

MASTER'S THESIS

**Influence of vertical interior wall greening on the
indoor climate and comfort in schools**

Submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Diplom-Ingenieur/ Diplom-Ingenieurin
of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

DIPLOMARBEIT

**Einfluss von vertikaler Innenwand-Begrünung auf das
Raumklima und Behaglichkeit in Schulen**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines/ einer
Diplom-Ingenieurs/ Diplom-Ingenieurin
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Laurent Weber

Matr.Nr.: 1635270

unter der Anleitung von

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Azra Korjenic**

Univ.Ass. Mag.rer.nat. **David Tudiwer**

Institut für Werkstofftechnologie, Bauphysik und Bauökologie
Forschungsbereich Ökologische Bautechnologien
Technische Universität Wien,
Karlsplatz 13 / E207-03 / A-1040 Wien

Wien, im Monat März 2019

Danksagung

Es ist mir ein Bedürfnis mich an dieser Stelle bei all den Menschen zu bedanken auf deren Unterstützung ich während der Anfertigung dieser Diplomarbeit zählen konnte.

Ich möchte mich in diesem Zusammenhang ganz besonders bei Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Azra Korjenic und Univ.Ass. Mag.rer.nat. David Tudiwer bedanken für ihre kompetente Betreuung, die konstruktive Kritik und die wertvollen Anregungen, die eine ständige Weiterentwicklung ermöglicht haben.

Weber Laurent,

Wien, Februar 2019

Kurzfassung

Einfluss von vertikaler Innenwand-Begrünung auf das Raumklima und Behaglichkeit in Schulen

Ein gesundes Raumklima, ein Arbeits- und Lernumfeld, in dem man sich wohlfühlen kann: Innenraumbegrünungen sind mehr denn je ein Thema, das unseren Lebensalltag betrifft.

Die Fragestellung dieser Diplomarbeit entstammt einem Forschungsauftrag an den Forschungsbereich Ökologische Bautechnologien vom Institut für Werkstofftechnologie, Bauphysik und Bauökologie der TU Wien und beschäftigt sich mit der Untersuchung des Einflusses von vertikalen Innenraumbegrünungssystemen auf das Raumklima in Schulen.

Zu diesem Zweck wurden drei Gebäude untersucht, wobei die Untersuchungen in zwei Blöcke untergegliedert sind: hygrothermische Behaglichkeit und Behaglichkeit bezüglich der CO₂-Konzentrationen.

Die Untersuchungen haben folgende Ergebnisse gezeigt:

- Die Begrünungssysteme verändern, in Abhängigkeit zur relativen Raumluftfeuchte (Selbstregulierung, siehe Erklärung im Abschnitt 2.2.1), die Wassergehaltsabgabe an die Raumluft und wirken somit einer trocknen Raumluft entgegen (siehe Kapitel 6.2).
- Je Gebäudetyp (Altbau / Neubau) fallen die Ergebnisse unterschiedlich aus: Im Neubau (BRG 15 und BRG 16), welcher im Vergleich zum Altbau (GRG 7) höhere Anforderungen an die energetische Gebäudehülle zu erfüllen hat, ist die Verbesserung des Raumklimas im begrünten Raum offensichtlicher als im Altbau. Weiterhin besteht ein Unterschied ob der Neubau eine Lüftungsanlage besitzt (BRG 15) oder nicht (BRG 16), wobei bei letzterem der Effekt der Begrünung klar ersichtlich ist. Diese Punkte sind Bestandteil der Analyse im Kapitel 6.3.
- Die Begrünungssysteme liefern unterschiedliche Ergebnisse bezüglich der Befeuchtung des Raumes je Fläche des angewandten Begrünungssystems (siehe Kapitel 6.4).
- Der Effekt der Begrünungen auf den CO₂-Gehalt in den untersuchten Klassenräumen (siehe Kapitel 7) ist zu gering, um im Schulalltag messbar zu sein. Parameter, wie u.a. geöffnete Türen, unterschiedliche Aktivitäten der Raumnutzer, undichte oder schlecht verschlossene Fenster, stören den Messvorgang und machen einen Vergleich unmöglich.

Abstract

Influence of vertical interior wall greening on the indoor climate and comfort in schools

A healthy room climate, a working and learning environment in which one can feel good: Interior greening is more than ever a topic that affects our daily live.

The question of this diploma thesis comes from a research assignment to the Research Unit of Ecological building technologies of the Institute of Material Technology, Building Physics, and Building Ecology of the Vienna University of Technology and deals with the investigation of the influence of vertical indoor greening systems on the indoor climate in schools.

For this purpose, three buildings were examined, with the investigations being subdivided into two blocks: Hygrothermal comfort and comfort with regard to CO₂ concentrations.

The investigations have shown the following results:

- The vegetation systems change, depending on the relative humidity of the room (self-regulation, see explanation in section 2.2.1), the water content release to the room air and thus counteract dry room air (see chapter 6.2).
- Depending on the type of building (old building / new building), the results differ: In the new building (BRG 15 and BRG 16), which must meet higher requirements for the energy-efficient building envelope compared to the old building (GRG 7), improving the indoor climate in the green space is more obvious than in the old building. Furthermore, there is a difference whether the new building has a ventilation system (BRG 15) or not (BRG 16) where in the latter the effect of greening is clearly visible. These points are part of the analysis in chapter 6.3).
- The greening systems provide different results regarding the humidification of the room per area of the applied greening system (see chapter 6.4).
- The effect of greening on the CO₂ content in the examined classrooms (see chapter 7) is too low to be measurable in everyday school life. Too many other parameters such as open doors, different activities of room users, leaky or poorly closed windows, interfere with the measurement process and make comparison impossible.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Inhalt dieser Diplomarbeit	2
1.2	Fragestellung und Zielformulierung dieser Diplomarbeit	3
1.3	Aufbau der Arbeit	4
2	Grundlagen	5
2.1	Raumklima	5
2.1.1	Kohlenstoffdioxid CO ₂ in ppm	7
2.1.2	Relative Luftfeuchte ϕ in %	9
2.1.3	Raumlufttemperatur und Oberflächentemperatur in °C	10
2.1.4	Luftbewegung im Raum in m / s	11
2.1.5	Gerüche	11
2.1.6	Vom Menschen abhängige Faktoren	11
2.2	Pflanzen	13
2.2.1	Theoretische Grundlagen	13
2.2.2	Wirkung von Pflanzen auf das Behaglichkeitsempfinden	14
2.3	Vertikale Begrünungssysteme im Innenbereich	16
2.3.1	Definition und Funktionsweise einer vertikalen Innenwandbegrünung	16
2.3.2	Anforderungen an eine vertikale Innenbegrünung	19
3	Beschreibung der Gebäude	21
3.1	GRG 7	23
3.2	BRG 15	25
3.3	BRG 16	27
4	Konzept der Messdatenerfassung	29
5	Methode der Auswertung	31
5.1	Durchführung der Datenfilterung in der Auswertung	32
5.2	Auswertungsinformationen je Gebäude	36
5.2.1	GRG 7	36
5.2.2	BRG 15	36
5.2.3	BRG 16	37
6	Auswertung der hygrothermischen Behaglichkeit	38
6.1	Ergebnisse	39
6.1.1	Messdaten der Phase I und Phase II	39
6.1.2	Messdaten der Phase III	43
6.1.3	Messdaten der Phase IV	48
6.2	Diskussion der Ergebnisse - Einzelbetrachtung der untersuchten Gebäude bezüglich des hygrothermischen Verhaltens	53

6.3	Diskussion - Vergleich der Gebäudetypen (Altbau / Neubau)	62
6.4	Diskussion - Vergleich der Begrünungssystemflächen	67
7	Auswertung der CO₂-Behaglichkeit	69
7.1	Ergebnisse	69
7.2	Diskussion der CO ₂ -Behaglichkeit	72
8	Fazit und Ausblick	73
9	Abbildungsverzeichnis	75
10	Tabellenverzeichnis	79
11	ANHANG	80
11.1	Anhang - Inhaltsverzeichnis	80
11.2	Anhang – Tabellen / bezüglich Grundlagen	81
11.3	Anhang – Abbildungen / bezüglich der Auswertungen	85
11.3.1	Bezüglich des Außenklimas	85
11.3.2	Bezüglich des GRG 7	87
11.3.3	Bezüglich des BRG 15	89
11.3.4	Bezüglich des BRG 16	91
12	Literaturverzeichnis	93

1 Einleitung

Den ersten autonomen vertikalen Garten (sogenannte begrünte Wände) wurden vom französischen Botaniker und Künstler Patrick Blanc vor über 30 Jahren geschaffen. Das Konzept wurde fortwährend weiterentwickelt und ist sowohl im Innenbereich als auch im Außenbereich anwendbar. [1]

Eine mit lebenden Pflanzen begrünte Innenwand hat durchaus eine positive Wirkung auf die Gesundheit [1]. Ferner beeinflusst eine Wandbegrünung das Behaglichkeitsempfinden und hat vor allem folgende Vorteile, welche im Kapitel 2 näher erörtert werden [2]:

- Die Blätter sowie das Substrat geben Feuchtigkeit ab, was besonders bei trockener Außenluft wie beispielsweise im Winter zu einer Verbesserung der Raumluftqualität führt. In Kapitel 2.2 wird die Feuchtigkeitsabgabe näher erklärt. [2]
- Pflanzen filtern Feinstaub und Schadstoffe aus der Luft. Im Gegenzug reichern sie die Luft mit Sauerstoff an. Laut einer Studie des Karlsruher Instituts für Technologie aus dem Jahr 2012 [3] reduziert eine Wandbegrünung den Schadstoffgehalt in der Luft um 30 %. Des Weiteren wird auch der CO₂-Gehalt der Luft verringert und trägt zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit bei. [4]
- Die Nachhallzeit lässt sich durch großflächige Wandbegrünungen verringern (Schallabsorption), was zu einer Verbesserung der Akustik führt. [2]
- Zusätzlich zu den vorherigen besonders für den Schulalltag maßgeblichen Parametern, wird die Farbe „Grün“ mit positiven Eigenschaften wie z.B. Entspannung und Unterstützung der Konzentration verbunden. [2]
- Des Weiteren hat die Studie von McCullough et al [5] gezeigt, dass begrünte Wände unter anderem das Lernen und die Aufmerksamkeit verbessern sowie Ermüdungserscheinungen minimieren können. Zusätzlich belegt die Studie, dass ein Zugang zur Natur das menschliche Empfinden und die Leistungsfähigkeit steigern kann. [5]

Nachteilig und beachtenswert sind unter anderem der finanzielle Aufwand für eine solche Installation sowie die Notwendigkeit der regelmäßigen Düngung der Pflanzen. Außerdem besteht die Gefahr der Schimmelbildung (durch Schwitzwasser oder Staunässe). [2]

Das Hauptziel dieser Diplomarbeit besteht darin den Einfluss der vertikalen Innenwandbegrünung auf das Raumklima aufzuzeigen. Nachfolgend wird auf den Inhalt dieser Diplomarbeit (Kapitel 1.1), die Fragestellung und Zielformulierung dieser Diplomarbeit (Kapitel 1.2) sowie den Aufbau der Arbeit (Kapitel 1.3) eingegangen.

1.1 Inhalt dieser Diplomarbeit

Diese Arbeit erfolgt im Rahmen des Projektes „GRÜNEzukunftSCHULEN“. Ein Begrünungssystem soll dazu beitragen qualitativ optimale Räume fürs Lernen und fürs Zusammenleben aller Beteiligten zu schaffen und die Raumbedingungen zu verbessern. Die Untersuchungen werden an den folgenden Standorten in Wien ausgeführt: das Bundesrealgymnasium am Schuhmeierplatz in Ottakring (BRG 16); das Bundesrealgymnasium Diefenbach im 15ten Bezirk (BRG 15) und das Bundesgymnasium & Bundesrealgymnasium Wien 7 (GRG 7) (siehe Tabelle 1). In diesen Gebäuden werden unterschiedliche Begrünungssysteme installiert (siehe Kapitel 3) welche dann im weiteren Vorgehen messtechnisch ausgewertet und analysiert werden.

Tabelle 1 Übersicht der Gebäude, sowie Informationen zu den jeweiligen Gebäudetypen und Standort der untersuchten Gebäude. Des Weiteren sind die entsprechenden Beschreibungen zum jeweiligen Gebäude und die dazugehörigen Skizzen sowie Fotos der Räume in den angebenen Abbildungen. (eigene Darstellung)

Allgemeine Übersicht der Gebäude		Zusätzliche Informationen je Gebäude
GRG 7	Altbau ohne Lüftungsanlage Kandlgasse 39, 1070 Wien	Siehe Kapitel 3.1 mit Gebäudeansicht (Abbildung 7), Ansicht der Klassenräume (Abbildung 8) und Skizzen der untersuchten Räume (Abbildung 9)
BRG 15	Neubau mit Lüftungsanlage Diefenbachgasse 19, 1150 Wien	Siehe Kapitel 3.2 mit Gebäudeansicht (Abbildung 10), Ansicht der Klassenräume (Abbildung 11) und Skizzen der untersuchten Räume (Abbildung 12)
BRG 16	Neubau ohne Lüftungsanlage Schuhmeierplatz, 1160 Wien	Siehe Kapitel 3.3 mit Gebäudeansicht (Abbildung 13), Ansicht der Klassenräume (Abbildung 14) und Skizzen der untersuchten Räume (Abbildung 15)

Jeweils zwei Klassenräume wurden mit unterschiedlichen Begrünungssystemen (Trogssystem und Vliessystem) versehen und in jeder Schule wurde ein Referenzraum ohne Begrünungssystem so festgelegt, dass dieser eine ähnliche Raumgröße und Himmelsrichtung hat. In jedem der betreffenden Räume wurden Messsensoren eingebaut um unter anderem die relative Luftfeuchte, die Temperatur und den CO₂-Gehalt zu messen.

Die Fragestellung und die angehenden Ziele sind im folgenden Kapitel erörtert. Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird im Text ausschließlich die männliche Form verwendet. Es sind dabei sowohl männliche als auch weibliche Personen gemeint.

1.2 Fragestellung und Zielformulierung dieser Diplomarbeit

Im Allgemeinen werden häufig relativ ähnliche Befindlichkeitsstörungen in Schulklassen genannt: Kopfschmerzen, Müdigkeit und mangelnde Konzentration. Die vertikale Innenraum-Wandbegrünung soll eine Veränderung der Raumklimas mit sich bringen. Demnach wird von einer Steigerung der Lebensqualität in den Schulräumen ausgegangen.

In der Einleitung wurden die zu erwartenden verbesserten Möglichkeiten bereits genannt. Es handelt sich dabei um die Steigerung der relativen Raumluftfeuchte [2], der Feinstaubaufnahme [3], der Verbesserung des Hör- und Sprachempfindens [2] sowie die Steigerung der Lernfähigkeit, der Konzentration und der Minimierung von Ermüdungserscheinungen für Schüler [5].

Im Mittelpunkt dieser Arbeit steht die Frage: Welchen Einfluss hat die vertikale Innenwandbegrünung auf das Raumklima und das Behaglichkeitsgefühl in den untersuchten Klassenzimmern der jeweiligen Schulgebäude? Kann ein Einfluss nachgewiesen werden, wird ein weiterer Punkt dieser Diplomarbeit darin bestehen, das Ausmaß zu bestimmen und den Unterschied zwischen den Begrünungssystemen und Gebäudetypen festzustellen.

Auf dieser Grundlage werden nicht nur die Schulen im Einzelnen betrachtet, sondern es wird ebenfalls ein Vergleich aufgestellt, um herauszufinden wie sich der Einfluss der Begrünungssysteme in den unterschiedlichen Gebäudetypen entwickelt hat (Unterschied zwischen Altbau GRG 7 und Neubau BRG 15 / BRG 16) und welcher Einfluss in Bezug auf die Referenzklasse des jeweiligen untersuchten Gebäudes zu verzeichnen ist. Insbesondere die Qualität der Gebäudehülle übt einen großen Einfluss auf die Stärke des Begrünungssystems aus. Ferner werden die unterschiedlichen Begrünungssysteme in den jeweiligen Schulen betrachtet, indem die begrünten Klassenräume mit den unbegrünten Räumen verglichen werden.

Für die Auswertung wurde das Schuljahr 2017 / 2018 als zu betrachtender Zeitraum gewählt, d.h. der gesamte Betrachtungsraum der Messungen der Schulen entspricht dem Zeitrahmen vom 01.09.2017 bis zum 30.06.2018.

Zusammengefasst gilt es in dieser Arbeit unter anderem die Einflüsse der Begrünungssysteme in Bezug auf das Raumklima und die Behaglichkeit zu begutachten und zu bewerten, wie z.B. die relative Luftfeuchte, die Raumtemperatur, den CO₂-Gehalt.

Der Aufbau der Arbeit wird im folgenden Kapitel 1.3 behandelt.

1.3 Aufbau der Arbeit

In dieser Diplomarbeit wird versucht den Einfluss von Begrünungssystemen auf das Raumklima darzustellen. Zuerst werden die Grundlagen des Raumklimas (Kapitel 2.1) dargelegt. Dann wird das Thema Pflanzen im Kapitel 2.2 generell behandelt und deren Beitrag zur Befindungsänderung in Räumen beleuchtet. In Kapitel 2.3 werden schließlich die vertikalen Innenwandbegrünungssysteme grundsätzlich vorgestellt um anschließend die untersuchten Gebäude sowie die verwendeten Begrünungssysteme zu thematisieren (Kapitel 3).

Um die im vorherigen Kapitel 1.2 formulierten Ziele zu erreichen, wird zunächst ein Konzept zur Messdatenerfassung (Kapitel 4) erstellt, welches sich dann in einer Methode für die Auswertung (Kapitel 5) erschließt. Des Weiteren werden Auswertungsinformationen je Gebäude im Kapitel 5.2 beschrieben.

Die Bewertung der Qualität der Innenraumluft mit den jeweiligen Ergebnissen und Erkenntnissen ist in folgende Kapitel unterteilt:

- Auswertung der hygrothermischen Behaglichkeit (Kapitel 6);
- Auswertung der CO₂-Ergebnisse (Kapitel 7).

Das Kapitel Fazit und Ausblick bildet den Schluss der vorliegenden Arbeit.

2 Grundlagen

In den folgenden Abschnitten werden grundsätzliches Wissen das Raumklima betreffend (siehe Kapitel 2.1) sowie die Definition und die jeweiligen Grenzwerte vermittelt. Des Weiteren wird auf die einzelnen raumklimatischen Faktoren eingegangen und deren jeweiliger Einfluss aufgezeigt.

Ferner werden die Grundfunktionen der Pflanzen, wie z.B. das Prinzip der Transpiration in Abschnitt 2.2.1, erklärt und darüber hinaus werden die Wirkung der Pflanzen und dessen Wichtigkeit für die Behaglichkeitsempfindung (siehe Abschnitt 2.2.2) hervorgehoben.

2.1 Raumklima

Raumklima ist die Summe aller Faktoren, die unmittelbar Einfluss auf das Wohlbefinden von Menschen im umbauten Raum haben [6]. Wohlbefinden wird vom Menschen subjektiv wahrgenommen. Weshalb die Behaglichkeit nur so bemessen werden kann, dass sich die meisten Menschen wohl fühlen werden [7]. DIN 1946-2:1994 gibt folgende Definition: „Thermische Behaglichkeit ist dann gegeben, wenn der Mensch Lufttemperatur, Luftfeuchte, Luftbewegung und Wärmestrahlung in seiner Umgebung als optimal empfindet und weder wärmere noch kältere, weder trockenere noch feuchtere Raumluft wünscht.“ [8]. Die Berücksichtigung des Raumklimas und der Raumluftqualität sind in der Gebäudeplanung unabdingbar [7].

Der dänische Ingenieur Ole Fanger (1934 – 2006) hat ein Verfahren zur Bestimmung des Wohlbefindens von Menschen in Innenräumen entwickelt. Auf diese Weise sind die „Komfortwerte“ ‚PMV‘ („Predicted Mean Vote“ = erwartete durchschnittliche Empfindung) und ‚PPD‘ („Predicted Percentage of Dissatisfied“ = erwartete durchschnittliche Unzufriedenheitsrate) entstanden [9]:

- ‚PMV‘ Index, welcher in der Gebäudeplanung, z.B. für Klima- und Lüftungsanlagen benutzt wird. Dieser Index wird folgendermaßen definiert: „mittlere subjektive Beurteilung einer größeren Personengruppe, die in gleicher Kleidung bei gleicher Aktivität in derselben Umgebung zur ihrem Behaglichkeitsempfinden befragt wurde“ [7].
- ‚PPD‘ Index, welcher „den Prozentsatz einer großen Personengruppe ausdrückt, die das Raumklima entweder als heiß (+3), warm (+2), kühl (-2) oder kalt (-3) empfinden“ [7].

Setzt man die beiden Werte in einen Zusammenhang (siehe Abbildung 1), kann man feststellen, dass ein kleiner Prozentsatz unzufriedener Personen bestehen bleibt, obwohl man von optimalen Bedingungen sprechen kann. Deshalb kann man davon ausgehen, dass sehr gute thermische Bedingungen vorherrschen, wenn weniger als 10 % der Raumnutzer unzufrieden sind. [9]

Die Regelwerke DIN 1946-2:1994-01 [8]; ÖNORM EN ISO 7730:2006 05 01 [10] und ÖNORM EN 16798-3:2017 12 15 [11] weisen in Bezug auf das Raumklima auf folgende Einflussfaktoren hin: Luft (Temperatur, Feuchte, Geschwindigkeit), Strahlung (Oberflächentemperaturen, Wärmestrahlung, kurzwellige Strahlung), Bekleidung, Aktivität, Aufenthaltsdauer und Außenklima. Zusätzlich sind genügend Licht sowie die Abwesenheit von Immissionen wie Lärm und Gerüche wichtig. [12]

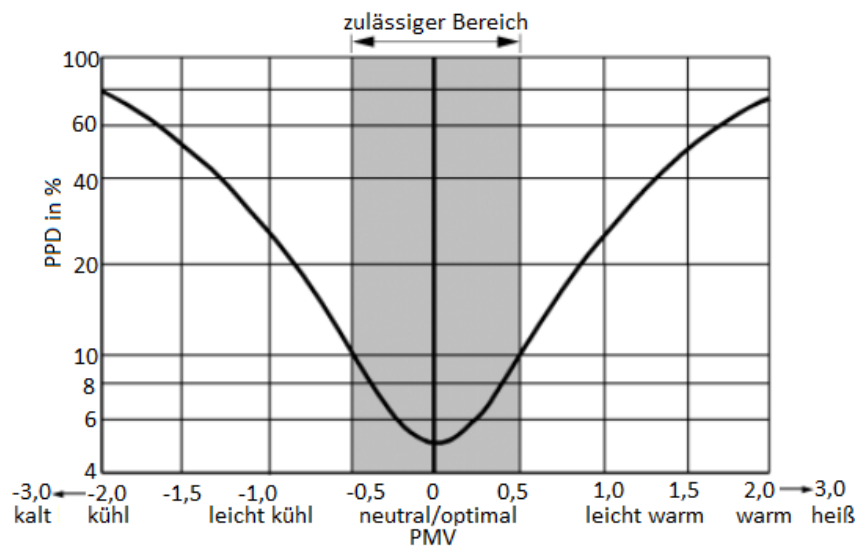


Abbildung 1 PPD-Index in Abhängigkeit von der PMV-Bewertung unverändert aus [9]
 PMV Index: Predicted Mean Vote (erwartete durchschnittliche Empfindung), welcher in der Gebäudeplanung benutzt wird, z.B. für Klima- und Lüftungsanlagen - „mittlere subjektive Beurteilung einer größeren Personengruppe, die in gleicher Kleidung bei gleicher Aktivität in derselben Umgebung zur ihrem Behaglichkeitsempfinden befragt wurde“ [9]. PPD Index: Predicted Percentage of Dissatisfied (erwartete durchschnittliche Unzufriedenheitsrate), welcher „den Prozentsatz einer großen Personengruppe ausdrückt, die das Raumklima entweder als heiß (+3), warm (+2), kühl (-2) oder kalt (-3) empfinden“. Ein kleiner Prozentsatz unzufriedener Personen bleibt bestehen. Es gilt: sind weniger als 10 % der Raumnutzer unzufrieden, wird von sehr guten thermischen Bedingungen ausgegangen. [9].

Die wichtigsten Faktoren werden in der Abbildung 2 ‚Einflussgrößen auf das vorherrschende Raumklima‘ [12] gezeigt. Sie sind in 2 Kategorien unterteilt: Faktoren, welche vom Raum abhängig sind und Faktoren, welche vom Menschen abhängig sind.



Abbildung 2 Die wichtigsten Einflussgrößen auf das vorherrschende Raumklima, welche in Parameter, abhängig vom Raum sowie vom Menschen, unterteilt sind. unverändert aus [12]. Des Weiteren weisen die Regelwerke DIN 1946-2:1994-01 [8]; ÖNORM EN ISO 7730:2006 05 01 [10] und ÖNORM EN 16798-3:2017 12 15 [11] in Bezug auf das Raumklima auf folgende Einflussfaktoren hin: Luft (Temperatur, Feuchte, Geschwindigkeit), Strahlung (Oberflächentemperaturen, Wärmestrahlung, kurzwellige Strahlung), Bekleidung, Aktivität, Aufenthaltsdauer und Außenklima. Wichtig sind genügend Licht sowie die Abwesenheit von Immissionen wie Lärm und Gerüche [12].

Die Leistungsfähigkeit der Personen hängt mit der Raumtemperatur zusammen [5]. Dentel et al [13] zeigen auf, dass zwischen Temperaturanstieg und Leistungsabnahme kein linearer Zusammenhang besteht. Laut [13] fällt die körperliche und geistige Leistungsfähigkeit stark ab, wenn die Raumtemperatur steigt. Dentel et al [13] zufolge reduziert sich die körperliche Leistungsfähigkeit um 50 % und die geistige Leistungsfähigkeit um 20 % bei 28 °C. Bei einer Temperaturerhöhung von 23 °C auf 26 °C nimmt die Leistungsfähigkeit gemäß [13] um 50 % zu. Steigt im letzten Beispiel die Temperatur auf 29 °C, fällt die Leistungsfähigkeit auf das Niveau von 23 °C herab.

In den folgenden Abschnitten werden die maßgeblichen Einflussparameter (Kohlenstoffdioxid, relative Luftfeuchte, Raumlufttemperatur und Oberflächentemperatur, Luftbewegung im Raum, Gerüche, vom Menschen abhängige Faktoren) des Raumklimas näher betrachtet.

2.1.1 Kohlenstoffdioxid CO₂ in ppm

Menschen ‚verbrauchen‘ Sauerstoff und ‚belasten‘ die Luft mit CO₂. Der CO₂-Anteil wird in ppm (parts per million) angegeben. Die Luft eines Raumes nimmt mit der Zeit verschiedenste Stoffe (Schadstoffe, Gerüche) auf. Saubere Luft enthält 78 % Stickstoff, 21 % Sauerstoff und ca. 1 % Edelgase. Der Anteil von Kohlendioxid (CO₂) beträgt ca. 0,04 % [14].

Auf zahlreichen Untersuchungen basierend hat der deutsche Hygieniker Pettenkofer (1818 - 1901) einen Grenzwert bestimmt, der den Übergang von angenehmer zu unangenehmer Luftqualität markiert [7]. So sollte die CO₂-Konzentration möglichst nicht über 1 000 ppm steigen [7]. Der Grenzwert für die maximale CO₂-Konzentration liegt laut DIN 1946-2 [8] bei 1 500 ppm in Schulgebäuden. Konzentrationen von ca. 2 000 ppm sind als auffällig anzusehen, bleiben jedoch kurzzeitig tolerierbar, ab 3 000 bis 4 000 ppm sind sie inakzeptabel, weil z.B. Atembeschwerden auftreten können [14].

In Anlehnung an den Pettenkofer Wert für CO₂-Konzentration gilt für den Außenluftbedarf der Richtwert von 30 m³ / h je Person. Je nach Schadstoffbelastung (z.B. Rauchen) oder Empfindlichkeit der Personen, die sich ggf. im Raum aufhalten (Kranke, Allergiker, Säuglinge, etc.), fällt die notwendige Luftwechselrate umso höher aus. [7]

Die CO₂-Konzentration in der Innenraumlufte hängt vor allem von der Anzahl der Personen, der Größe des Raumes sowie der Belüftung in Anbetracht der klimatischen Außenbedingungen (Windgeschwindigkeit; Temperaturdifferenz außen / innen) ab. Der Mensch ist eine bedeutende CO₂-Quelle. Eine Zusammenfassung der CO₂-Abgabe von Menschen je Tätigkeit kann in Tabelle 2 nachgelesen werden. [4]

Tabelle 2 Literaturangaben für die CO₂-Abgabe je Tätigkeit von Menschen pro Stunde unverändert aus [4] genommen

Literaturstelle	Werte in Liter CO ₂ pro Stunde	Anmerkung
Rietschel (1994)	20,4	Leichte, vorwiegend sitzende Tätigkeit, entspanntes Stehen
	27,2	Stehende Tätigkeit
Witthauer, Horn, Bischof (1993)	12	Ruhiger Zustand
	18	Sitzende Tätigkeit
	180	Schwerarbeit
Recknagel, Sprenger, Schramek (1999)	20	Leichte, vorwiegend sitzende Tätigkeit
VDI 4300 Bl. 9 (2003) analog zu 4300 Bl. 7 (2001)	15 - 20	Sitzende Tätigkeit
	20 - 40	Leichte Arbeit
	40 - 70	Mittelschwere Arbeit
	70 - 110	Schwere Arbeit
ASHRAE (1989) -	18	Büroarbeit

Abschließend kann hinzugefügt werden, dass die CO₂-Konzentration einen Hinweis für schlecht empfundene Raumlufte ist und in Bezug zur (persönlichen) Befindlichkeit und Leistungsfähigkeit steht. In diesem Zusammenhang ist die ausgeübte Aktivität (geistige Arbeit, körperliche Tätigkeit, Schlaf, ...) von größerer Bedeutung. Für eine gesundheitliche Bewertung des Innenraumes ist allein die Betrachtung der CO₂-Konzentration nicht ausreichend. [4]

2.1.2 Relative Luftfeuchte ϕ in %

Die relative Luftfeuchte (ϕ in %) wird durch den tatsächlichen Dampfgehalt der Luft im Verhältnis zum maximal aufnehmbaren Dampfgehalt definiert [7]. Diese Aufnahmefähigkeit der Luft hängt ebenfalls von der Lufttemperatur ab, denn je höher die Temperatur desto größer die Menge an Dampfmenge, welche aufgenommen werden kann, z.B. bei 1 m³ Luft von 10 °C ca. 8,5 g und bei 1 m³ Luft von 20 °C ca. 18 g Wasser. Das überschüssige Wasser schlägt sich als Kondenswasser nieder. [15]

Die Wärmeabgabe des Menschen beeinflusst ebenfalls das Raumklima. Des Weiteren gibt ein Mensch 40 g Wasser je Stunde ab, bei mittlerer Arbeit 80 - 150 g / h. [15]. Weitere Details können in der VDI 2078:2015-06 [16] in Anlehnung an DIN 1946-2 [8] nachgelesen werden. Abschnitt 2.1.6 wird diesen Punkt vertiefen.

An die relative Luftfeuchte werden folgende Anforderungen gestellt [14] (siehe Abbildung 3):

- Bei einer Überschreitung der relativen Raumlufffeuchte von 55 % werden diese als unangenehm wahrgenommen und die Wahrscheinlichkeit von Schimmelbildung steigt. Diese Obergrenze entspricht einer „biophysikalischen Obergrenze“. Schimmelpilzbefall in Innenräumen kommt oft in Kombination mehrerer Faktoren vor, die nicht Bestandteil dieser Arbeit sind (Wärmebrücken, Wandbereichen mit ungenügender Luftzirkulation usw.). [14]
- Ab einer Unterschreitung der relativen Raumlufffeuchte von 30 % wird das weite Behaglichkeitsfeld, bzw. der ‚noch behagliche‘ Bereich verlassen [14]. Ein Abfall der relativen Raumlufffeuchte unterhalb 20 % hat einen negativen Effekt auf die Gesundheit (gereizte Haut und Augen, Kopfschmerzen, häufige Erkältungen, ...). Trockene Raumluff kann durch regelmäßiges angemessenes Stoßlüften verringert werden. Allerdings gilt es zu beachten, dass je kälter es draußen ist und je stärker gelüftet wird, desto trockener wird die Raumluff, weil sich weniger Feuchtigkeit in den Räumen befindet. [13].

Abbildung 3 basiert auf den Erkenntnissen von Leusden und Freymark, welche eine Beurteilung der Behaglichkeit ermöglicht und als Basis für diese Diplomarbeit verwendet wird. Das Thema thermische Behaglichkeit betreffend, gibt es weitere Methoden wie z.B. die ‚Komfortwerte‘ nach Fanger [9] oder Feuchte- und Behaglichkeitswerte nach Frank [17].

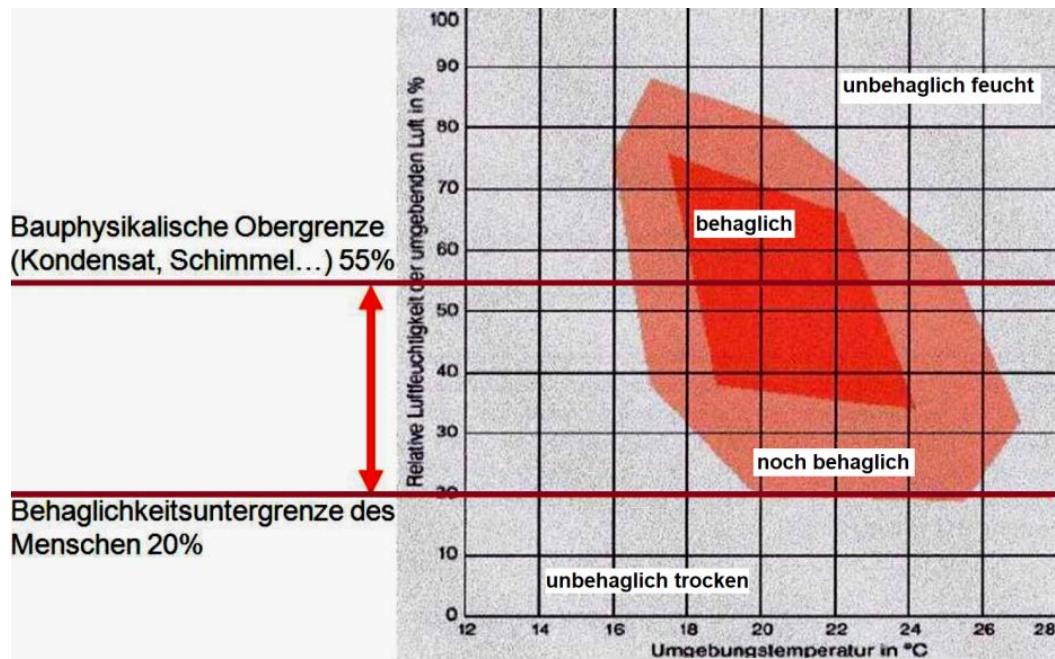


Abbildung 3 Behaglichkeit eines Menschen in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur und der relativen Luftfeuchte der umgebenden Luft mit eingezeichneter bauphysikalischer Obergrenze und Behaglichkeitsuntergrenze. Feuchte – und Behaglichkeitswerte nach Leusden und Freymark (1951); mit Ergänzungen der oberen und unteren Grenzen (Winter). Hinweis: Bei schlechter Bausubstanz kann es bei 55 % relativer Luftfeuchte schon zu Schimmelbildungen kommen, aus [14]. Laut DIN 1946-2:1994-01 [8] gilt ein Maximalwert für die empfundene Temperatur bei 27 °C (Innen), welche noch zum weiten Behaglichkeitsfeld zählt. Fällt die relative Raumlufffeuchte unter 30 % wird das weite Behaglichkeitsfeld, bzw. der ‚noch behagliche‘ Bereich verlassen [14]. Einen dauerhaften Abfall der relativen Raumlufffeuchte unterhalb 20 % hat einen negativen Effekt auf die Gesundheit [13].

Optimale Lüftung (mittels einer Komfortlüftungsanlage mit Feuchterückgewinnung und Leistungsregelung) ist nicht nur für die Schadstoffabfuhr nützlich, sondern verhindert ebenfalls das Erreichen von zu feuchten oder zu trockenen Behaglichkeitszuständen. [14]

2.1.3 Raumlufftemperatur und Oberflächentemperatur in °C

Einer der Hauptfaktoren des Wohlbefindens ist die Raumlufftemperatur, welche im Winter zwischen 20 und 23 °C und im Sommer in Anbetracht der leichten Bekleidung bei 26 °C als behaglich empfunden wird [7]. Die Raumlufftemperatur ist subjektiven Einflüssen unterworfen wie Alter, Tätigkeit, Geschlecht und Bekleidung. [12]

Die DIN 1946-2:1994-01 [8] vergleicht die empfundene Temperatur in Anbetracht der Außentemperatur und überschreitet den Grenzwert von 27 °C (Innen) für die empfundene Temperatur nicht.

Des Weiteren sollte der Temperaturunterschied zwischen Raumluft und Oberflächentemperatur (Strahlungstemperatur) der Wände unter 3 °C liegen. Um eine thermische Behaglichkeit zu erzielen, müssen unangenehme Zugerscheinungen vermieden werden. [6] Bauteile wie z.B. dreifach verglaste Fenster, raumabschließende Wände, Decken und Böden, sollten eine Oberflächentemperatur von 18 bis 19 °C aufweisen, denn der Mensch steht mit der Hülle des Raumes im Strahlungsabtausch [7].

2.1.4 Luftbewegung im Raum in m / s

Luftbewegungen können die Behaglichkeit negativ beeinflussen. Eine anhaltende Luftgeschwindigkeit von mehr als 0,3 m / s wird (außer im Sommer) als unangenehm beurteilt. Denn je höher die Temperatur, desto empfindlicher reagiert der Mensch auf kalte und konstant aus einer Richtung kommenden Luftbewegung wie z.B. der Windzug, der im Sommer durch falsch eingestellte Klimaanlage produziert wird. Andererseits ist auch der Wärmetransport, Konvektion, eine Ursache für unangenehme Zugluft, welche durch warme Oberflächen verursacht wird und eine Erhöhung der Wärmeabgabe zufolge hat. [7]. Diese Aspekte werden in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

2.1.5 Gerüche

Auch Gerüche beeinflussen das Behaglichkeitsempfinden und können i.d.R. durch ausreichendes Lüften entfernt werden. Es wird zwischen Geruchsquelle und empfundener Luftqualität unterschieden [7]:

- Die Stärke der Geruchsquelle wird in Olf (lat. Olfactus = Geruchssinn) angegeben wobei „1 Olf der Geruchsbelastung einer Standardperson (erwachsen, geduscht, sitzend) entspricht“ [7].
- Die empfundene Luftqualität (Luftverunreinigung) wird in Dezipol (Pol – lat. Pollutio) ausgedrückt. Ein Dezipol entspricht der empfundenen Luftqualität, wenn 10 l / s reine Luft durch 1 Olf verunreinigt werden [7].

