maschinen (2 Computer). Die Abwärme der Personen kann vom Planer nicht verringert werden. Aber die freigesetzte Abwärme der Computer sehr wohl. Durch die direkte Absaugung der von den Computerlüftern ausgeblasenen erwärmten Abluft durch die Lüftungsanlage oder den Einsatz von entsprechend belüfteten Gehäusen, in welchen die Computer stehen (positiver Zusatzeffekt: Verringerung des Lärmpegels im Raum), kann die Abwärme auf ein Minimum reduziert werden. Lediglich eine geringe Abstrahlung der Computer (ohne Zusatzgehäuse) und die Abwärme der Bildschirme würden dann noch in den Raum freigesetzt werden. So kann von einer Reduktion der Abwärme von 500 W auf maximal 200 W ausgegangen werden. Damit ergeben sich folgende Auslegungskühllasten:

Nordorientierung		Ostorientierung		Südorientierung		Westorientierung	
Kühllast in Watt	Reduktion						
200 im Juli	-89 %	402 im Juli	-89 %	440 im August	-90 %	561 im Juli	-84 %

Tabelle 7.17: Ergebnisse Optimierung 5c – Verminderung der freigesetzten Maschinenabwärme

7.7.6 Verminderung der Transparenz des Sonnenschutzes

Da das Fenster mit 6,4 m² eine überdurchschnittlich große Glasfläche besitzt (32 % der Fußbodenfläche), kann die Transparenz des Sonnenschutzes an extrem heißen Tagen durchaus auf 15 % herabgesetzt werden (z.B. Sonnenschutz mit 15 % Transparenz wird nur an extremen Tagen vollständig geschlossen):

Nordorientierung		Ostorientierung		Südorientierung		Westorientierung	
Kühllast in Watt	Reduktion						
115 im Juli	-93 %	314 im Juli	-91 %	283 im Juli	-94 %	432 im Juli	-88 %

Tabelle 7.18: Ergebnisse Optimierung 5d – Verminderung der Sonnenschutz-Transparenz

7.7.7 Erhöhung des Nachtluftwechsels

Manchmal ist eine Erhöhung des Nachtluftwechsels über 4 h^{-1} möglich bzw. sinnvoll. Bei den hier analysierten Räumen kann dadurch eventuell völlig auf eine Kühlanlage verzichtet werden. Außerdem sind die Betriebskosten bei diesen hohen Nachtluftwechseln nicht ausschlaggebend und die Lüftung muss nicht geräuschlos arbeiten (wodurch kleinere Querschnitte bei den Rohren und den Lüftungsauslässen erlaubt sind), da nur selten, bei extremen Wetterlagen und nur außerhalb der Bürozeiten ein so hohen Luftwechsel erforderlich ist:

	Ergebnisse							
	Nordorientierung		Ostorientierung		Südorientierung		Westorientierung	
Luftwechsel pro Stunde	Kühllast in Watt	Reduktion						
4	115	-93 %	314	-91 %	283	-94 %	432	-88 %
5	0	-100 %	236	-93 %	169	-96 %	341	-90 %
6	0	-100 %	147	-96 %	45	-99 %	216	-94 %
Monat, in der die maximale Kühllast auftritt	Juli		Juli		Juli		Juli	

Tabelle 7.19: Ergebnisse Optimierung 5e – Erhöhung des Nachtluftwechsels

7.8 Ergebnisse der Optimierungen

Durch thermische Optimierung der vier Räume mittels Kombination folgender Maßnahmen

- vertikaler Sonnenschutz (nachjustiert)
- erhöhter Nachtluftwechsel (nachjustiert)
- Erhöhung der Solltemperatur auf ein (bei extremer Wetterlage) vertretbares Niveau
- Erhöhung der Speichermassen
- Verkleinerung der Fensterfläche von 7,6 m² auf 6,4 m²
- Verminderung der freigesetzten Maschinenwärme durch Absaugung der Abluft

konnten die Auslegungskühllasten (je nach Orientierung) stark reduziert werden (Ostraum -96 % und Westraum -94 %) bzw. kann völlig auf eine Kühlanlage verzichtet werden (Nordraum ab einer Nachtluftwechselrate von 5 h⁻¹ und Südraum ab 6 h⁻¹).

In der folgenden Tabelle sind die Änderungen nach erfolgter Optimierung gegenüber den ursprünglichen Raumdaten (siehe Einleitung) angeführt. Daten in grau sind der Vollständigkeit halber angeführt, beinhalten aber keine Änderungen:

Beschreibung	Wert	
Meteorologische Daten	Wien	
Reflexionsfaktor Umgebung	0,25 – Rasen	
Kühlbetrieb	0 – 24 Uhr	
Raumangaben:		
Raumbreite (Außenwand)	4 m	
Raumtiefe	5 m	
Raumhöhe	3 m	
Geschosshöhe	3,287 m	
Raumgrundfläche	20 m ²	
Raumluftvolumen	60 m ³	
Kunstlicht-Raumbelastungsgrad	1	
Gleichzeitigkeitsfaktor(en) Last(en)	1	
Tagesabschnitte	2 Tagesabschnitte	
Abschnitte (von Uhrzeit bis Uhrzeit)	8 – 17	17 – 8
Personenabwärme trocken, bei 20°C	230 W	0 W

Maschinenabwärme	500 W (200 W freigesetzt, 300 W über Lüftung abgeführt)	0 W
Glühlampen	0 W	0 W
Zuluft mit Außenlufttemperatur	60 m ³ /h (LW 1 h ⁻¹)	0 m ³ /h bzw. Nachtlüftung mit einem Luftwechsel von 5 h ⁻¹ bzw. 6 h ⁻¹
Raumluft-Solltemperatur	27,0°C	27,0°C
Bauteilangaben:		
Bauteil 1 – Decke:		
Bauteilfläche	20 m ²	
U-Wert	0,60 W/(m ² .K)	
Schichtaufbau (Baustoff und Dicke):		
Schicht 1 (oben)	Textiler Teppich	1,0 cm
Schicht 2	Estrichbeton	5,5 cm
Schicht 3	Mineralwolle TSDP	4,0 cm
Schicht 4	Stahlbeton	18,0 cm
Schicht 5 (unten)	Gipsputz	0,2 cm
Nachbarraum	ident zu aktuellem Raum	
Bauteil 2 – Fußboden:	gleich Bauteil 1 - Decke	
Bauteil 3 – Außenwand:		
Bauteilfläche inkl. Fensterfläche	12 m ²	
Bauteilfläche exkl. Fensterfläche	5,6 m ²	
U-Wert (bei ÖNORM von Norm selbst berechnet)	0,22 W/(m ² .K)	
Absorptionskoeffizient der Bauteiloberfläche	0,7	
Schichtaufbau (Baustoff und Dicke):		
Schicht 1 (außen)	Kunstharz Zementputz	0,2 cm
Schicht 2	EPS Hartschaum	12,0 cm
Schicht 3	Porosierter HLZ m. KZ Mörtel	25,0 cm
Schicht 4 (innen)	Gipsputz	1,5 cm
Orientierung – Azimut (gegen Norden)	Nord 0° / Ost 90° / Süd 180° / West 270°	
Neigung – Höhenwinkel der Flächennormalen	0,0°	
Bauteil 4 – Fenster:		
Bauteilfläche (Breite x Höhe)	6,4 m ² (4,0 x 1,6 m)	
U-Wert gesamt	1,1 W/(m ² .K)	

