



Doctoral Thesis
**INFLUENCES OF LIVING WALL SYSTEMS ON THERMAL
PROTECTION, SUMMERY OVERHEATING AND HYDROTHERMAL
COMFORT**

submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Doctor of Science
of the Vienna University of Technology, Faculty of Civil Engineering

Dissertation
**EINFLÜSSE VERTIKALER GEBÄUDEBEGRÜNUNG AUF
WÄRMESCHUTZ, SOMMERLICHE ÜBERWÄRMUNG UND
HYGROTHERMISCHE BEHAGLICHKEIT**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der technischen Wissenschaften
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen
von

Mag. David Tudiwer
Matrikelnummer 0353101
Bandgasse 9/4; 1070 Wien

Betreuerin : Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Azra Korjenic
Institut für Werkstofftechnologie, Bauphysik und Bauökologie
Forschungsbereich Ökologische Bautechnologien
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/207-03, A - 1040 Wien

Gutachter: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Iva Kovacic
E234 Institut für Interdisziplinäres Bauprozessmanagement
Industriebau und interdisziplinäre Bauplanung
Forschungsgruppe für Integrale Planung
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/234, A - 1040 Wien

Gutachter: Priv. Doz. Dipl.-Ing. Dr. Ulrike Pitha
Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau
Department für Bautechnik und Naturgefahren
Universität für Bodenkultur Wien
Peter Jordan-Straße 82, A-1190 Wien

Wien, im September 2019

Abstract

In der vorliegenden Dissertation wurden die Einflüsse vertikaler Gebäudebegrünung auf Wärmeschutz, sommerliche Überwärmung und hygrothermische Behaglichkeit untersucht. Unterschiedliche Begrünungssysteme wurden an Gebäudefassaden in Wien und Umgebung installiert und über mehrere Jahre gemessen. Um die in situ Messungen an den unterschiedlichen Fassaden hinsichtlich Wärmeschutz auszuwerten, wurde im Zuge der Dissertation eine Methode entwickelt, die auch auf zukünftige in situ Messungen übertragbar ist. Ergänzend zu den in situ Messungen wurden die Auswirkungen auf den Wärmeschutz und die sommerliche Überwärmung mit unterschiedlichen Computerprogrammen untersucht. Die Computerprogramme ermöglichten sowohl das Nachstellen der untersuchten Situationen als auch das Berechnen fiktiver Szenarien an unterschiedlichen Gebäudefassaden. Zur Untersuchung der Auswirkungen von Innenraumbegrünung auf die hygrothermische Behaglichkeit wurden Klassenräume in Wiener Schulen begrünt. Über mehrere Jahre wurde das hygrothermische Innenraumklima in den begrünteren Klassenräumen zeitgleich mit nicht begrünteren Klassenräumen untersucht.

Es hat sich gezeigt, dass vertikale Gebäudebegrünung den Wärmeschutz von nicht gedämmten Gebäuden erhöht. Das Ausmaß der Erhöhung hängt von der Größe der Hinterlüftungsöffnungen ab. Es sind bis zu $0.39 \text{ m}^2\text{K/W}$ möglich. Für gedämmte Gebäude sind außerdem noch die Verankerungen an der Fassade zu beachten. Sie können Wärmebrücken verursachen, die zu einer Verschlechterung des Wärmeschutzes führen. Die sommerliche Überwärmung kann aufgrund von Fassadenbegrünung reduziert werden, wobei sich andere Maßnahmen, wie Außenverschattung der transparenten Flächen und Nachtlüftung, stärker auswirken. Innenraumbegrünung hat keinen Einfluss auf die sommerliche Überwärmung. Die Lufttemperatur sinkt aufgrund von Innenraumbegrünung leicht ab, dafür wird die Luftfeuchtigkeit erhöht, wodurch sich an heißen Tagen die gefühlte Luft etwa gleich warm anfühlt. Auf die hygrothermische Behaglichkeit wirkt sich Innenraumbegrünung positiv aus. Aufgrund der höheren Luftfeuchtigkeit wird im Winter das hygrothermische Klima im begrünteren Raum um 69 % häufiger als behaglich eingestuft, als der nicht begrünteren Raum.

Inhalt

1.	Problemstellung	3
1.1.	Fassadenbegrünung.....	3
1.2.	Innenraumbegrünung.....	7
1.3.	Aufgabenstellung der vorliegenden Dissertation.....	8
1.4.	Technische Grundlagen	9
1.4.1.	U-Wert.....	9
1.4.2.	Sommerliche Überwärmung	12
1.4.3.	Hygrothermische Behaglichkeit.....	12
2.	Ziele	13
3.	Methodologie.....	14
3.1.	Details zu den untersuchten Systeme	14
3.1.1.	Fassaden- und Gebäudeaufbauten.....	14
3.1.2.	Raumgrößen	15
3.1.3.	Begrünungssysteme.....	16
3.2.	Messaufbau.....	16
3.2.1.	Messgeräte.....	16
3.2.2.	Messdurchführung.....	17
3.3.	Messdatenauswertung	18
3.4.	Rechnerische Untersuchungen	19
3.4.1.	U-Wert.....	19
3.4.2.	Auswirkung von Gebäudebegrünung auf den Innenraum.....	20
4.	Zusammenfassung der wissenschaftlichen Aufsätze	22
4.1.	Zusammenfassung erste Publikation, “The effect of living wall systems on the thermal resistance of the façade”.....	22
4.2.	Zusammenfassung zweite Publikation, „Abbildung der wärmedämmenden Wirkung eines fassadengebundenen Begrünungssystems in einem Simulationsmodell“	23
4.3.	Zusammenfassung dritte Publikation, „Greening Aspang – Hygrothermische Gebäudesimulation zur Bestandsanalyse und Bewertung unterschiedlicher Szenarien bezogen auf das Innenraumklima“	26
4.4.	Zusammenfassung vierte Publikation, “The effect of an Indoor Living Wall System on humidity, mould spores and CO2-concentration”	26
5.	Wissenschaftlicher Beitrag der Dissertation.....	28
5.1.	Stand der Forschung	28
5.2.	Ergebnisse	30
5.2.1.	U-Werte und Wärmebrücken.....	30

5.2.2.	Auswirkungen der Innenraumbegrünung auf das hygrothermische Raumklima.....	34
5.3.	Schlussfolgerungen und Beitrag der Dissertation zu den offenen Forschungsfragen.....	38
6.	Diskussion der Arbeit und Ausblick auf offene Forschungsagenden	40
7.	Danksagungen.....	41
8.	Literatur	42
9.	Abbildungsverzeichnis.....	46
10.	Tabellenverzeichnis.....	47
11.	Anhang.....	48

1. Problemstellung

Laut UN werden bis zum Jahr 2050 rund zwei Drittel aller Menschen in Städten leben [1]. Dieser Prozess der Urbanisierung geht einerseits mit der Erweiterung der Stadtgrenzen einher und erfordert andererseits eine Verdichtung im urbanen Raum. Besonders in Städten steigen die Temperaturen an, nicht nur aufgrund der globalen Klimaerwärmung, sondern auch aufgrund des lokalen Phänomens der städtischen Hitzeinseln. Darüber hinaus nimmt die ökologische Vielfalt in den Städten ab, da zahlreichen Tieren der Lebensraum genommen wird. Das Mikroklima verändert sich und begünstigt Feinstaub und andere Schadstoffe in der Luft. Durch die Verdichtung werden die Grünflächen am Boden immer kleiner. Um die Lebensqualität in den Städten weiterhin zu gewährleisten, ist es aber notwendig für mehr Grünflächen im urbanen Raum zu sorgen. Die Fassadenflächen an Gebäuden bieten sich dafür an. Immer mehr Firmen arbeiten an Lösungen für Fassadenbegrünung und entwickeln gemeinsam mit der Forschung verschiedene Produkte für die Umsetzung. Doch einige Auswirkungen von Gebäudebegrünung sind noch unerforscht. Diese Dissertation beantwortet grundlegende Fragen, die sich mit der Auswirkung von Gebäudebegrünung auf das Gebäude und das Mikroklima beschäftigen. Das Kapitel 1.1 informiert über die Grundlagen von Fassadenbegrünung, das Kapitel 1.2 über Innenraumbegrünung, das Kapitel 1.3 und Kapitel 1.4 informieren über den technischen Hintergrund der Problemstellung und führen die wissenschaftlichen Wissenslücken an, die durch diese Dissertation geschlossen wurden.

1.1. Fassadenbegrünung

Im Zuge der vorliegenden Dissertation wurden Auswirkungen von vertikaler Gebäudebegrünung detailliert erforscht. Es gibt zahlreiche Möglichkeiten Gebäude vertikal außen (an den Fassaden) und innen (in Räumen) zu begrünen. In [2] werden die unterschiedlichen Systeme zur Fassadenbegrünung gruppiert. Zur Kategorie der bodengebundenen Begrünung zählen Kletterpflanzen die in der Erde nahe dem Gebäude wurzeln und an der Fassade hochklettern. Es gibt Kletterpflanzen, die sich selbst mittels Wurzeln oder Haftscheiben an der Fassade halten. Die häufigsten Pflanzen, die zur bodengebundenen Fassadenbegrünung eingesetzt werden, sind Efeu und wilder Wein (siehe Abbildung 1).



Abbildung 1: Bodengebundene Fassadenbegrünung in der Werk und Kulturstätte Wien.

Andere Kletterpflanzen benötigen Seile oder andere technische Bauteile um an einer Fassade hochklettern zu können. Sie werden als Gerüstkletterer bezeichnet.

Fassadengebundene Begrünung wird dadurch definiert, dass die Pflanzen nicht am Boden, sondern direkt in einer installierten Konstruktion vor der Fassade wurzeln. Es handelt sich dabei um vorgehängte Fassadenelemente, die direkt am Gebäude befestigt sind. Je nach Produkt sind es entweder Pflanzentröge die an Schienen befestigt sind (siehe Abbildung 2), oder vertikal aufgehängte, flache Behälter aus denen die Pflanzen horizontal wachsen (siehe Abbildung 3).

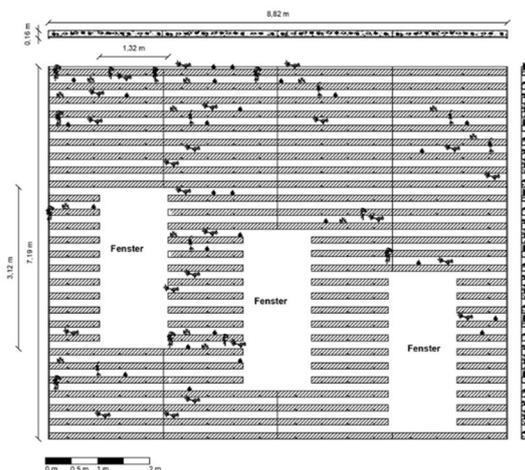


Abbildung 2: Fassadengebundenes Begrünungssystem mit Trögen (Trogsystem) [3].

Das Trogsystem besteht aus übereinander gereihten Trögen, die mit Substrat gefüllt sind. Aufgrund des geringen vertikalen Abstands zwischen den Trogreihen, überdecken die Pflanzen ab einer gewissen Größe die Tröge und es entsteht eine grüne Wand (in Abbildung 2 und Abbildung 6 sind die Pflanzen noch relativ jung, nur an manchen Stellen wird das Aluminium überwachsen). Jede Trogreihe ist mit einem Tropfschlauch ausgestattet und wird bewässert. Überschüssiges Wasser fließt in den Trog darunter. Unterhalb der untersten Trogreihe befindet sich ein Auffangbehälter.

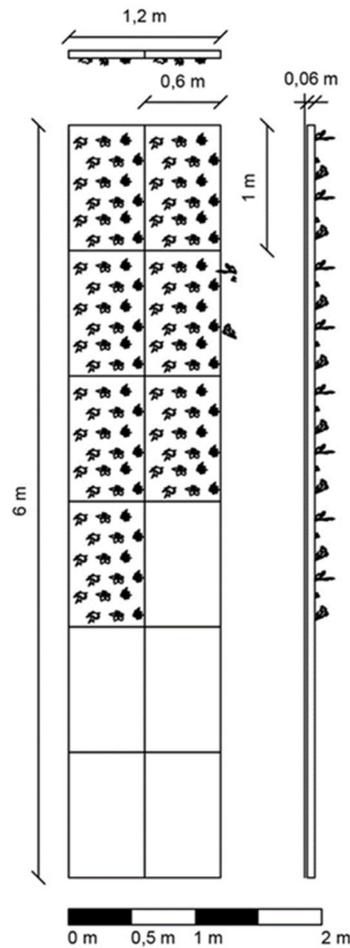


Abbildung 3: Fassadengebundenes Begrünungssystem aus vertikal aufgehängten Behältern, horizontal wachsende Pflanzen (Kassettensystem) [3].

Das Kassettensystem besteht aus zwei Aluminiumplatten, wobei die hintere geschlossen ist. Sie ist die Trägerplatte. Die vordere Platte hat Löcher aus denen die Pflanzen waagrecht wachsen können. Einzelne Module werden nebeneinander installiert und teilen sich ein Bewässerungssystem.

Fassadengebundene Begrünung ist teurer als bodengebundene Begrünung [4], hat aber den Vorteil, dass keine Erdfläche am Boden benötigt wird. Insbesondere in urbanen Gebieten sind die Bedingungen für bodengebundene Begrünung meist nicht gegeben.