In dieser Arbeit werden die Gerüche nicht in Betracht gezogen.

2.1.6 Vom Menschen abhängige Faktoren

Der Mensch ‚belastet‘ den Raum durch seine Aufenthaltsdauer und die daraus resultierende Belegungsdichte des Raumes. Ferner wird das Raumklima durch Wärmeabgabe sowie Feuchteabgabe beeinflusst (wie bereits im Abschnitt 2.1.2 gesehen). Zusätzlich ‚belastet‘ der Mensch den Raum durch Ausatmen von CO₂, wie im Abschnitt 2.1.1 beschrieben wird.

Wie in Abbildung 2 aufgeführt, haben die Kleidung und der Tätigkeitsgrad (siehe Tabelle 2 und Tabelle 4) sowie die Aufenthaltsdauer und Belegungsdichte des Raumes bezüglich des Raumklimas eine Bedeutung. [4] [9]

Die Behaglichkeit wird u.a. von der Kleidung beeinflusst: ist es zu kalt oder zu warm können wir uns mittels mehr, bzw. weniger Kleidung helfen. Allerdings lässt sich die Kleidung nicht physikalisch ermitteln. Deshalb haben Gagge et al. [9] den Clo-Wert eingeführt (Clothing - Value, 1 clo 0,155 m²*K / W, siehe Tabelle 3).

Tabelle 3 Dämmwert von Kleidung (Quelle: Recknagel, Sprenger, Schramek, 2011/12, Alle Rechte vorbehalten), unverändert aus [9]

Kleidungsstück	Dämmwert in clo	Änderung der operativen Temperatur in K
T-Shirt	0.09	0.6
Hemd mit kurzen Ärmeln	0.15	0.9
Hemd mit langen Ärmeln	0.25	1.6
Shorts	0.06	0.4
Normale Hosen	0.25	1.6
Leichter Rock (Sommer)	0.15	0.9
Dicker Rock (Winter)	0.25	1.6
Leichten Sweater	0.20	1.3
Pullover	0.28	1.7
Normale Jacke	0.35	2.2

Für die Aktivität wurde der Met-Wert (Metabolic Rate) eingeführt: 1 met entspricht einer Wärmeabgabe von 58 W pro Quadratmeter Körperoberfläche. In Anlehnung an die ÖNORM EN ISO 7730 [10] lässt sich der Energieumsatz bestimmen. [9]

Tabelle 4 Gesamtwärmeabgabe des Menschen in Abhängigkeit von der Tätigkeit, unverändert aus [9]

Körperliche Tätigkeit	Energieumsatz		
	W/m ²	met	W*
Angelehnt	46	0,8	83
Sitzend, entspannt	58	1,0	104
Sitzende Tätigkeit	70	1,2	126
Stehende, leichte Tätigkeit (leichte Arbeiten)	93	1,6	167
Stehende, mittelschwere Tätigkeit (Verkauf, Maschinenbedienung, Hausarbeit)	116	2,0	209
Gehen auf der Ebene			
2 km/h	110	1,9	198
3 km/h	140	2,4	252
4 km/h	165	2,8	297
5 km/h	200	3,4	360

*Es ist eine wärmeabgebende Oberfläche des Menschen von 1,8 m² zugrunde gelegt.

Das Raumklima ist sowohl abhängig von physikalischen Kenngrößen als auch von personenbezogenen Faktoren oder der Luftqualität [4].

Des Weiteren verschafft die Tab. A. 1 im Anhang [18] einen Überblick über einige der häufigsten Schadstoffe im Innenraum und deren Wirkung auf den Menschen sowie deren Quellen und gibt jeweils eine mögliche Lösung an. Hierbei ist auffallend, dass Pflanzen

nicht in dieser Tab. A. 1 als Lösungsmöglichkeit zu finden sind. Der Einfluss der Pflanzen auf das Behaglichkeitsempfinden des Menschen muss jedoch in Betracht gezogen werden. Kapitel 2.2 liefert hierfür einen Nachweis.

2.2 Pflanzen

Alle Pflanzen haben, außer einer dekorativen Funktion, einen großen Einfluss auf unser Leben. Sie produzieren Sauerstoff und sind vielseitig. Welche Rolle sie in geschlossenen Räumen spielen und wie sie zur Verbesserung des Raumklimas beitragen, wird im Abschnitt 2.2.2 gezeigt.

Der Aufbau und die Funktionsweise der Pflanzen sind sehr komplex. Allerdings werden in dieser Arbeit nur solche Aspekte behandelt, die für das Verständnis der folgenden Kapitel notwendig sind. Im Abschnitt 2.2.1 werden die relevanten Vorgänge der Pflanzen kurz vorgestellt.

2.2.1 Theoretische Grundlagen

Pflanzen regulieren ihren Wasserhaushalt über verschließbare Poren (Spaltöffnungen / Stomata) [19]. Pflanzen sind u.a. Sauerstoffspender und Luftbefeuchter und können bis zu 90 % des zugeführten Wassers durch die Spaltöffnung der Pore wieder abgeben. Jedoch ist der abgeführte Anteil abhängig von der Pflanzenart [20]. Die Transpiration kann eine stomatäre oder eine cuticuläre Transpiration sein.

- stomatäre Transpiration: an der Unterseite der Blätter verdunstet das Wasser durch regulierbare Spaltöffnungen. Die Größe der Spaltöffnungen regelt die Menge an Feuchteabgabe und wieviel CO₂ für die Fotosynthese aufgenommen werden kann. D.h. die Stomata sind bei hoher Luftfeuchtigkeit weit geöffnet und bei Trockenheit fast oder ganz geschlossen. Durch die stomatäre Transpiration kann sich das Blatt durch Verdunstung abkühlen. [21]
- cuticuläre Transpiration (Cuticula = dünne Wachsschicht auf der oberen Epidermis der Blätter): das Wasser verdunstet über die gesamte Blattoberfläche und ist von der Pflanze nicht steuerbar, sondern hängt von der Cuticaldicke ab. Im Gegensatz zur stomatären Transpiration hat sie eine geringe Bedeutung. [19]

Je mehr Pflanzen, desto größer ist die Sauerstoff- und Befeuchtungsleistung. Allerdings ist zu beachten, dass die Pflanzen das Wasser besser einteilen müssen, je wärmer es ist. Bei besonders trockener Raumluft schadet es nicht, die Pflanzen häufiger zu gießen, da das zugeführte Wasser rasch verdunstet. Nur Pflanzen, die viel Wasser benötigen, geben auch viel Wasserdampf an die Raumluft ab. [20]

Beide Arten der Transpiration sind von folgenden Faktoren abhängig: Luftfeuchtigkeit (Wassergehalt in der Umgebungsluft), Windgeschwindigkeit, Lichtintensität, Temperatur, Pflanzendichte, Nährstoffmangel (z.B. Kalium), Bodenstruktur (ein fester Boden verringert die Wasserverfügbarkeit). [19] D.h.:

- je trockener / wärmer die Luft; je windiger die Umgebung; je stärker das Licht; je schlechter der Boden mit Nährstoffen versorgt ist, desto mehr transpiriert die Pflanze [19];
- je höher die Temperatur desto weniger Wärme kann ein Wassermolekül aufnehmen. Folglich muss die Pflanze mehr Wassermoleküle verdunsten, um nicht zu überhitzen [19].

Den Zusammenhang zwischen dem Feuchtegrad der Raumluft und der Wasserabgabe konnte durch Brucher et al [22] nachgewiesen werden (siehe Abschnitt 2.3.1) und wird als selbstregulierende Fähigkeit der Pflanze angesehen.

Es ist ergänzungshalber zu bemerken, dass es nicht nur die Transpiration, sondern auch die Evapotranspiration gibt, welche die Feuchteabgabe infolge von Windeinflüssen widerspiegelt, jedoch in einem geschlossenen Raum weniger ausschlaggebend ist [21].

2.2.2 Wirkung von Pflanzen auf das Behaglichkeitsempfinden

Nahezu alle Pflanzenarten beeinflussen das Raumklima nicht nur als Sauerstofflieferanten und Luftbefeuchter, sondern wirken sich positiv auf unsere Leistungsfähigkeit und unser Wohlbefinden aus. (siehe Kapitel 1, Einleitung). Zu viele Pflanzen erhöhen die Luftfeuchtigkeit und tragen zur Schimmelbildung bei. Wie Studien bereits belegen (siehe KIT [3]; FH Burgenland im Auftrag von Florawall [1]) verringert eine Pflanzenwand den CO₂-Gehalt der Raumluft, einige Pflanzen können ebenfalls Schadstoffe aus der Luft aufnehmen.

Die chemische und die physikalische Wirkung der Schadstoffe beeinträchtigen die Gesundheit des Menschen und belasten die Umwelt. In diesem Zusammenhang wird von ‚Emission‘ (Abgabe von Stoffen, Geräuschen, Energie und Strahlung an die Umgebung durch eine Quelle) oder ‚Immission‘ (Einwirken von Schadstoffen, Lärm etc. auf Menschen, Tiere, Pflanzen und Materialien) gesprochen. Die Liste der Schadstoffe befindet sich im Anhang Tab. A. 1. [18]

Es gilt zu beachten, dass verschiedene Pflanzen unterschiedliche Mengen und Arten von Schadstoffen verringern können, ohne jedoch zu vergessen, dass eine vollständige Aufnahme aller belastenden Stoffe im Raum nicht gewährleistet werden kann. [18]

Die erste Liste von luftreinigenden Pflanzen wurde von der NASA, im Rahmen einer Studie („NASA Clean Air Study“), zwecks Verbesserung der Luft in Raumstationen erstellt. Die Ergebnisse wurden bereits 1989 veröffentlicht und haben noch heute ihre Gültigkeit. Für eine ausreichende Luftreinigungswirkung empfehlen die NASA-Forscher zumindest eine Pflanze pro 9 m². [23] Welche Pflanzen z.B. Benzol, Formaldehyd oder Trichlorethen in welchem Umfang entfernen können, kann im Anhang Tab. A. 2 aus [23] nachgelesen werden.

Durch Fotosynthese kann das Kohlendioxid unter anderem in Sauerstoff umgewandelt werden. Bestimmte Arten können Giftstoffe wie Formaldehyd (Spanplatten / Möbel), Benzol (Lacke, Kunststoffe) oder Trichlorethylen (Farben / Lacke, chemische Reinigungsmittel) aus der Raumluft filtern indem sie diese einatmen und gegen sauberen, frischen, klaren Sauerstoff austauschen [20].

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass Pflanzen einen allgemeinen positiven Einfluss auf den CO₂-Gehalt der Luft im Raum haben. Dies wird durch das Behaglichkeitsdiagramm (siehe Abbildung 3) und die Beschreibungen in Abschnitt 2.2.1 ersichtlich. Des Weiteren ist durch die Bepflanzung eines Raumes eine bessere Nachhallzeit und Akustik zu erwarten.

Im nächsten Kapitel wird beschrieben welche Pflanzenarten genutzt werden, um eine effiziente Innenwandbegrünung zu erhalten. Eigentlich ein kleiner Prozentsatz des reichen Potenzials der Pflanzenvielfalt, aber ein wichtiger Schritt in die richtige Richtung: grüne Wände durchfluten Innenräume mit lebensverlängerndem Grün.

2.3 Vertikale Begrünungssysteme im Innenbereich

Die vorherigen Kapitel 2.1 und 2.2 beziehen sich auf die Grundlagen des Raumklimas und der Pflanzen. Diese Kapitel gehen unter anderem auf die Grenzwerte ein und geben an, ab wann sich ein behagliches Raumklima einstellt, z.B. ist eine relative Luftfeuchte zwischen 40 % und 60 % notwendig damit das Raumklima als behaglich empfunden wird.

In diesem Kapitel werden die Definition und Funktionsweise einer vertikalen Innenwandbegrünung eingeleitet, um danach die Anforderungen an eine vertikale Innenbegrünung zu erklären.

2.3.1 Definition und Funktionsweise einer vertikalen Innenwandbegrünung

Innenraumbegrünung wird nach Kerstjens et al. [24] [25] definiert als „die dauerhafte Begrünung von Innenräumen für Wohnen, Arbeiten und Freizeit (z.B. in Verwaltungsgebäuden, Foyers, Schulen, Wintergärten, Krankenhäusern, Schwimmbädern, Einkaufspassagen, Botanischen und Zoologischen Gärten) mit Pflanzen in mobilen und ortsfesten Gefäßen bzw. in Flächen mit oder ohne Bodenanschluss verstanden. Die Räume sind in der Regel geschlossen und klimatisiert.“

Die Forschungsanstalt für Gartenbau Weihenstephan hat im Zuge ihrer Untersuchungen herausgefunden, dass Topfpflanzen eine Steigerung von 5 % der relativen Luftfeuchte bewirken. Dies kann allerdings nicht als ausreichend angesehen werden weshalb auf den Einsatz einer vertikalen funktionalen Begrünung zurückgegriffen werden muss, um die Luftfeuchte zu erhöhen.

Bucher et al [22] definieren die funktionale Begrünung als „ein vertikal in den Raum gestelltes Substrat - Trägersystem, das eine hohe Verdunstungsrate und chemisch-physikalisch stabile Eigenschaften aufweist. Die Wirkungsweise entspricht einem begrünten Oberflächenverdunster, bei dem die Verdunstung passiv erfolgt und daher als hygienisch unbedenklich anzusehen ist“. Umweltfaktoren wie Temperatur, Licht, Luftfeuchte und Luftbewegung beeinflussen die Verdunstungsleistung [22].

Die Studie der Forschungsinitiative „Zukunft Bau“ [22] hat gezeigt, dass vertikale Begrünungssysteme Probleme der relativen Luftfeuchte lösen können und durchaus neben der Gebäudeklimatisierung vollwertig eingesetzt werden sollen.

Die Funktionsweise der grünen Wand hängt von der Art des installierten grünen Wandsystems ab. Es gibt bisweilen zwei Systeme auf dem Markt, entweder werden die Pflanzen in ein Vliessystem eingebunden (mit / ohne zusätzliches Substrat) oder sie werden in Trögen mit Substraten verwendet. Ein exemplarisches Begrünungssystem wird schematisch in Abbildung 4 dargestellt. [22]

Substrate sind „... Stoffe oder Stoffgemische, die den Pflanzen in bodenunabhängigen Anwendungen als Wurzelraum dienen, ...“ [24]. Mittels Pumpe wird in diesem exemplarischen System das Wasser, bzw. die Nährlösung hochgepumpt und durch die Schwerkraft wird das Wasser im Auffangbehälter aufgefangen [24] [26].

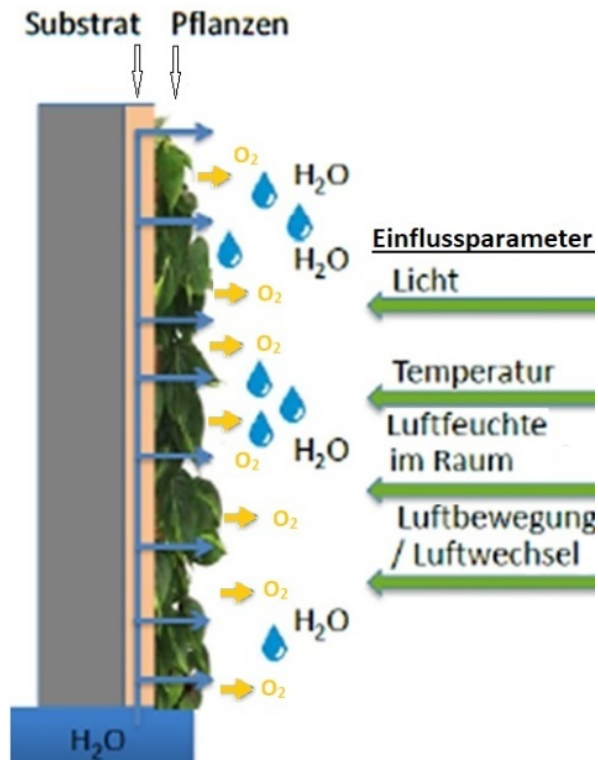


Abbildung 4 Schematische Darstellung der Wirkungsweise einer funktionalen, vertikalen Begrünung mit Bepflanzung und Substrat. Bearbeitete Darstellung aus [22] mit den Einflussfaktoren wie Licht, Temperatur, Luftfeuchte und Luftbewegung auf das Begrünungssystem.

Bei der Innenraumbegrünung gilt es zwischen zwei unterschiedlichen Begrünungssystemen auszuwählen: ein offenes oder ein geschlossenes System. In beiden Fällen ist auf die Staunässe im Wurzelraum zu achten, d.h. dass diese nicht zu lange und somit pflanzengefährdend auftritt. Dies hätte eine Einschränkung der Wurzel durch den entstehenden Sauerstoffmangel zur Folge. [25]

Die Steuerung der Bewässerung lässt sich manuell oder automatisch regeln. Laut Kerstjens et al kann dies „über ein Anstauverfahren, mittels Tröpfchenbewässerung, über poröse Druckschläuche oder durch oberflächiges Versprühen erfolgen“. [24] [25]

Der Unterschied in den Bewässerungsarten, offen sowie geschlossen, liegt an der Prozedur wie das Abwasser abgeführt wird [25]:

- Offenes System:

Das Wasser fließt ab und verlässt das System durch einen Anschluss an das Hausnetz, welches Zusatzkosten mit sich bringt. Aufgrund des Nichtvorhandenseins eines Wasservorrates und einem damit einhergehenden Verlust des überschüssigen Wassers wird ein regelmäßiges Gießen und Zuführen von Nährstoffen unabdingbar. [25]

Ein Vorteil dieses Systems besteht darin, dass ein Überschuss an Wasser durch das Gießen keine pflanzengefährdende Staunässe entstehen lässt, weil der Abfluss entgegenwirken wird. [25]

- Geschlossenes System:

Das Wasser und die Nährstoffe bleiben im System wodurch nur geringer Zusatzanschluss benötigt wird [25]. Nur was verdunstet oder von den Pflanzen verbraucht wird, muss neu eingebracht werden.

Jedoch kann es z.B. bei einem Gießfehler zu einer Wasseranstauung kommen. Übermäßiges Gießen oder Düngen kann mittels eines Wasserstandanzeigers kontrolliert und verhindert werden. [25]

Laut einer Studie der Forschungsinitiative „Zukunft Bau“ [22], die unter anderem verschiedene Begrünungssysteme (Vertical Green, Grüne Wand, Moving Wall und Wonderwall) gegeneinander verglich, erbrachten die Systeme Vertical Green und Grüne Wand während der gesamten Untersuchungsperiode eine optimale Befeuchtungsleistung. Moving Wall und Wonderwall schnitten in dieser Studie am schlechtesten ab, denn trotz erhöhter Wasserzufuhr wurden viele Pflanzenausfälle beobachtet. Des Weiteren wurde auch in dieser Studie die Selbstregulierungsfähigkeit der Pflanze in den Untersuchungen festgestellt, welche eine Wechselwirkung zwischen der relativen Raumlufffeuchte und der Feuchteabgabe der Bepflanzung beinhaltet. [22]

2.3.2 Anforderungen an eine vertikale Innenbegrünung

Bei der Innenraumbegrünung spielt die Lebensdauer der verwendeten Pflanzen eine wichtige Rolle. Laut FLL Richtlinien [24] [25] soll eine Dauer von mindestens 10 Jahren angestrebt werden. Sollte die Begrünung für eine kürzere Zeit gedacht sein (z.B. Ausstellungen) muss geprüft werden, wie die Richtlinie angewendet werden soll.

Dieselben Richtlinien weisen darauf hin, dass eine fachgerechte Planung, Bauausführung und Pflege sowie die Wachstumsfaktoren (Licht, Temperatur, Sauerstoff, Kohlendioxid, Wasser, Nährstoffe oder der durchwurzelbare Raum) wichtige Kriterien bei der Umsetzung sind. D.h. die Anforderungen der Pflanzen und die Bedingungen des Raumes, der begrünt werden soll, müssen kompatibel sein. [24] [25]

Allerdings ist das Wachstum der Pflanze eingeschränkt, wenn durch einen der folgenden Faktoren die Bedürfnisse der Pflanze vernachlässigt werden. [25]

- Raumklima

Die Pflanzenart oder -herkunft und die klimatischen Raumbedingungen sind eng miteinander verbunden. Für das Pflanzenwachstum sind die raumklimatischen Faktoren (Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftbewegung) maßgebend. [25]

- Licht

Für das Pflanzenwachstum sowie für die Fotosynthese braucht die Pflanze je nach Art und Gattung unterschiedliches Licht. Des Weiteren nimmt das Tageslicht je Raumtiefe ab und zu wenig Licht kann vom Blattfall bis zum Absterben der Pflanze führen. Deswegen können mittels zusätzlicher Beleuchtung (z.B. Metallhalogenlampen) die für die Pflanze individuell erforderlichen Lichtwerte herbeigeführt werden. Zusätzlich muss auch die Einstrahlungsdauer (Tag- / Nachtlänge) und die spektrale Lichtzusammensetzung beachtet werden. [25]

- Bodenfeuchte

Die Ansprüche sind in diesem Bereich je nach Pflanzenart sehr unterschiedlich. Es gilt darauf zu achten, dass die Wurzeln genügend Sauerstoff bekommen und / oder durch übermäßige Feuchte nicht abfaulen. Die richtige Einstellung der Bewässerung (ob manuell oder automatisch) ist eine komplizierte Aufgabe: die Bewässerungsintervalle müssen auf die verschiedenen Faktoren (Pflanzenart; Pflanzengröße; Menge; Raumtemperatur; Wasserqualität, usw.) gleichzeitig abgestimmt sein. [25]

- Nährstoffversorgung

Um eine optimale Versorgung zu erzielen, sollte ein Düngeplan aufgestellt werden, in dem der pH-Wert, der Salzgehalt im Substrat, das vorhandene Nährstoffangebot, das Gießwasser und der Nährstoffbedarf (Hauptnährstoffe: Stickstoff, Phosphor, Kalium, Magnesium und Spurenelemente: Bor, Kupfer, Zink, Mangan, Eisen, Selen) der verschiedenen Pflanzenarten berücksichtigt werden muss. [25]

- Boden / Substrat

Das Substrat ist die Grundlage für den Halt und den Nährstoffhaushalt der Pflanze im Begrünungssystem. Zudem ist es essenziell für die adäquate Wasser- und Sauerstoffversorgung der Pflanze. Substrate können flächig ausgeführt werden oder in einem Trog. [25]

Es gibt zwei Arten von Substraten, wobei auch gemischte Varianten zu finden sind [25]:

- a) Organische Substrate (Kokosfasern, Rindenkompost, Ton und Holzfasern), welche durch die hohe Anzahl an luftführenden Poren und einem hohen Wasserhaltevermögen charakterisiert sind. Hinzu kommt, dass in diesem Typ von Substrat Keime und Bakterien schneller ansiedeln können, was sie wiederum untauglich für verschiedene Räume (z.B. Krankenhaus) macht. [25]
- b) Mineralische Substrate (Bims, Lava, gebrochener Blähton, Blähschiefer, Tongranulate, Zeolithe, Perlithe oder Vermiculite [24]), welche eine geringe Pufferwirkung besitzen und deswegen eine regelmäßige Nährstoffzulieferung (Düngung) benötigen. Jedoch fördert dies auch zugleich ein Risiko der Anfälligkeit gegen unsachgemäßen Nährstoffeintrag. [25]

In Bezug auf die FLL Richtlinien [24] [25] sind folgende Kriterien bei der Auswahl der Substrate zu berücksichtigen: „Abriebfestigkeit; ausreichende Verfügbarkeit; Einheitlichkeit in der Qualität; frei von Schaderregern; keine Überschreitung des stoffüblichen Salzgehaltes; keine pflanzen- oder umweltschädigenden Substanzen; Nährstoffsorptionsfähigkeit; pH - Wert- und Pufferung; Struktur- und Sackungsstabilität durch geringe Zersetzung; Trittfestigkeit bei begehbaren Grünflächen; Vergießfestigkeit durch hohes Grob- und Mittelporenvolumen; vorbeugenden Brandschutz nach DIN 4102 beachten; Wasserspeicherfähigkeit.“

Der praktische Teil dieser Arbeit dokumentiert mittels verschiedener Untersuchungen den Einfluss der Begrünungssysteme auf die Raumklimata. Nach einer Beschreibung der Gebäude in Kapitel 3, wird das Konzept der Datenerfassung in Kapitel 4 vorgestellt, um in Kapitel 5 anhand der Trichter-Vorgehensweise die Messdaten zu erarbeiten. Ab dem Kapitel 5.2 bis Kapitel 7 inklusive werden sie anschließend ausgewertet und interpretiert.

3 Beschreibung der Gebäude

Für diese Diplomarbeit wurden folgende Gebäude zur Verfügung gestellt:

- GRG 7, Altbau ohne Lüftungsanlage in der Kandlgasse 39, 1070 Wien;
- BRG 15, Neubau mit Lüftungsanlage in der Diefenbachgasse 19, 1150 Wien;
- BRG 16, Neubau ohne Lüftungsanlage am Schuhmeierplatz 7, 1160 Wien.

Für das GRG 7 Gebäude sind ähnliche Pflanzen wie in Abbildung 5 und in Abbildung 6 verwendet worden. In diesem Gebäude sind ebenfalls ein Referenzraum und zwei Begrünungsräume vorhanden, welche aus einem Trogsystem- und einem Vliessystemraum bestehen.

Zunächst wird auf die Eckdaten des BRG 15 Gebäudes und des BRG 16 Gebäudes sowie auf die jeweils verwendeten Pflanzpläne eingegangen (siehe Abbildung 5 und Abbildung 6 sowie die Pflanzenbezeichnungen im Anhang Tab. A. 3). Danach werden die zu untersuchenden Klassenräume in den jeweiligen Gebäuden und die integrierten Begrünungssysteme analysiert.

In diesen Schulen finden sowohl geschlossene als auch offene Systeme Verwendung (siehe die Erklärungen in Abschnitt 2.3.1). Des Weiteren ist ein Klassenraum mit einem Trogsystem versehen in dem ein Substrat (Seramis) verbaut ist. Ein anderes Klassenzimmer ist mit einem Vliessystem ausgestattet. Die jeweiligen verwendeten Systeme wie Trog- und Vliessystem werden im Folgenden kurz erklärt:

- Trogsystem: Pflanzenwannen aus Aluminium sind übereinander aufgebaut und mit Substrat (z.B. geblähtes Tongranulat) gefüllt. Die Bewässerung erfolgt über Tropfschläuche. Dieses System eignet sich für den Außen- und Innenbereich. [27] Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde in den Schulen jeweils der Biologieraum als Trogsystemraum ausgewählt. Für die Kinder und Jugendliche ist das Fach geradezu ideal, um eine Verbindung zur Natur herzustellen, indem sie anhand dieses Systems die Pflanzen selbst bewässern und pflegen dürfen.
- Vliestaschensystem: es werden verschiedene Vliese als Vegetationsträger kombiniert. Die Wasserversorgung wird über Tropfschläuche realisiert. Das Überschusswasser kann in einem Reservoir aufgefangen werden und findet je nach System mittels Umlaufpumpe eine Wiederverwendung. Dieses System eignet sich ausschließlich für den Innenbereich. [27]

Die Tabelle 5 zeigt die Eckdaten des Trogsystem- und des Vliessystemraumes des BRG 15 und des BRG 16, sowie die Abbildung 5 und die Abbildung 6 die jeweiligen

Pflanzpläne präsentieren. Die Pflanzenbezeichnungen der Abbildung 5 und Abbildung 6, welche in den Schulen verwendet wurden, können im Anhang in der Tab. A. 3 nachgelesen werden.

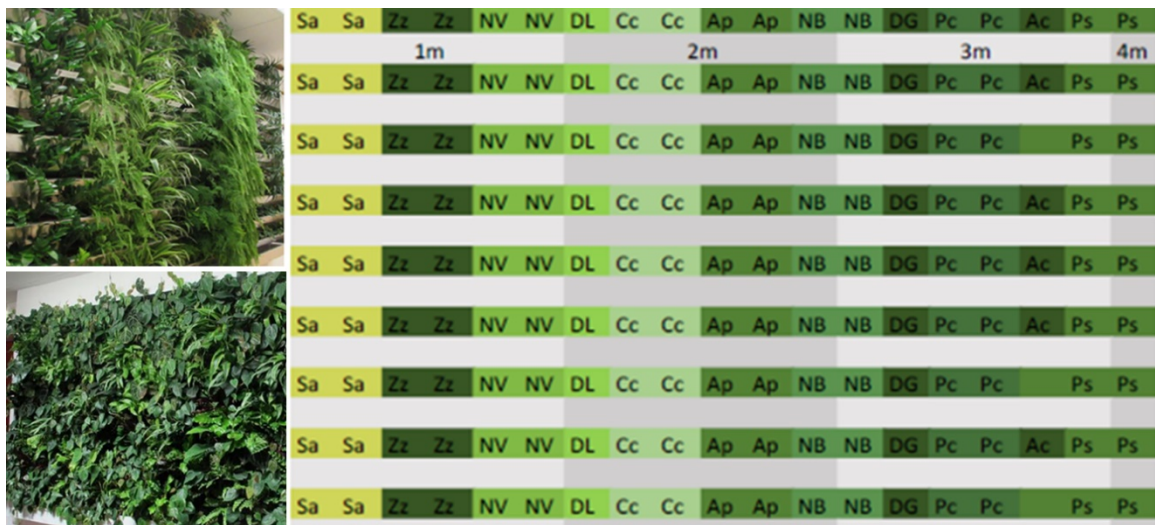


Abbildung 5 Pflanzplan (Mitte) des Biologiesaales im BRG 15 Gebäude, welcher mit dem Trogsystem (links) ausgestattet wurde (Darstellung aus [27])

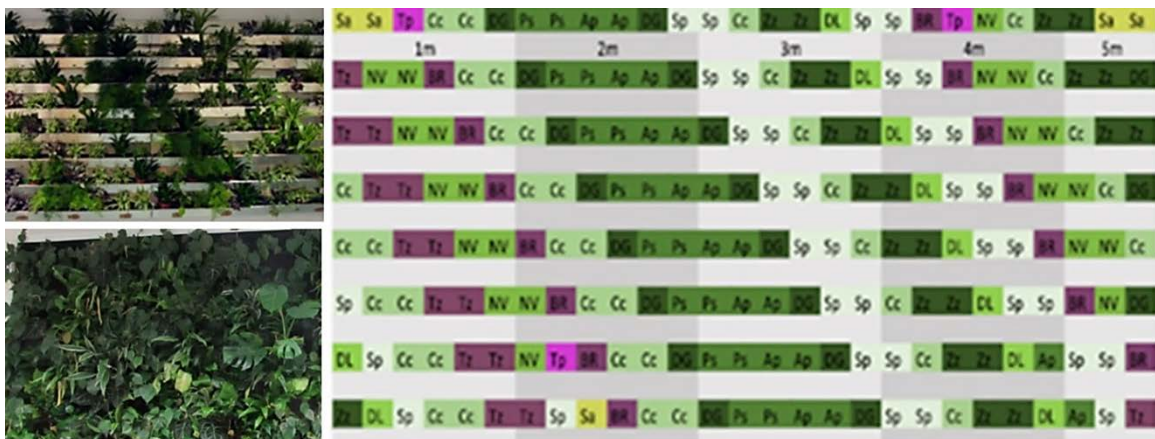


Abbildung 6 Pflanzplan des Biologiesaales im BRG 16 Gebäude, welcher mit dem Trogsystem ausgestattet wurde (Darstellung aus [27])

Tabelle 5 Eckdaten der begrünten Klassenräume der Gebäude GRG 7, BRG 15 und BRG 16 aus [27]

Eckdaten	GRG 7		BRG 15		BRG 16	
	Trog	Vlies	Trog	Vlies	Trog	Vlies
Begrünungssystem	Trog	Vlies	Trog	Vlies	Trog	Vlies
Bewässerungsart (offen/geschlossen)	offen		offen		geschlossen	
Bewässerungssystem (manuell/automatisch)	automatisch		automatisch		manuell	
Fläche des Begrünungssystems	17 m ²	6,5 m ²	9 m ²	5,6 m ²	11,4 m ²	5,6 m ²
Bepflanzung (vertikal/diagonal)	Keine Infos		vertikal		diagonal	
Pflanzplan	Keine Infos		Abbildung 5		Abbildung 6	

3.1 GRG 7

Das Gymnasium und Realgymnasium 7 (GRG 7) befindet sich in der Kandlgasse 39 (1070 Wien). Das Gebäude wurde 1907 errichtet [28]. In Abbildung 7 ist zunächst eine Ansicht des Gesamtgebäudes zu sehen. Des Weiteren sind in Abbildung 8 die Klassenräume: der Trogsystemraum, der Referenzraum und der Vliessystemraum zu sehen. Des Weiteren gibt es in diesem Gebäude auch einen Referenzraum, welcher ohne zusätzliches Begrünungssystem ausgestattet ist und zu Vergleichszwecken für die begrünten Klassenräume herangezogen wird.



Abbildung 7 Ansicht des GRG 7 Gebäudes, Altbau ohne Lüftungsanlage in der Kandlgasse 39, 1070 Wien (eigenes Foto)



Abbildung 8 Ansicht der begrünten Klassenräume: rechts der Biologieraum mit Trogsystem und links der Raum mit Vliessystem (eigene Fotos)

Abbildung 9 übermittle die Grundrisse der jeweiligen untersuchten Klassenzimmer, welche aus Trogsystemraum, Referenzraum und Vliessystemraum bestehen.

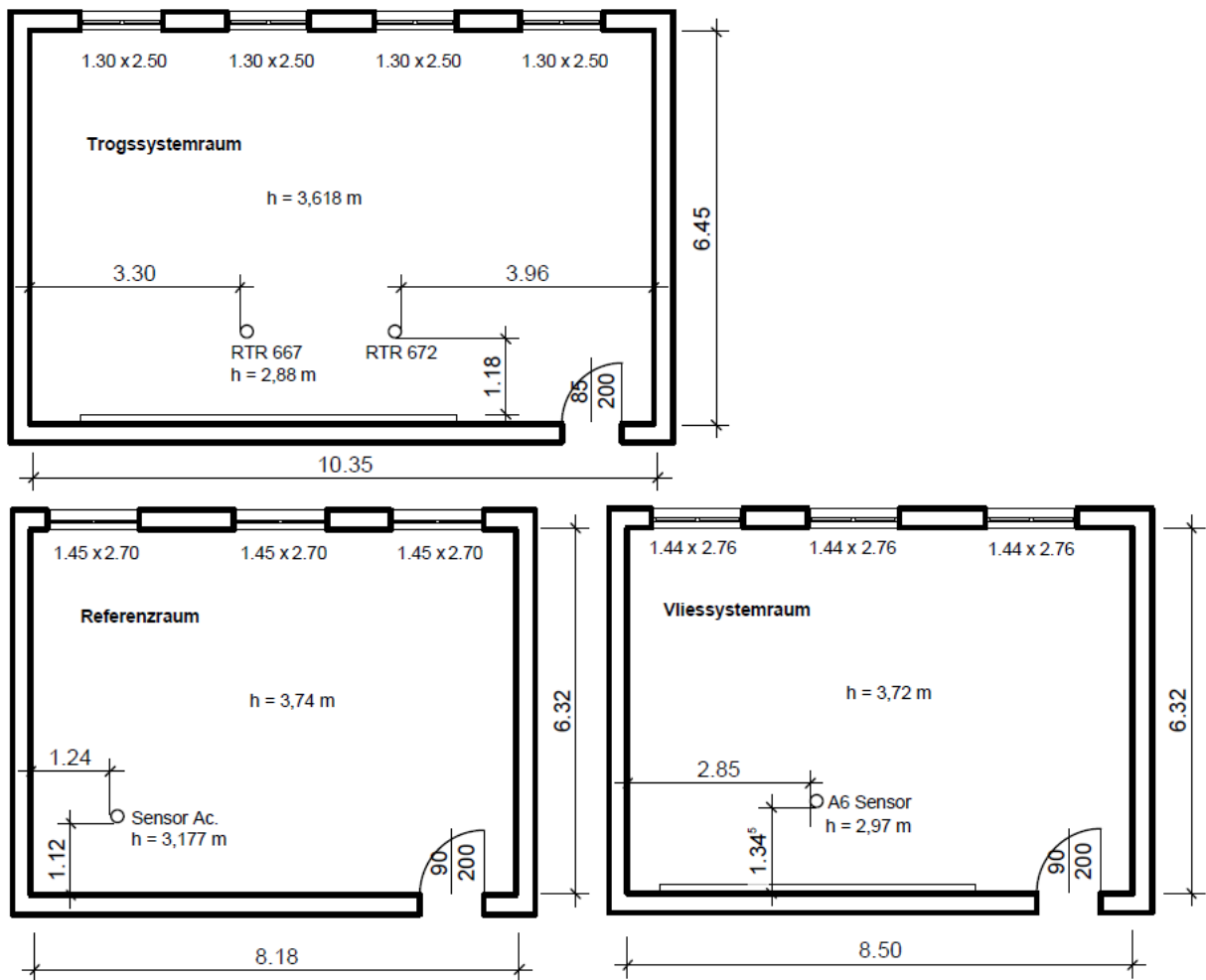


Abbildung 9 Skizzen der untersuchten Klassenräume im GRG 7 Gebäude: der Trogsystemraum (oben links), das Referenzzimmer (unten links) und der Vliessystemraum (unten rechts). (eigene Darstellung)

3.2 BRG 15

Im Jahr 2012 wurde die Sanierung des Bundesrealgymnasiums in der Diefenbachgasse im 15. Bezirk (BRG 15) abgeschlossen. Es entstand ein viergeschossiger Neubau auf einer Fläche von ca. 10 000 m². Auf dem Dach des Gebäudetrakts der Storchengasse (Turnsaal) ist zusätzlich ein Spielfeld entstanden, im Erdgeschoss wurden überdachte Stellplätze für Fahrräder geschaffen. Das Hauptgebäude wurde mit neuen Fenstern versehen und die Räume wurden umgruppiert. Der Eingang und alle Übergänge wurden mit Rampen und Aufzügen ausgestattet, sodass ein barrierefreier Zugang möglich ist. Es wurde dafür gesorgt, dass auch bei geschlossenen Fenstern eine gute Luftqualität vorhanden ist indem eine kontrollierte Raumlüftung mit Wärmerückgewinnung installiert wurde. Zusätzlich wurde im Innenhof eine grüne Lernoase („grüne Klasse“) geschaffen. [26]

In Abbildung 10 ist zunächst eine Ansicht des Gesamtgebäudes zu sehen. Des Weiteren stellen die Rot gekennzeichneten Bereiche die Fensterfronten der untersuchten Klassenzimmer dar. Dabei ist zu beachten, dass der vordere Klassenraum (der Biologieraum) über dem Eingang der Schule liegt und in der Nachmittagszeit direkter Sonneneinstrahlung ausgesetzt ist, bzw. nach Südwesten ausgerichtet ist. Somit ist dieser Raum wärmer als die beiden anderen Räume, worauf in der späteren Auswertung nochmals näher eingegangen wird.