Glasanteil	100,00 %
Glastyp	Wärmeschutzglas beschichtet
Aufbau	2 Scheiben
g-Wert	60 %
Sonnenschutz	außen, Transparenz 15 %
Vorsprünge – Abstand vom Fensterrahmen:	
oben / unten / links / rechts	0 m
Vorsprünge – Tiefe des Vorsprungs:	
oben / unten / links / rechts	0 m
Orientierung – Azimut (gegen Norden)	Nord 0° / Ost 90° / Süd 180° / West 270°
Neigung – Höhenwinkel der Flächennormalen	0,0°
Horizontüberhöhung	0,0°
Bauteil 5 – Innenwand (seitlich):	
Bauteilfläche	15 m ²
U-Wert	3,02 W/(m ² .K)
Schichtaufbau (Baustoff und Dicke):	
Schicht 1	Gipsputz 0,2 cm
Schicht 2	Stahlbeton 15,0 cm
Schicht 3	Gipsputz 0,2 cm
Nachbarraum	ident zu aktuellem Raum
Bauteil 6 – Innenwand (seitlich):	gleich Bauteil 5 - Innenwand
Bauteil 7 – Innenwand (Rückwand):	
Bauteilfläche	12 m ²
U-Wert	3,02 W/(m ² .K)
Schichtaufbau (Baustoff und Dicke):	
Schicht 1	Gipsputz 0,2 cm
Schicht 2	Stahlbeton 15,0 cm
Schicht 3	Gipsputz 0,2 cm
Nachbarraum	ident zu aktuellem Raum

Tabelle 7.20: Objektdaten thermische Optimierung – Optimierter Büroraum

Nach diesen Optimierungsmaßnahmen errechnen sich folgende Auslegungskühllasten (diese treten im Juli auf, in allen anderen Monaten sind die Nennkühllasten geringer):

Luftwechsel pro Stunde	Auslegungskühllasten							
	Nordorientierung		Ostorientierung		Südorientierung		Westorientierung	
	Kühllast in Watt	Reduktion	Kühllast in Watt	Reduktion	Kühllast in Watt	Reduktion	Kühllast in Watt	Reduktion
5	0	-100 %	236	-93 %	149	-97 %	341	-90 %
6	0	-100 %	147	-96 %	0	-100 %	216	-94 %

Tabelle 7.21: Endergebnisse der Optimierung – Auslegungskühllasten

Ohne Kühlung ergeben sich damit folgende Jahres-Temperaturmaxima der Raumluft (im Juli):

Luftwechsel pro Stunde	Jahres-Temperaturmaxima			
	Nordorientierung	Ostorientierung	Südorientierung	Westorientierung
5	26,8 °C	28,1 °C	27,6 °C	28,2 °C
6	26,3 °C	27,5 °C	27,1 °C	27,6 °C

Tabelle 7.22: Endergebnisse der Optimierung – Temperaturmaxima

Die folgenden Diagramme zeigen die dazugehörigen Temperaturverläufe:

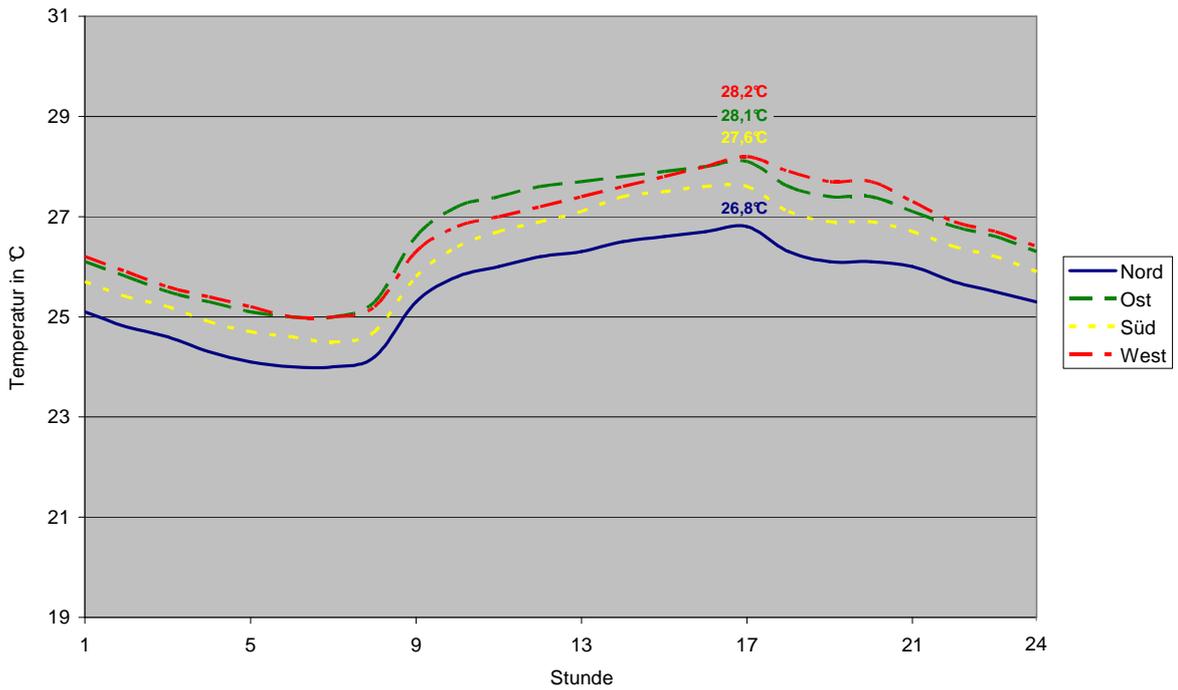


Abb. 7.13: Endergebnisse der Optimierung – Temperaturen ohne Kühlung, Luftwechselrate 5 h⁻¹