Unabhängig vom jeweiligen Typ der fassadengebundenen Begrünung, haben alle Systeme bestimmte Gemeinsamkeiten. Es muss einen Hinterlüftungsspalt zwischen Gebäude und Begrünungssystem geben, um Kondensat zu vermeiden (siehe Abbildung 4). Der Hinterlüftungsspalt definiert den Abstand zwischen Gebäudefassade und Begrünungselement. Die Luft im Hinterlüftungsspalt ist mit der Außenluft über die Hinterlüftungsöffnungen verbunden. Die Größe der Hinterlüftungsöffnungen kann dabei variieren. Abbildung 5 zeigt die Fassadenbegrünung schematisch und stellt den Hinterlüftungsspalt und die Hinterlüftungsöffnungen dar.

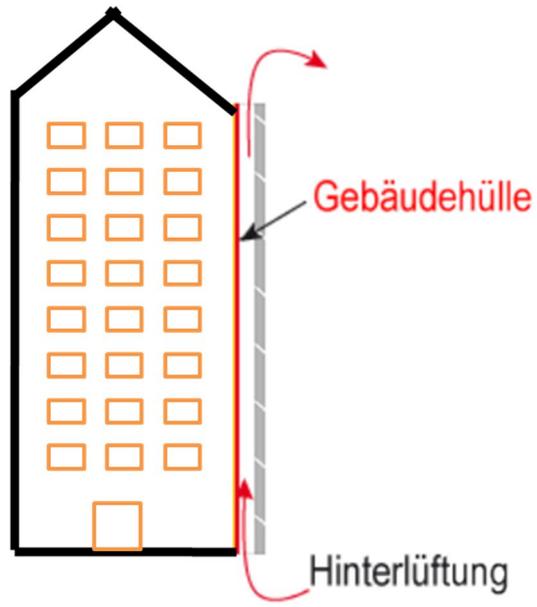


Abbildung 4: Schematische Darstellung der vorgehängten hinterlüfteten Konstruktion einer fassadengebundenen Begrünung.

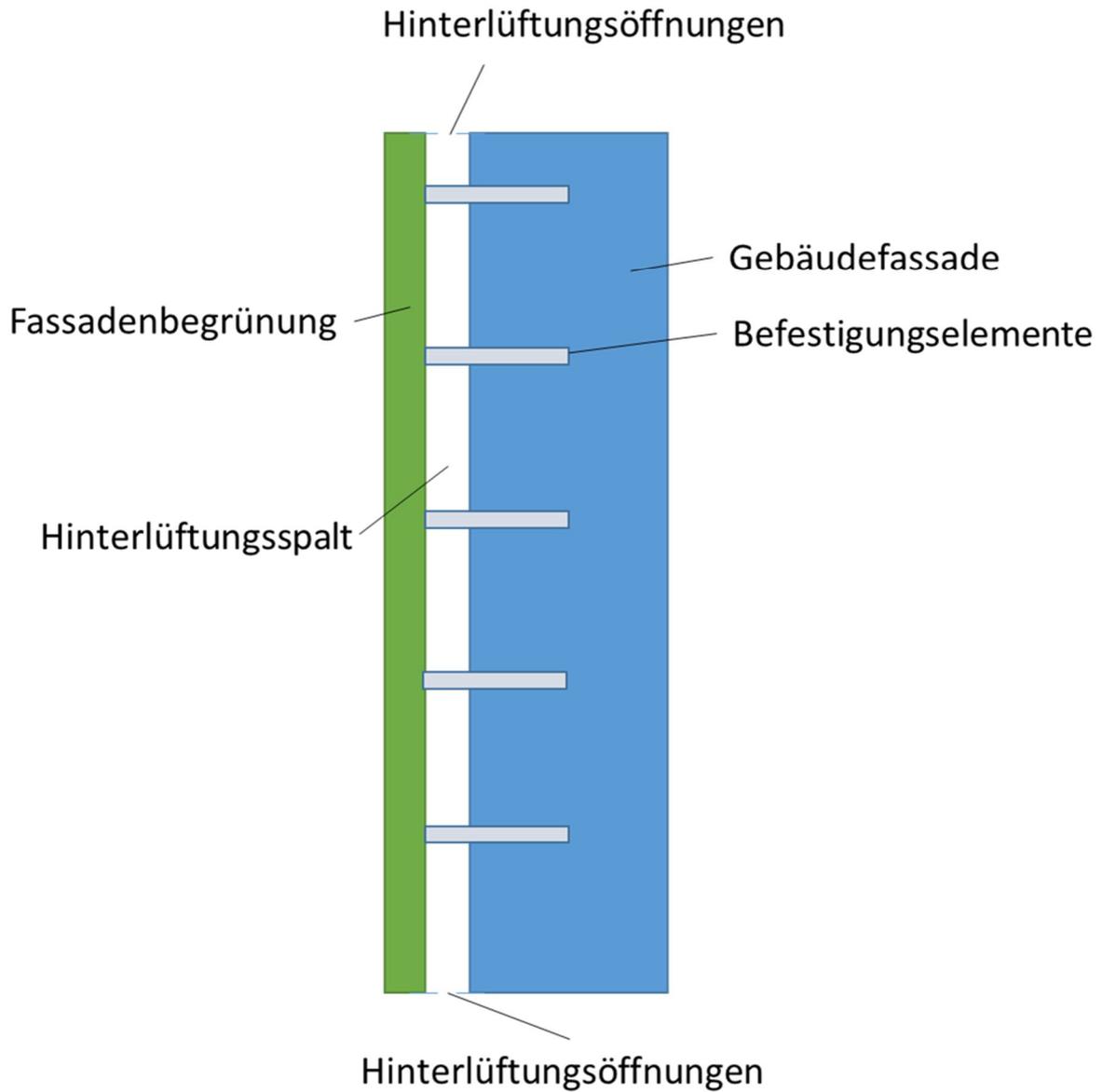


Abbildung 5: Darstellung von Hinterlüftungsspalt und Hinterlüftungsöffnungen.

1.2. Innenraumbegrünung

Innenraumbegrünung kann, wie bisher üblich, mit konventionellen Blumentöpfen erfolgen. Neue Systeme ermöglichen jedoch auch die vertikale Begrünung der Wände von Innenräumen. So sind größere Flächen von Begrünung ohne bedeutenden Platzaufwand in Räumen möglich. Abbildung 6 zeigt zwei verschiedene Begrünungssysteme in Räumen, die im Rahmen dieser Dissertation aktiv messtechnisch untersucht wurden.



Abbildung 6: Die untersuchte vertikale Innenraumbegrünung. Links: Trogsystem, Rechts: Vliestaschensystem.

Das Trogsystem im Innenraum (Abbildung 6 links) ist genauso aufgebaut wie im Außenraum (siehe Kapitel 1.1). Das Vliestaschensystem (Abbildung 6 rechts) besteht aus zwei Vliesschichten. Die außenliegende Schicht ist hydrophob und lässt kein Wasser durch. Die innenliegende ist hydrophil und verteilt das von oben zugeführte Wasser. In diesem Begrünungssystem befindet sich kein Substrat. Mit der Bewässerung werden auch alle notwendigen Nährstoffe der Pflanze zugeführt. Die Pflanzen werden wurzelnack in Einschnittlöcher der äußeren Vliesschicht gesetzt.

Im Zuge der vorliegenden Dissertation wurden Messungen in Räumen durchgeführt, die mit diesen Begrünungssystemen ausgestattet waren (siehe Kapitel 4.4).

1.3. Aufgabenstellung der vorliegenden Dissertation

Die Auswirkungen von Gebäudebegrünung auf das Gebäude selbst und das lokale Mikroklima sind derzeit nur teilweise erforscht. Grund dafür ist unter anderem, dass es sich hierbei um lebende Konstruktionen handelt, die unterschiedlich gebaut werden, mit unterschiedlichen Pflanzen versehen werden etc., die sich bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen und Jahreszeiten unterschiedlich verhalten. Im Zuge der vorliegenden Dissertation wurden die hygrothermische Auswirkung von fassadengebundener Begrünung und vertikaler Innenraumbegrünung detailliert untersucht.

In Hinblick auf die im Fachdiskurs gängige Hypothese zu Auswirkungen und Effekten von Gebäudebegrünung, wurden folgende Aspekte zur näheren Untersuchung herangezogen:

1. Die Auswirkungen von fassadengebundener Begrünung auf den Wärmeschutz
2. Die Auswirkungen von Fassadenbegrünung auf die sommerliche Überwärmung
3. Die Auswirkungen von vertikaler Innenraumbegrünung auf die hygrothermische Innenraumbehaglichkeit.

Die Aufgabenstellung der Dissertation war die Beantwortung folgender Forschungsfrage:

„Wie wirkt sich vertikale Gebäudebegrünung auf den Wärmeschutz, die sommerliche Überwärmung und die hygrothermische Innenraumbehaglichkeit aus?“

Das Thema der Dissertation definiert sich somit wie folgt:

„Einflüsse vertikaler Gebäudebegrünung auf Wärmeschutz, sommerliche Überwärmung und hygrothermische Behaglichkeit“

Im Zuge der vorliegenden Dissertation wurden die oben genannten Auswirkungen von vertikaler Gebäudebegrünung an realen Objekten und für ausgewählte, bauphysikalisch und energetisch interessante Situationen erforscht. Mittels in situ Messungen, Berechnungen und Analysen soll die Dissertation den Grundstein dafür legen, dass Fassadengebundene Begrünung in die OIB Richtlinie 6 und in die ÖNORM B 8110-6 eingebunden werden kann. Außerdem soll gezeigt werden, wie sich Innenraumbegrünung auf das hygrothermische Raumklima auswirkt. Dafür wurden in situ Messungen in Räumen mit vertikaler Innenraumbegrünung durchgeführt. Zeitgleich wurden Vergleichsmessungen in bauähnlichen, nicht begrünten Räumen durchgeführt. Die Auswertung und Analyse erhobener in situ Messdaten ermöglichen eine Bewertung der Auswirkung vertikaler Innenraumbegrünung auf das hygrothermische Raumklima.

1.4. Technische Grundlagen

1.4.1. U-Wert

In Österreich gibt die OIB-Richtlinie 6 [5] den Wärmeschutz für Gebäude vor. Sie enthält die wärmeschutztechnischen Anforderungen an Gebäude und stellt schematisch dar, wie ein Energieausweis aufgebaut sein muss. Ein wesentlicher Teil des Wärmeschutzes stellt die thermische Qualität der Außenhülle dar. Wie gut eine Konstruktion thermisch ist, wird durch den U-Wert angegeben. Der U-Wert gibt an, welche Wärmeleistung pro Quadratmeter und Kelvin Temperaturdifferenz durch eine Konstruktion fließt. Der U-Wert einer homogenen Konstruktion ist der Kehrwert des Wärmedurchgangswiderstandes (siehe Formel 1). Wobei sich R_T aus der Summe der Wärmedurchlasswiderstände (bei mehreren Schichten die Summe der Wärmedurchlasswiderstände ΣR_i) und den Wärmeübergangswiderständen R_{si} für innen und R_{se} für außen berechnet (siehe Formel 2). R_{si} gibt an wie groß der Widerstand für die Wärmeleistung ist, die von der Innenluft an die innere Bauteiloberfläche abgegeben wird. R_{se} gibt an wie groß der Widerstand für die Wärmeleistung ist, die von der äußeren Bauteiloberfläche an die Außenluft abgegeben wird.

$$U = \frac{1}{R_T}$$

Formel 1: Verhältnis zwischen dem Wärmedurchgangswiderstand und dem U-Wert.

$$R_T = R_{si} + \sum_{i=1}^n R_i + R_{se}$$

U	Wärmedurchgangskoeffizient in W/m^2K
R_T	Gesamt-Wärmedurchgangswiderstand in m^2K/W
R_{si}	Innerer Wärmeübergangswiderstand in m^2K/W
R_{se}	Äußerer Wärmeübergangswiderstand in m^2K/W
ΣR_i	Wärmedurchlasswiderstand der bestehenden Wand in m^2K/W

Formel 2: Berechnung des Wärmedurchgangswiderstandes durch summieren der Wärmedurchlasswiderstände und der Wärmeübergangswiderstände.

Zur Berechnung des U-Wertes einer homogenen Fassade werden üblicher Weise die Bestandteile der Konstruktion benötigt. Die Stärke jeder homogenen Schicht und ihre Wärmeleitfähigkeit sollten bekannt sein. Um die einzelnen R_i zu berechnen wird Formel 3 angewendet.

$$R_i = \frac{d_i}{\lambda_i}$$

R_i	Wärmedurchlasswiderstand der homogenen Schicht in $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$
d_i	Stärke der homogenen Schicht in m
λ_i	Wärmeleitfähigkeit der homogenen Schicht in W/mK

Formel 3: Berechnung des Wärmedurchlasswiderstandes einer homogenen Schicht.

An vielen Bestandsgebäuden lässt sich für einzelne Fassadenabschnitte der U-Wert mittels dieser Methode nicht immer verlässlich bestimmen. Die Wärmeleitfähigkeit der verbauten Bauteilschichten kann sich im Laufe der Jahrzehnte aufgrund von Alterungsprozessen oder Feuchtigkeit verändert haben. Eine Probenentnahme aus der Fassade zur Messung der Wärmeleitfähigkeit ist nicht möglich.

Nach [6] sind die hier untersuchten Systeme aufgrund der belüfteten Luftschicht zwischen dem Begrünungssystem und der bestehenden Wandoberfläche wie eine vorgehängte hinterlüftete Fassade zu modellieren. Dabei wird der Wärmedurchgangswiderstand der Luftschicht und aller weiter außen liegenden Schichten vernachlässigt. Stattdessen wird ein erhöhter Wärmeübergangswiderstand zur Anwendung gebracht: An Stelle eines Widerstandes von $R_{se} = 0,04 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ der ansonsten an allen außenseitigen Flächen anzuwenden ist, wird der R_{se} basierend auf Formel 4 berechnet.