Abbildung 10 Ansicht des BRG 15 Gebäudes, Neubau mit Lüftungsanlage in der Diefenbachgasse 19, 1150 Wien. Des Weiteren sind die in Rot gekennzeichneten Bereiche die Fensterfronten der untersuchten Klassenzimmer. Dabei ist zu beachten, dass der vordere Klassenraum (der Biologieraum) über dem Eingang der Schule liegt und in der Nachmittagszeit direkter Sonneneinstrahlung ausgesetzt ist. Somit ist dieser Raum wärmer als die beiden anderen Räume, worauf in der späteren Auswertung nochmals näher eingegangen wird. (eigenes Foto)

In der Abbildung 11 sind die Klassenräume von innen, das Trog- und Vliessystem (links, sowie rechts) sowie der Referenzraum (Mitte) dargestellt.



Abbildung 11 Ansicht der Klassenräume: links der Biologieraum mit Trogssystem; in der Mitte der Referenzraum ohne Begrünungssystem und rechts der Raum mit Vliessystem (eigene Fotos)

Abbildung 12 übermittelt die Grundrisse der jeweiligen untersuchten Klassenzimmer, welche aus Trogssystemraum, Referenzraum und Vliessystemraum bestehen.

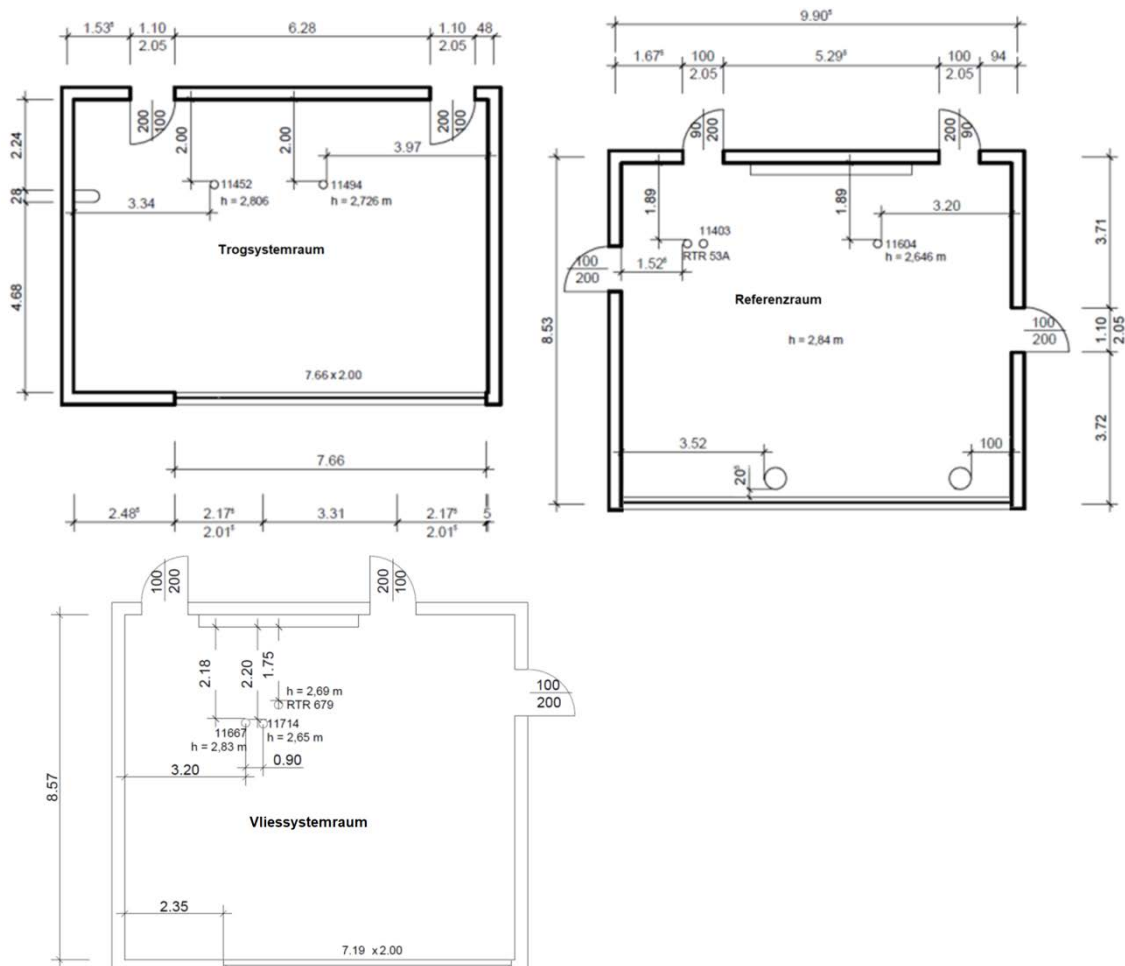


Abbildung 12 Skizzen der drei untersuchten Klassenräume im BRG 15 Gebäude: Trogssystemraum (oben links), Referenzzimmer (oben rechts) und Vliessystemraum (unten links). (eigene Darstellung)

3.3 BRG 16

Das BRG 16 befindet sich am Schuhmeierplatz im 16. Bezirk. Das BRG 16-Gebäude wurde Anfang des 20. Jahrhunderts errichtet. Die Renovierung des Gebäudes wurde 2014 fertiggestellt. Viele Räume wurden umgebaut bzw. neu angeordnet. Hinzu kamen 2 800 m² Neuf Flächen bestehend aus zwei unterirdischen Turnhallen, einem zweigeschossigen Erweiterungsbau, Zentralgarderoben im Innenhof sowie einem Sportplatz. Brandschutz und Haustechnik wurden generalüberholt und das Gebäude wurde weitgehend mittels Rampen und Aufzug barrierefrei gestaltet. [27]



Abbildung 13 Ansicht des BRG 16 Gebäudes, Neubau ohne Lüftungsanlage am Schuhmeierplatz 7, 1160 Wien (eigenes Foto)

In der Abbildung 13 ist zunächst eine Ansicht des Gesamtgebäudes zu sehen. Zudem sind die Klassenräume in Abbildung 14 dargestellt: der Trogsystemraum und der Vliessystemraum. Ähnlich wie bei den beiden anderen Gebäuden gibt es hier auch einen Referenzraum, welcher ohne zusätzliches Begrünungssystem ausgestattet ist und zu Vergleichszwecken für die begrünten Klassenräume herangezogen wird.



Abbildung 14 Ansicht der Klassenräume: links der Biologieraum mit Trogsystem und rechts der Raum mit Vliessystem. (eigenes Foto)

Abbildung 15 übermittelt die Grundrisse der jeweiligen untersuchten Klassenzimmer, welche aus Trogsystemraum, Referenzraum und Vliessystemraum bestehen.

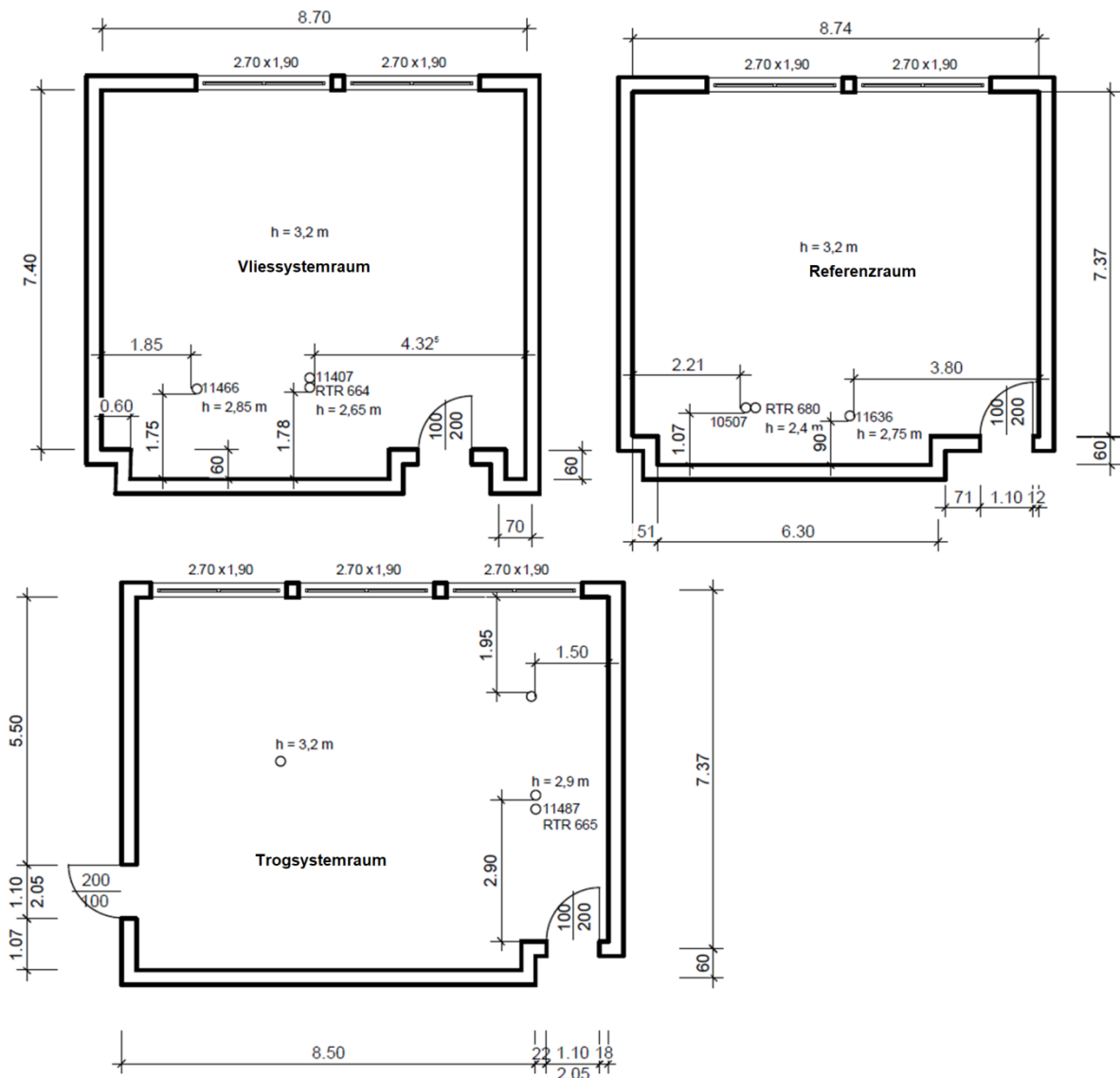


Abbildung 15 Skizzen der drei untersuchten Klassenräume im BRG 16 Gebäude: Trogsystemraum (unten links), Referenzzimmer (oben rechts) und Vliessystemraum (oben links). (eigene Darstellung).

Nach der kurzen Vorstellung der verschiedenen Gebäude, beginnt der praktische Teil indem die Vorgehensweise der Datenerfassung beschrieben wird (siehe Kapitel 4). Anschließend wird auf die Methodik der Auswertung (siehe Kapitel 5) eingegangen, um anschließend die Ergebnisse (siehe Kapitel 6.1) bezüglich der thermischen Behaglichkeit zu präsentieren (siehe Kapitel 6.2, Kapitel 6.3 und Kapitel 6.4). Ferner werden die Ergebnisse bezüglich des CO₂-Gehaltes bewertet und analysiert (siehe Kapitel 7).

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird darauf hingewiesen, dass in den folgenden Kapiteln mit den Bezeichnungen GRG 7, BRG 15 oder BRG 16 die jeweils untersuchten Räume der Gebäude gemeint sind.

4 Konzept der Messdatenerfassung

Für diese Diplomarbeit wurden drei Gebäude (siehe Kapitel 3) für die Untersuchungen zur Verfügung gestellt. Je Gebäude wurden drei Räume (Referenzraum, Trogsystemraum und Vliessystemraum) mit entsprechender Messtechnik (siehe Abbildung 16) ausgestattet, um unter anderem die Raumlufttemperatur in °C, die Raumluftfeuchte in % und die CO₂-Konzentration in ppm zu messen. An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass die Messsensoren des CO₂-Gehaltes im Raum einen Messbereich von 450 ppm bis 2 000 ppm haben.

Diese Messungen ermöglichen eine spätere Analyse des Einflusses der Begrünungssysteme in den untersuchten Räumen auf das Raumklima bzw. die Behaglichkeit. Die Methode der Auswertung wird im entsprechenden Kapitel 5 beschrieben.

Für die Auswertung wurde das Schuljahr 2017 / 2018 als zu betrachtender Zeitraum gewählt, d.h. der gesamte Betrachtungszeitraum der Messungen der Schulen entspricht dem Zeitrahmen vom 01.09.2017 bis zum 30.06.2018.

Die Messdatenerfassung läuft folgendermaßen ab: Die Sensoren zeichnen im 10 Minuten - Intervall auf, wobei die Auslesung der gemessenen Daten in den Gebäuden unterschiedlich vonstattengeht. Im GRG 7 Gebäude können diese Messwerte nur vor Ort eingelesen werden. Die Messwerte der beiden anderen Gebäude, BRG 15 und BRG 16, sind mit einer WLAN Verbindung online abrufbar. Bei der Auswahl der Lage der Messtechnik wurde beachtet, dass eine Beschädigung durch Schüler ausgeschlossen werden konnte. Die genaue Lage ist in den jeweiligen Skizzen (siehe Abbildung 9, Abbildung 12 und Abbildung 15) der entsprechenden Gebäude im vorherigen Kapitel 3 zu sehen. Eine kleine Auswahl der Messtechnik ist in der Abbildung 16 zu erkennen.



Abbildung 16 verwendete Messtechnik im Innenraum; links ein RTRs - Messsensor und der Aufbau der Messsensorik auf den zwei Bildern rechts. (eigene Fotos)

Zusätzlich zu den Messsensoren in den Räumen wurden auch die Messwerte des Außenklimas im betrachteten Zeitraum benötigt, welche durch die Messungen am Institut an den Aspanggründen und den Außen - Messsensoren an der Turnhalle im GRG 7 Gebäude ermöglicht wurden. Aufgrund der geographischen unterschiedlichen Lage der Außen - Messtechnik zu den jeweiligen Gebäuden stellt dies eine Vereinfachung dar. Bei der Messung des Außenklimas wurden unter anderem folgende Parameter aufgezeichnet: Luftdruck in hPa, Lufttemperatur in °C und relative Luftfeuchte in %. Die Daten der Messstation Aspanggründe für die Außenbedingungen sind mit Ausnahme des Zeitraums vom 24.08.2017 bis zum 14.09.2017 vorhanden und werden nur in diesem Zeitraum durch die Außenmesswerte der Messstation am GRG 7 Gebäude ergänzt.

Die objektiv erfassten Daten müssen ausgewertet werden, um die angestrebten Vergleiche zu ermöglichen (siehe Kapitel 6). Die angewandten Auswertungsmethoden werden im folgenden Kapitel 5 genauer beschrieben.

5 Methode der Auswertung

Die Ziele und Fragestellungen werden im Kapitel 1.2 detailliert beschrieben, außerdem ist der Aufbau der gesamten Diplomarbeit in Kapitel 1.3 zu finden. Des Weiteren werden die Themen Behaglichkeit und empfohlene Grenzwerte in Bezug auf das Raumklima im Kapitel 2.1 erklärt. Außerdem wird in Kapitel 2.2 auf die Grundlagen der Pflanzen und im Kapitel 2.3 auf den allgemeinen Einfluss von Begrünungssystemen eingegangen. Die für diese Arbeit zur Verfügung gestellten Gebäude wie auch deren zu untersuchenden Räume und deren beinhaltendes Begrünungssystem ist in Kapitel 3, und dessen entsprechende Unterkapitel, weiter erläutert. Die in den Räumen inkludierte Messtechnik wird in Kapitel 4 beschrieben.

In diesem Kapitel wird die Methode der Auswertung der erhaltenen Messdaten beschrieben und detailliert erörtert. Die Auswertung betrifft das Schuljahr 2017 / 2018.

Grundlegend sollen die Untersuchungen den Effekt auf die Behaglichkeit (relative Luftfeuchte, Temperatur sowie CO₂-Gehalt) hervorheben indem ein Raum mit Begrünungssystem mit einem Raum ohne Begrünungssystem verglichen wird.

Diesem Ziel entsprechend wurden zwei unterschiedliche Begrünungssysteme verwendet (Trogssystem sowie Vliessystem), welche im Verlauf dieser Arbeit miteinander verglichen werden. Außerdem wird ein Vergleich zwischen den Gebäudetypen (Altbau / Neubau) aufgestellt.

In diesem Zusammenhang ist wichtig festzuhalten, dass die Ergebnisse der geführten Untersuchungen nicht relevant genug sind, um als wissenschaftliche Aussage angesehen zu werden. Beim Vergleich zwischen begrünten und unbegrünten Klassenräume gibt es Faktoren (wie z.B. das Nutzerverhalten, Lüftungsverhalten, etc.) deren Einfluss während den betrachteten Zeiträumen nicht vollständig umrissen werden konnte. Folglich konnte die Dynamik des Raumklimas nie zur Gänze bewertet werden.

5.1 Durchführung der Datenfilterung in der Auswertung

In der nachfolgenden Abbildung 17 werden die einzelnen Phasen der angewandten Filterung schematisch dargestellt. Methodisch wurde die Trichter-Vorgehensweise gewählt: Ausgangspunkt sind die Gesamtdaten. Durch weiteres Vorgehen wird eine detailliertere Ansicht der Datenmengen angestrebt. Diese Aufteilung ermöglicht eine vereinfachte Darstellung der Messungen, um so eine Basis für eine detaillierte Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu schaffen.

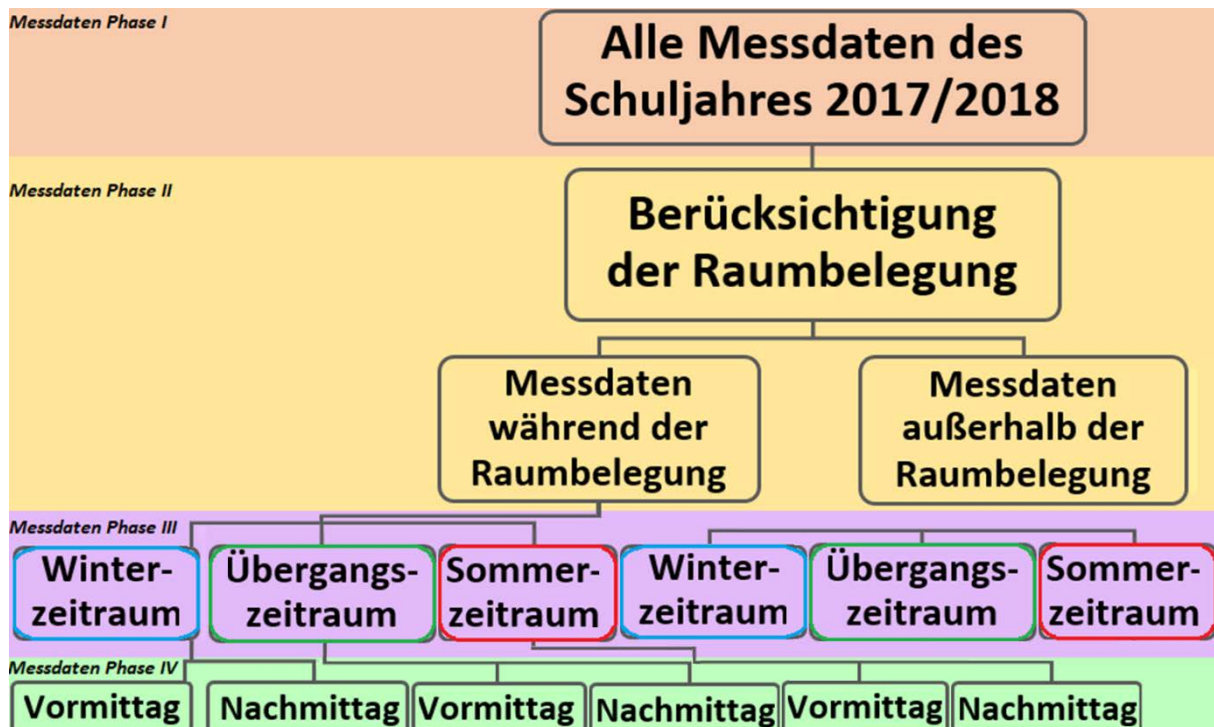


Abbildung 17 Die Filterung der Messdatenmenge wird wie bei einem ‚Trichter‘ vom Ausgangspunkt der Gesamtdaten (Phase I) bis zur Phase IV (Vormittagsbetrachtung vor 12 Uhr / Nachmittagsbetrachtung nach 12 Uhr) immer detaillierter dargestellt. Phase II beinhaltet nur diejenigen Messdaten, die zu jedem Zeitpunkt in jedem Raum und jedem Gebäude vorhanden sind. In der anschließenden Aufteilung der Datenmengen in Phase III werden die Messwerte je nach Tagesmitteltemperatur der Außenwelt zur Sommer- (rot), Übergangs- (grün) oder Winterbetrachtung (blau) gezählt. Diese Trennung mittels Außenklimadaten wird gemäß der VDI Richtlinie 4655 [29] durchgeführt: Tagesmitteltemperaturen von kleiner als 5 °C werden als Winter, zwischen 5 °C bis 15 °C als Übergang und größer als 15 °C als Sommer definiert [22]. (eigene Darstellung)

Die nächsten Abschnitte beschreiben die in der Abbildung 17 genannten vier Phasen:

- Phase I = der Ausgangspunkt betrifft alle Messdaten im Schuljahr 2017 / 2018

Es wurde ein einheitlicher Auswertungszeitraum für jedes Gebäude festgelegt, welcher sich vom 01.09.2017 bis zum 30.06.2018 (Schuljahr 2017 / 2018) erstreckt, d.h. die Zeitpunkte, zu denen die Klassenräume belegt und unbelegt sind.

Die jeweiligen Messwerte des Betrachtungszeitraumes werden eingelesen und dahingehend gekürzt (Filterung), sodass zu jedem Zeitpunkt jedes der drei Gebäude (GRG 7, BRG 15, BRG 16) und jeder Raum Messwerte besitzt. Dabei gilt es zu beachten, dass der Trogsystemraum im GRG 7 nur für die Periode vom 04.04.2018 bis zum Ende des Schuljahres Messwerte aufweist. Durch diese Mitberücksichtigung bei der Filterung würde ein neuer Betrachtungszeitraum von geringerem Ausmaß entstehen. Um dies zu vermeiden wird der Trogsystemraum des GRG 7 nicht in der Gesamtfilterung berücksichtigt werden, wie in Abbildung 17 / Phase I ersichtlich ist.

In den Einzelnachweisen der Raumauswertungen in Kapitel 6 wird der Trogsystemraum vom GRG 7 miteinbezogen.

- Phase II = Berücksichtigung der Raumbellegung

In der Betrachtung der Auswertung, welche den Einfluss der Begrünung auf das Raumklima in Schulen untersucht, sind die Zeiten maßgebend, in denen sich Menschen in den Klassenräumen befinden. Dies wird durch die Implementierung der Belegungspläne, welche im Anhang (siehe Tab. A. 4 GRG 7, Tab. A. 6 BRG 15 und Tab. A. 8 BRG 16) einsehbar sind, berücksichtigt. Des Weiteren werden bei dieser Betrachtung sowohl die Ferienzeiten als auch die Wochenenden mitberücksichtigt.

Ferner werden die Messdaten außerhalb der Raumbellegung der untersuchten Klassenräume für spätere Auswertungen benötigt (siehe Kapitel 6.3).

- Phase III = Außenklimatrennung der Messdaten in Winter-, Übergangs- oder Sommerzeiträume. Die gewählte Arbeitsweise basiert auf dem Vorgehen der Forschungsinitiative „Zukunft Bau“ [22].

Im nächsten Schritt werden die belegten Messdaten aus der Phase II mittels Tagesmittelwerten des Außenklimas in unterschiedliche Zeiträume (Sommer-, Übergangs- oder Winterzeitraum) [22] aufgeteilt.

Die Tagesdurchschnittstemperatur wird durch den Mittelwert der Temperatur innerhalb eines ganzen Tages (24 h) bestimmt. Diese Werte werden dann, unabhängig vom chronologischen Zusammenhang, dem Jahreszeitraum entsprechend (Sommer, Übergangszeit und Winter) zugeordnet. Die Zuteilung, ob der

Tag ein Sommer-, ein Übergangs- oder ein Wintertag ist, kann in der Abbildung 18 nachvollzogen werden. Im Anhang ist ein Diagramm der Außentemperatur je Kalenderwoche eingefügt, welches zusätzlich die Ferientage beinhaltet (siehe Abb. A. 1, Abb. A. 2).

Gemäß der VDI Richtlinie 4655 [29] wird der Winter (blau) mit Außentemperaturen kleiner als 5 °C definiert, die Außentemperaturen von 5 °C bis 15 °C sind als Übergangszeit (grün) und die Außentemperaturen über 15 °C sind als Sommer (rot) festgelegt. Die Außenklimadaten / Messwerte werden mittels der im Kapitel 4 beschriebenen Außensensoren bezogen, welche die relative Luftfeuchte in % sowie die Temperatur in °C und Luftdruck in hPa messen.

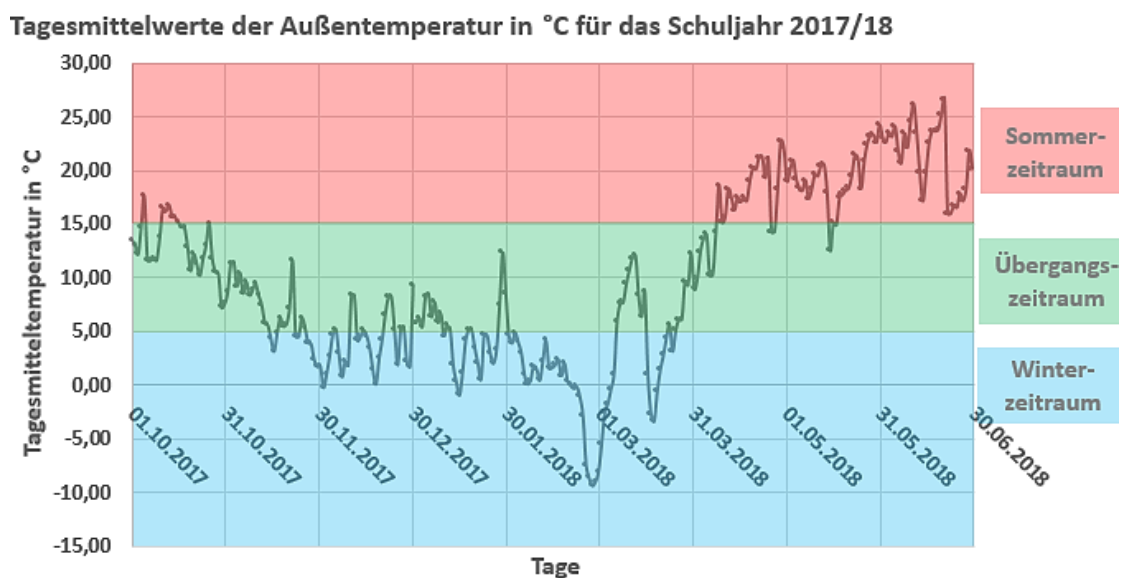


Abbildung 18 Außenklima des Schuljahres 2017 / 2018 mit Tagesmittelwerten der Außentemperatur in °C je Tag und Aufteilung gemäß der VDI Richtlinie 4655 [29] Die gewählte Arbeitsweise basiert auf dem Vorgehen der Forschungsinitiative „Zukunft Bau“ [22]. (eigene Darstellung)

- Phase IV = Trennung in Vormittags- und Nachmittagsbetrachtungszeitraum

Diese zusätzliche Trennung wurde vorgenommen, um den Einfluss der Sonneneinstrahlung vor und nach 12 Uhr festzuhalten.

Durch die Trennung der Messdaten in ‚vor 12 Uhr‘ und ‚nach 12 Uhr‘ wird der Einfluss der Sonneneinstrahlung offensichtlicher, denn am Vormittag ist das Gebäude noch durch die Nacht abgekühlt. Das Gebäude speichert im Laufe des Tages die Strahlungsenergie der Sonne. Bessere (im Sinne von ‚behaglichere‘) Ergebnisse können erzielt werden, bzw. ein besseres Behaglichkeitsempfinden ist zu erwarten, wenn die Schulstunden vormittags stattfinden. Darüber hinaus kann gerade im Sommer ein nutzerabhängiges Verhalten beobachtet werden. Hier wird der Einfluss des Messzeitpunktes vor und nach 12 Uhr besonders deutlich. Durch das Öffnen von

Fenstern und / oder Verschattungen durch Rollläden, welche das Raumklima beeinflussen, wird speziell im Sommer das Erreichen einer besseren Behaglichkeit erschwert.

Die Messdatenmenge, welche aus den vorausgehenden Filterungsphasen resultiert, wird unterschiedlichen Analysen und Auswertungen unterzogen. In den folgenden Abschnitten ist der Begriff ‚weites Behaglichkeitsfeld‘ gleichbedeutend mit dem ‚behaglichen‘ und dem ‚noch behaglichen‘ Bereich. Ferner betrifft das ‚enge Behaglichkeitsfeld‘ nur die Betrachtung des ‚behaglichen Bereiches‘.

5.2 Auswertungsinformationen je Gebäude

In diesem Kapitel werden spezifische Informationen bezüglich der einzelnen Gebäude hinsichtlich deren Auswertung gegeben. Diese beinhalten relevante Erläuterungen, welche zum besseren Verständnis der Auswertungen und der späteren Diskussion der Ergebnisse nützlich sind.

5.2.1 GRG 7

Allgemeine Information zum GRG 7 (siehe Tabelle 1) sowie eine Ansicht des Gebäudes (siehe Abbildung 7), Grundrisse (siehe Abbildung 9) und Bilder der Klassenräume (Abbildung 8) können im entsprechenden Kapitel 3.1 nachgelesen werden.

Hier ist zu beachten, dass die Messdaten des Biologieraumes (= Trogsystemraum) erst ab dem 04.04.2018 um 14:21 verwendbar sind. Es wurde entschieden, den Trogsystemraum bis zum 04.04.2018 um 14:21 für die Filterung auszuschließen, d.h. die Daten erst ab diesem Zeitpunkt mit in die Filterung einfließen zu lassen. Dies erklärt, warum der Trogsystemraum des GRG 7 wesentlich weniger Messwerte hat, als die beiden anderen Räume im GRG 7 und im Vergleich zu den Biologieräumen des BRG 15 und des BRG 16. In der Auswertung wird diese Begebenheit zu berücksichtigen sein.

Für die spätere Auswertung der CO₂-Messdaten des GRG 7 können nur die Messwerte des Vliessystemraumes benutzt werden (Betrachtungszeitraum des Schuljahres 2017 / 2018). Anschließend erfolgte eine Filterung mit den belegten Daten wie im Kapitel 5 (Phase II) beschrieben. Die entsprechenden Messwerte können in Kapitel 7.1 in der Abbildung 37 eingesehen werden.

5.2.2 BRG 15

Bei den im BRG 15 untersuchten Klassenzimmern handelt es sich um einen Neubau mit Lüftungsanlage (siehe Tabelle 1). Die Ansicht des Gebäudes und der untersuchten Klassen sowie die dazugehörigen Skizzen der jeweiligen Klassenzimmer sind im Kapitel 3.2 (siehe Abbildung 10 bis Abbildung 12) zu finden.

Die Orientierung der Fensterfronten in den einzelnen Klassenräumen im BRG 15 stellen eine Besonderheit dar, insofern diese Ausrichtung einen Einfluss unter anderem auf das Verhalten des Nutzers, die Raumlufttemperatur und auf die Wärmeentwicklung im Raum ausübt [30]. Bei der Analyse der einzelnen Auswertungen könnte dies ein maßgeblicher Faktor sein.

Im BRG 15 hat der Biologieraum eine südwestliche Orientierung und die beiden anderen Räume (Referenzklasse und Vliessystemraum) haben eine nordwestliche Orientierung. Dies bedeutet, dass eine höhere solare Strahlung im Trogsystemraum vorhanden ist.

Unterdessen ist festzuhalten, dass insbesondere nach Westen und Osten orientierte Fenster ein Überhitzungsproblem darstellen [30].

Bei der Untersuchung der CO₂-Daten des BRG 15 ist festzuhalten, dass in diesem Gebäude zumindest immer einer der beiden Messsensoren je Raum Messergebnisse geliefert hat, welche dann einer späteren Filterung unterzogen werden, wie es im Kapitel 5 (Phase II) beschrieben wird. Die Messwerte befinden sich in der Abbildung 38 (siehe Kapitel 7.1).

5.2.3 BRG 16

Bei den im BRG 16 untersuchten Klassenzimmern handelt es sich um einen neugebauten Zubau ohne Lüftungsanlage (siehe Tabelle 1). Die Ansicht des Gebäudes und der untersuchten Klassen sowie dazugehörige Skizzen der jeweiligen Klassenzimmer sind im Kapitel 3.3 (siehe Abbildung 13 bis Abbildung 15) zu finden. Des Weiteren ist hier zu erwähnen, dass sich alle drei Klassenzimmer im Erdgeschoss befinden und alle drei die gleiche Himmelsrichtung haben. Im BRG 16 sind alle CO₂-Messsensoren funktionstüchtig und können somit die Messdaten für die spätere Filterung liefern, welche im Kapitel 5 (Phase II) beschrieben wurde. Die Messwerte können in der Abbildung 39 (siehe Kapitel 7.1) nachgelesen werden.

In den folgenden Kapiteln (siehe Kapitel 6 und Kapitel 7) werden die Ergebnisse bezüglich den unterschiedlichen Thematiken der Behaglichkeit ausgewertet (die Auswertung der hygrothermischen Behaglichkeit und die Auswertung der CO₂-Behaglichkeit).

6 Auswertung der hygrothermischen Behaglichkeit

In diesem Kapitel werden die Auswertungen der Ergebnisse der einzelnen Gebäude behandelt. Die auswertungsspezifischen Merkmale je Gebäude können im Kapitel 5.2 nachgelesen werden. Die allgemeinen Informationen zu den Gebäuden befinden sich im Kapitel 3, während die Grundlagen und die entsprechende Literaturrecherche im Kapitel 2 aufzufinden sind. Die Methode dieser Auswertung der Messdaten erfolgte wie im Kapitel 5 beschrieben. Die Einteilung der Messdaten in die verschiedenen Phasen I bis IV wird wie im Kapitel 5.1 erklärt, durchgezogen.

Für die Auswertung der einzelnen Gebäude bezüglich der thermischen Behaglichkeit wurde zunächst ein Behaglichkeitsdiagramm angewendet (siehe Abbildung 3), welches auf Leusden und Freymark [14] beruht (siehe Abschnitt 2.1.2). Dieser Diagrammtyp wurde für die verschiedenen Filterungsschritte (Phase I bis Phase IV), für jedes Gebäude erstellt und verdeutlicht die Raumtemperatur in °C über der relativen Raumluftfeuchte in %. Des Weiteren ist die Messpunktwolke des Referenzraums in blau dargestellt, während diejenigen aus Trog- und Vliessystemraum grün gekennzeichnet sind. Ergänzend sind die Verteilungen der Häufigkeit je Behaglichkeitsfeld in % in den Diagrammen angegeben.

Das Raumklima wird maßgeblich von den Außenbedingungen, bzw. der Außentemperatur und der relativen Außenluftfeuchte bestimmt. Folglich steht die Raumluft in Abhängigkeit zur Randbedingung Außenluft. D.h. es besteht ein immerwährender Austausch zwischen der Rauminnenluft und der Außenwelt.

Durch die Betrachtung der Tagesmitteltemperatur der Außenluft und einer Einteilung in Sommer-, Übergangs- oder Winterzeitraum, wie dies in Kapitel 5 (Phase III) nachzulesen ist, wird eine Verknüpfung zwischen Innen- und Außenrandbedingungen ermöglicht. Daraufhin erfolgt die Einteilung der gesamten Messdaten in Bezug auf die entsprechenden Zeiträume (wie Sommer-, Übergangs- und Winterzeitraum).

Ferner wurde zusätzlich ein Mollier-h, x-Diagramm erstellt, welches das Verhältnis der Raumlufttemperatur zum Wassergehalt der Raumluft aufzeigt, denn der im Behaglichkeitsdiagramm verwendete Parameter ‚relative Luftfeuchte‘ ist von der Raumlufttemperatur abhängig. Das Mollier-h, x-Diagramm wurde gewählt, um eine bessere Vergleichbarkeit zwischen Raumluft und Außenluft aufzuzeigen. In dieser Arbeit wird der Luftdruck bei 1 013,25 hPa (≈ 1 bar) angenommen, was dem mittleren Luftdruck der Atmosphäre auf der Höhe des Meeres entspricht. Dieses Diagramm zeigt auf der x - Achse den Wassergehalt im Raum in g pro kg Raumluft. Auf der Ordinate befindet sich

die Raumlufttemperatur in °C. Die gekrümmten Linien / Kurven kennzeichnen die relative Luftfeuchte.

Zunächst werden die einzelnen Ergebnisse bezüglich der Thematik Behaglichkeit im Kapitel 6 beschrieben. Anschließend werden diese Ergebnisse wie folgt analysiert:

- Diskussion der Ergebnisse - Einzelbetrachtung der untersuchten Gebäude bezüglich des hygrothermischen Verhaltens im Kapitel 6.2,
- Diskussion - Vergleich der Gebäudetypen (Altbau / Neubau) im Kapitel 6.3 und
- Diskussion - Vergleich der Begrünungssystemflächen im Kapitel 6.4.

6.1 Ergebnisse

Die Ergebnisse richten sich nach dem Vorgehen der Datenverarbeitung (Einteilung der Messdaten in die verschiedenen Phasen I bis IV), welche im Kapitel 5.1 beschrieben wird. Zunächst wird auf die Thematik der Behaglichkeit in Bezug auf Temperatur und relative Luftfeuchte eingegangen (siehe betreffenden Abschnitt im Kapitel 2.1). Dies sind einige der wesentlichen Parameter bei der Bewertung der Änderung der Behaglichkeit, wie im Abschnitt 2.1.2 und 2.1.3 nachzulesen ist.