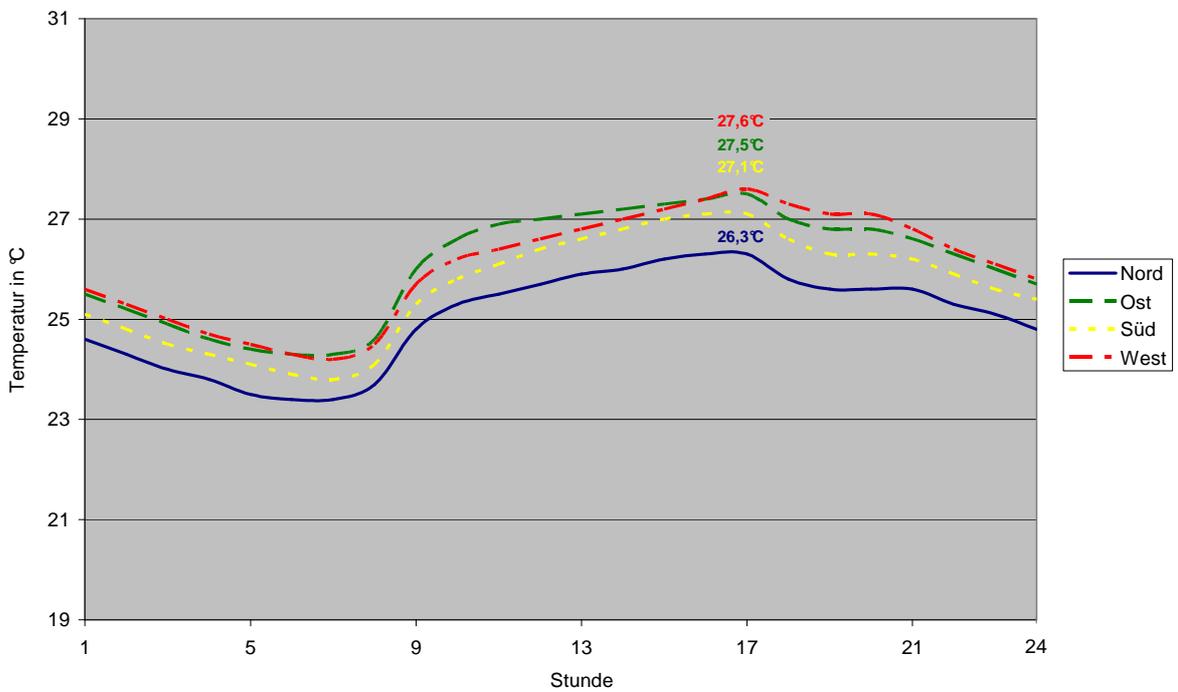


Abb. 7.14: Endergebnisse der Optimierung – Temperaturen ohne Kühlung, Luftwechselrate 6 h⁻¹

Der Planer kann nun anhand der Temperaturverläufe (Abbildungen auf der folgenden Seite) entscheiden, ob die maximalen Temperaturen ohne Kühlung niedrig genug liegen, ob noch weitere Optimierungen (z.B. weitere Verkleinerung der Fensterfläche, weitere Verringerung der Sonnenschutz-Transparenz) untersucht und umgesetzt werden sollen, oder ob doch eine schwache Kühlung eingebaut werden soll.

Anhand der ermittelten Temperaturen ist folgendes Szenario denkbar:

- Nordraum: 5 Nachtluftwechsel pro Stunde (Maximum bei 26,8°C am Ende der Bürozeit)
Die Temperaturen liegen unter der empfohlenen Maximaltemperatur (27°C).
Wenn mehr Komfort gewünscht ist, kann mit 6 Nachtluftwechseln pro Stunde der Temperaturverlauf in der gesamten Bürozeit um etwa 0,5°C gesenkt werden.
- Ostraum: 6 Nachtluftwechsel pro Stunde (Maximum bei 27,5°C am Ende der Bürozeit)
Die Temperaturen liegen in der Bürozeit ab 12h über der empfohlenen Maximaltemperatur (27°C), allerdings nur geringfügig.
- Südraum: 6 Nachtluftwechsel pro Stunde (Maximum bei 27,1°C am Ende der Bürozeit)
Die Temperaturen liegen praktisch nicht über der empfohlenen Maximaltemperatur (27°C).
- Westraum: 6 Nachtluftwechsel pro Stunde (Maximum bei 27,5°C am Ende der Bürozeit)
Die Temperaturen liegen in der Bürozeit über der empfohlenen Maximaltemperatur (27°C). Durch die zeitliche Verschiebung des Sonneneinstrahlungsmaximums gegenüber dem Ostraum, überschreitet die Raumlufttemperatur jedoch erst um ca. 13h30 die 27°C.

Diese Angaben beziehen sich natürlich nur auf den heißesten Monat. In den anderen Monaten kann entsprechend auch mit niedrigeren Nachtluftwechseln ein komfortableres Raumklima erreicht werden.

7.9 Diskussion der Ergebnisse der Optimierungen

Mittels der durchgeführten Optimierungsversuche wurde untersucht, inwieweit Kühllast-Berechnungsmethoden (hier im Speziellen das Verfahren nach ÖNORM H 6040) für die Optimierung von Räumen bzw. Gebäuden geeignet sind.

Anhand der vorliegenden Berechnungen ist ersichtlich, dass das Kühllast-Berechnungsverfahren nach ÖNORM H 6040 bei der Optimierung von Räumen hilfreich sein kann. Bei der Ermittlung der Auswirkungen eines Sonnenschutzes, von erhöhten Nachtluftwechsell und von baulichen Maßnahmen (z.B. Erhöhung der Speichermassen, Verkleinerung der Fensterflächen) liefert das Verfahren Aussagen, an denen sich der Planer bei seiner Optimierungsarbeit gut orientieren kann und anhand derer er sich für die richtigen Maßnahmen entscheiden kann. Eine Sensitivitätsanalyse ist ebenfalls möglich.