Auch der Wärmeübergangswiderstand für eine unbegrünte Wand hängt vom jeweiligen Gebäude und Standort ab. In [6] wird ein R_{se} Wert für eine Außenhülle angegeben, die gegenüber Witterungen und Wind exponiert ist. Die im Rahmen dieser Dissertation untersuchten Fassaden sind urban und deshalb muss der R_{se} auch am nicht begrünten Fassadenabschnitt gemessen werden. Nur so lässt sich ein direkter Vergleich zwischen der begrünten und der nicht begrünten Fassade darstellen.

Ziel war es, den Einfluss der fassadengebundenen Begrünung auf den U-Wert zu ermitteln. Es wurden Teile von homogenen Fassaden, deren ΣR_i und R_{si} an den gewählten Messstellen gleich sind, begrünt. Die vorgehängte Begrünung wirkt sich somit nur auf den R_{se} aus. Der veränderte R_{se} verändert den Gesamt- R_T und in weiterer Folge nach Formel 1 den U-Wert der Konstruktion. Die U-Werte können danach verglichen werden. Der U-Wert mit begrüntem Fassadenabschnitt wird in Abbildung 7 mit „U_g“ und der U-Wert mit nicht begrüntem Fassadenabschnitt, wird mit „U_ng“ schematisch dargestellt.

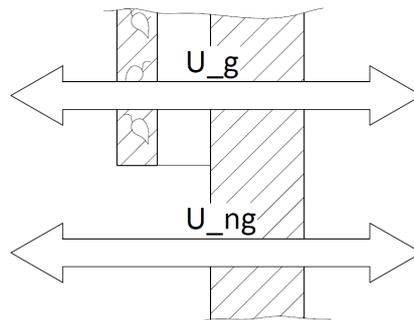


Abbildung 7: Darstellung der U-Werte die miteinander verglichen werden. U_g für den U-Wert mit Begrünung und U_{ng} für den U-Wert ohne Begrünung.

Wenn sich der U-Wert mittels Formel 1 bis Formel 3 nicht bestimmen lässt, da keine Probenentnahme möglich ist, bietet sich eine in situ U-Wert Messung an. Hierfür ist sowohl die Messung der Lufttemperaturen an beiden Seiten (innen und außen) des Bauteils, als auch die Messung der Wärmestromdichte notwendig. Die Bestimmung des U-Wertes erfolgt dann mit Formel 4.

$$U = \frac{\phi}{(T_1 - T_2) \cdot A}$$

Dabei bezeichnen:

U	Wärmedurchgangskoeffizient in W/m ² K
ϕ	Wärmestromdichte durch die Wand in W
T_1 / T_2	Temperaturen der Umgebungen auf jeder Seite eines Systems. In diesem Fall also Lufttemperaturen innen und außen in K
A	Wandfläche in m ²

Formel 4: Berechnung des U-Wertes auf Basis von Wärmestromdichte und Temperaturdifferenz.

Es wird zwischen stationären und instationären U-Werten unterschieden. Der instationäre U-Wert wird unter instationären Randbedingungen ermittelt, weshalb zusätzliche Parameter für die Berechnung relevant sind. Diese sind Absorption, Reflexion (an den Oberflächen innen und außen), Konvektion und die Wärmespeicherung der Konstruktion [7]. Im Zuge der vorliegenden Dissertation wurde ausschließlich der stationäre U-Wert berechnet, da dieser für die Integration in die OIB Richtlinie 6 bzw. Energieausweis ausschlaggebend ist. Die Messungen wurden an benutzten Objekten durchgeführt. Da viele Einflussfaktoren aufgrund der Nutzung auf die Messungen einwirkten, wurden die Messdaten gefiltert um eindeutige Ergebnisse ermitteln zu können. Das Filtern nach stationären Bedingungen (siehe Kapitel 3.3) reduzierte die Messfehler und Abweichungen signifikant.

Bei der Ermittlung des stationären U-Werts in einem Prüfstand werden in Formel 4 stationäre Verhältnisse vorausgesetzt. Das bedeutet, dass sich die Temperaturen an beiden Seiten des Bauteils während der gesamten Messung nicht verändern. Im Zuge dieser Dissertation wurden die in situ Messdaten gefiltert um annähernd stationäre Bedingungen bei den Berechnungen verwenden zu können. Kapitel 3.3 beschreibt die Vorgehensweise der Messdatenauswertung.

Aus Formel 4 ergibt sich über den Kehrwert (siehe Formel 5) der Wärmedurchgangswiderstand. Ist der Wärmedurchlasswiderstand der Konstruktion gefragt, ohne Berücksichtigung der Wärmeübergangswiderstände, werden für T_1 und T_2 in Formel 4 die Oberflächentemperaturen an beiden Seiten (innen und außen) eingesetzt.

$$R = \frac{(T_1 - T_2) \cdot A}{\phi}$$

Dabei bezeichnen:

R	Wärmewiderstand in m ² K/W
ϕ	Wärmestromdichte durch die Wand in W
T_1 / T_2	Temperaturen der Umgebungen auf jeder Seite eines Systems. In diesem Fall also Lufttemperaturen innen und außen in K
A	Wandfläche in m ²

Formel 5: Berechnung des Wärmewiderstandes auf Basis von Wärmestrom und Temperaturdifferenz.

Der innere Wärmeübergangswiderstand berechnet sich durch Einsetzen von Raumlufttemperatur und Oberflächentemperatur innen für T_1 und T_2 . Der äußere Wärmeübergangswiderstand durch Einsetzen von Außenlufttemperatur und Oberflächentemperatur außen für T_1 und T_2 .

Für die Fragestellung der vorliegenden Dissertation wurde der U-Wert hier nur während der kalten Jahreszeit berücksichtigt. Begrünung wirkt sich aber auch bei sommerlicher Überwärmung und hohen Temperaturen aus. Der Einfluss der Begrünung auf den U-Wert ist dabei nachrangig.

1.4.2. Sommerliche Überwärmung

Aufgrund der globalen Klimaerwärmung nimmt die Anzahl der Hitzetage zu [8],[9]. In Städten führt der Urban Heat Island Effekt (UHI) zu noch höheren Temperaturen an Hitzetagen. Auch die Gebäude selbst und ihre Innenräume sind von der sommerlichen Überwärmung aufgrund des UHI-Effekts stärker betroffen. Es wird mittels Vorgaben in Normen und Richtlinien (wie z.B. [10][11][12][13][14]) diesem Problem entgegengewirkt. Um sommerliche Überwärmung zu vermeiden werden unterschiedliche Maßnahmen getroffen. Diese sind z.B. Verschattung der transparenten Flächen, Möglichkeiten zur Nachtlüftung oder große thermische Speichermasse. Die Vermeidung von sommerlicher Überwärmung der Räume mittels Fassadenbegrünung wird erstmalig im Zuge dieser Dissertation untersucht. Somit wird, ergänzend zu den Auswirkungen im Winter (siehe Kapitel 1.4.1), die sommerliche Auswirkung von Fassadenbegrünung auf die Innenräume von Gebäuden dargestellt.

1.4.3. Hygrothermische Behaglichkeit

Es gibt zahlreiche Möglichkeiten hygrothermische Behaglichkeit in Räumen zu bewerten [15][16][17][18][19][20][21][11][22][12][23]. W. Frank erklärt in "Raumklima und Thermische Behaglichkeit" Behaglichkeitsbereiche für Innenräume. Im Zuge der vorliegenden Dissertation wurde die hygrothermische Behaglichkeit mit diesem Diagramm bewertet [23].

Abbildung 8 zeigt die hygrothermischen Bereiche, die im Zuge der vorliegenden Untersuchungen als behaglich (innerhalb des roten Bereichs), noch behaglich (innerhalb des grünen Bereichs, aber außerhalb des roten Bereichs) und nicht behaglich (außerhalb des grünen Bereichs) eingestuft werden.

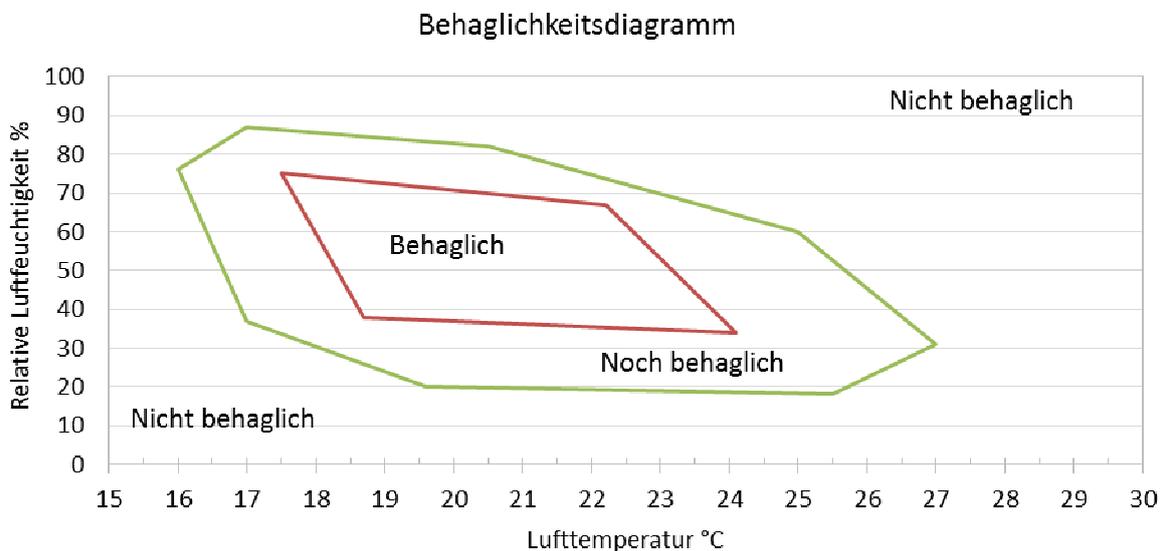


Abbildung 8: Behaglichkeitsdiagramm zur Bewertung der hygrothermischen Behaglichkeit [23]

2. Ziele

Ein Ziel dieser Forschungsarbeit war es die Forschungslücke, ob Fassadenbegrünung thermische Auswirkungen auf die Gebäudehülle hat, zu schließen. Dabei sollte einerseits die Pufferwirkung des Hinterlüftungsspalts berücksichtigt werden, andererseits wurden auch mögliche Wärmebrücken aufgrund von Befestigungselementen an der Fassade untersucht. Die Pufferwirkung sorgt für geringere Luftbewegung an der Fassadenaußengrenze und erhöht somit den äußeren Wärmeübergangswiderstand. Zu dieser Problematik wurden bereits einige Untersuchungen durchgeführt und publiziert. Die Untersuchungen werden in Kapitel 5.1 beschrieben. Sie beschäftigen sich jedoch ausschließlich mit der Pufferwirkung aufgrund des gebildeten Hinterlüftungsspalts. In den jeweiligen Publikationen wird dargestellt wie sich die erhöhte Temperatur im Winter auf den U-Wert auswirkt. Bisher gab es keine detaillierten Messungen mit Wärmestrommessfolien (zur Messung der Wärmestromdichte) und Temperatursensoren über einen ausreichend langen Zeitraum. Ziel dieser Dissertation war es erstmals genaue Messungen im Hinterlüftungsspalt durchzuführen.

Die Elemente von fassadengebundener Begrünung werden direkt an der Fassade befestigt. Die Befestigungselemente müssen stabil genug sein um für statische Stabilität zu sorgen. An gedämmten Konstruktionen ist es deshalb auch notwendig sie durch die Dämmschicht am tragenden Mauerwerk zu befestigen. Im Zuge der vorliegenden Dissertation sollte auch gezeigt werden, wie stark sich mögliche Wärmebrücken von den unterschiedlichen Befestigungselementen von Fassadenbegrünung auf die thermische Qualität von gedämmten und nicht gedämmten Konstruktionen auswirken. In weiterer Folge wird aufgezeigt, wie sich Fassadenbegrünung an unterschiedlichen Fassaden auch unter Berücksichtigung der Befestigungselemente (mögliche Wärmebrücken) auf die thermische Dämmung auswirkt.

Es wird außerdem gezeigt welche Messungen und Berechnungen notwendig sind, um die komplexen Zusammenhänge zwischen Fassadenbegrünung und U-Wert von Fassaden darzustellen und eindeutige Ergebnisse zu gewinnen, die alle relevanten Parameter berücksichtigen. In weiterer Folge kann diese Arbeit eine Grundlage dafür sein, Gebäudebegrünung in den Energieausweis einzubinden.

Das zweite Ziel dieser Dissertation beschäftigt sich mit den Auswirkungen von Begrünung auf den Innenraum von Gebäuden. Zum einen wird auf die Auswirkungen von Fassadenbegrünung auf die sommerliche Überwärmung, zum anderen auf die Auswirkungen von Innenraumbegrünung auf hygrothermische Parameter eingegangen. Das Ziel ist es den Einfluss von Fassaden- und Innenraumbegrünung auf das Innenraumklima zu ermitteln und zu bewerten. Die Forschungsfrage, wie sich Gebäudebegrünung (sowohl an der Fassade, als auch im Innenraum) auf das Innenraumklima und die sommerliche Überwärmung auswirkt, soll hiermit beantwortet werden.