6.1.1 Messdaten der Phase I und Phase II

In der Abbildung 19, Abbildung 20 und Abbildung 21 wird einerseits in der oberen Zeile die Messdatenmenge von allen Zeiträumen wie in Phase I (siehe Abbildung 17) (d.h. Winter-, Übergangs- und Sommerzeitraum) dargestellt. Andererseits werden in der unteren Zeile dieser Abbildungen nur die Messdaten der Phase II-Filterung dargestellt, welche die belegten Messdaten verbildlichen. Im weiteren Verlauf werden ausschließlich Werte, welche zum Zeitpunkt einer Belegung gemessen wurden, detaillierter betrachtet werden.

Des Weiteren kann der Abbildung 19 entnommen werden, dass die ‚behaglichen‘ und ‚noch behaglichen‘ Zonen (= weites Behaglichkeitsfeld) des GRG 7 Referenzraumes insgesamt 66 % ausmachen, wogegen dieselbe Betrachtungsweise 62 % beim Vliessystemraum, bzw. 54,10 % beim Trogsystemraum ergibt. Der Referenzraum ist im Vergleich zu den anderen Referenzräumen der Gebäude BRG 15 und BRG 16 behaglicher und wird bei den späteren Vergleichen zwischen den einzelnen Gebäuden sowie zwischen den bereits erwähnten Räumen (Referenzraum, Trogsystemraum, Vliessystemraum) in Kapitel 6.2 berücksichtigt werden müssen.

Dies ist nicht für den BRG 15 gültig (siehe Abbildung 20). Hier weist der Referenzraum ein Gesamtergebnis von 45,7 % für beide Zonen auf, während der Trogsystemraum 41,1 % und der Vliessystemraum 58,2 % aufzeigen.

Der positive Einfluss des Begrünungssystems auf das Raumklima, bzw. der Behaglichkeitsempfindung ist im Vliessystemraum deutlich erkennbar.

Die gleiche Gesamtbetrachtung der oben genannten Zonen für den BRG 16 (siehe Abbildung 21) liefert folgende Ergebnisse: Referenzraum 73,3 %; Trogsystemraum 76,1 % und der Vliessystemraum 65,7 %.

Im BRG 15 schneidet der Trogsystemraum schlechter als der Referenzraum ab; im BRG 16 schneidet dahingegen der Vliessystemraum schlechter ab.

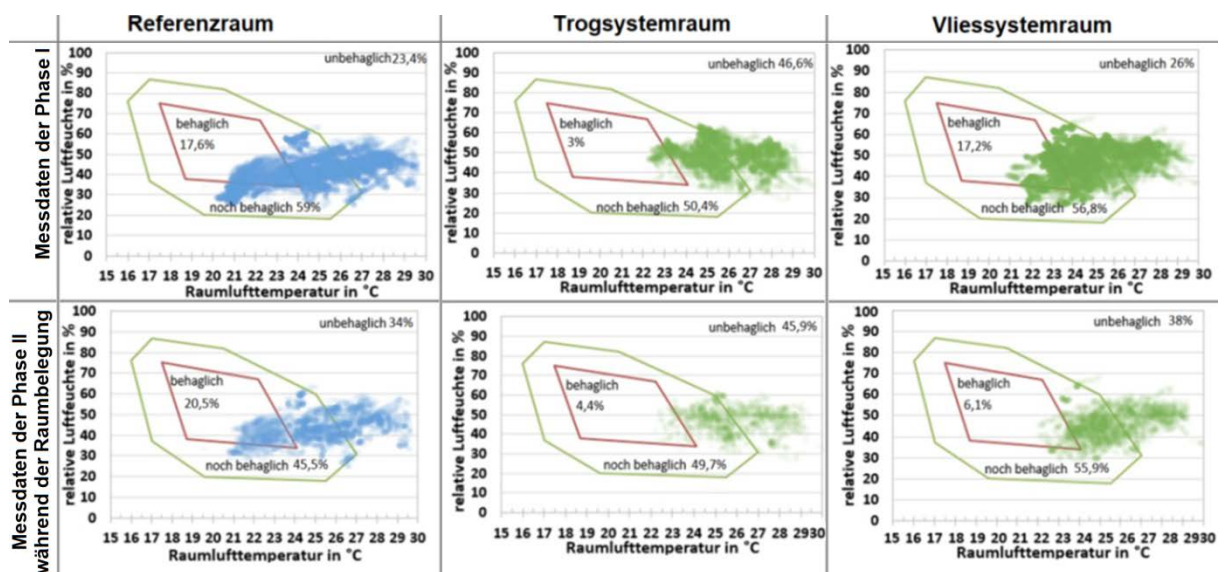


Abbildung 19 Behaglichkeitsdiagramme basierend auf Abbildung 3 für den gesamten Betrachtungszeitraum vom Schuljahr 2017 / 2018 des GRG 7, bzw. hier wurden alle Zeiträume berücksichtigt. In der oberen Zeile werden alle Daten, d.h. belegte und unbelegte Daten (Phase I), mitberücksichtigt. Ferner werden in der unteren Zeile nur die belegten Messdaten aller Zeiträume (Phase II) gezeigt. Die jeweiligen Reihen sind wie folgt aufgeteilt: links befindet sich der Referenzraum, in der Mitte der Trogsystemraum und rechts der Vliessystemraum. (eigene Darstellung)

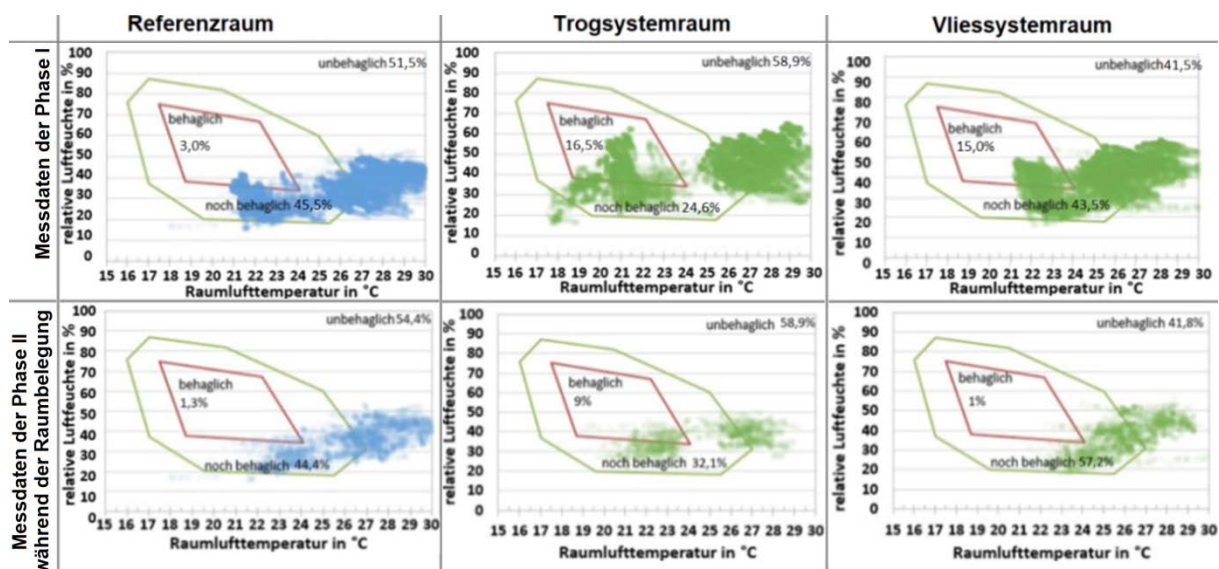


Abbildung 20 Behaglichkeitsdiagramme basierend auf Abbildung 3 für den gesamten Betrachtungszeitraum vom Schuljahr 2017 / 2018 des BRG 15 bzw. hier wurden alle Zeiträume berücksichtigt. In der oberen Zeile werden alle Daten, d.h. belegte und unbelegte Daten (Phase I), mitberücksichtigt. Ferner werden in der unteren Zeile nur die belegten Messdaten aller Zeiträume (Phase II) gezeigt. Die jeweiligen Reihen sind wie folgt aufgeteilt: links befindet sich der Referenzraum, in der Mitte der Trogssystemraum und rechts der Vliessystemraum. (eigene Darstellung)

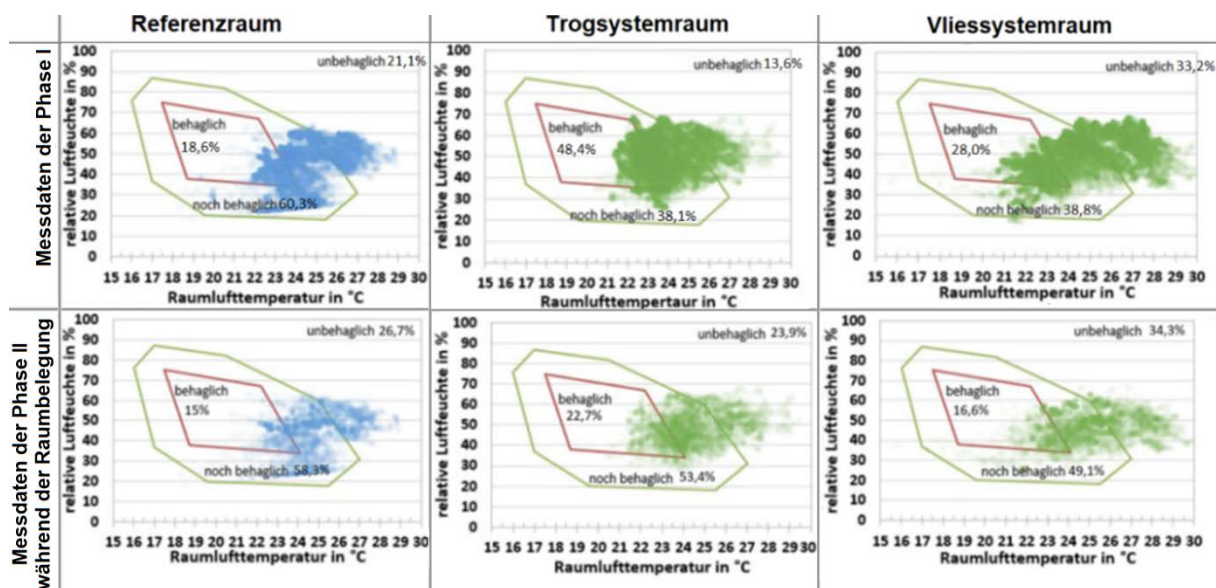


Abbildung 21 Behaglichkeitsdiagramme basierend auf Abbildung 3 für den gesamten Betrachtungszeitraum vom Schuljahr 2017 / 2018 des BRG 16 bzw. hier wurden alle Zeiträume berücksichtigt. In der oberen Zeile werden alle Daten, d.h. belegte und unbelegte Daten (Phase I), mitberücksichtigt. Ferner werden in der unteren Zeile nur die belegten Messdaten aller Zeiträume (Phase II) gezeigt. Die jeweiligen Reihen sind wie folgt aufgeteilt: links befindet sich der Referenzraum, in der Mitte der Trogssystemraum und rechts der Vliessystemraum. (eigene Darstellung)

Um endgültig festzustellen, ab welchem Zeitraum eine Verbesserung bzw. eine Verschlechterung im Vergleich zum Referenzraum stattfindet, werden die gesammelten Daten in einzelne Periodenzeiträume (Jahreszeiten) aufgeteilt, wie es in der Phase III (siehe Kapitel 5) festgelegt wurde. Im Sommer besteht durchaus die Möglichkeit einer Verschiebung der Werte außerhalb der ‚noch behaglichen‘ Zone bedingt durch die zusätzliche Feuchteabgabe der Pflanzen. Jedoch wird dies durch die Selbstregulierung relativiert, d.h. je höher die relative Raumlufffeuchte, desto niedriger ist die Feuchteabgabe der Pflanze (siehe Kapitel 2.2 / [22])

Im folgenden Kapitel wird auf die Messwerte der Phase III (siehe Kapitel 5.1) der einzelnen Gebäude (GRG 7, BRG 15, BRG 16) eingegangen werden.

6.1.2 Messdaten der Phase III

Für das Gebäude GRG 7 (siehe Abbildung 22) ist unter anderem zu erkennen, dass der Trogsystemraum im Winterzeitraum keine Messdaten hat, welches im Abschnitt 5.2.1 als Besonderheit des GRG 7 hervorgehoben wird. Außerdem wird in der Abbildung 22 ersichtlich, dass der Referenzraum ein erheblicher Anteil im ‚behaglichen‘ Bereich zu verzeichnen hat. Des Weiteren fällt beim Vergleich der begrünten Räume mit dem Referenzraum auf, dass der ‚unbehagliche‘ Bereich des Referenzraums im Winter- sowie im Übergangszeitraum am geringsten ist. Im GRG 7-Gebäude ist der Sommerzeitraum der Zeitraum mit den höchsten Anteilen im unbehaglichen Bereich.

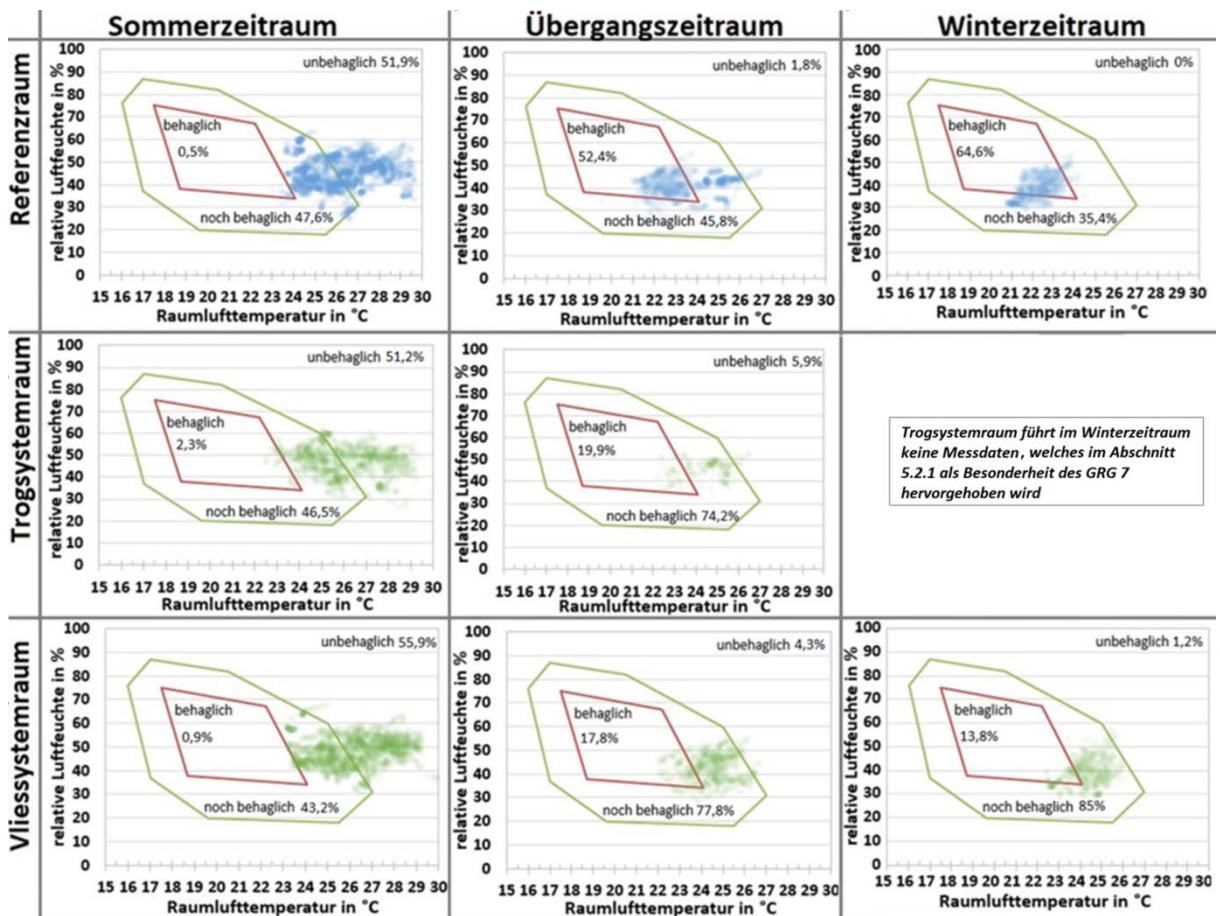


Abbildung 22 Behaglichkeitsdiagramme des GRG 7 für jeden einzelnen Zeitraum (Winter / Übergang / Sommer), wobei der Trogsystemraum im Winterzeitraum keine Messdaten führt. Dies wird im Abschnitt 5.2.1 als Besonderheit des GRG 7 hervorgehoben. Des Weiteren wurden hier nur belegte Daten betrachtet, d.h. es kommen nur Messwerte in Betracht, welche zu einem Zeitpunkt aufgenommen wurden, an dem laut Belegungsplan des entsprechenden Raumes eine Schulklasse präsent war. In der oberen Reihe der drei hintereinander folgenden Diagrammreihen ist der Referenzraum. Dann kommt der Trogsystemraum. Die dritte und letzte Reihe von oben ist der Vliessystemraum. (eigene Darstellung)

In der Abbildung 23 werden die Periodenzeiträume für das BRG 15-Gebäude dargestellt, basierend auf der Datenfilterung des Kapitels 5.1 (siehe Abbildung 17 der Phase III). Bei näherer Betrachtung, ist zu erkennen, dass für den Sommerzeitraum der Anteil des Referenzraumes am ‚unbehaglichen‘ Bereich 79,1 % beträgt, während der Trogsystemraum mit 87 % und der Vliessystemraum mit 59,3 % abschneidet.

Für den Vliessystemraum können für den angegebenen Zeitraum insgesamt behaglichere Verhältnisse festgehalten werden als dies für den Referenzraum der Fall ist. Beim Trogsystemraum ist das schlechtere Resultat gegenüber dem Referenzraum durch die erhöhte Sonneneinstrahlung zu erklären, welche mit der Südwestlichen Orientierung der Fenster zusammenhängt (siehe Abschnitt 5.2.2). Wird der Winterzeitraum derselben Betrachtung unterzogen, kann eine Verbesserung des Raumklimas hervorgehoben werden. Tatsächlich weist der Referenzraum 4 % im ‚unbehaglichen‘ Bereich auf, während der Trogsystemraum 0 % und der Vliessystemraum 1,1 % erkennen lassen. Analysiert werden diese Ergebnisse im Kapitel 6.2.

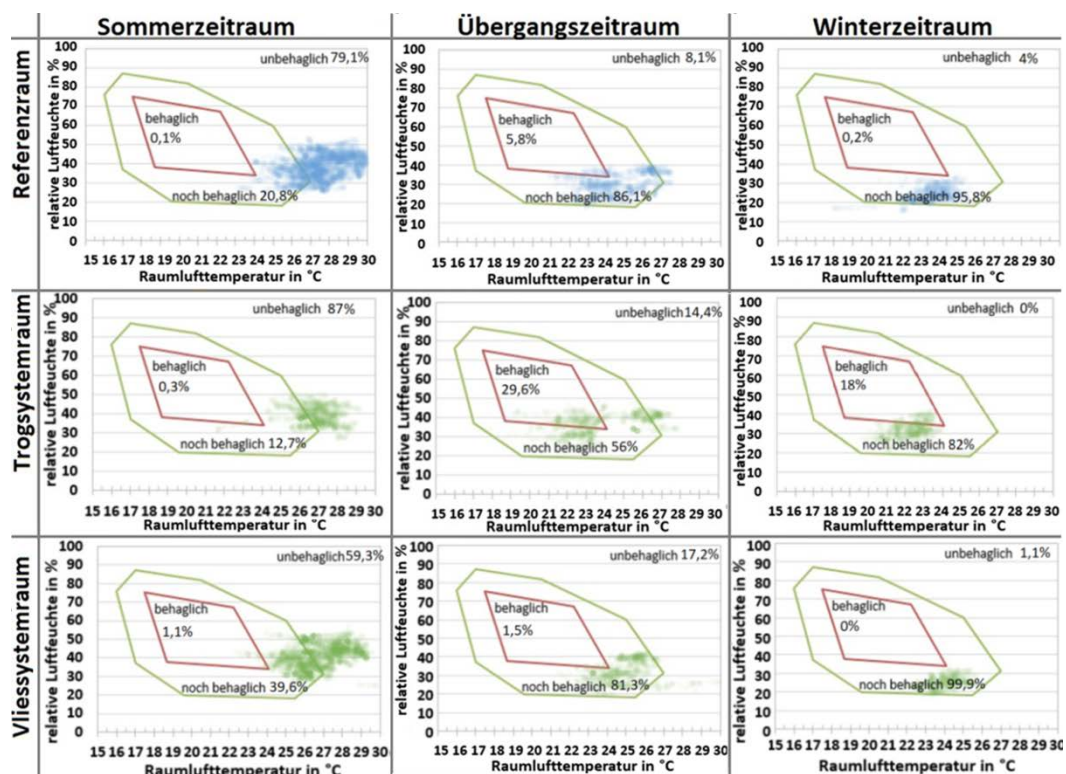


Abbildung 23 Behaglichkeitsdiagramme des BRG 15 für jeden Zeitraum (Winter / Übergang / Sommer) einzeln. Des Weiteren wurden hier nur belegte Daten betrachtet, d.h. nur Messwerte, welche zu einem Zeitpunkt aufgenommen sind an dem laut Belegungsplan des entsprechenden Raumes eine Schulklasse präsent war. In der oberen Reihe der drei hintereinander folgenden Diagrammreihen ist der Referenzraum. Dann kommt der Trogsystemraum. Die dritte und letzte Reihe von oben stellt den Vliessystemraum dar. (eigene Darstellung)

Die Abbildung 24 beinhaltet die Messdaten des BRG 16 für die Phase II gemäß Kapitel 5.1. Ferner lässt sich aus dieser Abbildung herauslesen, dass sich im Sommerzeitraum der ‚unbehagliche‘ Anteil im Referenzraum auf 41 %; im Trogsystemraum auf 36,8 % sowie im Vliessystemraum auf 52,4 % verändert.

Weiterhin lässt sich für den Winterzeitraum festhalten, dass der ‚unbehagliche‘ Anteil in den drei untersuchten Räumen einen fast identischen Wert hat, jedoch der Anteil des ‚behaglichen‘ Bereiches in den begrünten Klassenräumen im Vergleich zum Referenzraum wesentlich größer ist.

Im Neubau ohne Lüftungsanlage (BRG 16) wurde befürchtet, dass es im Sommer in den begrünten Klassen wegen der hohen Raumdichtheit zu feucht werden könnte. Im Kapitel 6.3 wird auf diese Bedenken näher eingegangen werden.

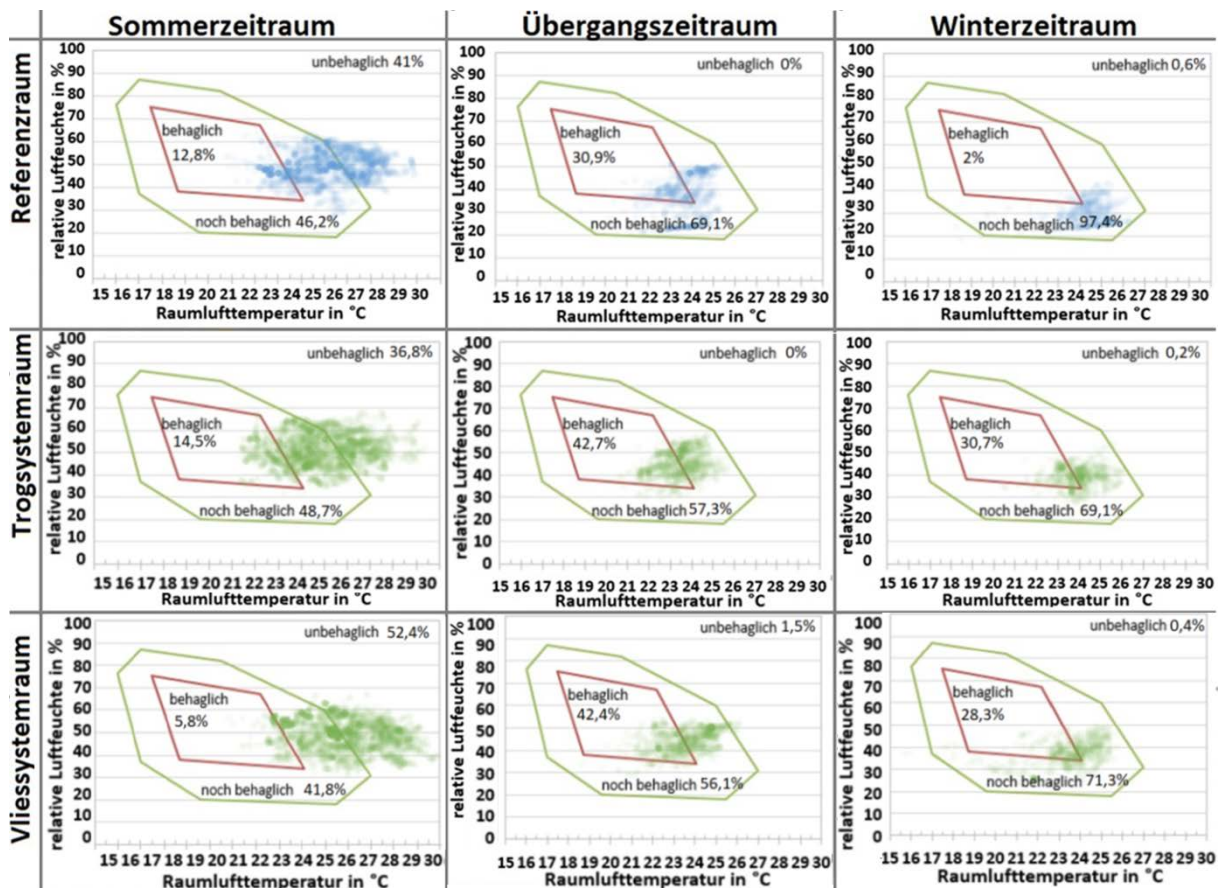


Abbildung 24 Behaglichkeitsdiagramme des BRG 16 für jeden Zeitraum (Winter / Übergang / Sommer) einzeln. Des Weiteren wurden hier nur belegte Daten betrachtet, d.h. nur Messwerte, welche zu einem Zeitpunkt aufgenommen sind an dem laut Belegungsplan des entsprechenden Raumes eine Schulklasse präsent war. In der oberen Reihe der drei hintereinander folgenden Diagrammreihen ist der Referenzraum. Dann kommt der Trogsystemraum. Die dritte und letzte Reihe von oben ist der Vliessystemraum. (eigene Darstellung)

Die Messwerte der Phase III werden in Kapitel 6.2 analysiert und diskutiert.

In den nachfolgenden Ausführungen werden die erhaltenen Ergebnisse der Phase III der einzelnen Gebäude in einem Mollier-h, x-Diagramm beschrieben. Zur besseren Übersicht werden die betreffenden Gebäude in der Abbildung 25 farblich gekennzeichnet (GRG 7 violett; BRG 15 gelb; BRG 16 orange) und einzeln dargestellt: der Referenzraum mit einem Kreuz, der Trogsystemraum mit einem Quadrat und der Vliessystemraum mit einem Dreieck. Des Weiteren handelt es sich hier um die jeweilige Visualisierung der einzelnen Mittelwerte der Messpunktewolke. Deswegen lässt sich aus diesen Diagrammen nur eine Tendenz ableiten und keine konkrete Aussage bezüglich des Behaglichkeitsempfindens.

Ferner fällt bei der Betrachtung des Wassergehalts in den Räumen auf, dass die Differenz zwischen dem Referenzraum und den begrünten Räumen im Sommer kleiner ist als im Winter. Dies ist der Selbstregulierung der Pflanzen zuzuschreiben, welche bei trockener Raumluft (wie dies im Winter der Fall ist) mehr Feuchte abgeben als in feuchteren Raumluftverhältnissen [22].

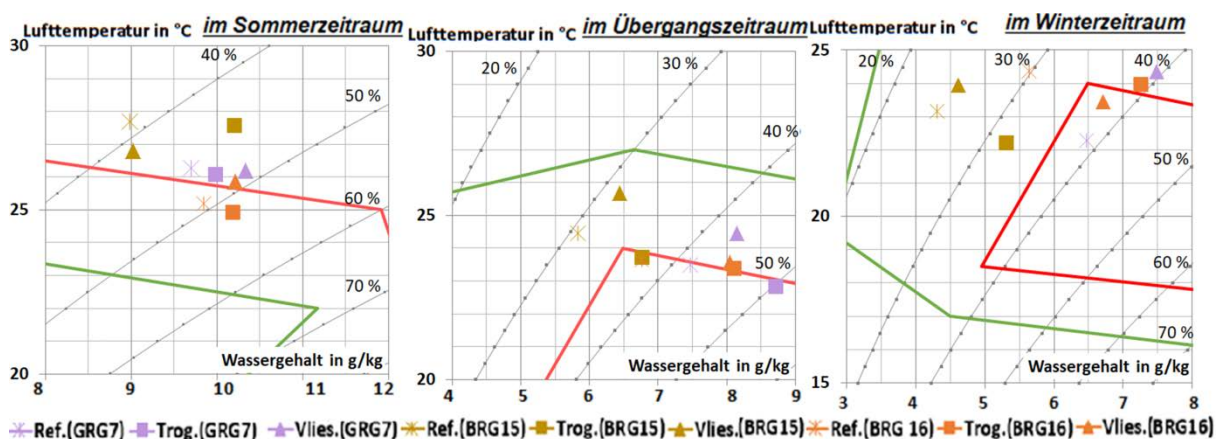


Abbildung 25 Mollier-h, x-Diagramm für den Zeitraum während der Raumbelagerung (Phase II laut Abbildung 17) bei einem Luftdruck von 1 013,25 hPa für jedes Gebäude (GRG 7=violett; BRG 15=Gelb; BRG 16= orange). Ferner wird hier die Gezeitentrennung wie in Kapitel 5.1 beschrieben durchgeführt (Phase III laut Abbildung 17): Winter (rechts), Übergang (Mitte), Sommer (links). Des Weiteren werden alle untersuchten Räume einzeln visualisiert: Referenzraum = Kreuz, Trogsystemraum = Quadrat und Vliessystemraum = Dreieck. Zudem sind die Grenzwerte (in Rot der behagliche Bereich und in Grün der noch behagliche Bereich) der Behaglichkeitsfelder laut Dentel et al [13] eingetragen. (eigene Darstellung)

- GRG 7

Dem GRG 7 (siehe Abbildung 25) ist zu entnehmen, dass in den begrünten Klassenräumen, im Gegensatz zum Referenzraum, in den jeweiligen Zeiträumen eine Steigerung des Wassergehalts in g / kg vorhanden ist. Des Weiteren lässt sich hier auch festhalten, dass der Vliessystemraum im Winterzeitraum im Gegensatz zum Referenzraum um 2,07 °C im Mittelwert wärmer ist, wobei dies nicht auf das Begrünungssystem zurückzuführen ist, sondern durch das Nutzerverhalten erklärt

werden kann. Wie bereits erwähnt, sind in dieser Winterperiode keine Werte für den Trogsystemraum vorhanden.

Im Übergangszeitraum ist der Vliessystemraum wieder um ca. 1 °C wärmer. Dies hat, wie vorhin bereits beschrieben, nicht aufgrund der Begrünung stattgefunden. Zudem ist diesem Zeitraum der Trogsystemraum um 0,64 °C kühler. Beide Räume haben eine gesteigerte absolute Feuchte innerhalb des Raumes in Relation zum Referenzraum.

Im Sommerzeitraum ist in den begrünten Klassenräumen eine ca. 0,1 °C kühlere Raumtemperatur im Mittel zu verzeichnen.

- BRG 15

Im BRG 15 (siehe Abbildung 25) fällt auf, dass der Trogsystemraum im Vergleich zum Referenzraum im Mittel eine verbesserte Situation aufweist aufgrund des zusätzlichen Feuchteintrags der Begrünungen. Außer im Sommer besteht für diesen Raum, im Vergleich zu den beiden anderen Räumen, eine deutlich andere Situation aufgrund der bereits erwähnten Fensterorientierung. Die korrelierende solare Einstrahlung liefert hierfür eine plausible Erklärung.

- BRG 16

Im BRG 16 (siehe Abbildung 25) kann festgestellt werden, dass im Winterzeitraum die begrünten Räume in Relation zum Referenzraum eine Verbesserung bezüglich des Behaglichkeitsempfindens aufgrund des Feuchteintrags haben.

Im Übergangszeitraum ergibt sich eine ähnliche Situation aufgrund der zusätzlichen Feuchte der Begrünungssysteme.

Im Sommerzeitraum hingegen stellt sich die Frage der Überfeuchtung, dies wird in Kapitel 6.3 analysiert.

Auf der Grundlage der vorangegangenen Ergebnisse wird die Diskussion in den angehenden Kapiteln hinsichtlich der unterschiedlichen Thematiken geführt. Dies betrifft die Diskussion der Ergebnisse - Einzelbetrachtung der untersuchten Gebäude bezüglich des hygrothermischen Verhaltens (siehe Kapitel 6.2), die Diskussion - Vergleich der Gebäudetypen (Altbau / Neubau) (siehe Kapitel 6.3) sowie die Diskussion - Vergleich der Begrünungssystemflächen (siehe Kapitel 6.4).

6.1.3 Messdaten der Phase IV

Eine zusätzliche Detailansicht wurde durch die Phase IV (siehe Kapitel 5.1) ermöglicht, indem die Messdaten der Abbildung 26 in ‚Vormittag‘ und ‚Nachmittag‘ aufgeteilt wurden um die Unterschiede in den Messergebnissen durch direkten Vergleich aufzuzeigen.

Es ist festzustellen, dass am Nachmittag weniger Messwerte im ‚unbehaglichen‘ Bereich vorzufinden sind als dies am Vormittag generell der Fall für den Referenzraum ist. Anders ist die Situation für den Trogsystemraum. Hier besitzt der Vormittag in der Sommerzeit die ‚behaglicheren‘ Werte. In der Übergangszeit hat der Vormittag für diesen Raum mit 73 % einen größeren Anteil im engeren Behaglichkeitsfeldes als der Nachmittag (43 %). Im Vliessystemraum weisen die Messwerte der Sommer- und Winterzeit eine gewisse Ähnlichkeit auf, allerdings findet in der Übergangszeit eine minimale Umverteilung zugunsten des ‚behaglichen‘ Bereiches statt.

In der der Abbildung 27 wird ersichtlich, dass der Vormittag weniger ‚unbehaglich‘ als der Nachmittag ist. Ferner ist in der Sommerzeitraumbetrachtung festzuhalten, dass obwohl der Referenzraum und der Vliessystemraum eine identische Fensterorientierung sowie gleiche Verglasungsanteile im Raum haben, der Vliessystemraum jedoch bessere (im Sinne von ‚behaglicheren‘) Ergebnisse vorzuweisen hat als der Referenzraum.

Im Winterzeitraum ist zu erkennen, dass die beiden Begrünungssysteme, im Vergleich zum Referenzraum, eine Verbesserung der Behaglichkeit bewirken.

In der Abbildung 28 werden nur die Vormittags - Daten des BRG 16 betrachtet. Hier wird offensichtlich, dass mit Ausnahme der Sommerzeit kaum Anteile im ‚unbehaglichen‘ Bereich für die einzelnen untersuchten Räume zu finden sind. Ansonsten ist im Sommer der Trogsystemraum am Vormittag weniger ‚unbehaglich‘ als der Referenzraum oder der Vliessystemraum. Im Allgemeinen hat der Vliessystemraum die Sommerperiode betreffend und im Gegensatz zu den beiden anderen Räumen, die ungünstigsten Ergebnisse.

Weitere Analysen der Ergebnisse erfolgen in den entsprechenden Kapiteln (siehe Kapitel 6.2, Kapitel 6.3 und Kapitel 6.4).

Im Winterzeitraum ist zu erkennen, dass die beiden Begrünungssysteme, im Vergleich zum Referenzraum, eine Verbesserung der Behaglichkeit bewirken.

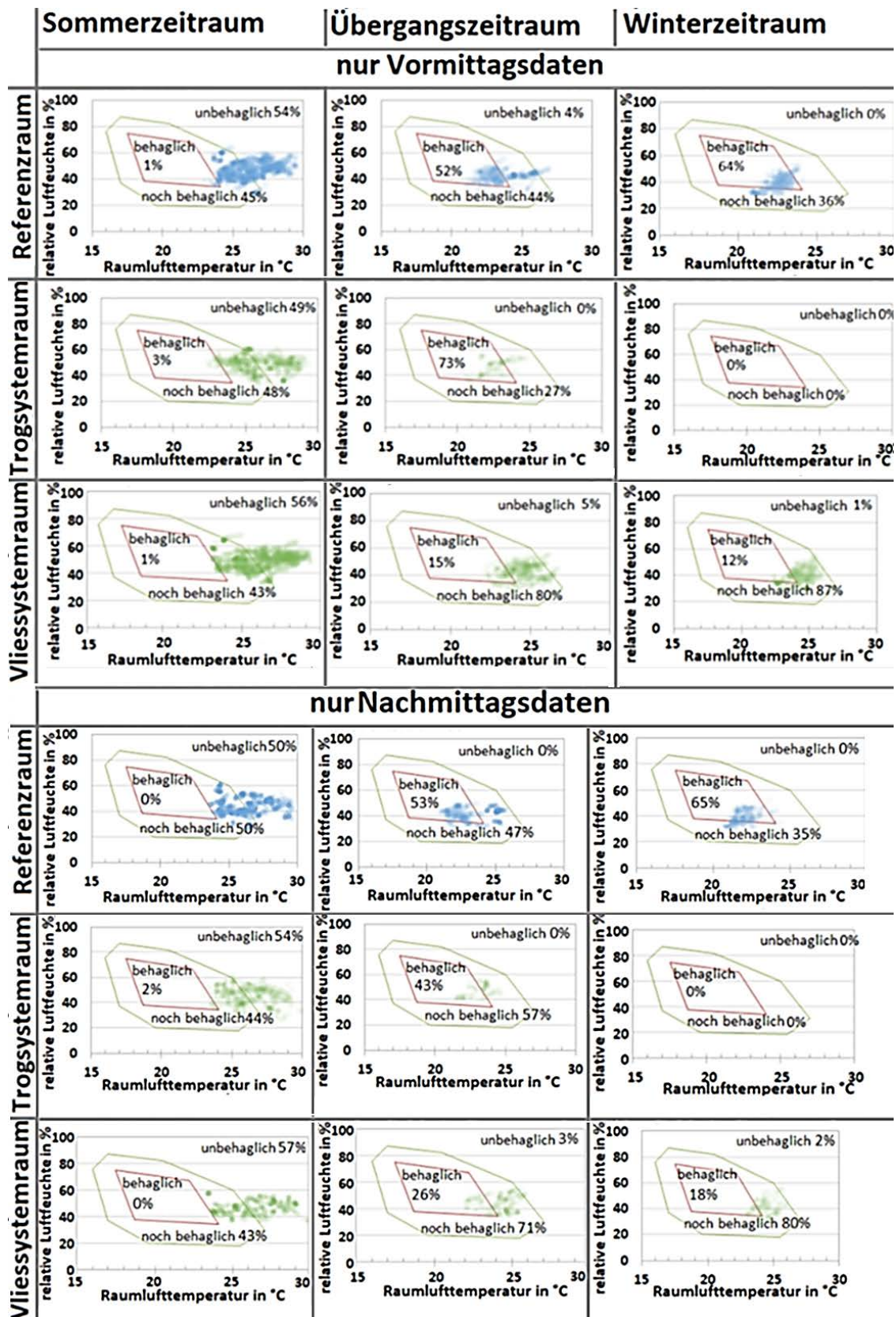


Abbildung 26 Die Abbildung zeigt die jeweiligen Betrachtungszeiträume wie Sommer-, Übergangs- und Winterzeitraum in den untersuchten Klassenräumen (Vliessystem-, Trogssystem- und Referenzraum). Des Weiteren wurde nur die Datenmenge aus der Phase IV, d.h. Vormittag- und Nachmittagsbetrachtung des GRG 7, berücksichtigt und in einem Behaglichkeitsdiagramm verdeutlicht (eigene Darstellung).