Nachteilig ist die derzeit fest vorgegebene Steuerung des vertikalen Sonnenschutzes. Die von der ÖNORM vorgeschriebene komplette Schließung des Sonnenschutzes bei Auftreffen von Direktstrahlung auf das Fenster und umgekehrt die vollständige Öffnung bzw. Entfernung beim Fehlen der direkten Sonneneinstrahlung führt zu viel zu hohen Kühllasten bei ausschließlich diffuser Einstrahlung. Durch einen Eingriff in das Verfahren (bzw. in die zugehörige Software „Kühllast H6040“) konnte gezeigt werden, dass in einer besseren Steuerung des Sonnenschutzes ein wesentliches Einsparungspotential steckt (z.B. für den Nordraum mit einem Sonnenschutz mit 20 % Transparenz ergibt die ÖNORM-Steuerung eine Auslegungskühllast von 1716 W. Mit einer modifizierten Steuerung, bei der der Sonnenschutz den ganzen Tag geschlossen bleibt, sinkt die Auslegungskühllast auf 1019 W).

Abgesehen vom vertikalen Sonnenschutz, dessen Einfluss auf das Verhalten des Gebäudes von der ÖNORM zu gering berücksichtigt wird, ist ein Kühllast-Berechnungsverfahren, wie das nach ÖNORM H 6040, zur thermischen Optimierung von Gebäuden für die Sommermonate gut geeignet.

8 Zusammenfassung und Aussicht

In der vorliegenden Arbeit wurden im deutschsprachigen Raum veröffentlichte Normen und Richtlinien, für die in der Praxis anwendbare Werkzeuge für den österreichischen Raum angeboten werden, zur Berechnung der sensiblen Kühllast von Räumen und Gebäuden in Österreich validiert und verglichen. Zusätzlich wurden die Ergebnisse der Berechnungen den Ergebnissen von einfach gehaltenen Überschlagsrechnungen gegenübergestellt, um die Eignung solcher Abschätzungsmethoden zu überprüfen. Zuletzt wurde der Nutzen der Berechnungsmethoden für die thermische Optimierung von Gebäuden für die Sommermonate analysiert.

Die aktuell gültige österreichische Norm ÖNORM H 6040 und die deutsche Richtlinie VDI 2078 gehen verschiedenen Wege bei der Berechnung der sensiblen Kühllast. Die ÖNORM setzt ein dynamisches Simulationsverfahren ein, das sehr viele Parameter der Umgebungsbedingungen, des Gebäudes, der Räume und der Nutzung der Räume berücksichtigt. Die beiden Verfahren der VDI 2078 stützen sich bei der Ermittlung von Kühllasten auf im Vorfeld der Richtlinienerstellung berechnete Daten und Korrekturfaktoren. Der Vorteil der VDI-Verfahren gegenüber dem ÖNORM-Verfahren liegt in der Einsparung von Eingabewerten und Rechenaufwand, der Nachteil in der ungenaueren und unflexibleren Berechnung. Neben diesen beiden Regelwerken stehen im deutschsprachigen Raum noch das schweizer Normverfahren der SN 546 382/2 (händisches Verfahren ohne Österreichbezug) und mehrere ungenormte, teilweise an Regelwerke angelehnte Berechnungsmethoden (dynamische Gebäudesimulationen, Kühllast-Abschätzungsmethoden wie Webseitenrechner und Formblätter etc.) zur Verfügung.

Anhand von mehreren, händisch, mit analytischen Berechnungsmethoden nachgerechneten Validierungsfällen, konnte das Verfahren der ÖNORM H 6040 verifiziert werden. Abweichungen beruhen vor allem auf der Wahl von Wärmeübergangskoeffizienten durch die ÖNORM, die geringfügig von den in aktueller Literatur üblichen Werten abweichen. Durch Einsetzen dieser heute gebräuchlichen Werte in das Normverfahren konnte die Abhängigkeit der Abweichungen von der Differenz zwischen den alten und den neuen Wärmeübergangskoeffizienten bestätigt werden. Die stärkste Abweichung zwischen analytischer Berechnung und Simulation nach ÖNORM bei gleichen Wärmeübergangskoeffizienten trat bei dem komplexesten Validierungsfall (Fall 5) auf, bei dem die Auswirkungen sowohl der Einstrahlung in den Raum durch eine

Einfachverglasung als auch der Differenzen zwischen Außen- und Innentemperaturen ermittelt wurden (Abweichung +4,9 %).

Der Vergleich des verifizierten Verfahrens der ÖNORM mit den VDI-Verfahren, Webseitenrechnern und Formblättern zeigte teilweise sehr starke Abweichungen in den Ergebnissen. Die VDI-Verfahren ergaben meist zu geringe Kühllasten. Die Abweichungen lagen beim VDI-EDV-Verfahren zwischen -13% und -62%, beim VDI-Kurzverfahren zwischen +18% und -80%, wobei beim VDI-Kurzverfahren nur in einem Fall und nur bei dem Ergebnis eines einzigen Programms eine positive Abweichung auftrat. Diese Abweichungen dürften vor allem durch zwei Problemstellen in den VDI-Verfahren entstanden sein. Erstens sind die Berechnungen für Typräume aufgelegt. Das lässt vermuten, dass bei größeren Abweichungen von diesen Typräumen auch größere Fehler bei den Berechnungen entstehen. Zweitens sind die grob unterteilten meteorologischen Daten von Deutschland und ihre Interpretation so fest mit dem Verfahren verknüpft, dass das Ersetzen durch ortsspezifische Daten kaum möglich ist. Die für Deutschland vorgesehenen Daten weichen von österreichischen Messwerten je nach Projektstandort mehr oder weniger stark ab. Außerdem sind die meteorologischen Daten der VDI deutlich älter (1953 bis 1972) als jene der ÖNORM.

Neben diesen Abweichungen sind die Differenzen zwischen Ergebnissen verschiedener Programme nach den VDI-Verfahren auffällig. Diese entstehen wahrscheinlich durch die von den Programmherstellern für einige Teile des Rechenverfahrens, für die die VDI keine vollständigen Rechenvorschriften vorgibt, selbst erarbeiteten (und damit auch unterschiedlichen) Lösungen.

Ein wesentliches Ergebnis dieser Arbeit ist, dass die weit verbreitete Ansicht, dass die Ergebnisse einfacher Abschätzungsmethoden immer auf der sicheren Seite lägen, widerlegt wurde. Trotz der vermuteten großen Sicherheitszuschläge dieser Verfahren werden oft viel zu kleine Kühllasten ermittelt. Die Schwankungen der Ergebnisse sind jedenfalls so groß (-100% bis +382%), dass damit keine Kühlanlagen ausgelegt werden sollten.