Die Auswirkungen von Fassadenbegrünung und Innenraumbegrünung auf das Innenraumklima sind noch weitgehend unerforscht (siehe Kapitel 5.1). Der Fokus dieser Dissertation liegt bei den Auswirkungen von Fassadenbegrünung auf die inneren Oberflächentemperaturen im Sommer. In Relation zu anderen Technologien die sommerlicher Überwärmung in Gebäuden entgegenwirken (z.B. Außenverschattung oder Nachtlüftung), war es Ziel dieser Dissertation die Auswirkungen von Fassadenbegrünung auf die innere Oberflächentemperatur im Sommer zu ermitteln. In weiterer Folge kann abgeschätzt werden, ob bzw. in welchem Ausmaß Fassadenbegrünung die Oberflächentemperatur im Innenraum an heißen Sommertagen reduziert.

Ziel dieser Dissertation ist es, die entscheidenden Auswirkungen von Fassaden- und Innenraumbegrünung auf Gebäude zu ermitteln. Das sind die Auswirkungen auf den Wärmeverlust im

Winter, den Wärmeeintrag im Sommer und die Auswirkungen von Innenraumbegrünung auf das hygrothermische Raumklima.

3. Methodologie

Im Zuge der vorliegenden Dissertation wurden unterschiedliche Mess- und Berechnungsmethoden auf die Fragestellungen angepasst und verwendet. Auch die untersuchten Systeme unterscheiden sich je nach Fragestellung. Insgesamt wurden fassadengebundene Begrünungssysteme an sechs unterschiedlichen Standorten in Wien und Umgebung untersucht. Es handelt sich dabei um Standorte an Altbaugebäuden, Neubaugebäuden, gedämmten und nicht gedämmten Gebäuden.

Zur Ermittlung der wärmedämmenden Wirkung von Fassadenbegrünung wurde ausschließlich fassadengebundene Begrünung untersucht. Im ersten Schritt wurden langfristige in situ Messungen durchgeführt. Mittels dieser wurde der zusätzliche R_{SE} -Wert aufgrund der Begrünung ermittelt. Im zweiten Schritt wurden die in situ Messungen in einem Modell abgebildet und durch Berechnungen mittels Computerprogramm validiert. Im dritten Schritt wurden die Wärmebrücken untersucht. Das geschah an denselben fassadengebundenen Begrünungssystemen. Das Zusammenführen der drei Schritte beantwortet die Forschungsfrage, wie sich Fassadenbegrünung auf den Wärmeschutz auswirkt.

Zur Ermittlung des Einflusses von Begrünung auf die sommerliche Überwärmung wurden Computersimulationen durchgeführt. Als Randbedingung dafür dienten Messdaten. Bei den untersuchten Begrünungssystemen handelt es sich sowohl um fassadengebundene Begrünung, als auch um Loggienbegrünung.

Die Auswirkungen von Innenraumbegrünung auf die hygrothermische Behaglichkeit konnten mittels in situ Messungen bewertet werden.

3.1. Details zu den untersuchten Systeme

3.1.1. Fassaden- und Gebäudeaufbauten

Es wurden sieben unterschiedliche Fassadenkonstruktionen mit und ohne Begrünung untersucht. Fassade 1 (Tabelle 1), Fassade 2 (Tabelle 2) und Fassade 3 (Tabelle 3) wurden für Untersuchungen hinsichtlich der Wärmedämmung im Winter herangezogen.

Für die Untersuchung der sommerlichen Überwärmung ist die Berücksichtigung des gesamten Gebäudes und nicht nur die von einer Fassade notwendig. Die vier Gebäudekonstruktionen die in Tabelle 4 angeführt werden, wurden für die Untersuchungen der sommerlichen Überwärmung verwendet.

Tabelle 1: Darstellung der Bestandteile von Fassade 1

Bauteil	Stärke	Wärmeleitfähigkeit λ	Wärmedurchlaßwiderstand R
	Meter	W/mK	m^2K/W
Stahlbeton	0.250	2.300	0.11
XPS Dämmung	0.140	0.032	4.38
Putzschicht	0.005	0.670	0.01

Tabelle 2: Darstellung der Bestandteile von Fassade 2

Bauteil	Stärke	Wärmeleitfähigkeit λ	Wärmedurchlaßwiderstand R
	Meter	W/mK	m ² K/W
Hochlochziegel	0.350	0.390	0.87
Putzschicht	0.005	0.670	0.01

Tabelle 3: Darstellung der Bestandteile von Fassade 3

Bauteil	Stärke	Wärmeleitfähigkeit λ	Wärmedurchlaßwiderstand R
	Meter	W/mK	m ² K/W
Vollziegel	0.600	0.690	0.90
Putzschicht	0.005	0.670	0.01

Tabelle 4: Darstellung der Gebäudekonstruktionen für die Untersuchungen hinsichtlich sommerlicher Überwärmung.

Objekt	Baujahr	Bauweise	Wände	Decken/Dächer	Farbe Oberfläche	Bruttovol. [m ³]	A/V-Verhältnis	Fensterfläche Außenwand	Lüftung
6	2012	schwer	STB +30 cm WDVS	STB Warmdach 40 cm EPS	beige/braun	22666	0,264	26,3 %	mech.
29	2009	mittelschwer	HLZ/STB +8 cm WDVS	STB Sargdeckel 16+5 cm MW	EG grau OG hellgrau/ gelb	4700	0,381	27,1 %	Fenster
35	1903	mittelschwer	Vollziegel/ Holzrahmenbau gedämmt im DG	Holztram/ Doppelbaum	hellgrau	10369	0,346	26,6 %	Fenster
45	1975	mittelschwer	STB +3,5 cm HW innen +3,5 HW und 5 cm EPS außen	STB Umkehrdach 8 cm XPS (Annahme)	EG gelb, OG hellbraun	12688	0,362	22,8 %	Fenster

3.1.2. Raumgrößen

Zur hygrothermischen Untersuchung von Innenraumbegrünung wurden Räume in Schulen ausgewählt. Es handelt sich dabei um zwei vergleichbare Klassenräume, wobei einer davon begrünt und der andere nicht begrünt ist. Beide Räume befinden sich im gleichen Stock, sind gleich orientiert und werden von 24-26 SchülerInnen genutzt (die Anzahl der SchülerInnen hat sich jährlich, während der Messdauer, verändert). Die Klassenräume sind annähernd gleich groß. Die Fläche und das Volumen der Klassenräume in der untersuchten Altbauschule werden in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Abmessungen der beiden BRG7 Klassenräume die zur Untersuchung hygrothermischer Parameter ausgewählt wurden.

Raum	Länge in m	Breite in m	Höhe in m	Fläche in m ²	Volumen in m ³
Kandlgasse grün	8,47	6,45	3,7	54,6	202,1
Kandlgasse nicht grün	8,47	6,28	3,7	53,2	196,8

3.1.3. Begrünungssysteme

Für die Untersuchungen zur Ermittlung der Auswirkungen von Fassadenbegrünung auf den Wärmeschutz wurden das Trogsystem (Abbildung 2) und das Kassettensystem (Abbildung 3) in unterschiedlichen Ausführungen untersucht. Beide haben einen Hinterlüftungsabstand von 6 cm. Es wurde zwischen einem großflächigen System (ca. 58 m²) und einem kleinflächigen System (ca. 14 m²) unterschieden. Beim großflächigen System handelt es sich um ein verblendetes System. Das bedeutet die Seiten sind unten und oben verblendet. Der Hinterlüftungsspalt (siehe Abbildung 5) ist deshalb nur gering hinterlüftet. Das kleinflächige System ist nicht verblendet. Der Hinterlüftungsspalt ist stark hinterlüftet. Damit die Begrünungssysteme statisch an der Fassade halten, müssen Befestigungselemente in der Fassade montiert werden. Das Gewicht des Trogsystems ist 22 kg/m. Da die Tröge im Abstand von 25 cm übereinander montiert wurden, ergibt das ein Gewicht von 88 kg/m² [24]. Die beim Trogsystem angewendeten Befestigungselemente sind 27.5 cm lang und haben einen Durchmesser von 2 cm. Das Kassettensystem hat ein Gewicht von maximal 83 kg/m² [25]. Die Verankerungen sind 26 cm lang und haben einen Durchmesser von 1 cm. Die Anzahl der Verankerungen ist 1.09/m² beim Trogsystem und 1.68/m² beim Kassettensystem. Die Verankerungsmaterialien werden bei beiden Begrünungssystemen variiert. Sie sind in einer Variante aus Edelstahl und in einer aus Aluminium. Aus statischen Gründen müsste die Anzahl der Befestigungselemente vom Fassadenaufbau abhängen. Um eine bessere Vergleichbarkeit zu zeigen, wird in den Untersuchungen für jeden Fassadenaufbau dieselbe Anzahl von Verankerungselementen angenommen.

Bei den Begrünungssystemen zur Ermittlung des Einflusses von Gebäudebegrünung auf die sommerliche Überwärmung, wurde in fassadengebundene Begrünung und Loggienbegrünung unterschieden. Bei der fassadengebundenen Begrünung kann es sich sowohl um ein Trogsystem als auch um ein Kassettensystem handeln. Das macht für das berechnete Ergebnis keinen Unterschied. Auch die Loggienbegrünung ist nicht im Detail definiert. Es handelt sich um belaubte Pflanzen, die für alle dahinterliegenden transparenten Bauteile eine Verschattung von 70 % verursachen. Die genaue Pflanzenspezies ist irrelevant und deshalb in der Berechnung nicht berücksichtigt.

Beim den Untersuchungen zur Innenraumbegrünung wurde das Vliessystem (siehe Abbildung 6 rechts) eingesetzt. Es hat eine Fläche von 6,5 m².

3.2. Messaufbau

3.2.1. Messgeräte

Die Lufttemperatur im Raum, im Hinterlüftungsspalt und der Außenluft wurde mit Lin Piccos A05 gemessen (siehe Abbildung 9). Zur Messung der Außenluft wurde der Lin Picco A05 in einen Strahlenschutzschirm eingebaut (siehe Abbildung 10 Links). So konnte sichergestellt werden, dass die Lufttemperatur ohne Strahlung oder Einfluss von Wind gemessen wurde.

Die Wärmestromdichte wurde mit Wärmestrommessplatten von Phymeas gemessen. Es wurden Platten mit großer Fläche (25 cm x 25 cm) für alle Messungen in dieser Forschungsarbeit ausgewählt (siehe Abbildung 10 Mitte). Dadurch wird eine größere Fläche zeitgleich gemessen. Sämtliche Oberflächentemperaturen wurden mit PT 1000 gemessen (siehe Abbildung 10 Rechts).

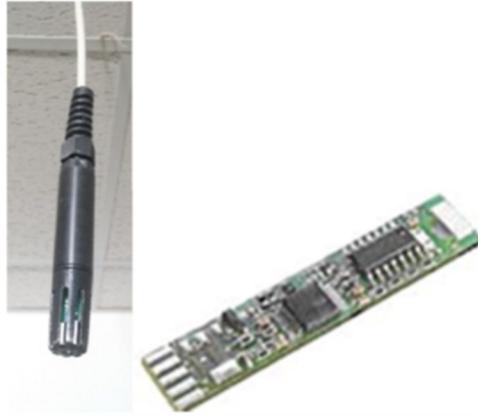


Abbildung 9: Lin Picco, Messgerät zur Messung von Lufttemperatur und relativer Luftfeuchtigkeit.

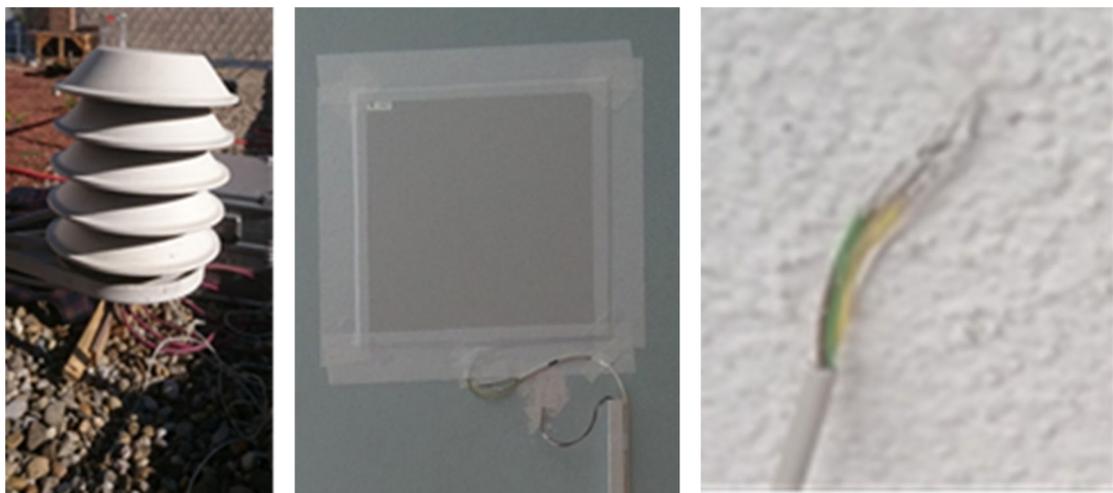


Abbildung 10: Links: Strahlenschutzschirm für die Messung der Außenlufttemperatur. Mitte: Wärmestrommessfolie von Phymas 25 cm x 25 cm zur Messung der Wärmestromdichte durch die Konstruktion. Rechts: PT 1000 zur Messung der Oberflächentemperaturen innen und außen.

Die Messgeräte wurden kalibriert und weisen eine Unschärfe von unter 5 % auf. Ihre Genauigkeit entspricht somit den Anforderungen der [26].