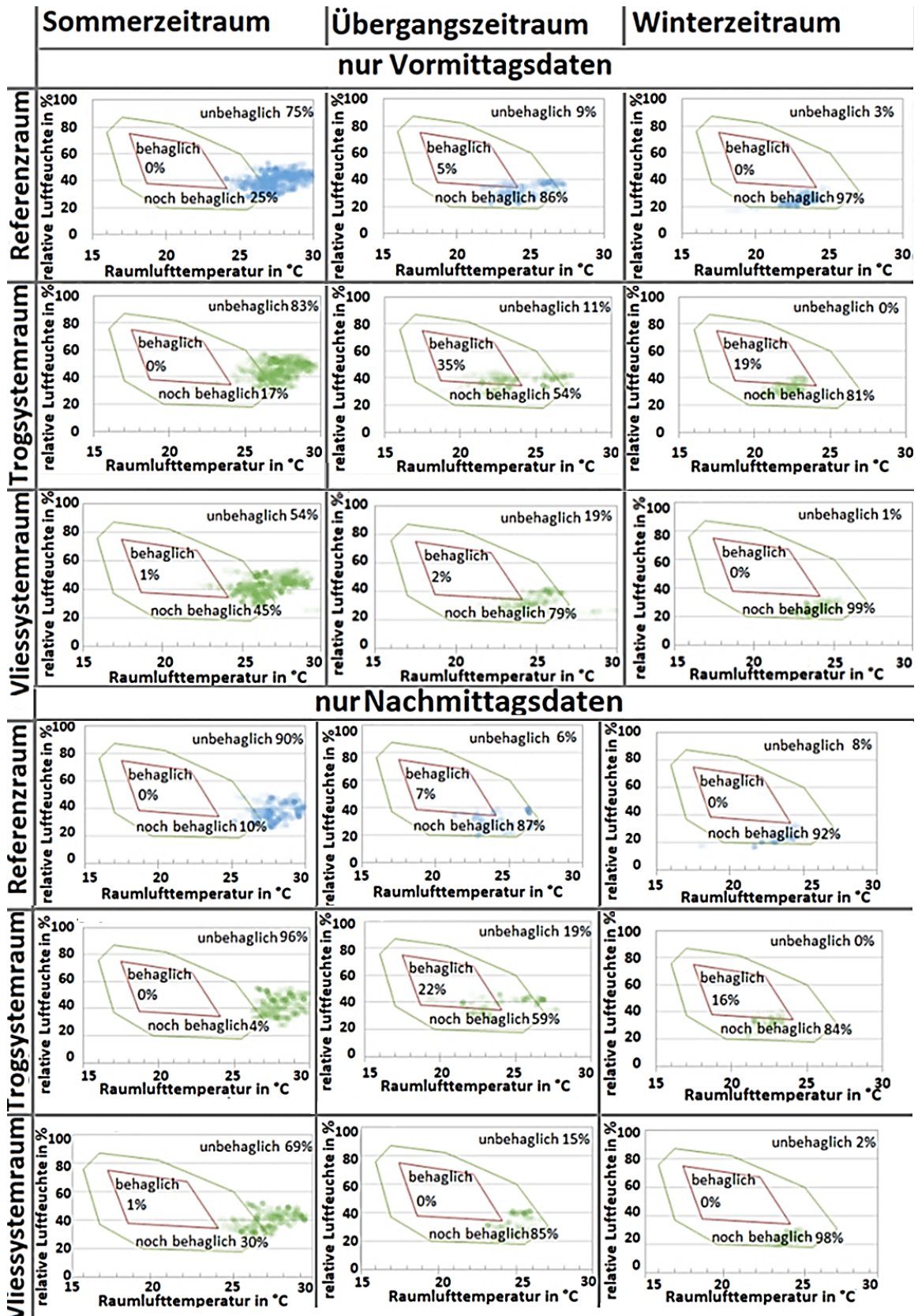


Abbildung 27 Die Abbildung zeigt die jeweiligen Betrachtungszeiträume wie Sommer-, Übergangs- und Winterzeitraum in den untersuchten Klassenräumen (Vliesystem-, Trogssystem- und Referenzraum). Des Weiteren wurde nur die Datenmenge aus der Phase IV, d.h. Vormittag- und Nachmittagsbetrachtung des BRG 15 berücksichtigt und in einem Behaglichkeitsdiagramm verdeutlicht (eigene Darstellung).

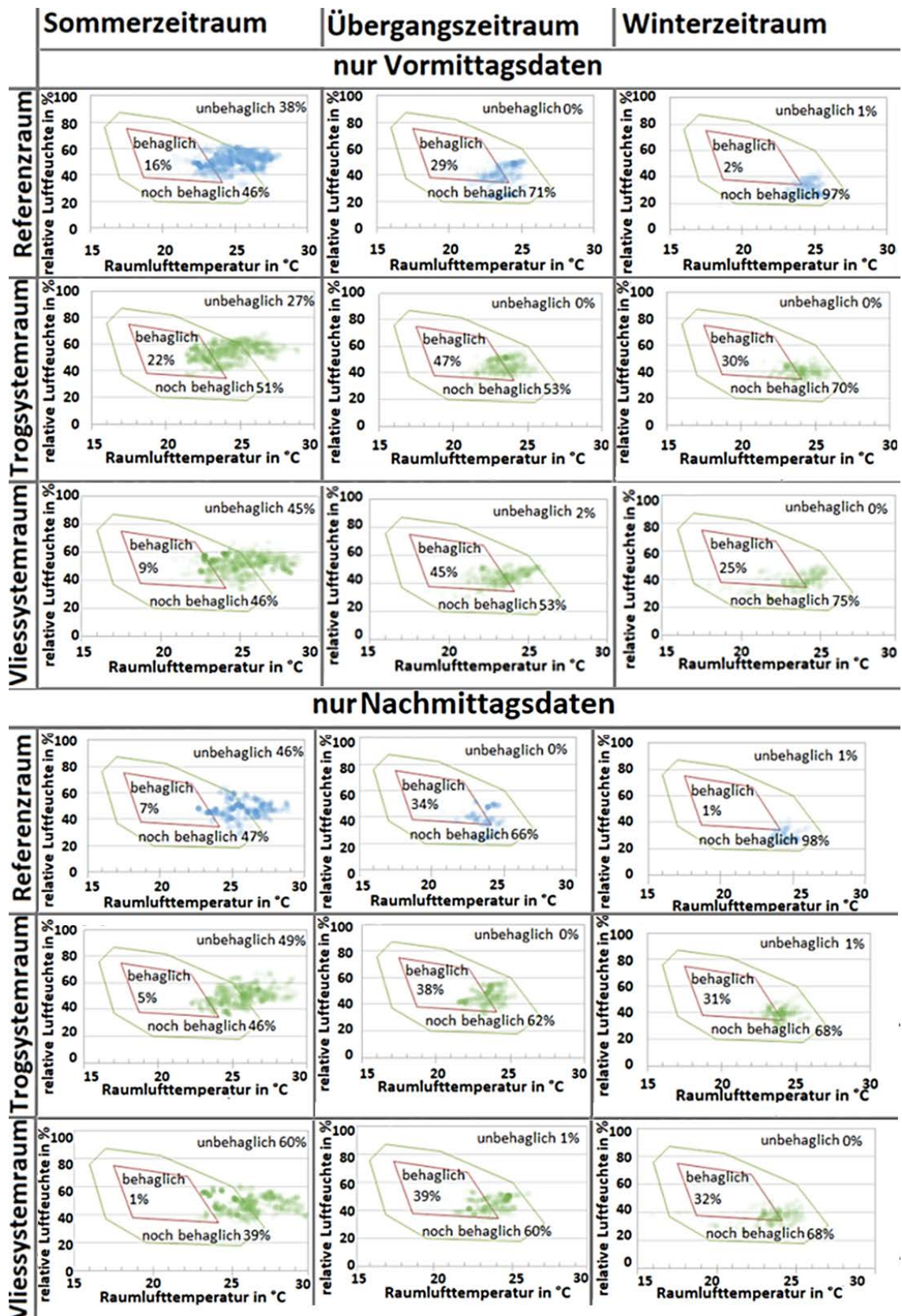


Abbildung 28 Die Abbildung zeigt die jeweiligen Betrachtungszeiträume wie Sommer-, Übergangs- und Winterzeitraum in den untersuchten Klassenräumen (Vliesystem-, Trogssystem- und Referenzraum). Des Weiteren wurde nur die Datenmenge aus der Phase IV, d.h. Vormittag- und Nachmittagsbetrachtung des BRG 16 berücksichtigt und in einem Behaglichkeitsdiagramm verdeutlicht (eigene Darstellung).

Im Anschluss wird die Vor- und Nachmittagsbetrachtung für die verschiedenen Gebäude behandelt, welche in den folgenden Abbildungen (siehe Abbildung 29 und Abbildung 30) einzeln ersichtlich sind. Beim Vergleich beider Abbildungen (siehe Abbildung 29 und Abbildung 30) sieht man die Nachmittägliche Tendenz der Aufwärmung in den untersuchten Räumen.

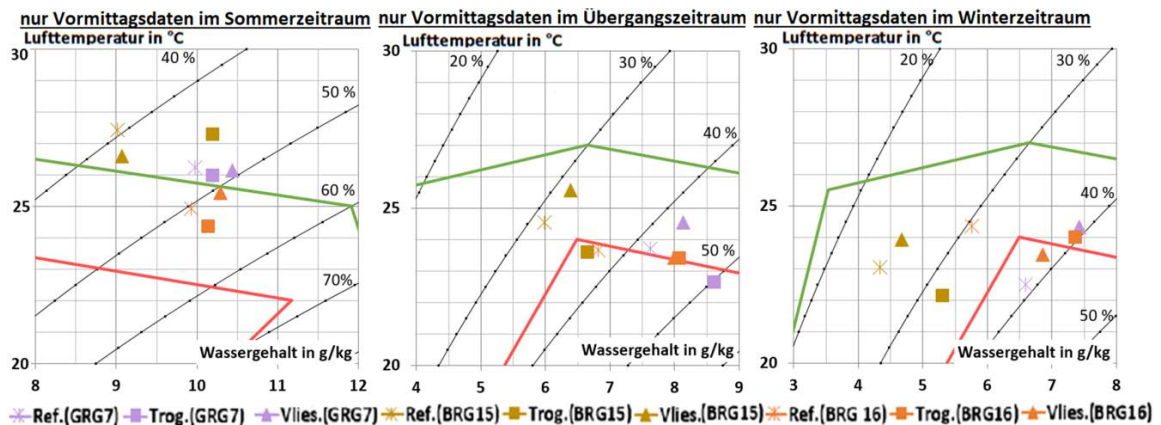


Abbildung 29 Detaillierte Betrachtung des Vormittags (bis 12 Uhr) im Mollier-h, x-Diagramm für alle Gebäude und entsprechende untersuchte Räume je Gezeitenperiode: Winter (rechts), Übergang (Mitte), Sommer (links). Dieses Diagramm zeigt auf der x-Achse den Wassergehalt im Raum in g pro kg Raumluft. Auf der Ordinate befindet sich die Raumlufttemperatur in °C. Die gekrümmten Linien / Kurven kennzeichnen die relative Luftfeuchte. (eigene Darstellung)

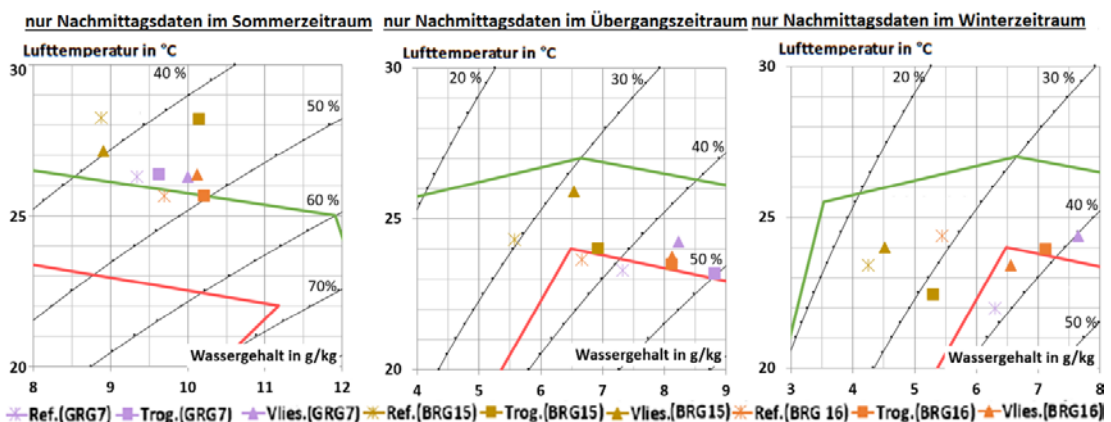


Abbildung 30 Detaillierte Betrachtung des Nachmittags (ab 12 Uhr) im Mollier-h, x-Diagramm für alle Gebäude und entsprechende untersuchte Räume je Gezeitenperiode: Winter (rechts), Übergang (Mitte), Sommer (links). Dieses Diagramm zeigt auf der x-Achse den Wassergehalt im Raum in g pro kg Raumluft. Auf der Ordinate befindet sich die Raumlufttemperatur in °C. Die gekrümmten Linien / Kurven kennzeichnen die relative Luftfeuchte. (eigene Darstellung)

6.2 Diskussion der Ergebnisse - Einzelbetrachtung der untersuchten Gebäude bezüglich des hygrothermischen Verhaltens

Dieses Kapitel bezieht sich auf die Ergebnisse des Kapitels 6.1 und legt ein Bewertungssystem fest, welches für jedes Gebäude, jeden Raum sowie für jeden Betrachtungszeitraum angewendet wird. Zu diesem Zweck wurde eine gewichtete Bewertungstabelle für die einzelnen Behaglichkeitsfelder ausgearbeitet. Die Kriterien ‚behaglich‘, ‚noch behaglich‘ und ‚unbehaglich‘ werden wie folgt gewichtet: Kategorie ‚behaglich‘ mit 1; Kategorie ‚noch behaglich‘ mit 3 sowie Kategorie ‚unbehaglich‘ mit 5.

Diese Wichtungen werden mit den jeweiligen Anteilen in den Behaglichkeitsfeldern multipliziert und summiert. Diese daraus entstehende Note geht von 1 ‚behaglich‘ bis 5 ‚unbehaglich‘, je nach Aufteilung der Anteile. Die erhaltenen Noten werden in der Tabelle 6 verdeutlicht und basieren auf den detaillierten Tabellen welche im Anhang eingesehen werden können (siehe Anhang Tab. A. 5, Tab. A. 7 und Tab. A. 9).

Tabelle 6 Übersicht der Benotungen je Gebäude auf der Grundlage der festgelegten Wichtung je Behaglichkeitsfeld. Zusätzlich werden alle untersuchten Klassenräume einzeln bewertet. Ferner werden hier die einzelnen Betrachtungszeiträume von Phase I bis Phase IV berücksichtigt. Die Kriterien ‚behaglich‘, ‚noch behaglich‘ und ‚unbehaglich‘ werden wie folgt gewichtet Kategorie ‚behaglich‘ mit 1; Kategorie ‚noch behaglich‘ mit 3 sowie Kategorie ‚unbehaglich‘ mit 5. Diese Wichtungen werden mit den jeweiligen Anteilen in den Behaglichkeitsfeldern multipliziert und summiert. Diese daraus entstehende Note geht von 1 ‚behaglich‘ bis 5 ‚unbehaglich‘, je nach Aufteilung der Anteile. Für detaillierte Informationen die verschiedenen Phasen betreffend wird auf Abbildung 17 und Kapitel 5.1 verwiesen. (eigene Darstellung)

Übersicht der Benotung je Gebäude		GRG 7			BRG 15			BRG 16		
		Ref.	Trog.	Vlies.	Ref.	Trog.	Vlies.	Ref.	Trog.	Vlies.
jeweiliger berücksichtigter Zeitraum und Datenmenge		Ref.	Trog.	Vlies.	Ref.	Trog.	Vlies.	Ref.	Trog.	Vlies.
Alle Zeiträume und alle Daten (Phase I)		3.1	3.9	3.2	4.0	3.9	3.5	3.0	2.5	3.1
Alle Zeiträume und nur belegte Daten (Phase II)		3.3	3.8	3.6	4.1	4.0	3.8	3.2	3.0	3.4
Alle Zeiträume und nur unbelegte Daten (Phase II)		3.1	3.9	3.1	4.0	3.8	3.5	3.0	2.4	3.1
nur Sommerzeitraum und nur belegte Daten (Phase III)		4.0	4.0	4.1	4.6	4.7	4.2	3.6	3.4	3.9
nur Übergangszeitraum und nur belegte Daten (Phase III)		2.0	2.7	2.7	3.0	2.7	3.3	2.4	2.1	2.2
nur Winterzeitraum und nur belegte Daten (Phase III)		1.7	0.0	2.7	3.1	2.6	3.1	3.0	2.4	2.4
Vormittag	nur Sommerzeitraum und nur belegte Daten (Phase IV)	4.1	3.9	4.1	4.5	3.3	4.1	3.4	3.1	3.7
	nur Übergangszeitraum und nur belegte Daten (Phase IV)	2.0	1.5	2.8	3.1	2.5	3.3	2.4	2.1	2.1
	nur Winterzeitraum und nur belegte Daten (Phase IV)	1.7	0.0	2.8	3.1	2.6	3.0	3.0	2.4	2.5
Nachmittag	nur Sommerzeitraum und nur belegte Daten (Phase IV)	4.0	4.0	4.1	4.8	4.9	4.4	3.8	3.9	4.2
	nur Übergangszeitraum und nur belegte Daten (Phase IV)	1.9	2.1	2.5	3.0	2.9	3.3	2.3	2.2	2.2
	nur Winterzeitraum und nur belegte Daten (Phase IV)	1.7	0.0	2.7	3.2	2.7	3.0	3.0	2.4	2.4

Im Folgenden werden die Auswirkungen der Begrünungsmaßnahmen auf das hygrothermische Verhalten im Innenraum besprochen. Diese können mittels der in Tabelle 6 ersichtlichen Bewertungen vollzogen werden.

Während die Phase I alle Messdaten enthält, werden die Messwerte der Phase II in zwei Kategorien aufgeteilt: einerseits die Daten, welche während einer Raumbelegung gemessen wurden (Kategorie 1), andererseits diejenigen welche außerhalb der Raumbelegung zusammengetragen wurden (Kategorie 2). Die Benotung der Messdaten der Kategorie 2 (Phase II) fällt ähnlich aus wie die Benotung der Messdaten der Phase I. Dies erklärt sich dadurch, dass wesentlich mehr Messwerte in diesem Zeitraum vorhanden sind als dies im Zeitraum für die Kategorie 1 (Raumbelegung) der Fall ist. Diese Messdaten (Phase II / Kategorie 1) hängen unter anderem vom Nutzer und dessen Verhalten im Raum ab, wie z.B. dem Lüftungsverhalten.

Sowohl die Messwerte der Phase I als auch diejenigen der Kategorie 2 (Phase II) fallen in den meisten Fällen besser aus oder erzielen zumindest eine identische Benotung im Vergleich zu den Messdaten der Kategorie 1 (Phase II). Dieser Unterschied ist durch die Zeiträume, in welchen keine Raumbelegung vorhanden ist, zu erklären. Die Behaglichkeit ist unter anderem von der relativen Luftfeuchte und der vorherrschenden Raumtemperatur abhängig. Die Ergebnisse der Phase II während der Raumbelegung resultieren durch erhöhte ‚Belastung‘, welche z.B. durch die Wärme- und Feuchteabgabe der Schüler / Lehrer herbeigeführt wird (siehe die Abschnitte 2.1.1 und 2.1.6). Ferner liegt die Nachtzeit, welche die Zeit abends sowie frühmorgens umfasst, außerhalb der Zeiten der Belegung der Räume.

Die Betrachtung der Messdaten der Phase II außerhalb der Zeiten der Raumbelegung erweist sich in der reinen Bewertung der Begrünungssysteme als äußerst sinnvoll, denn diese Messdaten werden am geringsten vom Nutzerverhalten beeinflusst. Außer im GRG 7 im Trogsystemraum (gleichbleibender Zustand in Relation zum Referenzraum) und im BRG 16 im Vliessystemraum (Verschlechterung um 0,1 in Relation zum Referenzraum), zeigt die Benotung eine Verbesserung der vorhandenen Situation.

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse im Hinblick auf die drei Zeiträume (Sommer, Übergang und Winter) ausgewertet. Diese haben unterschiedliche Außenluftbedingungen. Der Sommerzeitraum ist die Periode mit der wärmsten und eher feuchtesten Außenluft, der Übergangszeitraum ist charakterisiert durch geringere Unterschiede der Außenlufttemperatur und der Winterzeitraum ist die Periode mit der kältesten und eher trockensten Außenluft.

- Sommerzeitraum

Im GRG 7 sind die Behaglichkeitszustände des Referenz- und Trogsystemraumes gleichbleibend bei 4,0 benotet. Wogegen für den Vliessystemraum eine Verschlechterung um 0,1 Punkte notiert wird. Durch eine genauere Betrachtung des Mollier-h, x-Diagramms (siehe Abbildung 25) stellt sich heraus, dass der Vliessystemraum im Mittelwert einem höheren Wassergehalt im Raum ausgesetzt ist, und sich dadurch vom ‚noch behaglichen‘ Bereich entfernt.

Im Trogsystemraum ist eine höhere absolute Feuchte vorhanden als dies im Referenzraum der Fall ist. Darüber hinaus ist es im Trogsystemraum kühler als im Referenzraum. Diese Effekte sind bezüglich des Behaglichkeitsempfindens gegenläufig. Dies führt dazu, dass zwischen den Benotungen des Referenz- und des Trogsystemraumes kein Unterschied festgestellt werden konnte.

Im BRG 15 findet in der Sommerzeit beim Vliessystemraum eine Verbesserung von 0,4 Noten im Verhältnis zum Referenzraum statt (Phase III). Hervorzuheben ist, dass der Vliessystemraum um 0,89 °C kälter und unwesentlich feuchter als der Referenzraum ist. Wobei hier anzumerken ist, dass beide Räume eine ansatzweise gleiche Himmelsorientierung aufweisen. Dieser Unterschied der Raumtemperatur kann sowohl auf die individuelle Raumnutzung als auch auf die Verdunstungskälte [22] der Bepflanzung zurückgeführt werden.

Ferner lässt sich beim Trogsystemraum im Vergleich zu den beiden anderen Räumen (Referenz- und Vliessystemraum) eine Steigerung der absoluten Raumlufffeuchte um 1,21 g / kg festhalten (siehe Abbildung 25). Einer der Gründe für diese Zunahme ist die Fensterorientierung dieses Raumes, welche durch die solare Einstrahlung eine maßgebliche Rolle spielt (siehe Kapitel 3.2 und Abschnitt 5.2.2). Der Nutzer wird dadurch zu einem anderen Lüftungsverhalten verleitet und lässt die feuchtere Außenluft in den Raum. Bei der Vor- und Nachmittagsbetrachtung ändert sich die Benotung des Behaglichkeitszustandes für diesen Raum von 3,3 auf 4,9.

Im BRG 16 schneidet der Trogsystemraum (Note 3,4) im Vergleich zu den beiden anderen Räumen Referenzraum (Note 3,6) und Vliessystemraum (Note 3,9) besser ab. Dies ist durch die 0,33 °C kühlere Raumtemperatur zu erklären.

Die Verschlechterung des Vliessystemraumes ist durch die individuelle Raumnutzung zu erklären, welche eine wärmere Rauminnentemperatur hat. Ferner entspricht die absolute Feuchte in Relation zum Referenzraum wie beim Trogsystemraum einer Steigerung um die 0,3 g / kg.

- Übergangszeitraum

Im Übergangszeitraum fällt auf, dass weniger Behaglichkeitsprobleme auftreten. Das schlechteste Resultat wird mit 3,3 benotet.

Beim BRG 15 fällt auf, dass der Trogsystemraum eine bessere Benotung als die beiden anderen Räume hat. Dies spiegelt sich auch in der Vor- und Nachmittagsbetrachtung wieder. In diesem konkreten Fall begünstigt die Fensterorientierung das Raumklima dahingehend, dass deutlich bessere Ergebnisse erzielt werden können. Im Vergleich zur Übergangs- oder Winterzeit findet durch die vorhandene Orientierung eine stärkere Sonneneinstrahlung statt.

- Winterzeitraum

Gerade im Winterzeitraum ist von einem positiven Effekt der Begrünungssysteme auszugehen, denn die Bepflanzung trägt zur Befeuchtung der eher zu trocknen Luft dieser kälteren Periode bei, dies wird ebenso in der Abbildung 36 (siehe Kapitel 6.4) ersichtlich.

Grundsätzlich ist in der Übersicht aller Messergebnisse im Mollier-h, x-Diagramm (siehe Abbildung 25) zu erkennen, dass der Referenzraum für das jeweils betrachtete Gebäude der Raum mit der trockensten Raumluft ist. Des Weiteren ist festzuhalten, dass die begrünten Räume in Relation zum Referenzraum einen höheren Wassergehalt aufweisen.

Allgemein ist zu beachten, dass der Referenzraum des GRG 7 in jedem untersuchten Zeitraum überwiegend besser bewertet wird als dies der Fall für den Referenzraum der beiden anderen Gebäude (BRG 15 und BRG 16) ist.

Der Referenzraum im GRG 7 erreicht 1,7 in der Bewertung und hat somit bessere Behaglichkeitsanteile im Winter als die begrünten Räume des GRG 7. Dies kann bei genauerer Betrachtung vom individuellen Verhalten des Raumnutzers abgeleitet werden.

Denn der Vliessystemraum ist im Mittel 2,07 °C wärmer als der Referenzraum (siehe Abbildung 25 wobei der Trogsystemraum keine Messdaten mit sich führt (siehe Erklärung in Abschnitt 5.2.1)). Dieser Umstand ist der Hauptgrund für die Verschiebung der Messwerte aus dem engeren Behaglichkeitsfeld ins weite Behaglichkeitsfeld. Deswegen wird im Folgenden analysiert ob dieser Umstand bei einer festgelegten Raumtemperatur von 21 °C ebenfalls auftritt. In der Abbildung 31 ist die Häufigkeitsverteilung der Behaglichkeitsanteile für den Vliessystemraum und den Referenzraum zu sehen. Die Anteile im behaglichen Bereich haben eine Steigerung um 6,35 % auf einen Anteil von 67 % im Verhältnis zum Referenzraum.



Abbildung 31 Einfluss der vertikalen Innenbegrünung auf die Behaglichkeit bei einer festgelegten Innenraumtemperatur von 21 °C. Die Raumtemperatur ist eine vom Nutzer abhängige Variable. Durch diese Annahme von 21 °C wird der Beitrag des Begrünungssystems zur Steigerung des Behaglichkeitsempfindens verdeutlicht. Ferner ist ein Anstieg im behaglichen Bereich zu erkennen. (eigene Darstellung)

Im BRG 15 ist der Trogsystemraum mit einem höheren Wassergehalt als der Referenzraum versehen. Die Steigerung beträgt 1 g / kg (siehe Abbildung 25) Dies ermöglicht dem Trogsystemraum eine Verbesserung von 0,5 Noten im Vergleich zum Vliessystemraum. Denn gerade im Winter ist der Feuchteintrag der Begrünung maßgeblich, vor allem, weil im BRG 15 eine Lüftungsanlage ohne Feuchteausstauscher verbaut ist. So gelangt die trockene Außenluft direkt ins Rauminnere. Die Wirkung der Pflanzen ist im Fall einer Lüftungsanlage umso wichtiger, jedoch auch weniger effektiv (als ein Neubau ohne Lüftungsanlage) aufgrund des erhöhten Luftwechsels.

Im BRG 16 bringt der positive Effekt der Begrünungen, verursacht unter anderem durch die zusätzliche Befeuchtung der Raumluft, eine Verbesserung der Noten um 0,6 mit sich. Beim Vliessystemraum ist ein Feuchtezuwachs von 1,07 g / kg und beim Trogsystemraum von 1,62 g / kg in Relation zum Referenzraum zu beobachten (siehe Abbildung 25).

Zusätzlich zu den bisherigen Betrachtungen werden nun extreme Außenluftbedingungen und deren Zusammenhang mit der Behaglichkeit im Innenraum analysiert. Dies wird durch das Programm ‚OriginPro‘ ermöglicht, welches den Wassergehalt der Außenluft in g / kg als weiteren Parameter der Punktwolke zulässt.

In den folgenden Abbildungen (siehe Abbildung 32, Abbildung 33 und Abbildung 34) wird die hygrothermische Betrachtung weitergeführt. Zur Betrachtung werden nur diejenigen Tage herangezogen, in welchen die trockensten (kleiner oder gleich 3 g / kg) und feuchtesten (über 10 g / kg) Tagesmittelwerte des Wassergehaltes in der Außenluft vorhanden sind. Diese Tagemittelwerte des gesamten Betrachtungszeitraumes des Schuljahres 2017 / 2018 werden in der Abbildung Abb. A. 3 (siehe Anhang), verdeutlicht.

In der Abbildung 32 ist der GRG 7 dargestellt (links die trockensten Tage und rechts die feuchtesten Tage der Außenluft).

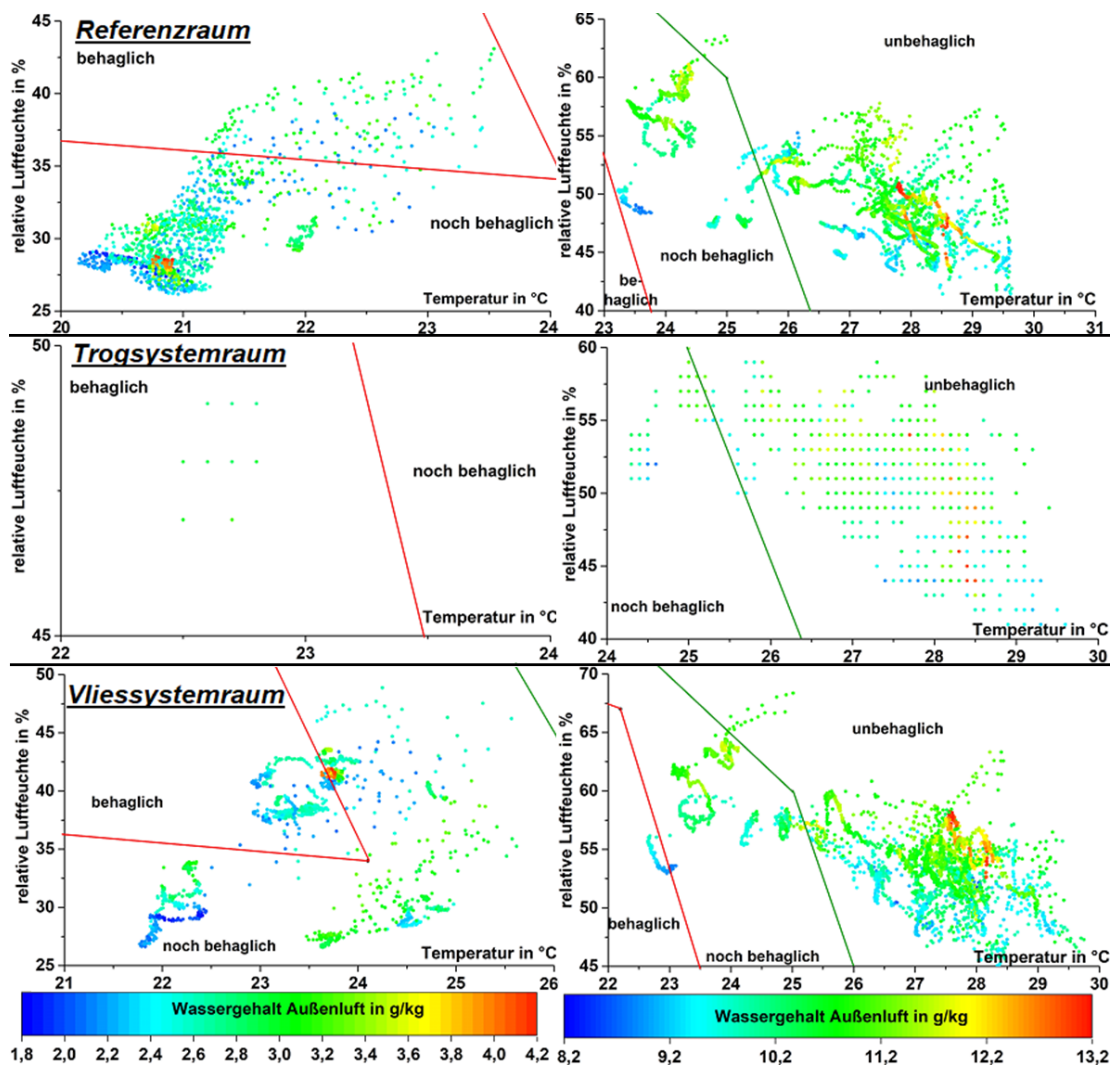


Abbildung 32 Übersicht der Messwerte vom GRG 7 der extrem feuchten (rechts) und trockenen (links) Tagesmittelwerte des Wassergehaltes in der Außenluft. (eigene Darstellung)

In der Abbildung 32 kann im Referenzraum eine Korrelation zwischen der extremen (trockenen sowie feuchten) Außenluft und den schlechteren Messwerten im Rauminnen aufgezeigt werden. Des Weiteren ist auf der linken Seite der Abbildung ersichtlich, dass die Messwerte der relativen Rauminnenfeuchte beim Referenzraum im Mittel bei ca. 30 % dagegen beim Vliessystemraum bei ca. 35 % liegen. Zu beachten ist, dass der Trogssystemraum kaum Messwerte in der trockenen Periode mit sich führt. Dies lässt sich anhand der Gegebenheiten nachvollziehen, welche im Abschnitt 5.2.1 beschrieben werden. Außerdem ist zu bemerken, dass im Vliessystemraum die trockene Außenluft keinen relevanten Einfluss auf das Behaglichkeitsempfinden hat und somit im Vergleich zum Referenzraum eine ‚Pufferwirkung‘ zeigt. Die betreffenden Messwerte im Diagramm des Vliessystemraumes unten links können durch das Lüftungsverhalten des Nutzers erklärt werden, denn die Rauminnenluft ist sehr trocken und dazu auch wesentlich kälter als dies bei den restlichen Messwerten der Fall ist.

Auf der rechten Seite der Abbildung 32 kann beim Vergleich der begrünten Räume zum Referenzraum festgestellt werden, dass die Begrünungssysteme einen leichten Kühlungseffekt haben und dass sich die Punktwolke bei den begrünten Räumen nach links bewegt. D.h. auch bei extrem feuchten Außenbedingungen sind die begrünten Klassenräume im Schnitt behaglicher als dies der Fall des Referenzraumes ohne Begrünungssystem ist.

In der folgenden Abbildung 33 ist das BRG 15 Gebäude dargestellt (links die trockensten Tage und rechts die feuchtesten Tage der Außenluft).

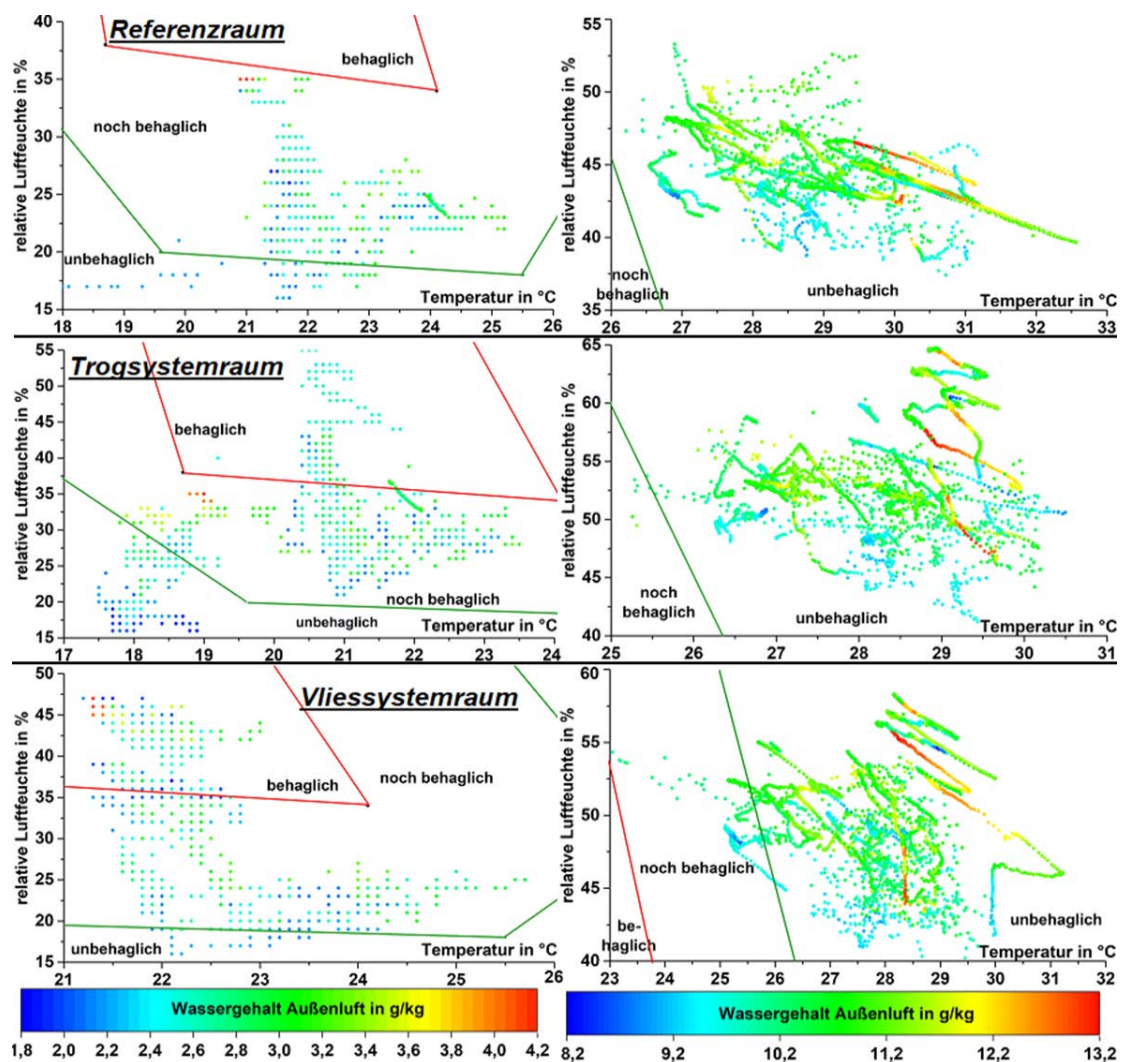


Abbildung 33 Übersicht der Messwerte vom BRG 15 der extrem feuchten (rechts) und trockensten (links) Tagesmittelwerte des Wassergehaltes in der Außenluft. (eigene Darstellung)

Auf der linken Seite der Abbildung 33 ist zu entnehmen, dass die Messwerte der relativen Rauminnenfeuchte beim Referenzraum im Mittel bei ca. 25 % liegen, dagegen beim Trogsystem- und beim Vliessystemraum bei ca. 30 %.