Zuletzt wurde noch untersucht, ob Kühllast-Berechnungsverfahren (hier stellvertretend das Verfahren der ÖNORM H 6040) bei der thermischen Optimierung von Gebäuden für die Sommermonate ein geeignetes Hilfsmittel sein können. Anhand von verschiedenen Maßnahmen und deren Auswirkungen auf das thermische Verhalten konnten die (verschieden orientierten) Räume mit Hilfe des Simulationsverfahrens soweit optimiert werden, dass eine Kühlung nicht mehr oder zumindest nicht mehr unbedingt erforderlich ist. Bis auf die zur Zeit eingeschränkten

Möglichkeiten bei der Steuerung des vertikalen Sonnenschutzes, kann das Verfahren der ÖNORM H 6040 für thermische Optimierungen also gute Dienste leisten.

Zur Zeit ist ein Umbruch bei der Ermittlung der Auslegungskühllast zu beobachten. Einerseits werden die Anforderungen von Auftraggebern immer höher, wodurch sich Planer, die die benötigte Leistung von Kühlanlagen bisher oft nur abgeschätzt haben, selbst bei kleineren Projekten zum Umstieg auf genauere Berechnungsverfahren gezwungen sehen. Dies dürfte unter anderem auf das gestiegene Umweltbewusstsein und die gestiegenen Energiekosten zurückzuführen sein.

Andererseits sind in letzter Zeit mehrere neue europäische Normen veröffentlicht worden, die teilweise neue, teilweise andere Herangehensweisen an die Teilbereiche der Kühllastberechnung vorgeben oder fordern. Die nationalen Normen müssen an diese europäischen Normen angepasst werden. Richtlinien von unabhängigen Organisationen, wie z.B. VDI-Richtlinien, müssen sich nicht an diese europäischen Normen halten.

Für die österreichische Norm ÖNORM H 6040 wird zur Zeit eine an die europäischen Normen angepasste Version erarbeitet. Auch an einer neuen VDI-Richtlinie wird mittlerweile gearbeitet. Es ist zu hoffen, dass bei der Entwicklung der neuen Normen und Richtlinien die Schwachstellen der Verfahren behoben werden und dass genaue Berechnungsverfahren in Zukunft eine weitere Verbreitung als heute erfahren werden.

9 Symbolverzeichnis

α	W/(m ² .K)	Wärmeübergangskoeffizient
α_E	W/(m ² .K)	äußerer Wärmeübergangskoeffizient
α_i	W/(m ² .K)	innerer Wärmeübergangskoeffizient
α_F	–	Absorptionsgrad von Glas für Sonnenstrahlung (diffus)
$\alpha_{F,Dir}$	–	Absorptionsgrad von Glas für Sonnenstrahlung (normal)
$\alpha_{Fußboden,Dir}$	–	Absorptionsgrad eines Fußbodens für Sonnenstrahlung (normal)
α_W	–	Absorptionsgrad einer Wand für Sonnenstrahlung (diffus)
$\alpha_{W,Dir}$	–	Absorptionsgrad einer Wand für Sonnenstrahlung (normal)
ϑ	°C	Temperatur
ϑ_E	°C	Außenlufttemperatur
ϑ_{ES}	°C	Wand-Außenoberflächentemperatur
ϑ_F	°C	Fensterglastemperatur
ϑ_i	°C	Innenlufttemperatur
ϑ_{SL}	°C	Sonnenlufttemperatur
λ	W/(m.K)	Wärmeleitfähigkeit
ρ_F	–	Reflexionsgrad von Glas für Sonnenstrahlung (diffus)
$\rho_{Luft, Außentemp}$	kg/m ³	Dichte der Luft bei Außenlufttemperatur
ρ_W	–	Reflexionsgrad einer Wand für Sonnenstrahlung (diffus)
τ_D	–	Transmissionsgrad des Staubes auf Glas für Sonnenstrahlung (diffus)
τ_F	–	Transmissionsgrad von Fensterglas für Sonnenstrahlung (diffus)
$\tau_{F,Dir}$	–	Transmissionsgrad von Fensterglas für Sonnenstrahlung (normal)
A	m ²	Fläche
A_F	m ²	Fenster-Glasfläche
A_W	m ²	gesamte Innenwandfläche des Raums
A_G	m ²	Gesamtfläche (Fenster-Glasfläche und gesamte Innenwandfläche)
c_p	J/(kg.K)	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck
d	m	Dicke
I_{ER}	W/m ²	an der Wandoberfläche reflektierte Sonneneinstrahlung

I_S	W/m ²	Sonneneinstrahlung
I_{SE}	W/m ²	an der Wandoberfläche absorbierte Sonneneinstrahlung
I_{SEDR}	W/m ²	am Staub reflektierte Sonneneinstrahlung
I_{SFA}	W/m ²	in der Fensterscheibe absorbierte Sonneneinstrahlung
I_{SFR}	W/m ²	in die Umgebung zurückreflektierter Teil der Sonneneinstrahlung
I_{SI}	W/m ²	in den Raum gelangende Sonneneinstrahlung (Teilsystem Fenster)
I_{SIR}	W/m ²	Strahlung aus Raum durch Reflexion an Innenwänden (Teilsystem Fenster)
I_{SIRE}	W/m ²	Strahlung aus dem Raum (durch Reflexion) an die Umgebung
I_{SIRFA}	W/m ²	in Fensterscheibe absorbierter Teil der Sonnenstrahlung aus dem Raum
I_{SW}	W/m ²	in den Raum gelangende Sonneneinstrahlung (Teilsystem Innenraum)
I_{SWRF}	W/m ²	Strahlung aus Raum durch Reflexion an Innenwänden (Teilsystem Innenraum)
I_{SWRnW}	W/m ²	Strahlungsanteil, der nach der n-ten Reflexion zur Wand reflektiert wird
I_{SWRnF}	W/m ²	Strahlungsanteil, d. nach der n-ten Reflexion zum Fenster reflektiert wird
I_{SWRnFR}	W/m ²	Strahlungsanteil, d. vom Fenster nach der n-ten Reflexion reflektiert wird
\dot{m}	kg/h	Massenstrom
\dot{q}	W/m ²	Gesamt-Wärmestromdichte
\dot{Q}	W	Gesamt-Wärmestrom (\equiv Kühllast)
\dot{q}_E	W/m ²	Dichte des Wärmestroms an die Umgebung
\dot{Q}_{H6040}	W	Gesamt-Wärmestrom (\equiv Kühllast), ermittelt nach ÖNORM H 6040
\dot{q}_I	W/m ²	Dichte des Wärmestroms in den Raum hinein pro m ² Fensterglasfläche
\dot{Q}_R	W	Wärmestrom durch Strahlung
\dot{q}_T	W/m ²	Wärmestromdichte durch Transmission
\dot{Q}_T	W	Wärmestrom durch Transmission
q_V	kJ/kg	spezifische Wärmemenge durch zugeführte Luftmenge
\dot{Q}_V	W	Wärmestrom durch zugeführten Luftstrom
R_E	m ² .K/W	äußerer Wärmeübergangswiderstand
R_I	m ² .K/W	innerer Wärmeübergangswiderstand
R_{UE}	(m ² .K)/W	äußerer Anteil des Wärmedurchgangswiderstands
R_{UI}	(m ² .K)/W	innerer Anteil des Wärmedurchgangswiderstands
U	W/(m ² .K)	Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert)
v	m/s	Luftgeschwindigkeit
\dot{V}	m ³ /h	Volumenstrom