3.2.2. Messdurchführung

Im Zuge der vorliegenden Dissertation wurden langfristige in situ Messungen durchgeführt. An unterschiedlichen Standorten wurden die notwendigen Parameter gemessen, um den effektiven Wärmedurchgangskoeffizienten ermitteln zu können. Bei den Berechnungen für den Energieausweis wird aber der stationäre Wärmedurchgangskoeffizient benötigt. Dieser wird bei in situ Messungen, indem der effektive Wärmedurchgangswiderstand in einem weitgehend stationären Zustand erhoben wird, bestimmt. Darüber hinaus ist es für die messtechnische Ermittlung des U-Wertes erforderlich, dass sowohl die Wärmestromdichte als auch der Temperaturunterschied einen gewissen Wert nicht unterschreiten, da sich ansonsten Störgrößen, wie Speicherfähigkeit der Mauer, nicht vernachlässigen lassen. Daher sind jene Messergebnisse repräsentativ, welche zu einem Zeitpunkt mit anhaltend hohem Temperaturunterschied erhoben werden. Abbildung 11 zeigt schematisch die installierten Messgeräten an den beiden Standorten. Die jeweiligen Parameter wurden zeitgleich, ca. alle 5 Minuten, an einem begrünten Teil der Fassade und an einem nicht begrünten Teil erhoben. Die beiden Fassadenabschnitte (begrünt und nicht begrünt) unterscheiden sich am jeweiligen Standort

ausschließlich durch die Begrünung. Der Fassadenaufbau, das Stockwerk, die Ausrichtung und der angrenzende Raum sind ident.

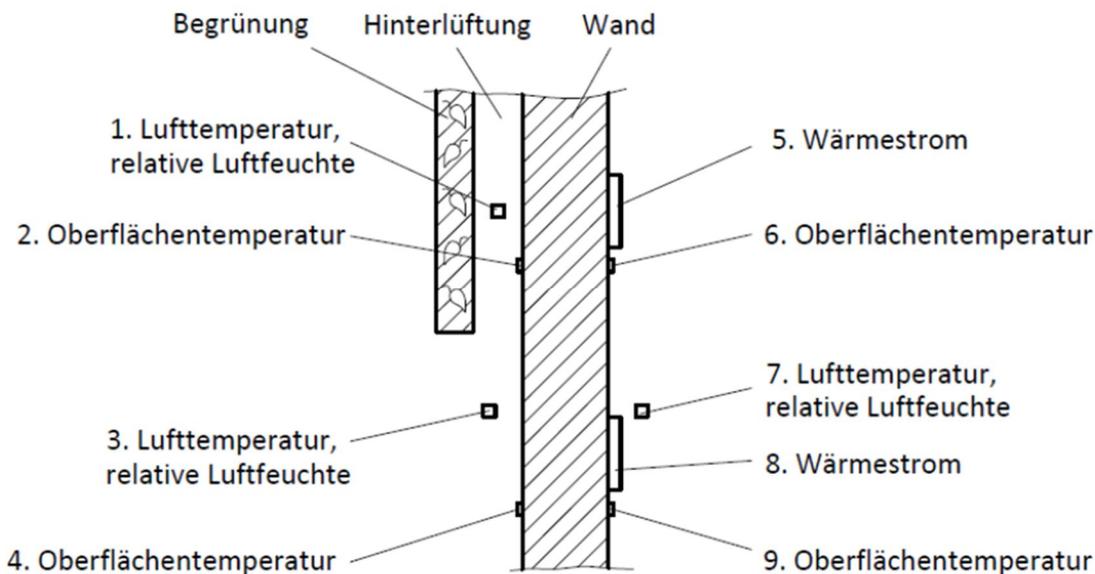


Abbildung 11: Schematische Darstellung des Messaufbaus.

Die hygrothermischen Daten der begrüneten und nicht begrüneten Klassen wurden über den Zeitraum von Oktober 2015 bis Juni 2019 erhoben. Gemessen wurden die Parameter Luftfeuchtigkeit und Lufttemperatur im Intervall von 5 Minuten. Die Messungen der beiden Parameter in den untersuchten Klassenräumen erfolgte zeitgleich. Die Sensoren waren mittig in den Klassenräumen angebracht.

Um die Randbedingungen für die Berechnung der sommerlichen Überwärmung zu gewinnen wurden Messdaten aus einer Wetterstation, nahe des Versuchsortes auf den Aspanggründen der TU Wien, erhoben. Die Wetterstation misst Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Windrichtung, Windstärke und die Globalstrahlung.

3.3. Messdatenauswertung

Um die Auswirkungen von Fassadenbegrünung auf den Wärmeschutz zu ermitteln, wird der U-Wert in einem möglichst stationären Zustand bestimmt. Da eine reale Wand ständigen Temperatur- und Einstrahlungsänderungen ausgesetzt ist, schwankt die gemessene Wärmestromdichte. Diese ist abhängig von den Temperaturen, dem Strahlungseinfluss, der Luftbewegungen und der Speichermasse. Um die Fehler bei der Auswertung der in situ Messung so gering wie möglich zu halten, wurden die Messwerte gefiltert. Es wurden folgende Filter gesetzt:

1. Der Temperaturunterschied zwischen Innenluft und Außenluft muss größer als 15 K sein.
2. Der Oberflächentemperaturunterschied zwischen der Innen- und Außenseite der Fassade muss größer als 15 K sein.
3. Der Oberflächentemperaturunterschied zwischen der Innen- und Außenseite der Fassade muss in den letzten 24 h im Mittel größer als 15 K sein.

4. Der Temperaturunterschied zwischen Innenluft und Außenluft darf in den letzten 24 h nicht mehr als 2 K geschwankt haben.
5. Die Oberflächentemperaturen der Innen- und Außenfassadenoberfläche dürfen in den letzten 24 h nicht mehr als 2 K geschwankt haben.

Die Filter 1-3 stellen sicher, dass nur Messungen an kalten Wintertagen berücksichtigt werden und das Mauerwerk nicht aufgeheizt ist. Die Punkte 4-5 filtern den größten Teil der Werte aus. Sie lassen nur noch Werte zu, die gemessen wurden, wenn in den letzten 24 h weitgehend stationäre Bedingungen (mit weniger als 2 K Schwankung) gegeben waren. Nach Filtersetzung bleibt nur ein kleiner Teil (ca. 1 %) der erhobenen Messdaten übrig. Sie wurden zeitgleich erhoben, als der begrünte und der nicht begrünte Teil der Fassade den oben angeführten Bedingungen (Filter 1-5) genügte. Das sind die im Betrachtungszeitraum stationärsten Bedingungen für die U-Wert Berechnung.

Die Messdaten in den Innenräumen, zur Ermittlung der hygrothermischen Auswirkungen von Begrünung, werden in Form eines Punktdiagramms dargestellt (siehe Abbildung 19, Abbildung 20, Abbildung 22 und Abbildung 23). Gefiltert wurde nach Jahreszeiten, wobei der Fokus auf den Messdaten im Winter liegt. Während des Sommers wurden die Räume häufig gelüftet, was Rückschlüsse auf die Innenraumbegrünung erschwert.

Die gemessenen Wetterdaten, die als Randbedingung für die Berechnungen der sommerlichen Überwärmung dienen, wurden als Rohdaten in das Berechnungsprogramm eingespielt.

3.4. Rechnerische Untersuchungen

3.4.1. U-Wert

Die vermessenen Situationen (Fassadenteile mit und ohne Fassadenbegrünung) sowie die Wärmeströme wurden in einem Simulationsmodell abgebildet und dynamische U-Werte mittels Computerprogramm berechnet. Die untersuchten Systeme zur Fassadenbegrünung werden so an der Fassade angebracht, dass sich ein Hinterlüftungsspalt bildet. Es gibt eine direkte Verbindung der Luft im Hinterlüftungsspalt mit der Außenluft über Hinterlüftungsöffnungen. Diese Problematik lässt sich mittels Computersimulation nicht trivial lösen. Für die Berechnungen wurde WUFI Pro 6.2 verwendet. Auch dieses Programm ist nicht primär für solche Berechnungen ausgelegt sodass es notwendig war, immer wieder die Simulationsergebnisse mit Messdaten abzugleichen, um ein Modell zu schaffen mit dem die Fassadenbegrünung hygrothermisch gerechnet werden kann. Im Zuge der vorliegenden Dissertation wurde eine Methode entwickelt um die Wirklichkeit im Simulationsprogramm nachzustellen. Es wurden Temperatursensoren an der inneren Oberfläche, der äußeren Fassadenoberfläche, der Außenluft und der Raumluft im angrenzenden Raum angebracht. Die gemessenen Außenlufttemperaturen dienten dem Programm als Randbedingungen. Die gemessenen Oberflächentemperaturen wurden zur Validierung der Berechnung herangezogen. Das Modell wurde solange angepasst, bis der Verlauf der berechneten Oberflächentemperaturen beidseitig jenen der gemessenen entsprach. Das Modell wurde eindimensional gerechnet. Das Begrünungssystem wurde zu einer homogenen Schicht vereinfacht und der Luftspalt zwischen der Fassade und dem Begrünungssystem wurde als nicht geschlossen definiert, um die Verbindung der Luft im Hinterlüftungsspalt mit der Außenluft zu simulieren. Der Austausch wurde mit einer Luftwechselrate von $0,2 \text{ m}^3/(\text{hm}^2)$ [27] nachgestellt. Die Abstrahlung des Modells wurde vereinfacht. Die langwellige

Abstrahlung wird über die reduzierte kurzwellige Strahlungsabsorptionszahl mit berücksichtigt [28]. Diese wird mit dem vergleichsweise niedrigen Wert von 0,3 angenommen [28]. Unter diesen Annahmen wurden Modelle entwickelt um die gemessenen Ergebnisse mit maximaler Genauigkeit abzubilden.

Zur Berechnung der punktuellen Wärmebrücken-Verlustkoeffizienten (χ -Werte) der Befestigungselemente, wurde die Software AnTherm® (Version 8.133.1.16375) von Tomasz P. Kornicki verwendet. Dabei wurde in der Software die Auswahl eines 3D-Schichten-Modells getroffen. Für diese Berechnungsmethodik wird das betrachtete Detail in mehrere Schichten aufgeteilt, wobei jede davon für sich als 2D-Wärmebrücke behandelt wird. Durch Aneinanderreihung der entstandenen (parallelen) Schichten mit ihren jeweiligen Schichtdicken in der dritten (zu den anderen beiden Achsen orthogonal stehenden) Koordinatenachsenrichtung, entsteht somit in Summe eine 3D-Wärmebrücke.

Als Grundlage für die Wärmebrückenberechnungen dient eine 2D-AutoCAD-Zeichnung eines Schnittes durch die Konsole des jeweiligen Fassadenbegrünungssystems. Diese wird in das Programm AnTherm® importiert und zur Generierung der erforderlichen Schichten entsprechend bearbeitet. Die für die Berechnung erforderlichen bauphysikalischen Baustoff-Kennwerte (Dichte, Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmespeicherkapazität und Wasserdampfdiffusionswiderstand) wurden der ÖNORM B 8115-7:2013 [29] sowie der ON-V 31:2001 [30] entnommen.

Einen maßgebenden Einfluss auf die Dauer der einzelnen stationären, dreidimensionalen Wärmebrückenberechnungen, und in weiterer Folge auf die Genauigkeit der Simulationsergebnisse, haben die Feinraster-Parameter: Je kleiner die Anfangsschrittweite und je geringer der Vergrößerungsfaktor, desto größer ist die Anzahl der Zellen, in die das Detail zerlegt wird. Die Eingaben wurden so gewählt, dass die Anzahl der Zellen ca. eine Million und die Berechnungszeit je Simulation ca. fünf Minuten beträgt (Anfangsschrittweite 0,4 mm; Maximum der Schrittweite 50 mm; Vergrößerungsfaktor 2).

Als unmittelbares Ergebnis einer Wärmebrückenberechnung in AnTherm® wird bei einem 3D-Schichten-Modell zunächst die Matrix der thermischen Leitwerte L^{3D} ausgewiesen. Die Elemente der Leitwert-Matrix sind von den Randbedingungen (Temperaturen und Raumluftfeuchten) unabhängig und besitzen die Einheit W/K. Die Differenz der L^{3D} -Werte der Wärmebrückenberechnungen einer Außenwandkonstruktion, einmal mit und einmal ohne Berücksichtigung der Unterkonstruktion für die Fassadenbegrünung, ergibt den gesuchten χ -Wert dieser punktuellen Wärmebrücke. Multipliziert mit der Anzahl der Befestigungselemente je Quadratmeter lässt sich die Veränderung des Wärmedurchgangskoeffizienten (ΔU -Wert) darstellen. Dieser ist negativ (entspricht einer Erhöhung der Wärmeverluste durch die Außenwandkonstruktion). Er wird zum U-Wert für die begrünte Fassade dazu addiert.

Unter Berücksichtigung der anderen Auswirkungen von Fassadenbegrünung auf den U-Wert können somit alle relevanten Parameter berücksichtigt werden, die sich auf den Wärmedurchgangskoeffizienten auswirken.