Auffallend sind verschiedene Messwerte im Diagramm des Trogsystemraumes unten links. Diese lassen sich unter anderem durch das Lüften der Räume erklären, denn die Rauminnenluft ist auffällig trocken und dazu auch wesentlich kälter als dies bei den restlichen Messwerten der Fall ist.

Auf der rechten Seite der Abbildung 33 ist zu erkennen, dass die Messwerte des Innenraums während den extremen Feuchtebedingungen der Außenluft in den begrünten Klassenräumen näher am weiten Behaglichkeitsfeld sind als der Referenzraum. (in Rot entspricht einem Wassergehalt größer gleich 13 g / kg) Dies ist mit dem Kühlungseffekt der Begrünung, welche durch die Verdunstungsleistung hervorgerufen wird, zu begründen. Die begrünten Klassenräume wirken den extremen Außenbedingungen entgegen und haben eine ‚Pufferwirkung‘.

In der Abbildung 34 ist das BRG 16 Gebäude dargestellt (links die trockensten Tage und rechts die feuchtesten Tage der Außenluft).

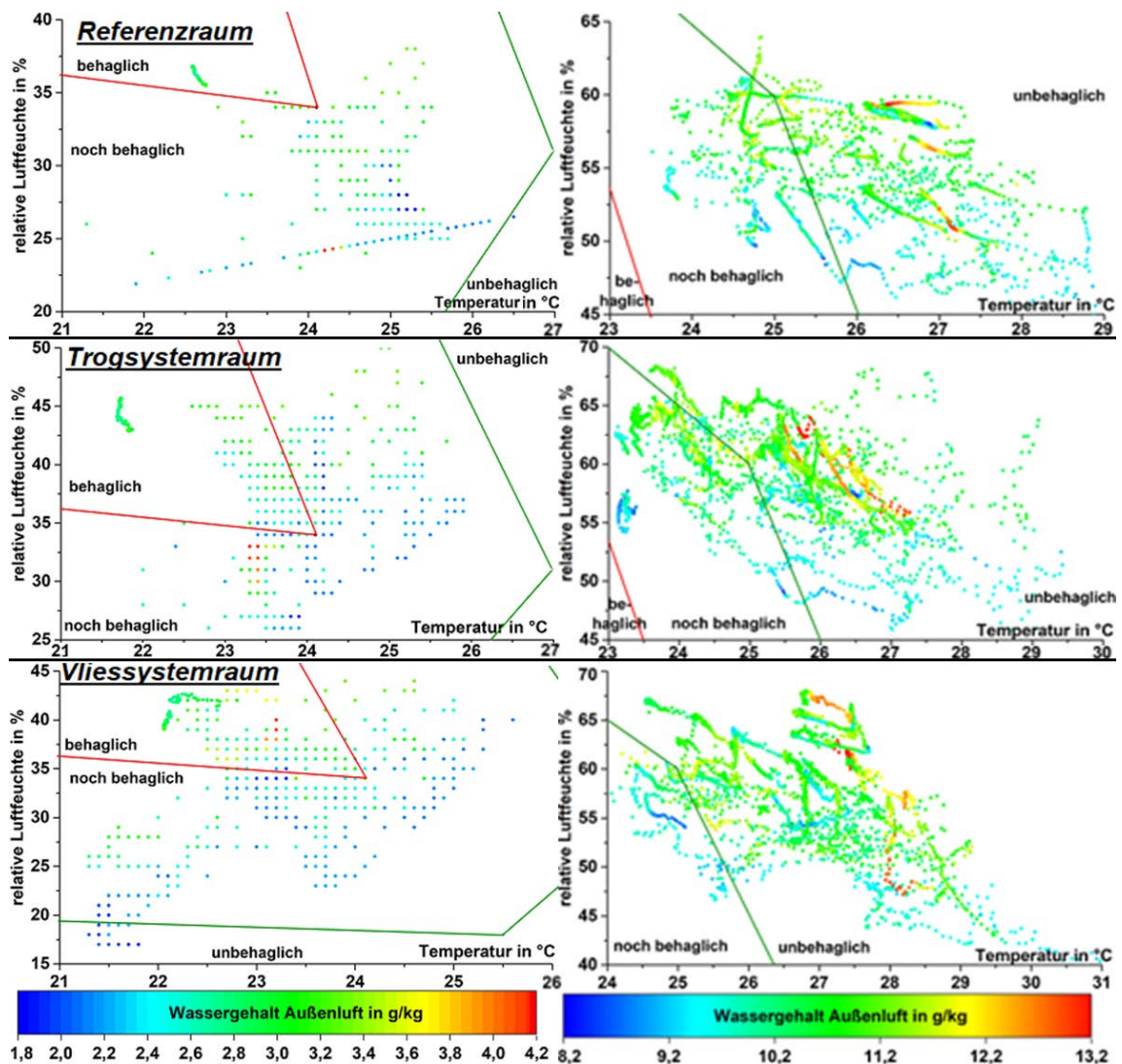


Abbildung 34 Übersicht der Messwerte vom BRG 16 der extrem feuchten (rechts) und trockensten (links) Tagesmittelwerte des Wassergehaltes in der Außenluft. (eigene Darstellung)

Ähnlich wie bei den anderen Gebäuden ist auf der linken Seite der Abbildung 34 zu sehen, dass sich an den Tagen mit der trockensten Außenluft im Rauminnen ein höherer behaglicher Zustand in den begrünten Räumen bildet als im Vergleich zum Referenzraum (unter 2 g / kg entspricht der Farbe dunkelblau). Die begrünten Klassenräume haben eine höhere relative Luftfeuchte, welche beim Trogsystemraum bei ca. 37,5 % und beim Vliessystemraum bei ca. 32,5 %, dagegen beim Referenzraum bei ca. 27,5 % liegt.

Auffallend sind verschiedene Messwerte im Diagramm des Vliessystemraum unten links, wo die Rauminnenluft auffällig trocken und dazu auch wesentlich kälter als dies bei den restlichen Messwerten ist. Dies lässt sich unter anderem durch das Lüftungsverhalten des Nutzers erklären.

Auf der rechten Seite der Abbildung 34 wird deutlich, dass die Spitzenwerte des Wassergehalts in den extremen Zeiträumen von über 13 g / kg in der Außenluft in den begrünten Klassenräumen gepuffert werden. D.h. die Messwerte im Rauminnen liegen näher am ‚noch behaglichen‘ Bereich als Folge der Verdunstungsleistung und des damit einhergehenden Kühlungseffekts der Begrünung. Dies wird besonders deutlich im Trogsystemraum.

6.3 Diskussion - Vergleich der Gebäudetypen (Altbau / Neubau)

In diesem Kapitel werden die bereits vorgestellten Ergebnisse aus Kapitel 6.1 analysiert. Bei diesem Vergleich der Gebäudetypen ist anzumerken, dass Neubauten höhere energetische Anforderungen erfüllen müssen. Dies spiegelt sich in der Dämmung sowie der dichteren Gebäudehülle wieder. Bei den in dieser Diplomarbeit untersuchten Gebäuden können die allgemeinen Informationen im Kapitel 1.1 in der Tabelle 1 eingesehen werden. Es handelt sich beim BRG 15 und beim BRG 16 um einen Neubau, und beim GRG 7 um einen Altbau. Des Weiteren ist eine Lüftungsanlage im Gebäude BRG 15, im Gegensatz zum BRG 16, verbaut.

Anhand der Analyse der Abbildungen (siehe Abbildung 32, Abbildung 33 und Abbildung 34) wird bezüglich des Vergleichs der Gebäudetypen ersichtlich, dass der GRG 7 (aufgrund der niedrigeren energetischen Anforderungen an die Gebäudehülle) und der BRG 15 (aufgrund der Lüftungsanlage) eine größere Abhängigkeit von den Außenbedingungen vorzuweisen haben. Im BRG 16 (keine Lüftungsanlage) wird deutlich, dass trotz hoher oder niedriger absoluter Außenluftfeuchte ein größerer Anteil der Messwerte näher am behaglichen Bereich liegt. Dies ist beim nicht begrüntem Referenzraum am deutlichsten zu erkennen.

Für die nachfolgende Analyse werden die unbelegten Zeiträume betrachtet. Anschließend wird die Aufteilung mittels Tagesmittelwerten der Außentemperatur berücksichtigt um die Messdaten den einzelnen Zeiträume (Winter, Übergang und Sommer), wie in Kapitel 5.1 beschrieben, zuzuordnen (siehe Abbildung 35). Die Messdaten, welche zu den raumbelegten Zeiten gemessen wurden, sind in diesem Kapitel vernachlässigt worden, um den Einfluss des Nutzerverhaltens auszuklammern. Die Zeiträume in denen keine Belegung des Raumes stattgefunden hat, sind in den Tabellen im Anhang einzusehen (siehe Tab. A. 4 GRG 7, Tab. A. 6 BRG 15 und Tab. A. 8 BRG 16).

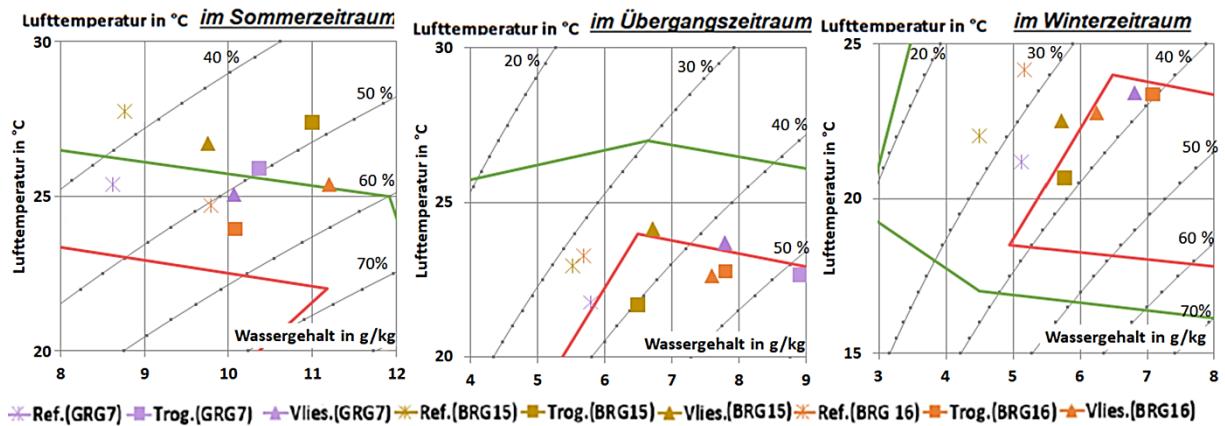


Abbildung 35 Mollier-h, x-Diagramm für den Zeitraum außerhalb der Raumbelagung (Phase II laut Abbildung 17) bei einem Luftdruck von 1 013,25 hPa für jedes Gebäude (GRG 7=violett; BRG 15=Gelb; BRG 16= orange). Ferner wird hier die Gezeitentrennung wie in Kapitel 5.1 beschrieben durchgeführt (Phase III laut Abbildung 17): Winter (rechts), Übergang (Mitte), Sommer (links). Des Weiteren werden alle untersuchten Räume einzeln visualisiert: Referenzraum = Kreuz, Trogsystemraum = Quadrat und Vliessystemraum = Dreieck. Zudem sind die Grenzwerte (in Rot der behagliche Bereich und in Grün der noch behagliche Bereich) der Behaglichkeitsfelder laut Dentel et al [13] eingetragen. (eigene Darstellung)

Auffällig in der Abbildung 35 ist, dass der Referenzraum im Mittelwert immer trockener als die jeweiligen begrünzten Räume ist. Deswegen ist besonderes im Winterzeitraum eine Steigerung des Behaglichkeitsempfindens in den Räumen mit einem Begrünungssystem zu verzeichnen.

Weiterhin in der Abbildung 35 unterscheidet sich der Altbau (GRG 7) im Winterzeitraum vom Neubau dadurch, dass das GRG 7 Gebäude kühlere Raumlufttemperaturen aufweist. Eine plausible Erklärung kann anhand der undichteren Gebäudehülle des GRG 7 geliefert werden.

Bei der Betrachtung der Neubauten untereinander (siehe Abbildung 35) ist festzuhalten, dass sich der Einfluss der Begrünung im BRG 16 positiver herauskristallisiert als dies der Fall im BRG 15 ist. In allen Gezeitenperioden ist erkennbar, dass die untersuchten begrünzten Klassenräume im BRG 16 einen behaglicheren Zustand im Mittel einnehmen als dies der Fall beim BRG 15 ist. Beim direkten Vergleich der Referenzklassen im Winterzeitraum ist hervorzuheben, dass der BRG 15 einen trockeneren Zustand als der BRG 16 aufweist. Eine mögliche Erklärung hierfür ist, dass der BRG 15 eine Lüftungsanlage besitzt (siehe die Beschreibung in Kapitel 3.2). Diese Anlage ist zusätzlich mit einem Wärmetauscher jedoch nicht mit einem Feuchtetauscher ausgestattet. Dies erklärt, dass der Referenzraum des BRG 15 im Winter sehr trocken ist. Tatsächlich kann es im Winter bei einer Lüftungsanlage ohne Feuchtetauscher vorkommen, dass die trockene Außenluft direkt in den Raum gesaugt wird.

In der Sommerperiode ist anzumerken, dass das GRG 7 Gebäude kühler als das BRG 15 Gebäude ist. Hier handelt es sich um die Zeiträume außerhalb der Raumbelagung, welche sich eher in den abgekühlten Phasen der Sommertage befinden, d.h. abends, nachts sowie frühmorgens. Dies kann unter anderem dadurch begründet werden, dass der Altbau typischerweise eine höhere Speichermasse als bei Neubauten besitzt und zudem ein träges Temperaturverhalten aufweist. In der Abbildung 35 werden die Zeiträume außerhalb der Raumbelagung gezeigt. Dies sind zumeist Nachmittage, d.h. der Altbau, welcher in der Nacht langsam abgekühlt worden ist, erwärmt sich progressiv am Vormittag, im Gegensatz zum Neubau.

In der vorherigen Abbildung 35 werden die Mittelwerte der gesamten Messdatenmenge je Betrachtung besprochen. In der folgenden Abbildung 36 werden die Häufigkeitsverteilungen für unterschiedliche relative Luftfeuchtebereiche betrachtet. Grün entspricht dem Trogssystemraum, gelb dem Vliessystemraum und grau dem Referenzraum. Darüber hinaus wurden die unterschiedlichen Anforderungen an die relative Raumlufffeuchte gestellt, welche über 60 % als unangenehm empfunden werden und das Schimmelrisiko erhöhen (siehe Tappler [14]). Ferner hat die Unterschreitung der relativen Raumlufffeuchte unter 30 % einen negativen Effekt auf die Gesundheit (gerezte Haut und Augen, Kopfschmerzen, häufige Erkältungen, ...) [13].

Im Sommer waren Bedenken aufgetreten, dass es wegen der hohen Raumdichte im BRG 16 zu feucht werden könnte (siehe Abschnitt 6.1.2). Diese Befürchtungen wurden nicht bestätigt, denn die Hitze ist der Grund für die Unbehaglichkeit. Die relative Luftfeuchte konnte nie über 70 % und nur selten über 60 % gemessen werden, wie dies in Abbildung 23 eingesehen werden kann.

		Alle Messdaten	Messdaten während der Raumbelegung	Messdaten außerhalb der Raumbelegung
■ Viessystemraum ■ Trogsystemraum ■ Referenzraum				
GRG 7	≥ 60% rel. Lf	1,51% 5,45% 0,15%	1,53% 1,90% 0,66%	1,50% 6,27% 0,01%
	≥ 55% rel. Lf	11,28% 18,02% 2,12%	7,81% 8,20% 4,22%	11,89% 20,29% 1,55%
	≤ 35% rel. Lf	6,40% 3,11% 22,81%	6,27% 4,85% 8,54%	6,43% 2,71% 26,70%
	≤ 30% rel. Lf	1,71% 0,36% 4,60%	0,69% 0,70% 1,88%	1,88% 0,28% 5,34%
	Häufigkeit in %	0,00% 50,00%	0,00% 10,00%	0,00% 50,00%
BRG 15	≥ 60% rel. Lf	0,00% 2,35% 0,00%	0,00% 0,00% 0,00%	0,00% 2,68% 0,00%
	≥ 55% rel. Lf	3,08% 12,05% 0,00%	0,03% 1,26% 0,00%	3,51% 13,56% 0,00%
	≤ 35% rel. Lf	25,56% 18,72% 52,44%	42,22% 28,18% 48,98%	23,22% 17,39% 53,09%
	≤ 30% rel. Lf	14,20% 7,06% 27,64%	27,22% 8,90% 30,22%	12,37% 6,80% 27,16%
	Häufigkeit in %	0,00% 100,00%	0,00% 100,00%	0,00% 100,00%
BRG16	≥ 60% rel. Lf	13,13% 13,59% 1,02%	1,69% 8,12% 1,45%	15,53% 14,74% 0,95%
	≥ 55% rel. Lf	29,95% 30,94% 14,22%	12,81% 20,86% 11,21%	33,55% 33,05% 14,73%
	≤ 35% rel. Lf	6,15% 5,07% 25,86%	6,73% 3,84% 21,17%	6,03% 5,33% 26,66%
	≤ 30% rel. Lf	2,15% 0,93% 20,46%	1,92% 0,44% 14,58%	2,20% 1,04% 21,46%
	Häufigkeit in %	0,00% 50,00%	0,00% 50,00%	0,00% 50,00%

Abbildung 36 Übersicht der Häufigkeitsverteilungen der relativen Raumlufffeuchte je Gebäude und je ausgewählten Messdatenbereich / Messdaten. Des Weiteren werden die Häufigkeiten der Über- und Unterschreitungen von unterschiedlichen Werten in % angegeben. Ferner ist festzuhalten, dass der Referenzraum eine trocknere Luft als die begrünten Klassenräume hat. Es wurden unterschiedliche Anforderungen an die relative Raumlufffeuchte gestellt, welche über 60 % als unangenehm empfunden werden und das Schimmelrisiko erhöhen (siehe Tappler [14]). Ferner hat die Unterschreitung der relativen Raumlufffeuchte unter 30 % einen negativen Effekt auf die Gesundheit (gereizte Haut und Augen, Kopfschmerzen, häufige Erkältungen, etc.) [13]. (eigene Darstellung)

Der Abbildung 36 ist zu entnehmen, dass die begrünten Klassenräume weniger oft Messwerte haben, welche kleiner oder gleich 35 % relativer Luftfeuchte entsprechen. Noch deutlicher ist der Unterschied zwischen dem Referenzraum und den begrünten Räumen bei der Grenze von 30 % relativer Luftfeuchte. Außerdem weisen die begrünten Räume immer eine höhere Häufigkeit oberhalb der 60 % relativen Luftfeuchte Grenze auf. Beides ist darauf zurückzuführen, dass die Begrünungssysteme als Luftbefeuchter dienen.

Des Weiteren fällt beim Vergleich zwischen den Gebäudetypen auf, dass der BRG 15 und der GRG 7 wesentlich seltener Messwerte oberhalb von 60 % relativer Luftfeuchte haben. Eine mögliche Erklärung hierfür ist die eingebaute Lüftungsanlage (BRG 15) sowie die undichtere Gebäudehülle des GRG 7 (im Vergleich zu den Neubauten), welche zu viel trockene Luft aus der Umgebung in den Raum hineinlässt. Wobei anzumerken ist, dass der BRG 15 mehr Messwerte unterhalb der Grenze von 35 % relativer Luftfeuchte hat im Vergleich zu den beiden anderen Gebäuden.

6.4 Diskussion - Vergleich der Begrünungssystemflächen

In diesem Kapitel werden die Messwerte behandelt, welche im Abschnitt 6.1.2 vorgelegt wurden. Die Methode der Auswertung der Messdaten in die unterschiedlichen Phasen und Gezeiten erfolgte wie im Kapitel 5.1 beschrieben. Des Weiteren fehlen die Messdaten des Trogsystemraumes im GRG 7 während dem Winterzeitraum, dies wird im Abschnitt 5.2.1 erklärt.

Bei den Begrünungen steht die Feuchteabgabe im Mittelpunkt, denn die Luftfeuchteerhöhung ist ein wesentlicher Aspekt der Innenraumbegrünung. Deshalb wurde in Tabelle 7 eine Übersicht der unterschiedlichen Wassergehalte je begrüntem Raum in Relation zum Referenzraum erstellt. Zusätzlich ist hier anzumerken, dass das Lüftungsverhalten und die Anzahl der Nutzer für jeden Raum vollkommen identisch angenommen sind. Hier besteht weiterhin Bedarf genauere weiterführende Analysen durchzuführen.

Tabelle 7 Übersicht der unterschiedlichen Wassergehalte je begrüntem Raum in Relation zum Referenzraum und zusätzlich in Relation zur Begrünungsfläche. (eigene Darstellung)

Phase III- Betrachtung	untersuchte Räume	GRG 7			BRG 15			BRG 16		
		Wassergehalt in g/kg								
		Mess- ergebnis in g/kg	in Relation zum Referenz- raum in g/kg	zusätzlich in Relation zur Begrünungs- fläche in g/(kgxm ²)	Mess- ergebnis in g/kg	in Relation zum Referenz- raum in g/kg	zusätzlich in Relation zur Begrünungs- fläche in g/(kgxm ²)	Mess- ergebnis in g/kg	in Relation zum Referenz- raum in g/kg	zusätzlich in Relation zur Begrünungs- fläche in g/(kgxm ²)
Winter- zeitraum	Ref	6.47	0.00	0.00	4.31	0.00	0.00	5.64	0.00	0.00
	Trog	nicht vorhanden			5.31	1.00	0.11	7.26	1.62	0.14
	Vlies	7.48	1.02	0.16	4.62	0.31	0.05	6.72	1.07	0.19
Übergangs- zeitraum	Ref	7.48	0.00	0.00	5.85	0.00	0.00	6.76	0.00	0.00
	Trog	8.72	1.24	0.07	6.77	0.92	0.10	8.11	1.35	0.12
	Vlies	8.16	0.68	0.10	6.45	0.60	0.11	8.06	1.30	0.23
Sommer- zeitraum	Ref	9.69	0.00	0.00	8.98	0.00	0.00	9.85	0.00	0.00
	Trog	9.98	0.28	0.02	10.19	1.21	0.13	10.18	0.33	0.03
	Vlies	10.33	0.63	0.10	9.02	0.04	0.01	10.21	0.37	0.07

In der Tabelle 7 ist zu erkennen, dass die begrünten Klassenräume einen höheren Wassergehalt in der Raumluft vorzuweisen haben als die entsprechenden Referenzräume. Außerdem ist die Differenz zwischen dem Referenzraum und den begrünten Räumen während dem Sommerzeitraum deutlich kleiner als dies z.B. der Fall beim Winterzeitraum ist. Dies ist auf die selbstregulierende Fähigkeit der Pflanzen zurückzuführen (siehe Abschnitt 2.2.1 [22]).

Des Weiteren fällt auf, dass die begrünten Räume des BRG 15 eine geringere Differenz zum Referenzraum des BRG 15 aufweisen als dies in den jeweiligen Zeiträumen in den anderen Gebäuden der Fall ist. Außer im Sommer im Trogsystemraum, welcher eine Wassergehaltsdifferenz von 1,21 g / kg aufzeigt. Diese in Relation zu den anderen Räumen der anderen Gebäude erhöhte Differenz ist unter anderem durch die Fensterorientierung des Trogsystemraumes im BRG 15 zu erklären. Eine mögliche Erklärung ist unter anderem die Ausrichtung der Fenster, welche einen Einfluss auf das Nutzerverhalten ausübt.

Ferner ermöglicht die Tabelle 7 auch eine Betrachtung der Wasserabgabedifferenz in Relation zur Begrünungsfläche. Dabei wird erkennbar, dass je nach Gebäude ein unterschiedliches Begrünungssystem die höchste Feuchteabgabe aufweist.

Zusätzlich ist hier anzumerken, dass das Lüftungsverhalten und die Anzahl der Nutzer für jeden Raum vollkommen identisch angenommen sind. Dies verlangt weitere genauere Analysen.

Das folgende Kapitel 7 bezieht sich auf die Auswertung der CO₂-Messwerte, welche anschließend im Kapitel 7.2 diskutiert werden.

7 Auswertung der CO₂-Behaglichkeit

Laut Abschnitt 2.1.1 ist der CO₂-Gehalt nicht der einzige aber ein wichtiger Faktor für die Bewertung der Qualität der Innenraumluft. Gemäß Pettenkofer [7] gilt der Grenzwert von 1 000 ppm für die räumliche Behaglichkeit (CO₂-Konzentration < 0,1 %); die Unbehaglichkeit beginnt ab 2 000 ppm (CO₂-Konzentration > 0,2 %). Für Wohn- und Schulgebäude liegt der Grenzwert für die maximale CO₂-Konzentration laut DIN 1946-2 [8] bei 1 500 ppm (CO₂-Konzentration < 0,15 %). Um die Lesbarkeit der nächsten beiden Kapiteln zu erhöhen, wird der Grenzwert von Pettenkofer [7] von 1 000 ppm nachstehend als Grenzwert 1 angegeben und der Grenzwert laut DIN 1946-2 [8] von 1 500 ppm als Grenzwert 2 notiert.

Besonders in der Schule, wo sich eine gewisse Anzahl von Menschen regelmäßig zusammen in einem kleinen Raum während einer gegebenen Zeitspanne aufhält und die Leistungsfähigkeit mit der CO₂-Konzentration korreliert [4], sollte ein regelmäßiges Lüften stattfinden, um kritisch hohe CO₂-Konzentrationen zu vermeiden. Bei schlechter Luft lernen die Schüler langsamer und / oder die Konzentration der Schüler nimmt ab [13].

Bei der Auswertung der CO₂ Messdaten werden zunächst die spezifischen Merkmale der untersuchten Gebäude berücksichtigt (siehe Kapitel 5.2). Des Weiteren werden die gesamten Messwerte in Messdaten während der Raumbelegung aufgetrennt, wie es in Phase II (siehe Kapitel 5.1) beschrieben ist.

Nachfolgend werden die Ergebnisse der CO₂-Werte bezüglich der Behaglichkeit des Raumklimas in Kapitel 7.2 ausgewertet und analysiert.

7.1 Ergebnisse

Zunächst werden die Ergebnisse der jeweiligen untersuchten Räume je Gebäude in den folgenden Abbildungen (siehe Abbildung 37 für das GRG7, Abbildung 38 für das BRG15 sowie Abbildung 39 für das BRG 16) präsentiert. Des Weiteren sind die spezifischen Auswertungsinformationen je Gebäude in den entsprechenden Abschnitten (siehe die Abschnitte 5.2.1, 5.2.2 und 5.2.3) nachzulesen. Anschließend erfolgt eine Auswertung in Kapitel 7.2.

Die Abbildung 37, Abbildung 38 und Abbildung 39 reflektieren das Nutzerverhalten: (siehe Abschnitt 2.1.1) Menschen atmen CO₂ aus und ‚belasten‘ somit den Raum.

Die Abbildung 37 dokumentiert nur die Messdaten des Vliessystemraumes. Es ist erkennbar, dass die CO₂-Werte im Vliessystemraum mit 61,63 % unterhalb des Grenzwertes 1 liegen und während der Raumebelegung mit 15,48 % oberhalb des Grenzwertes 2 liegen. Ferner ist ca. 38 % der Zeit während der Raumebelegung mit CO₂-Konzentrationen oberhalb des Grenzwertes 1 zu verzeichnen.

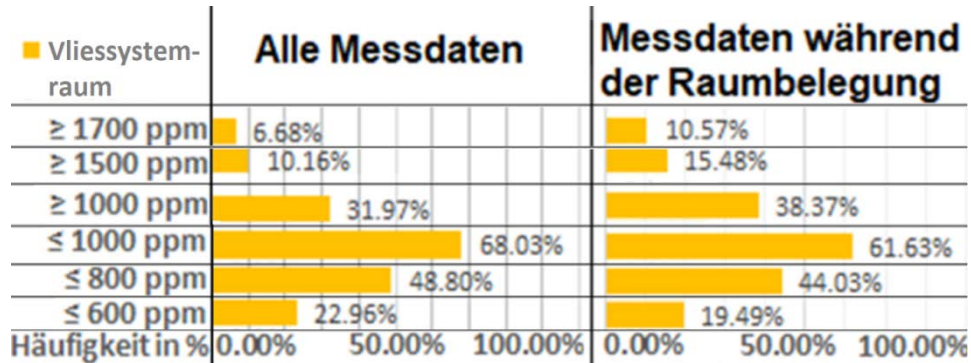


Abbildung 37 Übersicht der Häufigkeiten der CO₂-Gehalte im GRG 7 für unterschiedliche Grenzwerte. (eigene Darstellung)

Die Abbildung 38 gibt die Messwerte der untersuchten Räume (Trogsystem-, Vliessystem- und Referenzraum) des BRG 15-Gebäude wieder. Dabei fällt auf, dass die Häufigkeit der Überschreitung des Grenzwertes 1 im belegten Raum für den Referenzraum bei 11,61 %, für den Trogsystemraum bei 14,38 % und für den Vliessystemraum bei 4,98 % liegt. Demnach ist im BRG 15 eine geringe Überschreitung vorhanden. Dies wird im folgenden Kapitel 7.2 weitergehend analysiert.

Außerdem haben die begrünten Räume unterschiedliche Anteile an der Häufigkeit oberhalb des Grenzwertes 2. Hier liegt der Vliessystemraum bei 0,13 % und der Trogsystemraum bei 1,13 % und hat somit einen ähnlichen Anteil wie der Referenzraum mit 1,02 %.

Bei der Betrachtung der Konzentrationen kleiner gleich 800 ppm hat der Vliessystemraum einen Anteil von 88,25 %. Beim Trogsystemraum liegt die Häufigkeit dieser Unterschreitung bei 26,45 %, das bedeutet, dass viele CO₂-Messwerte zwischen 1 000 ppm und 800 ppm liegen.

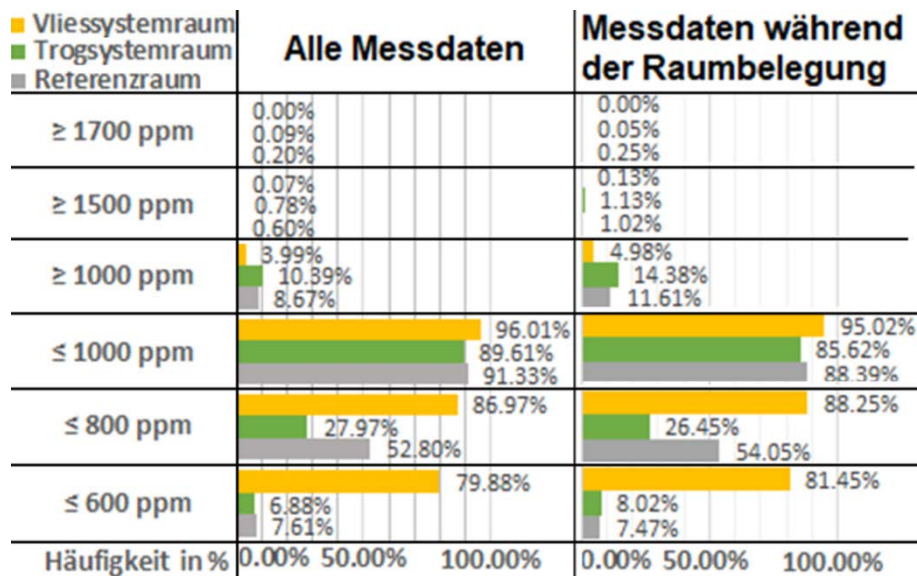


Abbildung 38 Übersicht der Häufigkeiten der CO₂-Gehalte je Raum im BRG 15 für unterschiedliche Grenzwerte. (eigene Darstellung)

Die Abbildung 39 veranschaulicht die Messwerte der untersuchten Räume (Trogsystem-, Vliessystem- und Referenzraum) des BRG 16. Die Häufigkeit der Unterschreitung der Messwerte unterhalb des Grenzwertes 1 während der Raumbellegung liegt bei beiden begrünten Klassenräumen bei ca. 83 % im Vergleich zum Referenzraum mit 66,25 %. Des Weiteren liegen im BRG 16 ca. 65 % der beiden Klassenräume mit integrierten Begrünungssystemen unterhalb von 800 ppm.

Ferner ist die Überschreitung des Grenzwertes 2 seitens der CO₂-Messwerte unterschiedlich ausgeprägt. Während der Anteil des Vliessystemraums ähnlich wie der Referenzraum ausfällt, ist der Trogsystemraum um ca. die Hälfte weniger oft an einer Überschreitung beteiligt.

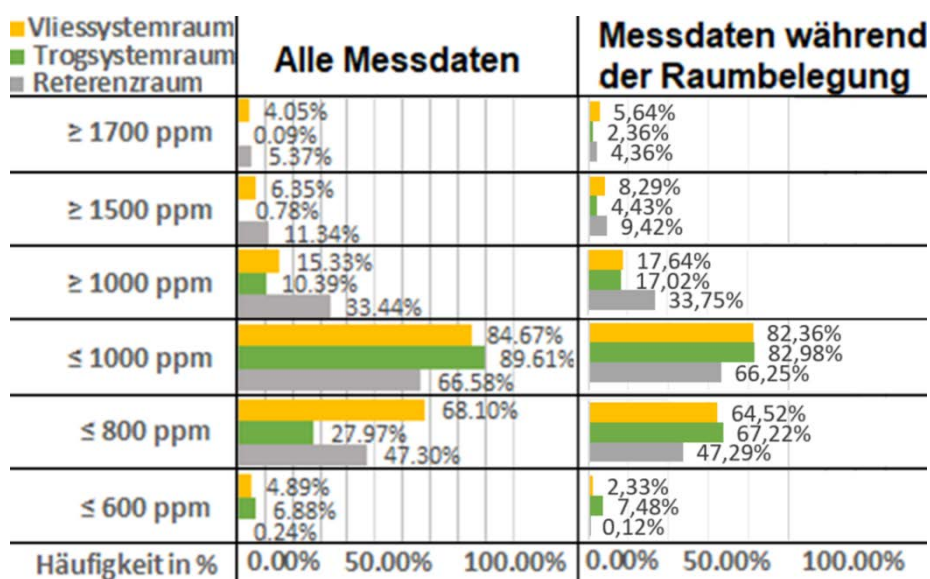


Abbildung 39 Übersicht der Häufigkeiten der CO₂-Gehalte je Raum im BRG 16 für unterschiedliche Grenzwerte. (eigene Darstellung)

7.2 Diskussion der CO₂-Behaglichkeit

Für die untersuchten Gebäude (siehe Abbildung 37 für das GRG 7, Abbildung 38 für das BRG 15 sowie Abbildung 39 für das BRG 16) lassen sich folgende Feststellungen treffen:

- der Effekt der Begrünungen auf den CO₂-Gehalt in den untersuchten Klassenräumen ist zu gering, um im Schulalltag messbar zu sein. Parameter, wie u.a. geöffnete Türen, unterschiedliche Aktivitäten der Raumnutzer, undichte oder schlecht verschlossene Fenster, stören den Messvorgang und den Vergleich.
- Bei der Betrachtung der einzelnen Begrünungssysteme ist auffällig, dass im BRG 15 das Vliessystem besser und im BRG 16 das Trogsystem leicht besser abschneidet. Die Raumluft ist während dem Unterricht einer nicht unwesentlichen Dynamik (Nutzerverhalten, Lüftungsverhalten) ausgesetzt. Dieser Einfluss konnte nicht genügend detailliert während des gegebenen Zeitraumes untersucht werden. Demzufolge lässt sich keine eindeutige Aussage darüber treffen, welches System am besten geeignet wäre.
- Beim Vergleich des Vliessystemraumes im Altbau (GRG 7) und in den Neubauten (BRG 15; BRG 16) fallen die eindeutig schlechten CO₂-Gehalte des Altbaus auf. Der Anteil des GRG 7 bei der Überschreitung des Grenzwertes 2 beträgt 15,48 % im Vergleich zum BRG 15 mit 0,13 % und im BRG 16 mit 8,29 %. Des Weiteren wird auch ein hoher Anteil bei der Überschreitung von 1 700 ppm verzeichnet und überschreitet den Anteil des BRG 16 um ca. das Doppelte. Der BRG 15 führt keine CO₂-Gehalte im Vliessystemraum oberhalb von 1 700 ppm.
- Anhand der Messung des CO₂-Gehalts im Rauminnen wird im BRG 15, im Gegensatz zum GRG 7, eine deutliche Verbesserung der Raumluftqualität gemessen. Z.B. ist im Vliessystemraum eine Steigerung um 54,18 % bei der Unterschreitung der Häufigkeit des Grenzwertes 1 zu verzeichnen. Dies lässt sich durch die Lüftungsanlage erklären, welche ‚bessere‘ Luft von außen in das Rauminnere hineinlässt. Dies ist nicht der Fall beim Altbau / GRG 7.
- Im Vergleich zwischen dem BRG 15 und dem BRG 16 ist zu erkennen, dass die Werte im BRG 15 wegen der vorhandenen Lüftungsanlage besser ausfallen als diejenigen im BRG 16. Der BRG 16 weist im Mittel bei den begrünten Klassenräumen eine Überschreitung des Grenzwertes 1 von ca. 17,3 % auf, wobei der BRG 15 im Mittel bei 9,68 % liegt. Ebenso kann im Vergleich der Referenzklassen eine Überschreitung des Grenzwertes 1 beim BRG 15 um 11,61 % und beim BRG 16 um 33,75 % verzeichnet werden.