10 Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1: Elektrisches Ersatzschaltmodell	23
Abb. 3.2: Geometrie der Typ-Räume [VDI 2078 (1996), Seite 34]	29
Abb. 3.3: Kühllastverläufe des VDI-Berechnungsbeispiels [VDI 2078 (1996), Seite 78]	30
Abb. 3.4: Zusammenhänge zwischen europäischen Normen [EN 15243 (2007), Seite 7]	35
Abb. 4.1: Statischer Wärmedurchgang durch eine Wand	50
Abb. 4.2: Statische Wärmezufuhr in einen Raum mit Lüftung	56
Abb. 4.3: Statischer Wärmedurchgang durch eine Wand mit Einstrahlung.....	58
Abb. 4.4: Skizze der Außenwand – Berechnungsschema.....	58
Abb. 4.5: Statischer Wärmedurchgang durch ein Fenster ohne Einstrahlung.....	61
Abb. 4.6: Statischer Wärme- und Strahlungsdurchgang durch ein Fenster	62
Abb. 4.7: Teilsystem Fenster	64
Abb. 4.8: Systemgrenze Fenster – Innenraum.....	69
Abb. 4.9: Teilsystem Innenraum.....	71
Abb. 4.10: Sonneneinstrahlung und diffuse Reflexionen im Innenraum – „realistische“ Darst.	72
Abb. 4.11: Sonneneinstrahlung und diffuse Reflexionen im Innenraum für die Ableitung	74
Abb. 4.12: Zusammenführung der Teilsysteme – Systemgrenze zur Umgebung	78
Abb. 5.1: Skizze Fall 1.....	87
Abb. 5.2: Skizze Fall 2.....	91
Abb. 5.3: Skizze Fall 3.....	97
Abb. 5.4: Skizze der Außenwand – Berechnungsschema.....	98
Abb. 5.5: Sonnenstand nach [ÖNORM H 6040 (1997), Seite 5]	100
Abb. 5.6: Skizze Fall 4.....	102
Abb. 5.7: Skizze Fall 5.....	105
Abb. 6.1: Ergebnisse Fall 1.....	124
Abb. 6.2: Ergebnisse Fall 2.....	129
Abb. 6.3: Ergebnisse Fall 3.....	134
Abb. 6.4: Fall 4 – Wohnraum mit Flachdach – Skizze des Gebäudes	135
Abb. 6.5: Ergebnisse Fall 4.....	140
Abb. 6.6: Ergebnisse Sonderfall 1	145
Abb. 6.7: Ergebnisse Sonderfall 2.....	150
Abb. 7.1: Skizze des Raums vor den Optimierungen.....	157

Abb. 7.2: Ergebnisse Optimierung 1 – Horizontaler Sonnenschutz.....	162
Abb. 7.3: Ergebnisse Optimierung 2 – Vertikaler Sonnenschutz.....	165
Abb. 7.4: Ergebnisse Optimierung 2 – Vert. Sonnenschutz mit mod. Sonnenschutzsteuerung...	166
Abb. 7.5: Ergebnisse Optimierung 3 – Erhöhter Nachtluftwechsel.....	168
Abb. 7.6: Auslegungskühllasten mit ÖNORM- und mit modifizierter Sonnenschutz-Steuerung...	169
Abb. 7.7: Ergebnisse Optimierung 4 – Kombination von Sonnenschutz und Nachtluftwechsel...	172
Abb. 7.8: Ergebnisse nach der Erhöhung der Solltemperatur (Nordraum, Juli).....	174
Abb. 7.9: Ergebnisse nach der Erhöhung der Solltemperatur (Ostraum, Juli).....	174
Abb. 7.10: Ergebnisse nach der Erhöhung der Solltemperatur (Südraum, August).....	175
Abb. 7.11: Ergebnisse nach der Erhöhung der Solltemperatur (Westraum, Juli).....	175
Abb. 7.12: Skizze des Raums nach verkleinerter Fensterfläche (Sonnenschutz geöffnet).....	177
Abb. 7.13: Endergebnisse der Optimierung – Temperaturen ohne Kühlung, Luftwechsel 5 h^{-1} ...	184
Abb. 7.14: Endergebnisse der Optimierung – Temperaturen ohne Kühlung, Luftwechsel 6 h^{-1} ...	184