3.4.2. Auswirkung von Gebäudebegrünung auf den Innenraum

Die Auswirkungen von Gebäudebegrünung auf den Innenraum beinhalten sowohl den Einfluss auf sommerliche Überwärmung, als auch die hygrothermischen Auswirkungen von Innenraumbegrünung. Die hygrothermischen Auswirkungen von Innenraumbegrünung wurden messtechnisch erfasst. Es waren keine begleitenden rechnerischen Untersuchungen notwendig. Die Auswirkungen von

Gebäudebegrünung auf sommerliche Überwärmung wurden mittels dem Computerprogramm WUFI Plus 3.0 durchgeführt. Es wurden unterschiedliche Szenarien an den Gebäuden untersucht. Im Zuge der Szenarien wurden die Gebäude fiktiv verändert und die Auswirkungen auf die Temperatur während der Hitzewelle untersucht. Die Szenarien sind Nachtlüftung, Außenverschattung, Fassadenbegrünung und Loggienbegrünung. Forschungsziel dieser Untersuchung war es zu zeigen wie sich die jeweilige Veränderung des Gebäudes auf die Innenraumtemperatur während einer Hitzewelle auswirken. Die untersuchten Objekte sind wie in Abbildung 12 ersichtlich, nach Süd-Süd-Westen ausgerichtet. Anhand einer Variantenstudie wurden die Auswirkungen unterschiedlicher baulicher Maßnahmen auf das hygrothermische Innenraumklima während einer Hitzewelle untersucht.

Die gemessenen Wetterdaten aus der nahe liegenden Wetterstation wurden als Randbedingung in die Berechnung eingespielt. Da zeitgleich auch die Messungen in den Wohnungen stattgefunden haben, konnten die Messdaten als Validierung für die berechneten Werte verwendet werden.

Tabelle 4 und Abbildung 12 zeigen die Objekte an denen Messungen stattgefunden haben und unterschiedliche Varianten simuliert wurden.

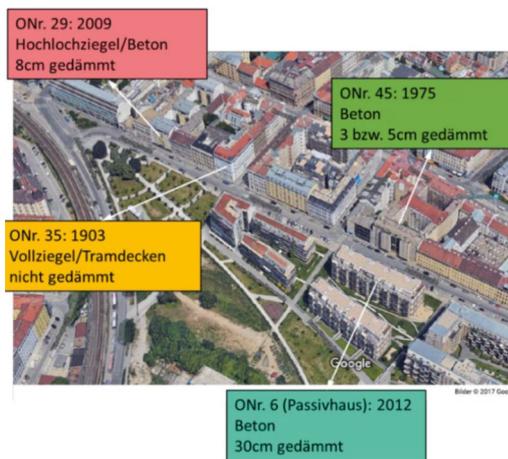


Abbildung 12: Darstellung der detailliert untersuchten Gebäude (Google Maps, 2017).

Die untersuchten Szenarien werden im Folgenden beschrieben:

Nachtlüftung beschreibt ein Szenario in dem die Fenster tagsüber geschossen sind. Sie werden nur zum Zweck des hygienischen Luftwechsels geöffnet. Während der Nachtstunden waren die Fenster geöffnet. Abbildung 13 zeigt den simulierten Luftwechsel nach Uhrzeit, in Abhängigkeit von der statischen Lüftungsmöglichkeit in der Wohnung.

Uhrzeit	Annahme Luftwechsel
07–08 Uhr	0,4 h ⁻¹
08–17 Uhr	0,0 h ⁻¹
17–22 Uhr	0,4 h ⁻¹
22–07 Uhr	0,8 h ⁻¹ ohne Querlüftung 1,5 h ⁻¹ mit Querlüftung 2,0 h ⁻¹ mit Querlüftung im Dachgeschoß

Abbildung 13: Simulierter Luftwechsel für das Szenario „Nachtlüftung“

Außenverschattung wird mit einem Verschattungsgrad von 0,2 angenommen. Der Zeitplan beruht auf einer üblichen Anwesenheit NutzerInnen. Er wird in Abbildung 14 dargestellt.

Uhrzeit	Öffnung Verschattung
08–17 Uhr	Vollständig geschlossen
17–08 Uhr	50 % geschlossen

Abbildung 14: Zeitplan für die Außenverschattung

Um natürliches Licht zu nutzen wird die vertikale Verschattung außerhalb der üblichen Arbeitszeiten nur zu 50 % geschlossen.

Fassadenbegrünung wurde als vollflächige Begrünung über die gesamte Fassade angenommen. Für alle opaken Bauteile wurde somit ein Reduktionsfaktor für die Verschattung von 0,1 angesetzt.

Loggienbegrünung wurde, wenn vorhanden, nicht nur an Loggien sondern auch an Balkonen eingesetzt. Für hinter Balkonen und Loggien liegende transparente Flächen wurde ein Verschattungsfaktor von 0,7 angenommen. Die Verschattung von nicht opaken Flächen wurde aufgrund der geringen Flächengröße vernachlässigt.

4. Zusammenfassung der wissenschaftlichen Aufsätze

Dieser Dissertation liegen vier wissenschaftliche SCI Publikationen zugrunde. Diese vier wissenschaftlichen Publikationen behandeln die Aufgabenstellung der Dissertation. Sie zeigen wie sich fassadengebundene Begrünung auf die thermische Dämmung der Fassade [31][32], oder die sommerliche Überwärmung [33] auswirkt und wie sich die Innenraumbegrünung auf das Innenraumklima auswirkt [34].

4.1. Zusammenfassung erste Publikation, “The effect of living wall systems on the thermal resistance of the façade”

Ziel des in dieser Publikation veröffentlichten Teiles der Forschungsarbeit war es, die Auswirkungen von fassadengebundener Begrünung auf den U-Wert bzw. auf die Transmissionswärmeverluste durch die Fassadenkonstruktionen zu durchleuchten. Dafür wurden jahrelang in situ Messungen durchgeführt, die Messdaten erhoben und analysiert sowie eine an die begrünten Konstruktionen angepasste Auswertungsmethode für die stationäre U-Wert-Auswertung entwickelt. Es war die erste umfassende Untersuchung zu diesem Thema weltweit die publiziert wurde. Die Publikation beschrieb den ersten Ansatz der entwickelten Methode die im weiteren Verlauf der Dissertation erweitert, optimiert und somit überholt wurde. Die neue im Zuge dieser Dissertation entwickelte Methode, reduziert den Einfluss der Fassadenbegrünung auf den R_{se} . Im Zuge dieser Publikation wird noch der gesamte R_T der beiden Fassadenteile miteinander verglichen.

Das Paper beschreibt die durchgeführten in situ U-Wert Messungen an begrünten und nicht begrünten Fassadenteilen. An mehreren begrünten Gebäuden in Wien und Umgebung wurden Messgeräte installiert (wie in Kapitel 3.2 beschrieben). Es wurden jeweils ein begrünter Fassadenabschnitt und ein nicht begrünter Fassadenabschnitt langfristig vermessen. Danach wurden die Daten nach unterschiedlichen Kriterien gefiltert sodass zwei Datensätze entstanden sind. Diese werden als Datensatz A und Datensatz B bezeichnet. Der Datensatz A wurde so gefiltert, dass nur Werte für die Berechnungen herangezogen wurden, die gemessen worden sind als der Temperaturunterschied zwischen drinnen und draußen in den letzten 24 h durchschnittlich über 10 K und der Wärmestrom durch die Fassade größer als 0 war.

Der Datensatz B berücksichtigt zusätzlich, dass die Fassade Wärmeenergie speichern kann. Deshalb fließen in die Berechnungen nur Messdaten ein, bei denen der Temperaturunterschied zwischen Innen- und Außenluft in den letzten 24 h weniger als 2°C geschwankt hat. Damit werden im Datensatz B möglichst stationäre Bedingungen geschaffen um den stationären U-Wert aus den in situ Messungen zu berechnen.

Datensatz A und Datensatz B führen zu sehr ähnlichen Ergebnissen. Beide zeigen, dass der U-Wert an den begrünten Fassadenabschnitten geringer ist als an den nicht begrünten. Die Erhöhung des Wärmewiderstandes durch die Begrünung wird in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: Erhöhung des Wärmewiderstandes durch die Fassadenbegrünung, nach Begrünungssystem und Datensatz.

	System A	System B
Datensatz A	0,31 m ² K/W	0,67 m ² K/W
Datensatz B	0,35 m ² K/W	0,68 m ² K/W

Bei den untersuchten Objekten führt die Fassadenbegrünung zu einer deutlichen Verbesserung der thermischen Dämmung.

4.2. Zusammenfassung zweite Publikation, „Abbildung der wärmedämmenden Wirkung eines fassadengebundenen Begrünungssystems in einem Simulationsmodell“

Ziel des in dieser Publikation veröffentlichten Teiles der Forschungsarbeit war es, die Fassadenbegrünung in einem Berechnungsmodell abzubilden um die Einflüsse der Begrünung in weiterer Folge simulationstechnisch untersuchen und berechnen zu können. Für die Abbildung wurden in situ Langzeitmessungen sowie die gemessenen Klimadaten verwendet. Ziel war es die richtigen Berechnungsbedingungen herauszufinden unter denen die gemessenen Daten und Auswertungsergebnisse wiedergegeben werden bzw. die Abweichungen zwischen Messung und Berechnung minimal und bauphysikalisch akzeptabel wird. Der Unterschied zu den in Kapitel 4.1 angeführten Auswertungen ist:

- Berechnung des instationären U-Wertes, nicht des stationären.
- Die Auswirkungen von der Fassadenbegrünung wurden auf den R_{se} beschränkt.
- Berechnungen auf Basis von normierten Kennzahlen im Computerprogramm und nicht auf Basis von in situ Messungen.

Für die Modellabbildung wurden das Trogsystem und die Langzeitmessdaten an einem Bürogebäude der Stadt Wien, im urbanen Umfeld verwendet. Der begrünte Fassadenabschnitt wurde genau vermessen, mittels Plänen sowie eigener Abmessungen wurden die Hinterlüftungsabstände und die Troghöhen erhoben. Der Hinterlüftungsabstand ist 6 cm und der vertikale Abstand zwischen den Trogoberkanten jeweils 25 cm. Zwischen den Trögen gibt es keinen Luftaustausch von Hinterlüftungsspalt und Außenluft. Dieser findet ausschließlich bei den oben und unten angebrachten Blenden statt. Abbildung 15 zeigt das Begrünungssystem im Winter, da die Winterdaten für die stationären U-Werte und Transmissionswärmeverluste ausschlaggebend sind. Abbildung 16 stellt das Begrünungssystem schematisch dar.



Abbildung 15: Foto des Begrünungssystems im Winter

Die Tröge aus Abbildung 15 sind aufgrund des dichten Pflanzenwuchses üblicherweise nicht sichtbar.

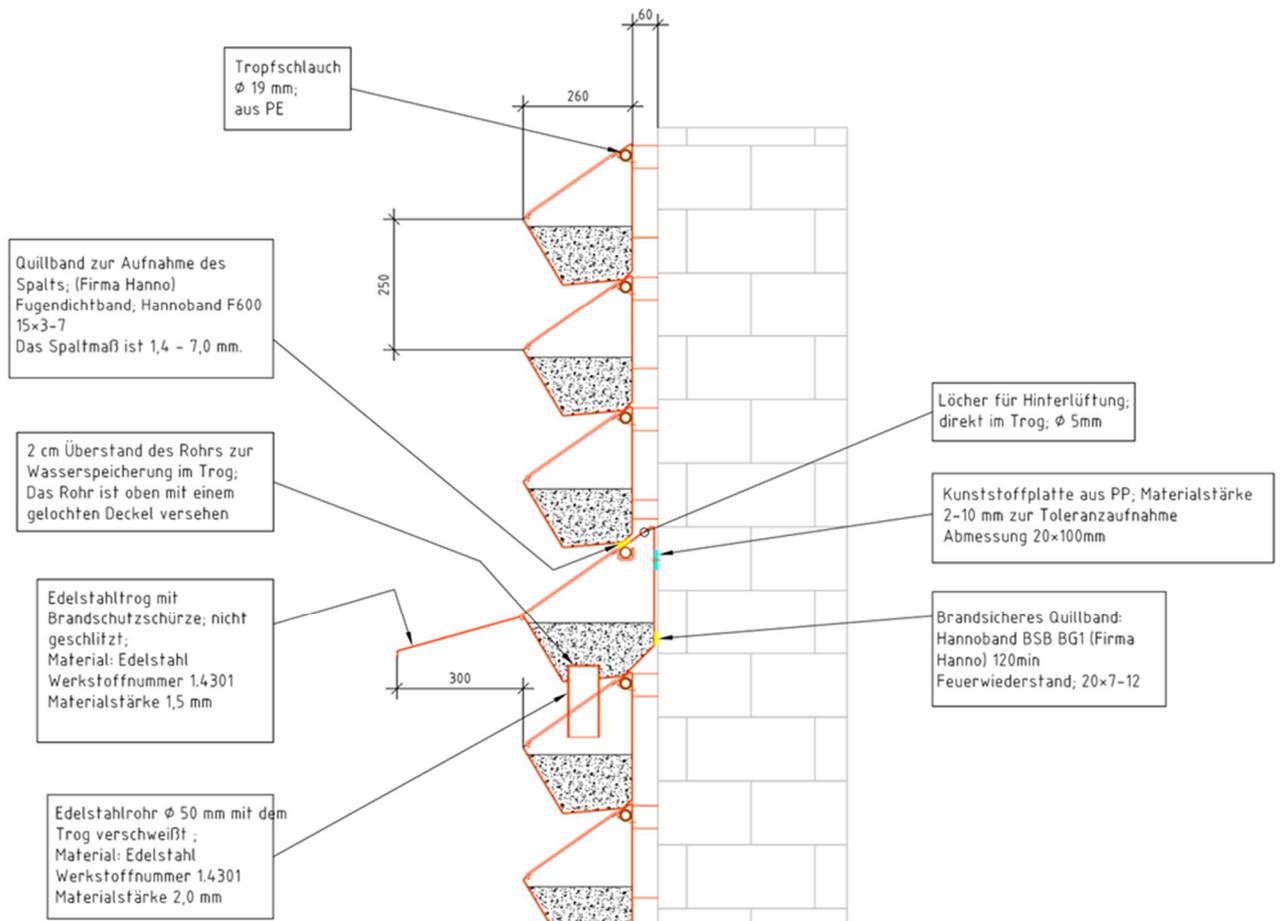


Abbildung 16: Schematische Darstellung des untersuchten Begrünungssystems (Quelle Hersteller).