Das folgende Kapitel 8 bezieht sich auf das Fazit und Ausblick.

8 Fazit und Ausblick

Pflanzen besitzen Eigenschaften, die dazu beitragen das Raumklima zu verbessern: die Transpirationsleistung ermöglicht eine Verbesserung der Luftfeuchtigkeit und der Anteil der Schadstoffe in der Luft können durch ihre Filterungsfähigkeit verringert werden. Zudem helfen sie den Lärmpegel zu reduzieren. Pflanzenwahl, Pflege und Pflanzsubstrat sind wichtige Kriterien im Zusammenhang mit einer nachhaltigen Innenraumbegrünung.

Im Mittelpunkt dieser Arbeit steht die Frage: Welchen Einfluss hat die vertikale Innenwandbegrünung auf das Raumklima und das Behaglichkeitsgefühl in den untersuchten Klassenzimmern der jeweiligen Schulgebäude? Kann ein Einfluss nachgewiesen werden, wird ein weiterer Punkt dieser Diplomarbeit darin bestehen, das Ausmaß zu bestimmen und den Unterschied zwischen den Begrünungssystemen und Gebäudetypen festzustellen.

Durch die in der vorliegenden Diplomarbeit ausgeführten Untersuchungen des Einflusses von vertikalen Innenraumbegrünungssystemen auf das Raumklima in Schulen wird ersichtlich, dass die Raumbedingungen die gestiegenen Anforderungen an das alltägliche Wohlbefinden oftmals nicht erfüllen.

Anhand der verschiedenen Untersuchungen lassen sich folgende Kernaussagen formulieren:

- a) Der zusätzliche Feuchteeintrag der Bepflanzungen erhöht die Luftfeuchte. Die hygrothermische Behaglichkeit hat sich, vor allem in den Winterzeiträumen, deutlich verbessert. Besonders in diesen Zeiträumen zeichnet sich die Luft durch hohe Trockenheit aus, was wiederum nicht förderlich für die Gesundheit ist (höhere Krankheitsanfälligkeit). Durch die begrünten Klassenräume konnte eine Verringerung der Häufigkeit der trockenen Luft registriert werden.
- b) Die Klassenräume mit integrierten Begrünungssystemen haben im Vergleich zum Referenzraum eine geringere Abhängigkeit von der Außenluft. Sowohl sehr hohe als auch sehr niedrige Feuchtegehalte der Außenluft werden aufgrund der Begrünung bezüglich des Behaglichkeitsempfindens im Innenraum gepuffert und weisen ein besseres Raumklima auf als Klassenräume mit identischen Außenbedingungen.
- c) Beim Neubau BRG 16 (ohne Lüftungsanlage), bedingt durch die höhere Dichtheit der Gebäudehülle, kristallisiert sich der Einfluss der Begrünung bezüglich der hygrothermischen- und der CO₂- Betrachtung deutlicher heraus als im Vergleich zum Altbau.

- d) Beim Vergleich der Neubauten kann eine deutlichere Verbesserung des Raumklimas (bezüglich der hygrothermischen Betrachtung) im BRG 16 im Vergleich zum BRG 15 festgestellt werden. Die verbaute Lüftungsanlage ohne Feuchteaustauscher im BRG 15 kann als Hauptgrund genannt werden, weil dadurch eher ein direkter Austausch zwischen der Raumluft und der Umgebungsluft stattfinden kann.
- e) Bei der Auswertung der Messwerte bezüglich der CO₂-Konzentrationen stellt sich heraus, dass der BRG 15 durch die verbaute Lüftungsanlage eine bessere Luftqualität besitzt als dies der Fall im BRG 16 ist. Ferner schneidet der Altbau (GRG 7) am schlechtesten von allen untersuchten Gebäuden ab.
- f) Beim Vergleich, bezüglich der Thematik hygrothermische Behaglichkeit und der CO₂-Behaglichkeit, zwischen den Begrünungssystemen ist kein System auffällig besser. Eine Erklärung liefert die Tatsache, dass es beim Vergleich zwischen begrünten und unbegrünten Klassenräume Faktoren gibt (wie z.B. das Nutzerverhalten, Lüftungsverhalten, etc.) deren Einfluss während den betrachteten Zeiträumen nicht vollständig umrissen werden konnte. Hier besteht noch Handlungsbedarf, um eine komplette Analyse zu gewährleisten.

Die vorliegende Diplomarbeit, welche in das Projekt „GRÜNEzukunftSCHULEN“ eingeordnet werden kann, zeigt die Vorteile einer Innenwandbegrünung auf. Die Möglichkeiten der Innenraumbegrünung sind noch nicht vollständig ausgeschöpft.

Weitere Anwendungsfelder der Begrünungssysteme, welche im Rahmen dieser Arbeit in den Schulen untersucht wurden, sind z.B. Gebäude, in denen sich ‚schwächere‘ Menschen aufhalten (Krankenhäuser, Pflegeheime, Pensionistenheime).

Gebäudebegrünung ist und bleibt ein Thema der Zukunft. Allerdings gilt es die Gebäudebegrünung als Ganzes zu betrachten, die sich auf drei Träger stützt: Dachbegrünung, Fassadenbegrünung und Innenraumbegrünung. In diesem Sinne ist die Zusammenarbeit aller Teilnehmer (Forschung und Praxis: Planer, Bauherren, Architekten, Ingenieure, usw.) gefordert. Es wäre zudem hilfreich, wenn durch öffentliche Förderungen oder spezifische Regelwerke (z.B. Gebäudebegrünung wird die Standardbauweise für alle Bauvorhaben) dieses Vorhaben unterstützt werden könnte.

9 Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1 PPD-Index in Abhängigkeit von der PMV-Bewertung unverändert aus [9] PMV Index: Predicted Mean Vote (erwartete durchschnittliche Empfindung), welcher in der Gebäudeplanung benutzt wird, z.B. für Klima- und Lüftungsanlagen - „mittlere subjektive Beurteilung einer größeren Personengruppe, die in gleicher Kleidung bei gleicher Aktivität in derselben Umgebung zur ihrem Behaglichkeitsempfinden befragt wurde“ [9]. PPD Index: Predicted Percentage of Dissatisfied (erwartete durchschnittliche Unzufriedenheitsrate), welcher „den Prozentsatz einer großen Personengruppe ausdrückt, die das Raumklima entweder als heiß (+3), warm (+2), kühl (-2) oder kalt (-3) empfinden“. Ein kleiner Prozentsatz unzufriedener Personen bleibt bestehen. Es gilt: sind weniger als 10 % der Raumnutzer unzufrieden, wird von sehr guten thermischen Bedingungen ausgegangen. [9]. _____ 6
- Abbildung 2 Die wichtigsten Einflussgrößen auf das vorherrschende Raumklima, welche in Parameter, abhängig vom Raum sowie vom Menschen, unterteilt sind. unverändert aus [12]. Des Weiteren weisen die Regelwerke DIN 1946-2:1994-01 [8]; ÖNORM EN ISO 7730:2006 05 01 [10] und ÖNORM EN 16798-3:2017 12 15 [11] in Bezug auf das Raumklima auf folgende Einflussfaktoren hin: Luft (Temperatur, Feuchte, Geschwindigkeit), Strahlung (Oberflächentemperaturen, Wärmestrahlung, kurzwellige Strahlung), Bekleidung, Aktivität, Aufenthaltsdauer und Außenklima. Wichtig sind genügend Licht sowie die Abwesenheit von Immissionen wie Lärm und Gerüche [12]. _____ 7
- Abbildung 3 Behaglichkeit eines Menschen in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur und der relativen Luftfeuchte der umgebenden Luft mit eingezeichneter bauphysikalischer Obergrenze und Behaglichkeitsuntergrenze. Feuchte – und Behaglichkeitswerte nach Leusden und Freymark (1951); mit Ergänzungen der oberen und unteren Grenzen (Winter). Hinweis: Bei schlechter Bausubstanz kann es bei 55 % relativer Luftfeuchte schon zu Schimmelbildungen kommen, aus [14]. Laut DIN 1946-2:1994-01 [8] gilt ein Maximalwert für die empfundene Temperatur bei 27 °C (Innen), welche noch zum weiten Behaglichkeitsfeld zählt. Fällt die relative Raumluftfeuchte unter 30 % wird das weite Behaglichkeitsfeld, bzw. der ‚noch behagliche‘ Bereich verlassen [14]. Einen dauerhaften Abfall der relativen Raumluftfeuchte unterhalb 20 % hat einen negativen Effekt auf die Gesundheit [13]. _____ 10
- Abbildung 4 Schematische Darstellung der Wirkungsweise einer funktionalen, vertikalen Begrünung mit Bepflanzung und Substrat. Bearbeitete Darstellung aus [22] mit den Einflussfaktoren wie Licht, Temperatur, Luftfeuchte und Luftbewegung auf das Begrünungssystem. _____ 17
- Abbildung 5 Pflanzplan (Mitte) des Biologiesaales im BRG 15 Gebäude, welcher mit dem Trogsystem (links) ausgestattet wurde (Darstellung aus [27]) _____ 22
- Abbildung 6 Pflanzplan des Biologiesaales im BRG 16 Gebäude, welcher mit dem Trogsystem ausgestattet wurde (Darstellung aus [27]) _____ 22
- Abbildung 7 Ansicht des GRG 7 Gebäudes, Altbau ohne Lüftungsanlage in der Kandelgasse 39,1070 Wien (eigenes Foto) _____ 23
- Abbildung 8 Ansicht der begrünten Klassenräume: rechts der Biologieraum mit Trogsystem und links der Raum mit Vliessystem (eigene Fotos) _____ 23
- Abbildung 9 Skizzen der untersuchten Klassenräume im GRG 7 Gebäude: der Trogsystemraum (oben links), das Referenzzimmer (unten links) und der Vliessystemraum (unten rechts). (eigene Darstellung) _____ 24
- Abbildung 10 Ansicht des BRG 15 Gebäudes, Neubau mit Lüftungsanlage in der Diefenbachgasse 19, 1150 Wien. Des Weiteren sind die in Rot gekennzeichneten Bereiche die Fensterfronten der untersuchten Klassenzimmer. Dabei ist zu beachten, dass der vordere Klassenraum (der Biologieraum) über dem Eingang der Schule liegt und in der Nachmittagszeit direkter Sonneneinstrahlung ausgesetzt ist. Somit ist dieser Raum wärmer als die beiden anderen Räume, worauf in der späteren Auswertung nochmals näher eingegangen wird. (eigenes Foto) _____ 25
- Abbildung 11 Ansicht der Klassenräume: links der Biologieraum mit Trogsystem; in der Mitte der Referenzraum ohne Begrünungssystem und rechts der Raum mit Vliessystem (eigene Fotos) _____ 26

Abbildung 12	Skizzen der drei untersuchten Klassenräume im BRG 15 Gebäude: Trogsystemraum (oben links), Referenzzimmer (oben rechts) und Vliessystemraum (unten links). (eigene Darstellung)	26
Abbildung 13	Ansicht des BRG 16 Gebäudes, Neubau ohne Lüftungsanlage am Schuhmeierplatz 7, 1160 Wien (eigenes Foto)	27
Abbildung 14	Ansicht der Klassenräume: links der Biologieraum mit Trogsystem und rechts der Raum mit Vliessystem. (eigenes Foto)	27
Abbildung 15	Skizzen der drei untersuchten Klassenräume im BRG 16 Gebäude: Trogsystemraum (unten links), Referenzzimmer (oben rechts) und Vliessystemraum (oben links). (eigene Darstellung).	28
Abbildung 16	verwendete Messtechnik im Innenraum; links ein RTRs - Messsensor und der Aufbau der Messsensorik auf den zwei Bildern rechts. (eigene Fotos)	29
Abbildung 17	Die Filterung der Messdatenmenge wird wie bei einem ‚Trichter‘ vom Ausgangspunkt der Gesamtdaten (Phase I) bis zur Phase IV (Vormittagsbetrachtung vor 12 Uhr / Nachmittagsbetrachtung nach 12 Uhr) immer detaillierter dargestellt. Phase II beinhaltet nur diejenigen Messdaten, die zu jedem Zeitpunkt in jedem Raum und jedem Gebäude vorhanden sind. In der anschließenden Aufteilung der Datenmengen in Phase III werden die Messwerte je nach Tagesmitteltemperatur der Außenwelt zur Sommer- (rot), Übergangs- (grün) oder Winterbetrachtung (blau) gezählt. Diese Trennung mittels Außenklimadaten wird gemäß der VDI Richtlinie 4655 [29] durchgeführt: Tagesmitteltemperaturen von kleiner als 5 °C werden als Winter, zwischen 5 °C bis 15 °C als Übergang und größer als 15 °C als Sommer definiert [22]. (eigene Darstellung)	32
Abbildung 18	Außenklima des Schuljahres 2017 / 2018 mit Tagesmittelwerten der Außentemperatur in °C je Tag und Aufteilung gemäß der VDI Richtlinie 4655 [29] Die gewählte Arbeitsweise basiert auf dem Vorgehen der Forschungsinitiative „Zukunft Bau“ [22]. (eigene Darstellung)	34
Abbildung 19	Behaglichkeitsdiagramme basierend auf Abbildung 3 für den gesamten Betrachtungszeitraum vom Schuljahr 2017 / 2018 des GRG 7, bzw. hier wurden alle Zeiträume berücksichtigt. In der oberen Zeile werden alle Daten, d.h. belegte und unbelegte Daten (Phase I), mitberücksichtigt. Ferner werden in der unteren Zeile nur die belegten Messdaten aller Zeiträume (Phase II) gezeigt. Die jeweiligen Reihen sind wie folgt aufgeteilt: links befindet sich der Referenzraum, in der Mitte der Trogsystemraum und rechts der Vliessystemraum. (eigene Darstellung)	40
Abbildung 20	Behaglichkeitsdiagramme basierend auf Abbildung 3 für den gesamten Betrachtungszeitraum vom Schuljahr 2017 / 2018 des BRG 15 bzw. hier wurden alle Zeiträume berücksichtigt. In der oberen Zeile werden alle Daten, d.h. belegte und unbelegte Daten (Phase I), mitberücksichtigt. Ferner werden in der unteren Zeile nur die belegten Messdaten aller Zeiträume (Phase II) gezeigt. Die jeweiligen Reihen sind wie folgt aufgeteilt: links befindet sich der Referenzraum, in der Mitte der Trogsystemraum und rechts der Vliessystemraum. (eigene Darstellung)	41
Abbildung 21	Behaglichkeitsdiagramme basierend auf Abbildung 3 für den gesamten Betrachtungszeitraum vom Schuljahr 2017 / 2018 des BRG 16 bzw. hier wurden alle Zeiträume berücksichtigt. In der oberen Zeile werden alle Daten, d.h. belegte und unbelegte Daten (Phase I), mitberücksichtigt. Ferner werden in der unteren Zeile nur die belegten Messdaten aller Zeiträume (Phase II) gezeigt. Die jeweiligen Reihen sind wie folgt aufgeteilt: links befindet sich der Referenzraum, in der Mitte der Trogsystemraum und rechts der Vliessystemraum. (eigene Darstellung)	41
Abbildung 22	Behaglichkeitsdiagramme des GRG 7 für jeden einzelnen Zeitraum (Winter / Übergang / Sommer), wobei der Trogsystemraum im Winterzeitraum keine Messdaten führt. Dies wird im Abschnitt 5.2.1 als Besonderheit des GRG 7 hervorgehoben. Des Weiteren wurden hier nur belegte Daten betrachtet, d.h. es kommen nur Messwerte in Betracht, welche zu einem Zeitpunkt aufgenommen wurden, an dem laut Belegungsplan des entsprechenden Raumes eine Schulklasse präsent war. In der oberen Reihe der drei hintereinander folgenden Diagrammreihen ist der Referenzraum. Dann kommt der Trogsystemraum. Die dritte und letzte Reihe von oben ist der Vliessystemraum. (eigene Darstellung)	43
Abbildung 23	Behaglichkeitsdiagramme des BRG 15 für jeden Zeitraum (Winter / Übergang / Sommer) einzeln. Des Weiteren wurden hier nur belegte Daten betrachtet, d.h. nur Messwerte, welche zu einem Zeitpunkt aufgenommen sind an dem laut Belegungsplan des entsprechenden Raumes eine Schulklasse präsent war. In der oberen Reihe der drei hintereinander folgenden Diagrammreihen ist der Referenzraum. Dann kommt	

der Trogsystemraum. Die dritte und letzte Reihe von oben stellt den Vliessystemraum dar. (eigene Darstellung)	44
Abbildung 24 Behaglichkeitsdiagramme des BRG 16 für jeden Zeitraum (Winter / Übergang / Sommer) einzeln. Des Weiteren wurden hier nur belegte Daten betrachtet, d.h. nur Messwerte, welche zu einem Zeitpunkt aufgenommen sind an dem laut Belegungsplan des entsprechenden Raumes eine Schulklasse präsent war. In der oberen Reihe der drei hintereinander folgenden Diagrammreihen ist der Referenzraum. Dann kommt der Trogsystemraum. Die dritte und letzte Reihe von oben ist der Vliessystemraum. (eigene Darstellung)	45
Abbildung 25 Mollier-h, x-Diagramm für den Zeitraum während der Raumbelegung (Phase II laut Abbildung 17) bei einem Luftdruck von 1 013,25 hPa für jedes Gebäude (GRG 7=violett; BRG 15=Gelb; BRG 16=orange). Ferner wird hier die Gezeitentrennung wie in Kapitel 5.1 beschrieben durchgeführt (Phase III laut Abbildung 17): Winter (rechts), Übergang (Mitte), Sommer (links). Des Weiteren werden alle untersuchten Räume einzeln visualisiert: Referenzraum = Kreuz, Trogsystemraum = Quadrat und Vliessystemraum = Dreieck. Zudem sind die Grenzwerte (in Rot der behagliche Bereich und in Grün der noch behagliche Bereich) der Behaglichkeitsfelder laut Dentel et al [13] eingetragen. (eigene Darstellung)	46
Abbildung 26 Die Abbildung zeigt die jeweiligen Betrachtungszeiträume wie Sommer-, Übergangs- und Winterzeitraum in den untersuchten Klassenräumen (Vliessystem-, Trogsystem- und Referenzraum). Des Weiteren wurde nur die Datenmenge aus der Phase IV, d.h. Vormittag- und Nachmittagsbetrachtung des GRG 7, berücksichtigt und in einem Behaglichkeitsdiagramm verdeutlicht (eigene Darstellung).	49
Abbildung 27 Die Abbildung zeigt die jeweiligen Betrachtungszeiträume wie Sommer-, Übergangs- und Winterzeitraum in den untersuchten Klassenräumen (Vliessystem-, Trogsystem- und Referenzraum). Des Weiteren wurde nur die Datenmenge aus der Phase IV, d.h. Vormittag- und Nachmittagsbetrachtung des BRG 15 berücksichtigt und in einem Behaglichkeitsdiagramm verdeutlicht (eigene Darstellung).	50
Abbildung 28 Die Abbildung zeigt die jeweiligen Betrachtungszeiträume wie Sommer-, Übergangs- und Winterzeitraum in den untersuchten Klassenräumen (Vliessystem-, Trogsystem- und Referenzraum). Des Weiteren wurde nur die Datenmenge aus der Phase IV, d.h. Vormittag- und Nachmittagsbetrachtung des BRG 16 berücksichtigt und in einem Behaglichkeitsdiagramm verdeutlicht (eigene Darstellung).	51
Abbildung 29 Detaillierte Betrachtung des Vormittags (bis 12 Uhr) im Mollier-h, x-Diagramm für alle Gebäude und entsprechende untersuchte Räume je Gezeitenperiode: Winter (rechts), Übergang (Mitte), Sommer (links). Dieses Diagramm zeigt auf der x-Achse den Wassergehalt im Raum in g pro kg Raumluft. Auf der Ordinate befindet sich die Raumlufttemperatur in °C. Die gekrümmten Linien / Kurven kennzeichnen die relative Luftfeuchte. (eigene Darstellung)	52
Abbildung 30 Detaillierte Betrachtung des Nachmittags (ab 12 Uhr) im Mollier-h, x-Diagramm für alle Gebäude und entsprechende untersuchte Räume je Gezeitenperiode: Winter (rechts), Übergang (Mitte), Sommer (links). Dieses Diagramm zeigt auf der x-Achse den Wassergehalt im Raum in g pro kg Raumluft. Auf der Ordinate befindet sich die Raumlufttemperatur in °C. Die gekrümmten Linien / Kurven kennzeichnen die relative Luftfeuchte. (eigene Darstellung)	52
Abbildung 31 Einfluss der vertikalen Innenbegrünung auf die Behaglichkeit bei einer festgelegten Innenraumtemperatur von 21 °C. Die Raumtemperatur ist eine vom Nutzer abhängige Variable. Durch diese Annahme von 21 °C wird der Beitrag des Begrünungssystems zur Steigerung des Behaglichkeitsempfindens verdeutlicht. Ferner ist ein Anstieg im behaglichen Bereich zu erkennen. (eigene Darstellung)	57
Abbildung 32 Übersicht der Messwerte vom GRG 7 der extrem feuchten (rechts) und trockenen (links) Tagesmittelwerte des Wassergehaltes in der Außenluft. (eigene Darstellung)	58
Abbildung 33 Übersicht der Messwerte vom BRG 15 der extrem feuchten (rechts) und trockenen (links) Tagesmittelwerte des Wassergehaltes in der Außenluft. (eigene Darstellung)	59
Abbildung 34 Übersicht der Messwerte vom BRG 16 der extrem feuchten (rechts) und trockenen (links) Tagesmittelwerte des Wassergehaltes in der Außenluft. (eigene Darstellung)	60
Abbildung 35 Mollier-h, x-Diagramm für den Zeitraum außerhalb der Raumbelegung (Phase II laut Abbildung 17) bei einem Luftdruck von 1 013,25 hPa für jedes Gebäude (GRG 7=violett; BRG 15=Gelb; BRG 16=orange). Ferner wird hier die Gezeitentrennung wie in Kapitel 5.1 beschrieben durchgeführt (Phase III laut Abbildung 17): Winter (rechts), Übergang (Mitte), Sommer (links). Des Weiteren werden alle untersuchten Räume einzeln visualisiert: Referenzraum = Kreuz, Trogsystemraum = Quadrat und Vliessystemraum = Dreieck.	

Zudem sind die Grenzwerte (in Rot der behagliche Bereich und in Grün der noch behagliche Bereich) der Behaglichkeitsfelder laut Dentel et al [13] eingetragen. (eigene Darstellung)	63
Abbildung 36 Übersicht der Häufigkeitsverteilungen der relativen Raumluftheuchte je Gebäude und je ausgewählten Messdatenbereich / Messdaten. Des Weiteren werden die Häufigkeiten der Über- und Unterschreitungen von unterschiedlichen Werten in % angegeben. Ferner ist festzuhalten, dass der Referenzraum eine trocknere Luft als die begrünten Klassenräume hat. Es wurden unterschiedliche Anforderungen an die relative Raumluftheuchte gestellt, welche über 60 % als unangenehm empfunden werden und das Schimmelrisiko erhöhen (siehe Tappler [14]). Ferner hat die Unterschreitung der relativen Raumluftheuchte unter 30 % einen negativen Effekt auf die Gesundheit (gereizte Haut und Augen, Kopfschmerzen, häufige Erkältungen, etc.) [13]. (eigene Darstellung)	65
Abbildung 37 Übersicht der Häufigkeiten der CO ₂ -Gehalte im GRG 7 für unterschiedliche Grenzwerte. (eigene Darstellung)	70
Abbildung 38 Übersicht der Häufigkeiten der CO ₂ -Gehalte je Raum im BRG 15 für unterschiedliche Grenzwerte. (eigene Darstellung)	71
Abbildung 39 Übersicht der Häufigkeiten der CO ₂ -Gehalte je Raum im BRG 16 für unterschiedliche Grenzwerte. (eigene Darstellung)	71

10 Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1</i>	<i>Übersicht der Gebäude, sowie Informationen zu den jeweiligen Gebäudetypen und Standort der untersuchten Gebäude. Des Weiteren sind die entsprechenden Beschreibungen zum jeweiligen Gebäude und die dazugehörigen Skizzen sowie Fotos der Räume in den angehenden Abbildungen. (eigene Darstellung)</i>	<i>2</i>
<i>Tabelle 2</i>	<i>Literaturangaben für die CO₂-Abgabe je Tätigkeit von Menschen pro Stunde unverändert aus [4] genommen</i>	<i>8</i>
<i>Tabelle 3</i>	<i>Dämmwert von Kleidung (Quelle: Recknagel, Sprenger, Schramek, 2011/12, Alle Rechte vorbehalten), unverändert aus [9]</i>	<i>12</i>
<i>Tabelle 4</i>	<i>Gesamtwärmeabgabe des Menschen in Abhängigkeit von der Tätigkeit, unverändert aus [9]</i>	<i>12</i>
<i>Tabelle 5</i>	<i>Eckdaten der begrünten Klassenräume der Gebäude GRG 7, BRG 15 und BRG 16 aus [27]</i>	<i>22</i>
<i>Tabelle 6</i>	<i>Übersicht der Benotungen je Gebäude auf der Grundlage der festgelegten Wichtung je Behaglichkeitsfeld. Zusätzlich werden alle untersuchten Klassenräume einzeln bewertet. Ferner werden hier die einzelnen Betrachtungszeiträume von Phase I bis Phase IV berücksichtigt. Die Kriterien ‚behaglich‘, ‚noch behaglich‘ und ‚unbehaglich‘ werden wie folgt gewichtet Kategorie ‚behaglich‘ mit 1; Kategorie ‚noch behaglich‘ mit 3 sowie Kategorie ‚unbehaglich‘ mit 5. Diese Wichtungen werden mit den jeweiligen Anteilen in den Behaglichkeitsfeldern multipliziert und summiert. Diese daraus entstehende Note geht von 1 ‚behaglich‘ bis 5 ‚unbehaglich‘, je nach Aufteilung der Anteile. Für detaillierte Informationen die verschiedenen Phasen betreffend wird auf Abbildung 17 und Kapitel 5.1 verwiesen. (eigene Darstellung)</i>	<i>53</i>
<i>Tabelle 7</i>	<i>Übersicht der unterschiedlichen Wassergehalte je begrüntem Raum in Relation zum Referenzraum und zusätzlich in Relation zur Begrünungsfläche. (eigene Darstellung)</i>	<i>67</i>

11 ANHANG

11.1 Anhang - Inhaltsverzeichnis

11.1	<i>Anhang - Inhaltsverzeichnis</i>	80
11.2	<i>Anhang – Tabellen / bezüglich Grundlagen</i>	81
11.3	<i>Anhang – Abbildungen / bezüglich der Auswertungen</i>	85
11.3.1	 <i>Bezüglich des Außenklimas</i>	85
11.3.2	 <i>Bezüglich des GRG 7</i>	87
11.3.3	 <i>Bezüglich des BRG 15</i>	89
11.3.4	 <i>Bezüglich des BRG 16</i>	91

11.2 Anhang – Tabellen / bezüglich Grundlagen

Tab. A. 1 Eine Auswahl der häufigsten Schadstoffe in Innenräumen und ihre Wirkung auf den Menschen sowie ihre Quellen und Abhilfe unverändert übernommen aus [18]

Schadstoff	Wirkung auf den Menschen	Häufige Quellen	Abhilfe
Allergene	Schleimhaut- und Bindehautentzündung, Schnupfen, allergisches Asthma	Hausstaub, Schimmelbefall, Haustiere, Pollen, Konservierungsstoffe, Pflanzen, Latex	Staubsauger mit HEPA-Filter, keine Haustiere halten, Produkte für Allergiker verwenden, Schimmelbefall entfernen und Ursache bekämpfen
Asbest	Krebse der Atemwege, Rippen- und Bauchfellkrebs	Brandschutz- und Dichtungsmaterial, Rückenbeschichtungen älterer PVC-Böden, Nachtspeicheröfen Spachtelmassen	Asbest von Fachleuten entfernen lassen, beim Heimwerken mit Spachtelmassen Atemschutz verwenden
Biozide (PCP, Lindan, Pyrethroide)	Kopfschmerzen, Übelkeit, Schädigung des Nervensystems, bei PCP u. U. auch Leberkrebs	Holzschutzmittel, Lacke, Teppiche, Schädlingsbekämpfung, Elektroverdampfer („Gelsenstecker“)	Gegenstände und Materialien, die Schadstoffe abgeben, entfernen oder geeignet abdichten, Fliegengitter
CO ₂ (Kohlenstoffdioxid)	Indikator für vom Menschen verunreinigte Raumluft, Leistungsverluste	Menschen, Haustiere, Verbrennungsvorgänge (bspw. Ethanolöfen, Gasherde)	Häufiges Lüften, Lüftungsanlagen, offene Flammen vermeiden
Feinstaub	Reizung und Irritation der Atemwege. Fernwirkungen an anderen Organen, insbesondere am Herzen und an den Blutgefäßen.	Verbrennungsvorgänge (Tabakrauch, E-Zigaretten, Ethanolöfen), Abrieb von bspw. Kleidung und Einrichtungsgegenständen	Feuchte Reinigung, regelmäßige Lüftung, Vermeidung von Feinstaubquellen.
Formaldehyd	Reizung der Augenbindehaut und der Atemwege, Unwohlsein, Kopfschmerzen, möglicherweise krebserregend	Tabakrauch, Spanplatten und Holzwerkstoffe, Lacke, offene Flammen (bspw. Ethanolöfen, Gasöfen),	Rauchverbot in Innenräumen, formaldehydfreie Leime bei Holzwerkstoffen, Schadstoffquelle entfernen oder

		Desinfektionsmittel	abdichten
Gerüche	Belästigung, Befindlichkeitsstörungen möglich, Stressfaktor	Möbel und Fußbodenlacke, Naturstoffe, Abflussrohre, undichte Gebäude, Duftöle, Mensch	Ursache der Gerüche herausfinden und sanieren, regelmäßige Lüftung
Glykole	Reizung der Augenbindehaut und der Atemwege, entwicklungstoxisch	E-Zigaretten, Wasserlacke, Reinigungsmittel	„Dampfen“ in Innenräumen vermeiden, ausgiebiges Lüften nach Anwendung von Wasserlacken oder Putzmitteln
Kohlenmonoxid, Stickoxide	Herz- und Sehstörungen, Kopfschmerzen, Schwindel, zentralnervöse Funktionsstörungen, inneres Ersticken	Undichte Öfen und Kamine, Durchlauferhitzer ohne Abzug, Gasherde, Garagen	Geräte regelmäßig überprüfen lassen, alte Geräte erneuern, aktive Entlüftung ins Freie installieren
PAK (Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe)	Krebs, Geruchsbelästigung	Parkettkleber, Feuchteabdichtungen, Karbolineum	Abdichten oder entfernen
PCB (Polychlorierte Biphenyle)	Schädigung der Leibesfrucht, Beeinträchtigung des Immunsystems, Krebsverdacht	Fugen- und Dichtungsmassen, Kleinkondensatoren in Leuchtstofflampen, alte Wandfarben	Von Fachleuten entfernen lassen
PER (Tetrachlorethen)	Schädigung des Nervensystems, Reizung der Schleimhäute (v. a. Augen), Kopfschmerzen, Müdigkeit, Atemwegserkrankungen, möglicherweise krebserregend	Chemische Reinigungsbetriebe, chemisch gereinigte Kleidung, Metallentfettung	PER-freie Reinigungsverfahren, Kleidung wählen, die keine chemische Reinigung erfordert, Gewerbebetrieb sanieren
Radon	Lungenkrebs	Erdreich, Baustoffe	Radondicht bauen, Abdichten, Belüften
Schimmel (Schimmelpilze und Bakterien)	Allergien, Reizungen, Geruchsbelästigung, bei immungeschwächten Personen Infektionen	Feuchte Bauteile, organisches Material, Keimbildung in Klimaanlage und Luftbefeuchtern	Ursache bekämpfen: Sanierung von Bauschäden, Luftfeuchte reduzieren, belüften

Tabakrauch	Herz- Kreislauf- und Atemwegs-erkrankungen, Lungenkrebs, Asthma	Zigaretten, Zigarren, Pfeifen	Rauchen in Innenräumen und im Auto einstellen
VOC (Flüchtige organische Verbindungen)	Geruchsbelästigung, Reizung des Atmungstraktes, Beeinträchtigung des Nervensystems, Befindlichkeitsstörungen, zum Teil krebserregend	Verbrennungsvorgänge (Tabakrauch, E-Zigaretten, Ethanolöfen), Abrieb von bspw. Kleidung und Einrichtungsgegenständen	Feuchte Reinigung, regelmäßige Lüftung, Vermeidung von Feinstaubquellen.

Tab. A. 2 NASA Liste von einigen ausgewählten luftreinigenden Pflanzen veränderte Darstellung übernommen aus [23]

Removed from a Sealed Experimental Chamber by Houseplants During a 24h Exposure period	Trichloroethylene (TCE)		Benzene		Formaldehyde	
	Total plant leaf surface area in cm ²	total micrograms removed per plant	Total plant leaf surface area in cm ²	total micrograms removed per plant	Total plant leaf surface area in cm ²	total micrograms removed per plant
Gerbera jamesonii	4 581	38 938	4 581	107 653	-	-
Hedera helix	981	7 161	1 336	13 894	985	9 653
Dracaena marginata	7 581	27 292	7 581	30 324	7 581	20 469
Spathiphyllum "Mauna Loa"	7 960	27 064	7 960	41 392	8 509	16 167
Sansevieria laurentii	3 474	9 727	2 871	28 710	2 871	31 294
Dracaena deremensis "Warneckeii"	7 242	13 760	7 242	39 107	-	-
Chamaedorea seifritzii	10 325	16 520	10 325	34 073	14 205	76 707
Dracaena massangeana	7 215	10 101	-	-	-	-
Dracaena deremensis "Janet Craig"	15 275	18 330	15 275	25 968	15 275	48 880

Die Tab. A. 3 listet sämtliche Pflanzen auf, welche zum Einsatz kamen.

Tab. A. 3 Pflanzenbezeichnungen, welche in den Schulen verwendet wurden, unveränderte Darstellung aus [27]

	botanischer Name	deutscher Name
Sa	<i>Scindapsus aureus</i>	Efeutute
Zz	<i>Zamioculcas zamiifolia</i>	Glücksfeder
NV	<i>Nephrolepis exaltata</i> 'Vitale'	Schwertfarn
DL	<i>Dracaena fragrans</i> 'Lemon Lime'	Drachenbaum
Cc	<i>Chlorophytum comosum</i> 'Ocean'	Grünlilie
Ap	<i>Asparagus plumosus</i>	Federspargel
NB	<i>Nephrolepis exaltata</i> 'Boston'	Schwertfarn
DG	<i>Dracaena fragrans</i> 'Green Jewel'	Drachenbaum
Pc	<i>Peperomia clusifolia</i>	Zwergpfeffer
Ps	<i>Philodendron scandens</i>	Baumfreund
Tz	<i>Tradescantia zebrina</i>	Zebra Ampelkraut
Sp	<i>Scindapsus pictus</i>	Gefleckte Efeutute
BR	<i>Begonia Rey-Hybriden</i>	Blatt Begonie
Tp	<i>Tradescantia pallida</i>	Mexikanische Dreimasterblume

11.3 Anhang – Abbildungen / bezüglich der Auswertungen

11.3.1 Bezüglich des Außenklimas

Für die Wetterdaten in den Abbildungen (siehe Abb. A. 1 und Abb. A. 2) wurden die Wochenmittelwerte für die Temperatur und die relative Luftfeuchte ermittelt, welche für die Jahre 2017 und 2018 dargestellt sind.

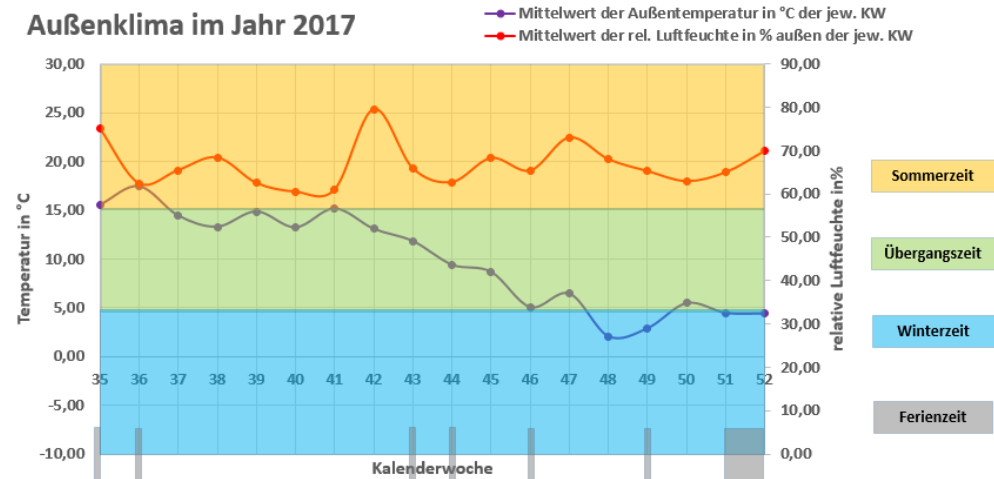


Abb. A. 1 Außenklima des Jahres 2017 mit Mittelwerten der Außentemperatur in °C und den Mittelwerten der relativen Außenluftfeuchte in % je Kalenderwoche (eigene Darstellung)

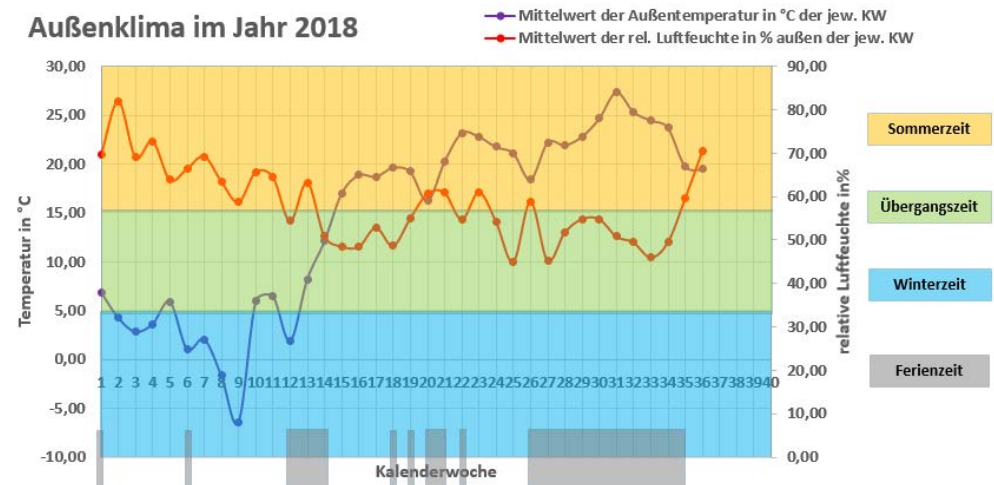


Abb. A. 2 Außenklima des Jahres 2018 mit Mittelwerten der Außentemperatur in °C und den Mittelwerten der relativen Außenluftfeuchte in % je Kalenderwoche (eigene Darstellung)

Des Weiteren wird im Kapitel 6.2 auf die extremsten Tagesmittelwerte der Wassergehalte der Außenluft eingegangen, welche in der folgenden Abbildung (siehe Abb. A. 3) für den Betrachtungszeitraum der Untersuchungen dargestellt ist. In den Abbildungen (siehe Abbildung 32, Abbildung 33 und Abbildung 34) werden nur diejenigen Tage betrachtet, insofern die trockensten (kleiner oder gleich 3 g / kg) und feuchtesten (über 10 g / kg) Tagesmittelwerte des Wassergehaltes in der Außenluft vorhanden sind. Diese Tagesmittelwerte sind in der Abb. A. 3 verdeutlicht.