11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Einstufung der Berechnungsverfahren in Hauptklassen	37
Tabelle 3.2: Gegenüberstellung der Regelwerke.....	44
Tabelle 4.1: Wärmeübergangswiderstände	51
Tabelle 4.2: Werte für Wärmeübergangswiderstände nach EN ISO 10077-1	51
Tabelle 4.3: Umrechnungsfaktoren alte Einheiten – SI-Einheiten.....	53
Tabelle 5.1: Übersicht über die Validierungsfälle.....	86
Tabelle 5.2: Angaben für Fall 1.....	87
Tabelle 5.3: Eingabewerte „Kühllast H6040“ für Fall 1	88
Tabelle 5.4: Vergleich der Ergebnisse Fall 1	90
Tabelle 5.5: Angaben für Fall 2.....	91
Tabelle 5.6: Eingabewerte „Kühllast H6040“ für Fall 2	93
Tabelle 5.7: Vergleich der Ergebnisse Fall 2.....	95
Tabelle 5.8: Mittelwerte Luftdruck Wien und Andau.....	96
Tabelle 5.9: Angaben für Fall 3.....	97
Tabelle 5.10: Eingabewerte „Kühllast H6040“ für Fall 3	99
Tabelle 5.11: Vergleich der Ergebnisse Fall 3.....	101
Tabelle 5.12: Angaben für Fall 4.....	102
Tabelle 5.13: Eingabewerte „Kühllast H6040“ für Fall 4	103
Tabelle 5.14: Vergleich der Ergebnisse Fall 4.....	104
Tabelle 5.15: Daten für Fall 4.....	105
Tabelle 5.16: Eingabewerte „Kühllast H6040“ für Fall 4	107
Tabelle 5.17: Vergleich der Ergebnisse Fall 4.....	108
Tabelle 5.18: Die Ergebnisse der Validierungsfälle.....	109
Tabelle 6.1: Eingabe- bzw. Auswahlmöglichkeiten der Berechnungsverfahren	119
Tabelle 6.2: Objektdaten Fall 1 – Büroraum in einem größeren Gebäude.....	122
Tabelle 6.3: Ergebnisse Fall 1 – Büroraum in einem größeren Gebäude	123
Tabelle 6.4: Objektdaten Fall 2 – Wohnraum in einem größeren Gebäude.....	127
Tabelle 6.5: Ergebnisse Fall 2 – Wohnraum in einem größeren Gebäude.....	128
Tabelle 6.6: Objektdaten Fall 3 – Büroraum in einem Gründerzeithaus.....	132
Tabelle 6.7: Ergebnisse Fall 3 – Büroraum in einem Gründerzeithaus	133
Tabelle 6.8: Objektdaten Fall 4 – Wohnraum mit Flachdach.....	138

Tabelle 6.9: Ergebnisse Fall 4 – Wohnraum mit Flachdach	139
Tabelle 6.10: Objektdaten Sonderfall 1 – Büroraum in größerem Gebäude ohne innere Lasten .	143
Tabelle 6.11: Ergebnisse Sonderfall 1 – Büroraum in größerem Gebäude ohne innere Lasten ...	144
Tabelle 6.12: Objektdaten Sonderfall 2 – Wohnraum mit Flachdach ohne innere Lasten	148
Tabelle 6.13: Ergebnisse Sonderfall 2 – Wohnraum mit Flachdach ohne innere Lasten	149
Tabelle 7.1: Objektdaten thermische Optimierung – Büroraum in einem größeren Gebäude	160
Tabelle 7.2: Änderungen an den Objektdaten bei Optimierung 1.....	161
Tabelle 7.3: Ergebnisse Optimierung 1 – Horizontaler Sonnenschutz.....	162
Tabelle 7.4: Änderungen an den Objektdaten bei Optimierung 2.....	163
Tabelle 7.5: Ergebnisse Optimierung 2 – Vertikaler Sonnenschutz.....	164
Tabelle 7.6: Zeiten mit geschlossenem vertikalem Sonnenschutz.....	164
Tabelle 7.7: Zeiten mit geschlossenem vertikalem Sonnenschutz (modifizierte Steuerung)	165
Tabelle 7.8: Ergebnisse Optimierung 2 – Vert. Sonnenschutz mit mod. Sonnenschutzsteuerung	166
Tabelle 7.9: Änderungen an den Objektdaten bei Optimierung 3.....	167
Tabelle 7.10: Ergebnisse Optimierung 3 – Nachtluftwechsel.....	168
Tabelle 7.11: Vergleich zwischen horizontalem und vertikalem Sonnenschutz.....	170
Tabelle 7.12: Änderungen an den Objektdaten bei Optimierung 4.....	171
Tabelle 7.13: Ergebnisse Optimierung 4 – Kombination Sonnenschutz und Luftwechsel.....	172
Tabelle 7.14: Ergebnisse Optimierung 5 – Erhöhung der Solltemperaturen	173
Tabelle 7.15: Ergebnisse Optimierung 5a – Erhöhung der Speichermassen.....	176
Tabelle 7.16: Ergebnisse Optimierung 5b – Verringerung der Fenstergröße	177
Tabelle 7.17: Ergebnisse Optimierung 5c – Verminderung d. freigesetzten Maschinenabwärme	178
Tabelle 7.18: Ergebnisse Optimierung 5d – Verminderung der Sonnenschutz-Transparenz	178
Tabelle 7.19: Ergebnisse Optimierung 5e – Erhöhung des Nachtluftwechsels.....	179
Tabelle 7.20: Objektdaten thermische Optimierung – Optimierter Büroraum.....	182
Tabelle 7.21: Endergebnisse der Optimierung – Auslegungskühllasten	183
Tabelle 7.22: Endergebnisse der Optimierung – Temperaturmaxima	183

12 Literaturverzeichnis

[Bacher 1982] Bacher, R.: Ein Verfahren zur Berechnung der Kühllast von Räumen, Diplomarbeit, Technische Universität Wien, Wien 1982

[Baehr 2004] Baehr, H.; Stephan, K.: Wärme- und Stoffübertragung, 4. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2004

[Bauphysik Kalender 2006] Fouad, N. (Hrsg.): Bauphysik Kalender 2006, 6. Jahrgang, Verlag Ernst & Sohn, Berlin 2006

[Baustoffe 1979] Republik Österreich – Bundesministerium für Bauten und Technik – Staatlicher Hochbau (Hrsg.): Katalog für empfohlene Wärmeschutzrechenwerte von Baustoffen und Baukonstruktionen, Heft 1, Ausgabe 1. Juli 1979, Wien 1979

[Bauteilkatalog IBO 1999] IBO – Österreichisches Institut für Baubiologie und –ökologie, Wien (Hrsg.); Donau-Universität Krems – Zentrum für Bauen und Umwelt, Krems (Hrsg.): Passivhaus-Bauteilkatalog – Ökologisch bewertete Konstruktionen, Springer-Verlag, Wien 1999

[Bauteilkatalog IBO 2008] IBO Österreichisches Institut für Baubiologie und –ökologie, Wien (Hrsg.): Passivhaus-Bauteilkatalog, 2. Auflage, Springer-Verlag, Wien 2008

[Berber 1979] Berber, J.: Bauphysik, 2. Auflage, Verlag Bernh. Friedr. Voigt, Hamburg 1979

[Berber 1986] Berber, J.: Bauphysik, 3. Auflage, Verlag Bernh. Friedr. Voigt, Hamburg 1986

[Böge 2007] Böge, A.: Formeln und Tabellen Maschinenbau, Vieweg Verlag, Wiesbaden 2007

[Deubner 1992] Deubner, H.; Schuller, H.: Ökosiedlung Gärtnerhof, Dokumentation eines Projektes, Forschungsauftrag F 1075, Gänserndorf 1992