Es gibt eine direkte Verbindung der Luft im Hinterlüftungsspalt mit der Außenluft über Hinterlüftungsöffnungen (Darstellung in Abbildung 5). Diese Situation lässt sich mittels stationärer Berechnung nicht hundertprozentig abbilden bzw. der Luftaustausch nicht berechnen. Für die Berechnungen wurde WUFI Pro 6.2 verwendet. Es wurden gezielt vier Monate untersucht bzw. im Modell abgebildet, Dezember 2015, Februar 2016, Oktober 2016 und November 2016. Für die Abbildung und Validierung dienten alle 5 Minuten gemessene Werte der Temperaturen an der inneren Oberfläche, der äußeren Fassadenoberfläche, der Außenluft und der Raumluft im angrenzenden Raum. Die gemessene Außenlufttemperatur diente dem Programm als Randbedingung. Die gemessenen Oberflächentemperaturen wurden zur Validierung der Berechnung herangezogen. Das Modell wurde so angepasst, dass der Verlauf der berechneten Oberflächentemperaturen jenen der gemessenen entsprach. Das Modell wurde eindimensional gerechnet. Das Begrünungssystem wurde zu einer homogenen Schicht vereinfacht und der Luftspalt zwischen der Fassade und dem Begrünungssystem wurde als nicht geschlossen definiert, um die Verbindung der Luft im Hinterlüftungsspalt mit der Außenluft zu simulieren. Der Austausch wurde mit einer Luftwechselrate von $0,2 \text{ m}^3/(\text{hm}^2)$ [27] definiert. Die Abstrahlung im Modell wurde vereinfacht. Die langwellige Abstrahlung wird über die reduzierte kurzwellige Strahlungsabsorptionszahl mit berücksichtigt [28]. Diese wird mit dem vergleichsweise niedrigen Wert von 0,3 angenommen [28].

Es wurden die Auswirkungen einer begrünten Fassade auf den äußeren Übergangswiderstand auf zwei unterschiedliche Arten untersucht. Die gemessenen Daten wurden direkt ausgewertet um die Auswirkungen auf den R_{se} zu berechnen. Hierfür ergab sich eine Erhöhung des äußeren Wärmeübergangswiderstandes um $0,33 \text{ m}^2\text{K/W}$. In der zweiten Variante wurden die Messdaten als Randbedingung und zur Validierung einer dynamischen Berechnung mittels Computersimulation

verwendet. Bei dieser Berechnung ergab sich eine Erhöhung des äußeren Wärmeübergangswiderstandes aufgrund der Begrünung von 0,25 bis 0,27 m²K/W.

Ein Grund für die unterschiedlichen Ergebnisse ist, dass das Computersimulationsprogramm basierend auf Normen rechnet. Die [35] gibt für ruhende Luftschichten (Öffnungen kleiner als 500 mm² je m Länge für vertikale Luftschichten) mit der Breite von 6 cm einen Wärmedurchlasswiderstand von 0,18 m²K/W an. Die Messungen zeigen jedoch einen höheren R_{se} für den äußeren Wärmeübergangswiderstand, als der von [35] vorgeschlagene.

4.3. Zusammenfassung dritte Publikation, „Greening Aspang – Hygrothermische Gebäudesimulation zur Bestandsanalyse und Bewertung unterschiedlicher Szenarien bezogen auf das Innenraumklima“

Ziel der in diesem Paper präsentierten Untersuchungen war es, die Auswirkungen von Fassadenbegrünung und Loggienbegrünung auf die sommerliche Überwärmung der angrenzenden Räume zu erforschen. Dafür wurden im Sommer 2016 in zahlreichen Wohnungen Messungen durchgeführt. Gemessen wurden die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit. Begleitet wurden die Messungen in den Wohnungen von Messungen an der Außenluft von einer Wetterstation nahe der Wohnungen. In dieser Publikation wurden die Untersuchungen an vier Wohnungen, die im 3. Wiener Bezirk in der Aspangstraße liegen, dargestellt. Diese gezielt ausgewählten Wohnungen befinden sich in unterschiedlichen Gebäuden. Die Gebäude unterscheiden sich in ihrem Baujahr, der Bauart, der thermischen Dämmung und der Fassadenoberflächenfarbe. Mittels Computerprogramm WUFI Plus 3.0 wurden unterschiedliche Szenarien an den Gebäuden untersucht und mit gemessenen Daten verglichen. Für die Simulation wurde im Zuge der Dissertation eine Methode entwickelt, um die Messdaten als Randbedingung für die Berechnungen zu verwenden. Im Zuge der Szenarien wurden die Gebäude fiktiv verändert und die Auswirkungen auf die Temperatur während der Hitzewelle untersucht. Die Szenarien sind eine eingebaute Nachtlüftung, Außenverschattung, Fassadenbegrünung und Loggienbegrünung. Forschungsziel der Publikation war es, zu zeigen wie sich die jeweilige Veränderung des Gebäudes auf die Innenraumtemperatur während einer Hitzewelle auswirken.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die effektivste Einzelmaßnahme sommerliche Überwärmung im Innenraum zu reduzieren, vom jeweiligen Gebäude abhängig ist. Eine Kombination aus allen unterschiedlichen Maßnahmen führt zu den besten Ergebnissen. Fassadenbegrünung und Loggienbegrünung können auch im Innenraum an heißen Tagen die Lufttemperatur senken. Die Auswirkungen sind jedoch abhängig vom jeweiligen Objekt. Nicht berücksichtigt wurde der Effekt, dass Begrünung auch die Außenluft ein wenig kühlt. Kühlere Außenluft führt auch in den Räumen zu geringeren Temperaturen. Die Kühlung der Außenluft ist allerdings sehr komplex und von der Umgebung und vielen anderen Parametern wie Wind, Pflanzenart, Blattgrößen und Bewässerungsvorgängen abhängig.

4.4. Zusammenfassung vierte Publikation, “The effect of an Indoor Living Wall System on humidity, mould spores and CO₂-concentration”

Ziel des in dieser Publikation veröffentlichten Teiles der Forschungsarbeit war es, die Auswirkungen von Innenraumbegrünung auf die Luftfeuchtigkeit, die Temperatur, die Schimmelsporenkonzentration und

die CO₂-Konzentration des Raumes zu erforschen. Die untersuchten Standorte waren mehrere Schulen / Schulklassen in Wien. Der Standort der in diesem Paper präsentierten Untersuchungen war die Schule im 7. Wiener Bezirk. Das Gebäude ist ein Altbaugebäude, das um ca. 1900 errichtet wurde. Ein Klassenraum mit Innenraumbegrünung und ein konventioneller Klassenraum ohne Begrünung wurden untersucht. Die beiden Klassenräume sind im selben Stockwerk, in dieselbe Richtung orientiert, liegen direkt nebeneinander, haben fast dieselben geometrischen Maße und durchschnittlich dieselbe Anzahl von RaumnutzerInnen. Deshalb eignen sich die beiden Räume zum Vergleich von ihrem Innenraumklima. Die Innenraumbegrünung in der begrünten Klasse ist ca. 6,5 m² groß.

Um die hygrothermische Behaglichkeit zu bewerten wurden langfristig die Lufttemperatur und die Luftfeuchtigkeit gemessen. Basierend auf Literaturquellen wurden behagliche, noch behagliche und nicht behagliche Bereiche in einem hygrothermischen Diagramm festgelegt (siehe Abbildung 8). Die Messwerte in den jeweiligen Behaglichkeitsbereichen wurden gezählt, um so einen Vergleich zwischen den beiden Klassenräumen zu ermöglichen. Die Schimmelsporenkonzentrationen in den untersuchten Räumen wurden mit einem dafür ausgewählten Messgerät (MAS-100) untersucht. Tabelle 7 zeigt, dass die Schimmelsporenkonzentration im begrünten Klassenraum nicht höher ist, als im unbegrünten oder an der Außenluft. Die Einheit CFU steht für Colony forming units und macht einen Vergleich zwischen den unterschiedlichen Substanzen möglich.

Tabelle 7: Schimmelsporen-Konzentration in den jeweiligen gemessenen Klassenräumen

Raum	Luft-temperatur	Relative Luft-feuchtigkeit	Konzentration von mesophilic mould [CFU/m ³]	Konzentration von thermophilic mould [CFU/m ³]	Gefundene Sporen
Begrünter Klassen-raum	24.9	51	160	50	Penicillium spores 55 % Cladosporium 30 % Andere 15 %
Nicht begrünter Klassen-raum	25.0	38	150	100	Cladosporium 45 % Penicillium spores 40 % Aspergillus versicolor 5 % Wallemia sebi 10 %
Außenluft straßen-seitig	20.4	45	1.000	50	Penicillium spores 75 % Cladosporium 20 % Andere 5 %
Außenluft Innenhof	21.1	37	1.100	110	Cladosporium 55 % Penicillium spores 35 % Aspergillus versicolor und Alternaria insgesamt 5 % Andere 5 %

In [36] wird beschrieben wie die Messdaten zu interpretieren sind. Für die in Tabelle 7 dargestellten Messwerte ist eine innere Schimmelquelle als „unlikely“ anzunehmen. Das ist die niedrigste Stufe der definierten Wahrscheinlichkeit.

Die Untersuchung der CO₂-Konzentration musste außerhalb der Schulzeiten in den Sommerferien durchgeführt werden. Denn um die CO₂-Konzentrationen von den beiden Räumen vergleichen zu können, ist es notwendig, dass deren Dichtheit (n₅₀ – Wert) gleich ist. Die Dichtheit der beiden

Klassenräume wurde mittels Blower-Door-Test solange gemessen und Leckagen möglichst gut abgedichtet bis die beide Räume auf dieselbe Dichtheit gebracht wurden. Anschließend wurde mittels CO₂-Druckflasche zeitgleich CO₂ in die beiden Klassenräume eingeführt. Die CO₂-Konzentration hat in beiden Klassenräumen aufgrund des Luftwechsels mit der Außenluft abgenommen. Zusätzlich haben in der begrünten Klasse die Pflanzen die CO₂-Konzentration reduziert. Diese beschleunigte Reduktion ist auf die Innenraumbegrünung zurückzuführen.

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die relative Luftfeuchtigkeit in der begrünten Klasse höher ist. Insbesondere im Winter bedeutet das häufigere Behaglichkeit in der begrünten Klasse. Denn im Winter war die trockene Luft der häufigste Grund für nicht behagliches hygrothermisches Raumklima. Im Sommer ist der häufigste Grund für nicht behagliches hygrothermisches Raumklima zu hohe Lufttemperatur. In der begrünten Klasse ist es genauso heiß wie in der nicht begrünten Klasse. Es kommt zu keiner fühlbaren Abkühlung aufgrund der Begrünung.

5. Wissenschaftlicher Beitrag der Dissertation

5.1. Stand der Forschung

Im Zuge der vorliegenden Dissertation wurde untersucht, wie sich Wandbegrünung auf den Wärmeschutz, die sommerliche Überwärmung im Gebäude und das hygrothermische Innenraumklima auswirken. Das ist eine Forschungslücke die zuvor nicht detailliert wissenschaftlich untersucht wurde. Zu Beginn der Dissertation waren diese Auswirkungen weitgehend unerforscht. Während der Untersuchungen im Rahmen dieser Dissertation, gab es weltweit Anstrengungen die offenen Forschungslücken bezüglich Fassadenbegrünung zu schließen. Die Untersuchungen die im Zuge der vorliegenden Dissertation getätigt wurden, sind jedoch bis heute die detailliertesten zu der in Kapitel 1.3 formulierten Forschungsfrage.

Die Auswirkung von Fassadenbegrünung auf die thermische Dämmung der Fassade wurde bereits in einigen Publikationen präsentiert. Es wurden Untersuchungen von begrünten Objekten durchgeführt, um Erkenntnisse über den Hinterlüftungsspalt zu gewinnen. Es wurde gezeigt, dass sich die Temperaturen im Hinterlüftungsspalt von der Außenluft unterscheiden [37], [38][3][39]. Der oben bereits genannte Bericht [3] beschreibt auch Messungen die im Zuge der Dissertation durchgeführt wurden. Die Messungen wurden an einer teilweise begrünten Altbaufassade durchgeführt. Dabei wurden begrünte Fassadenabschnitte mit nicht begrünten verglichen. Der Wärmedurchgangswiderstand ist an den begrünten Fassadenabschnitten höher als an den nicht begrünten. Je nachdem wie großflächig das Begrünungssystem ist und wie gut die Seitenränder des Systems verblendet sind, schwankt der zusätzliche Wärmedurchgangswiderstand aufgrund der Begrünung zwischen 0,12 m²K/W und 0,39 m²K/W. Das sind Teilergebnisse der vorliegenden Dissertation und sie wurden auch im Rahmen des Berichts, vor Abschluss der Dissertation, veröffentlicht. In [31] wurden ebenfalls in situ Messungen an zwei unterschiedlichen Begrünungssystemen durchgeführt. Es handelt sich dabei um die erste wissenschaftliche Publikation der vorliegenden Dissertation. Sie wird in Kapitel 4.1 beschrieben. Es wurde ein zusätzlicher Wärmedurchgangswiderstand zwischen 0,31 m²K/W und 0,68 m²K/W aufgrund der Fassadenbegrünung festgestellt.