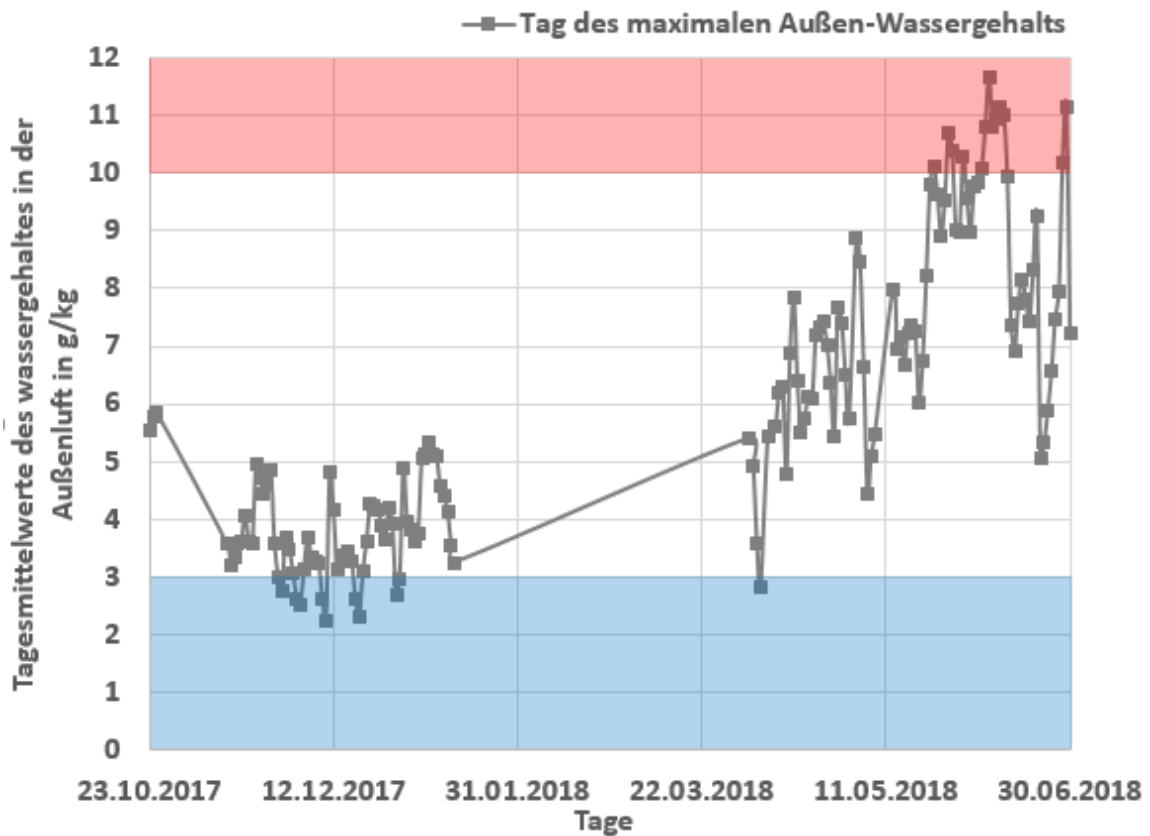


Abb. A. 3 *Darstellung der extremsten Tagesmittelwerte der Wassergehalte der Außenluft für den Betrachtungszeitraum der Untersuchungen (Schuljahr 2017 / 2018). Die trockensten Tagesmittelwerte (kleiner oder gleich 3 g / kg) werden durch den blauen Bereich verdeutlicht und die feuchtesten Werte (größer gleich 10 g / kg) werden anhand des roten Bereiches angezeigt. Für weitere Details wird auf folgende Abbildungen hingewiesen: Abbildung 32; Abbildung 33; Abbildung 34. (eigene Darstellung)*

11.3.2 Bezüglich des GRG 7

Tab. A. 4 Belegungspläne des GRG 7 für das Schuljahr 2017 / 2018 der einzelnen Klassenräume, wobei die Grünklasse 1C dem Vliessystemraum, der Biologieraum 3A dem Trogsystemraum und die Referenzklasse 3B dem Referenzraum entsprechen. (eigene Darstellung)

Stunde	Uhrzeit		Grünklasse 1C							Stunde
	Von	bis	Montag	Dienstag	Mittwoch	Donnerstag	Freitag	Samstag	Sonntag	
0	00:00	07:45	99	99	99	99	99	99	99	0
0,5	07:45	07:59	START	START	START	99	START	99	99	0,5
1	08:00	08:50	ff	ff	ff	99	ff	99	99	1
2	09:00	09:50	ff	ff	ff	ff	ff	99	99	2
3	10:00	10:50	ff	ff	ff	ff	ff	99	99	3
4	11:00	11:50	ff	ff	ff	ff	ff	99	99	4
5	12:00	12:50	99	ff	ff	ff	99	99	99	5
6	13:00	13:50	99	ff	99	ff	99	99	99	6
7	13:55	14:45	99	99	99	99	99	99	99	7
8	14:45	15:35	ff	99	99	99	99	99	99	8
9	15:35	16:25	ff	99	99	99	99	99	99	9
10	16:25	17:15	ff	99	99	99	99	99	99	10
11	17:15	18:05	99	99	99	99	99	99	99	11
12	18:05	18:55	99	99	99	99	99	99	99	12
13	18:55	23:59	99	99	99	99	99	99	99	13

Stunde	Uhrzeit		Referenzklasse 3B							Stunde
	Von	bis	Montag	Dienstag	Mittwoch	Donnerstag	Freitag	Samstag	Sonntag	
0	00:00	07:45	99	99	99	99	99	99	99	0
0,5	07:45	07:59	START	START	START	START	START	99	99	0,5
1	08:00	08:50	ff	ff	ff	ff	ff	99	99	1
2	09:00	09:50	ff	ff	ff	ff	ff	99	99	2
3	10:00	10:50	ff	ff	ff	ff	ff	99	99	3
4	11:00	11:50	ff	ff	ff	ff	ff	99	99	4
5	12:00	12:50	ff	ff	ff	ff	ff	99	99	5
6	13:00	13:50	ff	ff	99	ff	ff	99	99	6
7	13:55	14:45	99	99	99	99	99	99	99	7
8	14:45	15:35	99	ff	99	ff	ff	99	99	8
9	15:35	16:25	99	ff	99	ff	ff	99	99	9
10	16:25	17:15	ff	ff	99	ff	99	99	99	10
11	17:15	18:05	ff	ff	99	ff	99	99	99	11
12	18:05	18:55	99	99	99	99	99	99	99	12
13	18:55	23:59	99	99	99	99	99	99	99	13

Stunde	Uhrzeit		Biologieraum 3A							Stunde
	Von	bis	Montag	Dienstag	Mittwoch	Donnerstag	Freitag	Samstag	Sonntag	
0	00:00	07:45	99	99	99	99	99	99	99	0
0,5	07:45	07:59	START	START	START	START	START	99	99	0,5
1	08:00	08:50	ff	ff	ff	ff	ff	99	99	1
2	09:00	09:50	ff	ff	ff	ff	ff	99	99	2
3	10:00	10:50	ff	ff	ff	99	ff	99	99	3
4	11:00	11:50	ff	99	ff	ff	ff	99	99	4
5	12:00	12:50	ff	ff	ff	ff	ff	99	99	5
6	13:00	13:50	99	ff	ff	ff	ff	99	99	6
7	13:55	14:45	99	99	ff	99	99	99	99	7
8	14:45	15:35	ff	99	ff	ff	99	99	99	8
9	15:35	16:25	ff	99	99	ff	99	99	99	9
10	16:25	17:15	99	99	99	99	99	99	99	10
11	17:15	18:05	99	99	99	99	99	99	99	11
12	18:05	18:55	99	99	99	99	99	99	99	12
13	18:55	23:59	99	99	99	99	99	99	99	13

Tab. A. 5 Alle Ergebnisse des GRG 7 der einzelnen Betrachtungszeiträume in einer Tabelle zusammengeführt. Des Weiteren werden die Benotungen für jedes Behaglichkeitsfeld ersichtlich und anschließend wird ein Mittelwert für den entsprechenden Betrachtungszeitraum der jeweiligen Phase, laut Abbildung 17 von Phase I bis Phase III erstellt. (eigene Darstellung)

GRG 7					
jeweiliger berücksichtigter Zeitraum und Datenmenge	Behaglichkeitsfelder	Referenzraum	Trogsystemraum	Vliessystemraum	
Alle Zeiträume und alle Daten	behaglich	17.6%	3.0%	17.2%	
	noch behaglich	59.0%	50.4%	56.8%	
	unbehaglich	23.4%	46.6%	26.0%	
Bewertung der Behaglichkeitsfelder		3.1	3.9	3.2	
Alle Zeiträume und nur belegte Daten	behaglich	20.5%	4.4%	6.1%	
	noch behaglich	45.5%	49.7%	55.9%	
	unbehaglich	34.0%	45.9%	38.1%	
Bewertung der Behaglichkeitsfelder		3.3	3.8	3.6	
Alle Zeiträume und nur unbelegte Daten	behaglich	17.4%	2.4%	19.3%	
	noch behaglich	62.4%	46.1%	57.4%	
	unbehaglich	20.2%	50.5%	23.3%	
Bewertung der Behaglichkeitsfelder		3.1	3.9	3.1	
nur Sommerzeitraum und nur belegte Daten	behaglich	0.5%	2.3%	0.9%	
	noch behaglich	47.6%	46.5%	43.2%	
	unbehaglich	51.9%	51.2%	55.9%	
Bewertung der Behaglichkeitsfelder		4.0	4.0	4.1	
nur Übergangszeitraum und nur belegte Daten	behaglich	52.4%	19.9%	17.8%	
	noch behaglich	45.8%	74.2%	77.8%	
	unbehaglich	1.8%	5.9%	4.3%	
Bewertung der Behaglichkeitsfelder		2.0	2.7	2.7	
nur Winterzeitraum und nur belegte Daten	behaglich	64.6%	0.0%	13.8%	
	noch behaglich	35.4%	0.0%	85.0%	
	unbehaglich	0.0%	0.0%	1.2%	
Bewertung der Behaglichkeitsfelder		1.7	0.0	2.7	
nur Vormittag	nur Sommerzeitraum und nur belegte Daten	behaglich	1.0%	3.0%	1.0%
		noch behaglich	45.0%	48.0%	43.0%
		unbehaglich	54.0%	49.0%	56.0%
	Bewertung der Behaglichkeitsfelder		4.1	3.9	4.1
	nur Übergangszeitraum und nur belegte Daten	behaglich	52.0%	73.0%	15.0%
		noch behaglich	44.0%	27.0%	80.0%
		unbehaglich	4.0%	0.0%	5.0%
	Bewertung der Behaglichkeitsfelder		2.0	1.5	2.8
	nur Winterzeitraum und nur belegte Daten	behaglich	64.0%	0.0%	12.0%
		noch behaglich	36.0%	0.0%	87.0%
unbehaglich		0.0%	0.0%	1.0%	
Bewertung der Behaglichkeitsfelder		1.7	0.0	2.8	
nur Nachmittag	nur Sommerzeitraum und nur belegte Daten	behaglich	0.0%	2.0%	0.0%
		noch behaglich	50.0%	44.0%	43.0%
		unbehaglich	50.0%	54.0%	57.0%
	Bewertung der Behaglichkeitsfelder		4.0	4.0	4.1
	nur Übergangszeitraum und nur belegte Daten	behaglich	53.0%	43.0%	26.0%
		noch behaglich	47.0%	57.0%	71.0%
		unbehaglich	0.0%	0.0%	3.0%
	Bewertung der Behaglichkeitsfelder		1.9	2.1	2.5
	nur Winterzeitraum und nur belegte Daten	behaglich	65.0%	0.0%	18.0%
		noch behaglich	35.0%	0.0%	80.0%
unbehaglich		0.0%	0.0%	2.0%	
Bewertung der Behaglichkeitsfelder		1.7	0.0	2.7	

11.3.3 Bezüglich des BRG 15

Tab. A. 6 Belegungspläne des BRG 15 für das Schuljahr 2017 / 2018 der einzelnen Klassenräume, wobei die Grünklasse 251 dem Vliessystemraum, der Biologieraum 255 dem Trogsystemraum und die Referenzklasse 253 dem Referenzraum entsprechen. (eigene Darstellung)

Stunde	Uhrzeit		Grünklasse 251							Stunde
	Von	bis	Montag	Dienstag	Mittwoch	Donnerstag	Freitag	Samstag	Sonntag	
0	00:00	07:45	99	99	99	99	99	99	99	0
0,5	07:45	07:59	Start	Start	Start	99	Start	99	99	0,5
1	08:00	08:50	ff	ff	ff	99	ff	99	99	1
2	09:00	09:50	99	99	ff	ff	ff	99	99	2
3	10:05	10:55	99	ff	ff	ff	ff	99	99	3
4	11:05	11:55	99	99	ff	ff	ff	99	99	4
5	12:05	12:55	99	ff	ff	ff	ff	99	99	5
6	13:05	13:55	ff	ff	ff	ff	ff	99	99	6
7	13:55	14:45	99	99	99	99	99	99	99	7
8	14:45	15:35	99	ff	ff	ff	99	99	99	8
9	15:35	16:25	99	ff	ff	ff	99	99	99	9
10	16:25	17:15	99	99	99	ff	99	99	99	10
11	17:15	18:05	99	99	99	ff	99	99	99	11
12	18:05	18:55	99	99	99	99	99	99	99	12
13	18:55	23:59	99	99	99	99	99	99	99	13

Stunde	Uhrzeit		Referenzklasse 253							Stunde
	Von	bis	Montag	Dienstag	Mittwoch	Donnerstag	Freitag	Samstag	Sonntag	
0	00:00	07:45	99	99	99	99	99	99	99	0
0,5	07:45	07:59	Start	Start	Start	Start	Start	99	99	0,5
1	08:00	08:50	ff	ff	ff	ff	ff	99	99	1
2	09:00	09:50	ff	ff	ff	ff	99	99	99	2
3	10:05	10:55	ff	ff	ff	ff	ff	99	99	3
4	11:05	11:55	ff	ff	ff	ff	ff	99	99	4
5	12:05	12:55	ff	ff	ff	99	ff	99	99	5
6	13:05	13:55	ff	ff	ff	99	ff	99	99	6
7	13:55	14:45	99	99	99	99	99	99	99	7
8	14:45	15:35	99	ff	99	99	99	99	99	8
9	15:35	16:25	99	ff	99	99	99	99	99	9
10	16:25	17:15	99	99	99	99	99	99	99	10
11	17:15	18:05	99	99	99	99	99	99	99	11
12	18:05	18:55	99	99	99	99	99	99	99	12
13	18:55	23:59	99	99	99	99	99	99	99	13

Stunde	Uhrzeit		Biologieraum 255							Stunde
	Von	bis	Montag	Dienstag	Mittwoch	Donnerstag	Freitag	Samstag	Sonntag	
0	00:00	07:45	99	99	99	99	99	99	99	0
0,5	07:45	07:59	START	START	99	START	START	99	99	0,5
1	08:00	08:50	ff	ff	99	ff	ff	99	99	1
2	09:00	09:50	99	99	ff	99	99	99	99	2
3	10:05	10:55	99	ff	ff	ff	ff	99	99	3
4	11:05	11:55	ff	ff	ff	ff	ff	99	99	4
5	12:05	12:55	ff	99	ff	ff	99	99	99	5
6	13:05	13:55	99	ff	99	ff	ff	99	99	6
7	13:55	14:45	99	99	99	99	99	99	99	7
8	14:45	15:35	99	ff	99	ff	99	99	99	8
9	15:35	16:25	99	ff	99	99	99	99	99	9
10	16:25	17:15	99	99	99	99	99	99	99	10
11	17:15	18:05	99	99	99	99	99	99	99	11
12	18:05	18:55	99	99	99	99	99	99	99	12
13	18:55	23:59	99	99	99	99	99	99	99	13

Tab. A. 7 Alle Ergebnisse des BRG 15 der einzelnen Betrachtungszeiträume in einer Tabelle zusammengeführt. Des Weiteren werden die Benotungen für jedes Behaglichkeitsfeld ersichtlich und anschließend wird ein Mittelwert für den entsprechenden Betrachtungszeitraum der jeweiligen Phase, laut Abbildung 17 von Phase I bis Phase III erstellt. (eigene Darstellung)

BRG 15					
jeweiliger berücksichtigter Zeitraum und Datenmenge	Behaglichkeitsfelder	Referenzraum	Trogsystemraum	Vliessystemraum	
Alle Zeiträume und alle Daten (Phase I)	behaglich	3.0%	16.0%	15.0%	
	noch behaglich	46.0%	25.0%	43.0%	
	unbehaglich	51.0%	59.0%	42.0%	
Bewertung der Behaglichkeitsfelder		4.0	3.9	3.5	
Alle Zeiträume und nur belegte Daten	behaglich	1.3%	9.0%	1.0%	
	noch behaglich	44.4%	32.1%	57.2%	
	unbehaglich	54.4%	58.9%	41.8%	
Bewertung der Behaglichkeitsfelder		4.1	4.0	3.8	
Alle Zeiträume und nur unbelegte Daten	behaglich	3.3%	17.5%	16.9%	
	noch behaglich	45.7%	23.6%	41.6%	
	unbehaglich	50.9%	58.9%	41.5%	
Bewertung der Behaglichkeitsfelder		4.0	3.8	3.5	
nur Sommerzeitraum und nur belegte Daten	behaglich	0.1%	0.3%	1.1%	
	noch behaglich	20.8%	12.7%	39.6%	
	unbehaglich	79.1%	87.0%	59.3%	
Bewertung der Behaglichkeitsfelder		4.6	4.7	4.2	
nur Übergangszeitraum und nur belegte Daten	behaglich	5.8%	29.6%	1.5%	
	noch behaglich	86.1%	56.0%	81.3%	
	unbehaglich	8.1%	14.4%	17.2%	
Bewertung der Behaglichkeitsfelder		3.0	2.7	3.3	
nur Winterzeitraum und nur belegte Daten	behaglich	0.2%	18.0%	0.0%	
	noch behaglich	95.8%	82.0%	99.9%	
	unbehaglich	4.0%	0.0%	1.1%	
Bewertung der Behaglichkeitsfelder		3.1	2.6	3.1	
nur Vormittag	nur Sommerzeitraum und nur belegte Daten	behaglich	0.0%	0.0%	1.0%
		noch behaglich	25.0%	83.0%	45.0%
		unbehaglich	75.0%	17.0%	54.0%
	Bewertung der Behaglichkeitsfelder		4.5	3.3	4.1
	nur Übergangszeitraum und nur belegte Daten	behaglich	5.0%	35.0%	2.0%
		noch behaglich	86.0%	54.0%	79.0%
		unbehaglich	9.0%	11.0%	19.0%
	Bewertung der Behaglichkeitsfelder		3.1	2.5	3.3
	nur Winterzeitraum und nur belegte Daten	behaglich	0.0%	19.0%	0.0%
		noch behaglich	97.0%	81.0%	99.0%
unbehaglich		3.0%	0.0%	1.0%	
Bewertung der Behaglichkeitsfelder		3.1	2.6	3.0	
nur Nachmittag	nur Sommerzeitraum und nur belegte Daten	behaglich	0.0%	0.0%	1.0%
		noch behaglich	10.0%	4.0%	30.0%
		unbehaglich	90.0%	96.0%	69.0%
	Bewertung der Behaglichkeitsfelder		4.8	4.9	4.4
	nur Übergangszeitraum und nur belegte Daten	behaglich	7.0%	22.0%	0.0%
		noch behaglich	87.0%	59.0%	85.0%
		unbehaglich	6.0%	19.0%	15.0%
	Bewertung der Behaglichkeitsfelder		3.0	2.9	3.3
	nur Winterzeitraum und nur belegte Daten	behaglich	0.0%	16.0%	0.0%
		noch behaglich	92.0%	84.0%	98.0%
unbehaglich		8.0%	0.0%	2.0%	
Bewertung der Behaglichkeitsfelder		3.2	2.7	3.0	

11.3.4 Bezüglich des BRG 16

Tab. A. 8 Belegungspläne des BRG 16 für das Schuljahr 2017 / 2018 der einzelnen Klassenräume, wobei die Grünklasse N016 dem Vliessystemraum, der Biologieraum N004 dem Trogsystemraum und die Referenzklasse N005 dem Referenzraum entsprechen. (eigene Darstellung)

Stunde	Uhrzeit		Grünklasse N016							Stunde
	Von	bis	Montag	Dienstag	Mittwoch	Donnerstag	Freitag	Samstag	Sonntag	
0	00:00	07:45	99	99	99	99	99	99	99	0
0,5	07:45	07:59	Start	Start	99	Start	Start	99	99	0,5
1	08:00	08:50	ff	ff	99	ff	ff	99	99	1
2	09:00	09:50	ff	ff	ff	ff	ff	99	99	2
3	10:05	10:55	ff	99	ff	ff	ff	99	99	3
4	11:05	11:55	99	99	99	ff	ff	99	99	4
5	12:05	12:55	ff	ff	99	ff	ff	99	99	5
6	13:05	13:55	ff	ff	ff	ff	99	99	99	6
7	13:55	14:45	99	99	99	99	99	99	99	7
8	14:45	15:35	ff	99	ff	99	99	99	99	8
9	15:35	16:25	ff	99	ff	99	99	99	99	9
10	16:25	17:15	99	99	99	99	99	99	99	10
11	17:15	18:05	99	99	99	99	99	99	99	11
12	18:05	18:55	99	99	99	99	99	99	99	12
13	18:55	23:59	99	99	99	99	99	99	99	13

Stunde	Uhrzeit		Referenzklasse N005							Stunde
	Von	bis	Montag	Dienstag	Mittwoch	Donnerstag	Freitag	Samstag	Sonntag	
0	00:00	07:45	99	99	99	99	99	99	99	0
0,5	07:45	07:59	Start	Start	99	Start	Start	99	99	0,5
1	08:00	08:50	ff	ff	99	ff	ff	99	99	1
2	09:00	09:50	ff	ff	ff	ff	ff	99	99	2
3	10:05	10:55	99	ff	99	ff	ff	99	99	3
4	11:05	11:55	ff	99	ff	ff	ff	99	99	4
5	12:05	12:55	99	ff	99	99	ff	99	99	5
6	13:05	13:55	99	ff	ff	99	99	99	99	6
7	13:55	14:45	99	99	99	99	99	99	99	7
8	14:45	15:35	ff	99	ff	99	ff	99	99	8
9	15:35	16:25	ff	99	ff	ff	99	99	99	9
10	16:25	17:15	99	99	99	ff	99	99	99	10
11	17:15	18:05	99	99	99	99	99	99	99	11
12	18:05	18:55	99	99	99	99	99	99	99	12
13	18:55	23:59	99	99	99	99	99	99	99	13

Stunde	Uhrzeit		Biologieraum N004							Stunde
	Von	bis	Montag	Dienstag	Mittwoch	Donnerstag	Freitag	Samstag	Sonntag	
0	00:00	07:45	99	99	99	99	99	99	99	0
0,5	07:45	07:59	START	START	START	99	START	99	99	0,5
1	08:00	08:50	ff	ff	ff	99	ff	99	99	1
2	09:00	09:50	ff	ff	99	ff	99	99	99	2
3	10:05	10:55	ff	ff	99	ff	ff	99	99	3
4	11:05	11:55	ff	ff	ff	ff	ff	99	99	4
5	12:05	12:55	ff	ff	ff	ff	ff	99	99	5
6	13:05	13:55	ff	ff	ff	ff	ff	99	99	6
7	13:55	14:45	99	99	99	99	99	99	99	7
8	14:45	15:35	99	ff	ff	ff	99	99	99	8
9	15:35	16:25	99	ff	ff	ff	99	99	99	9
10	16:25	17:15	99	99	99	ff	99	99	99	10
11	17:15	18:05	99	99	99	99	99	99	99	11
12	18:05	18:55	99	99	99	99	99	99	99	12
13	18:55	23:59	99	99	99	99	99	99	99	13

Tab. A. 9 Alle Ergebnisse des BRG 16 der einzelnen Betrachtungszeiträume in einer Tabelle zusammengeführt. Des Weiteren werden die Benotungen für jedes Behaglichkeitsfeld ersichtlich und anschließend ein Mittelwert für den entsprechenden Betrachtungszeitraum der jeweiligen Phase, laut Abbildung 17 von Phase I bis Phase III erstellt. (eigene Darstellung)

BRG 16					
jeweiliger berücksichtigter Zeitraum und Datenmenge	Behaglichkeitsfelder	Referenzraum	Trogsystemraum	Vliessystemraum	
Alle Zeiträume und alle Daten	behaglich	19.0%	38.0%	28.0%	
	noch behaglich	60.0%	48.0%	39.0%	
	unbehaglich	21.0%	14.0%	33.0%	
Bewertung der Behaglichkeitsfelder		3.0	2.5	3.1	
Alle Zeiträume und nur belegte Daten	behaglich	15.0%	22.7%	16.6%	
	noch behaglich	58.3%	53.4%	49.1%	
	unbehaglich	26.7%	23.9%	34.3%	
Bewertung der Behaglichkeitsfelder		3.2	3.0	3.4	
Alle Zeiträume und nur unbelegte Daten	behaglich	19.3%	41.3%	30.4%	
	noch behaglich	60.6%	47.3%	36.6%	
	unbehaglich	20.1%	11.4%	33.0%	
Bewertung der Behaglichkeitsfelder		3.0	2.4	3.1	
nur Sommerzeitraum und nur belegte Daten	behaglich	12.8%	14.5%	5.8%	
	noch behaglich	46.2%	48.7%	41.8%	
	unbehaglich	41.0%	36.8%	52.4%	
Bewertung der Behaglichkeitsfelder		3.6	3.4	3.9	
nur Übergangszeitraum und nur belegte Daten	behaglich	30.9%	42.7%	42.4%	
	noch behaglich	69.1%	57.3%	56.1%	
	unbehaglich	0.0%	0.1%	1.5%	
Bewertung der Behaglichkeitsfelder		2.4	2.1	2.2	
nur Winterzeitraum und nur belegte Daten	behaglich	2.0%	30.7%	28.3%	
	noch behaglich	97.4%	69.1%	71.3%	
	unbehaglich	0.6%	0.2%	0.4%	
Bewertung der Behaglichkeitsfelder		3.0	2.4	2.4	
nur Vormittag	nur Sommerzeitraum und nur belegte Daten	behaglich	16.0%	22.0%	9.0%
		noch behaglich	46.0%	51.0%	46.0%
		unbehaglich	38.0%	27.0%	45.0%
	Bewertung der Behaglichkeitsfelder		3.4	3.1	3.7
	nur Übergangszeitraum und nur belegte Daten	behaglich	29.0%	47.0%	45.0%
		noch behaglich	71.0%	53.0%	53.0%
		unbehaglich	0.0%	0.0%	2.0%
	Bewertung der Behaglichkeitsfelder		2.4	2.1	2.1
	nur Winterzeitraum und nur belegte Daten	behaglich	2.0%	30.0%	25.0%
noch behaglich		97.0%	70.0%	75.0%	
unbehaglich		1.0%	0.0%	0.0%	
Bewertung der Behaglichkeitsfelder		3.0	2.4	2.5	
nur Nachmittag	nur Sommerzeitraum und nur belegte Daten	behaglich	7.0%	5.0%	1.0%
		noch behaglich	47.0%	46.0%	39.0%
		unbehaglich	46.0%	49.0%	60.0%
	Bewertung der Behaglichkeitsfelder		3.8	3.9	4.2
	nur Übergangszeitraum und nur belegte Daten	behaglich	34.0%	38.0%	39.0%
		noch behaglich	66.0%	62.0%	60.0%
		unbehaglich	0.0%	0.0%	1.0%
	Bewertung der Behaglichkeitsfelder		2.3	2.2	2.2
	nur Winterzeitraum und nur belegte Daten	behaglich	1.0%	31.0%	32.0%
noch behaglich		98.0%	68.0%	68.0%	
unbehaglich		1.0%	1.0%	0.0%	
Bewertung der Behaglichkeitsfelder		3.0	2.4	2.4	

12 Literaturverzeichnis

- [1] „FLORAWALL GmbH - Wissenschaftliche Studie: Florawall – Wirkanalyse einer vertikalen Begrünung,“ FH Burgenland im Auftrag von Florawall, 23 04 2015. [Online]. Available: www.florawall.at. [Zugriff am 08 2018].
- [2] „bauen.de - Grüne Wand,“ Immowelt AG 2018, 2018. [Online]. Available: <https://www.bauen.de/a/gruene-wand-raffinierter-blickfang-fuer-die-wohnung.html>. [Zugriff am 09 2018].
- [3] „KIT - Presseinformation 2012,“ 2012. [Online]. Available: www.kit.edu. [Zugriff am 08 2018].
- [4] R. Boos , B. Damberger, H.-P. Hutter, M. Kundi, H. Moshammer, P. Tappler, F. Twrdik und P. Wallner, „Bewertung der Innenraumlufte - Physikalische Faktoren, Kohlenstoffdioxid als Lüftungsparameter,“ Bericht - Arbeitskreis „Innenraumlufte“ am Umweltministerium (Österreich), Wien, 2011.
- [5] M. B. McCullough, M. D. Martin und M. A. Sajady, „Frontiers in Psychology,“ 06 06 2018. [Online]. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5997894/>. [Zugriff am 08 2018].
- [6] „CORAK Engineering - Thema Raumklima,“ 2018. [Online]. Available: http://www.corak.ch/themen/raumklima_bauphysik.html. [Zugriff am 08 2018].
- [7] „Baunetzwissen (1) - Luft und Lüftung / Raumbelüftung und Raumqualität,“ 2018. [Online]. Available: <https://www.baunetzwissen.de/bauphysik/fachwissen/luft-und-lueftung/raumbelueftung-und-raumluftqualitaet-4316959;>. [Zugriff am 08 2018].
- [8] „DIN 1946-2:1994-01 / Raumluftechnik; Gesundheitstechnische Anforderungen - (VDI-Lüftungsregeln),“ <https://www.beuth.de/de/norm/din-1946-2/2204739>, 1994-01 [Zugriff: 08/2018].
- [9] A. Seerig, „e-genius - open content platform,“ Initiative offene Bildung in Technik und Naturwissenschaften / Wien, 12 2017. [Online]. Available: https://www.e-genius.at/fileadmin/user_upload/grundlagen_thermische_behaglichkeit/grundlagen_thermische_behaglichkeit_2017.pdf. [Zugriff am 08 2018].
- [10] „ÖNORM EN ISO 7730: 2006 05 01 / Ergonomie der thermischen Umgebung,“ https://shop.austrian-standards.at/action/de/public/details/215156/OENORM_EN_ISO_7730_2006_05_01, 2006-05 [Zugriff am 08/2018].
- [11] „ÖNORM EN 16798-3:2017-12 15 / Energetische Bewertung von Gebäuden - Lüftung von Gebäuden - Teil 3,“ [https://shop.austrian-](https://shop.austrian-standards.at/action/de/public/details/215156/OENORM_EN_ISO_7730_2006_05_01)

- standards.at/action/de/public/details/621760/OENORM_EN_16798-3_2017_12_15, 2017 [Zugriff am 08/2018].
- [12] „VIEGA Deutschland - Themen: Energieeffizienz und Raumklima,“ 2016. [Online]. Available: <https://www.viega.de/de/produkte/themen/energieeffizienz/raumklima.html>. [Zugriff am 08 2018].
- [13] A. Dentel und U. Dietrich, „HafenCity Universität Hamburg / Institut für Energie und Gebäude,“ 2008. [Online]. Available: https://rom-umwelt-stiftung.de/wp-content/uploads/2006/02/Dokumentation_Thermische_Behaglichkeit.pdf. [Zugriff am 08 2018].
- [14] P. Tappler, „raumluft.org,“ IBO - Österreichisches Institut für Baubiologie und Bauökologie, 2011 06 2011. [Online]. Available: http://www.raumluft.org/fileadmin/dokumente/raumluft.org_-_Info_Luftmenge.pdf. [Zugriff am 08 2018].
- [15] „Luftentfeuchter & Bautrockner,“ 2013. [Online]. Available: <https://www.luftentfeuchter-bautrockner.de/luftfeuchtigkeit.html>. [Zugriff am 09 2018].
- [16] „VDI 2078:2015-06 / Berechnung der thermischen Lasten und Raumtemperaturen - (Auslegung Kühllast und Jahressimulation),“ <https://www.beuth.de/de/technische-regel/vdi-2078/197958916>, 2015-06 [Zugriff am 08/2018].
- [17] W. Frank, „Raumklima und Thermische Behaglichkeit - Berichte aus der Bauforschung, Heft 104, ISBN/EAN: 3433007314,“ Wilhelm Ernst & Sohn [Bundesminister fuer Raumordnung, Bauwesen und Staedtebau BMBau-, Bonn (Förderer)], Berlin, 1975.
- [18] „BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT (BMFLUW) - Innenraumluft,“ BMFLUW, 31 07 2017. [Online]. Available: https://www.bmlfuw.gv.at/umwelt/luft-laerm-verkehr/luft/innenraumluft/gesunde_Raumluft.html. [Zugriff am 08 2018].
- [19] „Pflanzenforschung - Lexikon / Glossar,“ Bundesministerium für Bildung und Forschung, [Online]. Available: <https://www.pflanzenforschung.de/de/themen/lexikon/evapotranspiration-10021>. [Zugriff am 09 2018].
- [20] „Pflanzenforschung - Wie Pflanzen schwitzen,“ Bundesministerium für Bildung und Forschung, 15 07 2010. [Online]. Available: <https://www.pflanzenforschung.de/de/journal/journalbeitrage/wie-pflanzen-schwitzen-mechanismus-zum-wassersparen-ent-848>. [Zugriff am 08 2018].
- [21] „Pflanzenforschung - Pflanzen schwitzen besser,“ Bundesministerium für Bildung und Forschung, 16 04 2013. [Online]. Available: <https://www.pflanzenforschung.de/de/journal/journalbeitrage/pflanzen-schwitzen-besser->

- us-amerikanische-forscher-ber-10028. [Zugriff am 09 2018].
- [22] A. Bucher, F. Kohlrausch, J. M. Kuckelkorn und R. Troll, „Berechenbare Unterstützung der Klimatisierung von energetisch hocheffizienten Gebäuden durch dezentrale, funktionale Innenraumbegrünung. Abschlussbericht Juni 2015,“ Fraunhofer IRB Verlag - Forschungsinitiative Zukunft Bau, Band F 2970 (Kopie des Manuskripts), Stuttgart, 2016.
- [23] B. C. Wolverton, W. L. Douglas und K. Bounds, „NASA,“ 01 07 1989. [Online]. Available: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19930073077.pdf>. [Zugriff am 08 2018].
- [24] K. Kerstjens, M. Gregg, M. Henze, D. Jansen, A. Kleineke-Borchers, M. Köhler, L. Kremkau, R. Maas, M. Upmeier und W. Werner, „Richtlinien für die Planung, Ausführung und Pflege von Innenraumbegrünungen / Aus der Arbeit des RWA 'Innenraumbegrünung',“ Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL), Bonn, 2011 - 14/07/2011.
- [25] I. Zluwa, „Publikationsserver der Universitätsbibliothek Bodenkultur Wien,“ Masterarbeit an der Universität für Bodenkultur Wien - Department für Bautechnik und Naturgefahren, Institut für Ingenieur, 07 2013. [Online]. Available: <http://epub.boku.ac.at/obvbokhs/content/titleinfo/1082686>. [Zugriff am 09 2018].
- [26] „BIG - Bundesimmobiliengesellschaft - Projekt Diefenbachgasse,“ 2018. [Online]. Available: <https://www.big.at/projekte/bgbrg-diefenbachgasse/>. [Zugriff am 10 2018].
- [27] „GRÜNEzukunftSCHULEN,“ 03 2018. [Online]. Available: <http://www.grueneschulen.at/wp-content/uploads/2018/09/GZS-Kurzprojektbeschreibung-neues-FFG-Logo-1.pdf>. [Zugriff am 10 2018].
- [28] „Wikipedia - GRG7 Kandlgasse,“ [Online]. Available: https://de.wikipedia.org/wiki/GRG7_Kandlgasse. [Zugriff am 10 2018].
- [29] Verein Deutscher Ingenieure, „VDI 4655 Referenzlastprofile von Ein- und Mehrfamilienhäusern für den Einsatz von KWK-Anlagen,“ VDI-Fachbereich Energietechnik (Verein Deutscher Ingenieure), [Zugriff am 10 2018], 2008-05 / https://www.vdi.de/richtlinie/vdi_4655-referenzlastprofile_von_ein_und_mehrfamilienhaeusern_fuer_den_einsatz_von_kwk_anlagen/.
- [30] „Baunetzwissen (2) - Planungsgrundlagen / Gebäudeorientierung,“ 2018. [Online]. Available: <https://www.baunetzwissen.de/nachhaltig-bauen/fachwissen/planungsgrundlagen/gebaeudeorientierung-und-zonierung-662877>. [Zugriff am 12 2018].