[EN 410 (1998)] ÖNORM EN 410 Glas im Bauwesen – Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen, Wien 1998

[EN 12831 (2003)] ÖNORM EN 12831 Heizungsanlagen in Gebäuden – Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast, Wien 2003

[EN 15243 (2007)] ÖNORM EN 15243 Lüftung von Gebäuden — Berechnung der Raumtemperaturen, der Last und Energie von Gebäuden mit Klimaanlage, Wien 2007

[EN 15255 (2007)] ÖNORM EN 15255 Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Berechnung der wahrnehmbaren Raumkühllast – Allgemeine Kriterien und Validierungsverfahren, Wien 2007

[EN ISO 6946 (2008)] ÖNORM EN ISO 6946 Bauteile – Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren, Wien 2008

[EN ISO 10077-1 (2006)] ÖNORM EN ISO 10077-1 Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Abschlüssen – Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten Teil 1: Allgemeines, Wien 2006

[Feist 1994] Feist, W.: Thermische Gebäudesimulation, C. F. Müller GmbH, Heidelberg 1994

[GEBA Handbuch 2008] Kreč, K.: Handbuch zum Programmpaket GEBA Version 7.0, veröffentlicht auf der Website des Büros für Bauphysik, Wien: www.krec.at, Wien 2008

[GEBA Hintergrund 2007] Kreč, K.: Informationen zum Programmhintergrund von GEBA V7.0, veröffentlicht auf der Website des Büros für Bauphysik, Wien: www.krec.at, Wien 2007

[GEBSIMU Einführung 2008] Rouvel, L.: Thermische Gebäudesimulation GEBSIMU Version 7.30 Einführung, veröffentlicht auf der Website www.gebsimu.de, München 2008

[Jürges 1924] Jürges, W.: Der Wärmeübergang an einer ebenen Wand, Beihefte zum Gesundheits-Ingenieur, Reihe I, Beiheft 19 (November 1924), Verlag von R. Oldenbourg, München und Berlin 1924

[Lehrbuch Bauphysik 2008] Richter, E.; Fischer, H.; Jenisch, R.; Freymuth, H.; Stohrer, M.; Häupl, P.; Homann, M.: Lehrbuch der Bauphysik, 6. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden 2008

[Licht 1972] Hentschel, H.: Licht und Beleuchtung, Verlag Siemens AG, Berlin und München 1972

[ÖIB 3 (2007)] Österreichisches Institut für Bautechnik: ÖIB-Richtlinie 3; Hygiene, Gesundheit und Umweltschutz, Ausgabe April 2007

[ÖNORM B 8110-3 (1999)] ÖNORM B 8110-3, Wärmeschutz im Hochbau – Wärmespeicherung und Sonneneinflüsse, Wien 1999

[ÖNORM H 6040 (1997)] ÖNORM H 6040, Lüftungstechnische Anlagen – Kühllastberechnung, Wien 1997

[ÖNORM H 6040 Beiblatt 2 (1997)] ÖNORM H 6040 Beiblatt 2, Lüftungstechnische Anlagen – Kühllastberechnung – Baustoff und Bauteilkatalog, Wien 1997

[Pokorny 2009] Persönliche, mündliche Mitteilung von DI Walter Pokorny, Entwickler des der ÖNORM H 6040 zugrundeliegenden Simulationsverfahrens

[Recknagel 2009] Recknagel, H.; Sprenger, E.; Schramek, E.: Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik 09/10, 74. Auflage, Oldenbourg Industrieverlag, München 2009

[Reim 2006] Reim, T.: Klimatechnische Analyse zum Sommerfall im Wohnbau, Dissertation, Universität für Bodenkultur Wien, Wien 2006

[Repetitorium 1995] Merziger, G.; Wirth, T.: Repetitorium der höheren Mathematik, 3. Auflage, Binomi-Verlag, Springe 1995

[Römpp 1998] Falbe, J. (Hrsg.); Regitz, M. (Hrsg.): Römpp kompakt Basislexikon Chemie, Georg Thieme Verlag, Stuttgart 1998

[Saint-Gobain 2009] Saint-Gobain Glass: SGG Planilux Klares Floatglas (Saint Gobain Glass Vision) – Technical Sheet Österreich, Download am 03.01.2009 von <http://www.saint-gobain-glass.com/FO/at/pdf/SGG%20PLANILUX%AE.pdf>

[SN 546 382/2 (1992)] Eingetragene Norm SN 546 382/2 der Schweizerischen Normen-Vereinigung, Herausgegeben vom Schweizerischen Ingenieur- und Architekten-Verein unter der Bezeichnung SIA V 382/2 – Kühlleistungsbedarf von Gebäuden, Empfehlung, Zürich 1992

[VDI 2078 (1996)] Verein deutscher Ingenieure: VDI-Richtlinie VDI 2078 – Berechnung der Kühllast klimatisierter Räume, Düsseldorf 1996 (2007 inhaltlich geprüft und unverändert weiterhin gültig)

[Wärmeatlas 2006] VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC) (Hrsg.): VDI-Wärmeatlas, 10. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2006

[Website DOE2 2009] Website von JJ Hirsch & Associates , James J. Hirsch, Camarillo, Kalifornien, USA: www.doe2.com, Stand April 2009

[Website EDSL 2009] Website der Firma Environmental Design Solutions Limited, Milton Keynes, Großbritannien: www.edsl.net, Stand April 2009

[Website IFES 2009] Website der Firma ifes Frechen, Frechen, Deutschland: www.ifes-frechen.de, Stand April 2009

[Website Kreč 2009] Website des Büros für Bauphysik von Kreč, K., Wien: www.krec.at
Stand April 2009

[Website ON 2009] Website des Österreichischen Normungsinstituts, Wien: www.on-norm.at,
Stand April 2009

[Website Pokorny 2009] Website der Firma Pokorny Technologies e.U., Wien: www.pokorny-tec.at,
Stand April 2009

[Website Wisconsin 2009] Website der Universität von Wisconsin, Madison, Wisconsin, USA, für das Programm Trnsys: sel.me.wisc.edu/trnsys/default.htm, Stand April 2009

[ZAMG 2000] Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik: Jahrbuch 2000, Veröffentlicht im Internet: www.zamg.ac.at, Wien

[ZAMG 2005] Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik: Jahrbuch 2005, Veröffentlicht im Internet: www.zamg.ac.at, Wien

[ZAMG 2006] Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik: Jahrbuch 2006, Veröffentlicht im Internet: www.zamg.ac.at, Wien