Auch die Untersuchungen von [40] wurden im Zuge der Dissertation durchgeführt. Hier wurden in situ Messungen getätigt und ausgewertet, um den Einfluss von Fassadenbegrünung auf den U-Wert festzustellen. Es wurden drei unterschiedliche Fassadenbegrünungssysteme an drei unterschiedlichen

Gebäuden vermessen. Bei den unterschiedlichen Mauerwerken handelte es sich um ein Vollziegelmauerwerk, eine Betonmauer mit 5 cm XPS-Dämmung und einer Mauer aus Hochlochziegeln. Das Ergebnis der Untersuchungen zeigt, dass die Fassadenbegrünung die U-Werte um ca. 20 % verbesserte, abhängig von der Art und Ausführung des Begrünungssystems.

In [39] wurde von K. Perini und anderen bereits vor Beginn der Dissertation die Windgeschwindigkeit im Hinterlüftungsspalt zwischen der bestehenden Fassade und dem Begrünungssystem gemessen. Es konnte festgestellt werden, dass die Luftgeschwindigkeit hinter dem Begrünungssystem nicht schneller ist als in Innenräumen. Deshalb wurde für den äußeren Wärmeübergangswiderstand der innere angenommen, was den gesamten Wärmeübergangswiderstand laut [6] um $0,09 \text{ m}^2\text{K/W}$ erhöht.

Auch auf die Publikation [41] konnte im Zuge der Dissertation zurückgegriffen werden. Sie wurde von ForscherInnen in China im Jahr 2014 veröffentlicht. Hier wurden Simulationen durchgeführt, der Wärmedurchgangswiderstand aber nur in einer relativen Verbesserung angegeben. Das Verhältnis wurde letzten Endes mittels Online-Plattform u-wert.net berechnet und es wurde festgestellt, dass sich der Wärmedurchgangswiderstand um bis zu 23,7 % verbesserte. Die Auswirkungen von Fassadenbegrünungen auf den U-Wert wurden aber noch nicht in einem Simulationsmodell detailliert abgebildet, um diese simulationstechnisch untersuchen zu können. Auch in [41] werden keine konkreten Angaben zur Erhöhung des Wärmedurchgangswiderstandes publiziert, sondern nur die relative Verbesserung.

Im Jahre 2013 wurde von Susorova und anderen [42] ein mathematisches Modell entwickelt, mit dem die Auswirkung von Kletterpflanzen auf den U-Wert untersucht wurde. Der Fokus der Untersuchungen liegt jedoch im Sommer und nicht wie in der vorliegenden Dissertation im Winter. Die errechnete Erhöhung des Wärmedurchgangswiderstands liegt zwischen 0 und $0,7 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Die Auswirkungen von Kletterpflanzen auf den U-Wert wurden im Zuge der Dissertation nicht behandelt. In [43] wird gezeigt, dass die Luftbewegung bei den Kletterpflanzen geringer ist und deshalb laut [6] auf einen höheren äußeren Wärmeübergangswiderstand (um $0,09 \text{ m}^2\text{K/W}$) rückgeschlossen werden kann. Eine allgemeine Aussage über die Auswirkungen von Kletterpflanzen auf den U-Wert der Fassade zu finden ist kaum möglich. Die Blattdichte und genaue Pflanzenform wirken sich auf den U-Wert aus, ändern sich jedoch ständig, da es sich um lebende Pflanzen handelt. Im Zuge der hier vorliegenden Dissertation wurde ausschließlich fassadengebundene Begrünung untersucht.

Die Auswirkungen von Innenraumbegrünung mittels Topfpflanzen wurden international häufig untersucht. Der generelle Fokus liegt dabei auf Untersuchungen bezüglich Staub und VOCs. So wurden in [44][45][46] die Auswirkungen von Topfpflanzen in Räumen auf Staub und VOCs untersucht. Es konnte eine positive Auswirkung der Pflanzen auf die Staubkonzentration und die VOCs festgestellt werden. In [46] wurde auch die CO_2 -Konzentration in Laboren untersucht. Es wurde eine Reduktion der CO_2 -Konzentration um $2.8 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-3}\text{m}^{-2}\text{h}^{-1}$ festgestellt. Der Einfluss von Innenraumbegrünung auf die hygrothermische Behaglichkeit wurde in keinem der Papers untersucht. Die Untersuchungen die im Zuge dieser Dissertation dazu angestellt wurden, sind erstmals in [3] publiziert worden. Für diese Untersuchungen wurde in einer Schulklasse Innenraumbegrünung installiert und die Luftfeuchtigkeit und Lufttemperatur während des Schulbetriebes zu messen. Aufgrund der erhöhten Luftfeuchtigkeit wird eine Verbesserung dokumentiert, die insbesondere im Winter die Behaglichkeit der hygrothermischen Bedingungen verbessert.

Das bedeutendste Argument für Gebäudebegrünung ist der UHI-Effekt. Er wird aufgrund der Reduktion von Grünflächen (siehe Kapitel 1) verstärkt. Das wurde auch in [47] und [48] untersucht. Der Fokus der Untersuchungen liegt hier allerdings bei der Untersuchung des Außenklimas. Es wird rechnerisch geprüft, wie sich Pflanzen auf die Reduktion der Temperatur in der Stadt auswirken können. Wie sich

Gebäudebegrünung auf die sommerliche Überwärmung in Gebäuden auswirkt, wurde noch nicht wissenschaftlich untersucht. Dieses Thema wurde im Zuge der vorliegenden Dissertation erstmals aufgegriffen.

5.2. Ergebnisse

Ergänzend zu den in Kapitel 4 und Kapitel 11 dargestellten Ergebnissen, wurden auch weitere Untersuchungen im Rahmen dieser Dissertation abgewickelt. Sie werden im folgenden Kapitel dargestellt.

5.2.1. U-Werte und Wärmebrücken

Bezüglich der Auswirkungen von fassadengebundener Begrünung auf die thermische Qualität der Fassade, wurden zahlreiche Untersuchungen im Zuge dieser Dissertation durchgeführt. Unterschiedliche Methoden wurden entwickelt und beschrieben. Die Ergebnisse der Dissertation basieren auf Basis der langjährigen Messungen sowohl an Altbau- als auch an Neubaufassaden. Sie waren Basis für die beschriebenen Computersimulationen in denen auch Wärmebrücken berücksichtigt wurden.

Die Zunahme des R_{SE} ist abhängig von der Größe des Begrünungssystems und den Hinterlüftungsöffnungen. Für großflächige Systeme mit verblendeten Hinterlüftungsöffnungen erhöht sich der R_{SE} um $0.39 \text{ m}^2\text{K/W}$, für kleinflächige Systeme ohne Verblendung um $0.12 \text{ m}^2\text{K/W}$. Diese beiden Werte können als oberer und unterer Wert für die Erhöhung des R_{SE} aufgrund von fassadengebundener Begrünung gesehen werden. Der zusätzliche R_{SE} , aufgrund der fassadengebundenen Begrünung, wird in weiterer Folge als R_A bezeichnet. Abbildung 17 und Abbildung 18 zeigen die U-Werte für unterschiedliche Szenarien mit fassadengebundener Begrünung und ohne dieser. Dabei handelt es sich in jedem Fall um großflächige fassadengebundene Begrünung bei der die Seiten verblendet sind. Der R_A ist deshalb mit $0.39 \text{ m}^2\text{K/W}$ zu bewerten, wenn Wärmebrücken nicht berücksichtigt werden.

Die blauen Säulen in Abbildung 17 und Abbildung 18 zeigen den U-Wert der nicht begrünten Fassade. Dieser Wert wurde mittels Formel 1 berechnet.

Die grünen Säulen in Abbildung 17 und Abbildung 18 zeigen den U-Wert der begrünten Fassade. Dieser Wert wurde mittels Formel 6 berechnet.

$$U_G = \frac{1}{R_G} = \frac{1}{R_T + R_A}$$

U_G = U-Wert des begrünten Teils der Fassade, ohne Berücksichtigung der Wärmebrücken (grüne Säule in Abbildung 17 und Abbildung 18)

R_G = Wärmedurchgangswiderstand des begrünten Teils der Fassade ohne Berücksichtigung von Wärmebrücken (ohne Befestigungselementen)

R_T = Gesamt-Wärmedurchgangswiderstand der nicht begrünten Fassade

R_A = Zusätzlicher Wärmedurchgangswiderstand aufgrund der fassadengebundenen Begrünung. Auf Basis der anderen Untersuchungen (auch für die Darstellungen in Abbildung 17 und Abbildung 18) wurde R_A mit 0.39 angenommen.

Formel 6: Berechnung des U-Wertes der begrünten Fassaden ohne Berücksichtigung möglicher Wärmebrücken (die grüne Säule in Abbildung 17 und Abbildung 18)

Die grauen und orangen Säulen in Abbildung 17 und Abbildung 18 zeigen die U-Werte der begrünten Fassade, unter Berücksichtigung der Befestigungselemente an Fassaden bzw. Wärmebrücken. Die Beschreibung der Befestigungselemente ist in Kapitel 3.1.3 angeführt. Die ΔU -Werte die sich aufgrund der Wärmebrücken ergeben, werden in Tabelle 11 dargestellt. Sie werden auf Basis der χ -Werte berechnet. Diese werden in Tabelle 10 dargestellt. Sie wurden mit AnTherm berechnet (siehe Kapitel 3.4.1).

Tabelle 8: L^{3D} Werte des Kassettensystems für die unterschiedlichen Szenarien

	Unbegrünte Fassade in W.K ⁻¹	Aluminium in W.K ⁻¹	Edelstahl in W.K ⁻¹
Fassade: Gedämmt System: Kassettensystem	0.4023	0.4247	0.4086
Fassade: Vollziegel System: Kassettensystem	1.7908	1.7923	1.7914
Fassade: Hochlochziegel System: Kassettensystem	1.7444	1.7464	1.7452

Tabelle 9: L^{3D} Werte des Trogsystems für die unterschiedlichen Szenarien

	Unbegrünte Fassade in W.K ⁻¹	Aluminium in W.K ⁻¹	Edelstahl in W.K ⁻¹
Fassade: Gedämmt System: Trogsystem	0.1274	0.1990	0.1737
Fassade: Vollziegel System: Trogsystem	0.5671	0.5695	0.5666
Fassade: Hochlochziegel System: Trogsystem	0.5524	0.5561	0.5526

Basierend auf den L^{3D} Werten wurden die χ Werte mittels Formel 7 berechnet.

$$\chi = L_{xx}^{3D} - L_{00}^{3D}$$

L_{00}^{3D} = L^{3D} Wert des nicht begrünten Fassadeabschnittes

L_{xx}^{3D} = L^{3D} Wert des begrünten Fassadeabschnittes mit Verankerungssystemen aus Aluminium oder Edelstahl

Formel 7: Berechnung der χ Werte auf Basis der L^{3D} Werte

Sie werden in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10: χ -Werte die auf Basis der L^{3D} Werte in Tabelle 8 und Tabelle 9 berechnet wurden

	Kassettsystem		Trogssystem	
	Aluminium in W.K ⁻¹	Edelstahl in W.K ⁻¹	Aluminium in W.K ⁻¹	Edelstahl in W.K ⁻¹
Fassade: Gedämmt	0.0224	0.0063	0.0717	0.0463
Fassade: Vollziegel	0.0015	0.0006	0.0024	0.0000
Fassade: Hochlochziegel	0.0021	0.0009	0.0037	0.0002

Die χ -Werte wurden verwendet, um die ΔU -Werte zu berechnen. Das ist mittels Formel 8 erfolgt.

$$\Delta U = c \cdot \chi$$

c = Anzahl der Befestigungselemente pro Quadratmeter

χ = Berechneter χ -Wert aus Tabelle 10

Formel 8: Berechnung der ΔU -Werte mithilfe der Anzahl der Befestigungselemente und χ -Werte

Tabelle 11: Berechnete ΔU -Werte für die unterschiedlichen Szenarien

	Kassettsystem		Trogssystem	
	Aluminium in W.K ⁻¹	Edelstahl in W.K ⁻¹	Aluminium in W.K ⁻¹	Edelstahl in W.K ⁻¹
Fassade: Gedämmt	0.0377	0.0106	0.0781	0.0505
Fassade: Vollziegel	0.0025	0.0010	0.0026	0.0000
Fassade: Hochlochziegel	0.0035	0.0015	0.0040	0.0002

Die ΔU -Werte beschreiben jene Werte die den U-Werten aufgrund der Wärmebrücken dazu addiert werden müssen (siehe Formel 9). In Abbildung 17 und Abbildung 18 zeigen die grauen und die orangenen Säulen die U_L Werte.

$$U_L = U_G + \Delta U$$

U_L = U-Wert des begrünten Fassadenabschnittes unter Berücksichtigung der Wärmebrücken (die grauen und orangen Säulen in Abbildung 17 und Abbildung 18).

U_G = U-Wert des begrünten Fassadenabschnittes ohne Berücksichtigung der Wärmebrücken (grüne Säulen in Abbildung 17 und Abbildung 18).

ΔU = Berechnet aus Formel 8

Formel 9: Berechnung des U-Wertes unter Berücksichtigung der fassadengebundenen Begrünung mit Befestigungselementen.

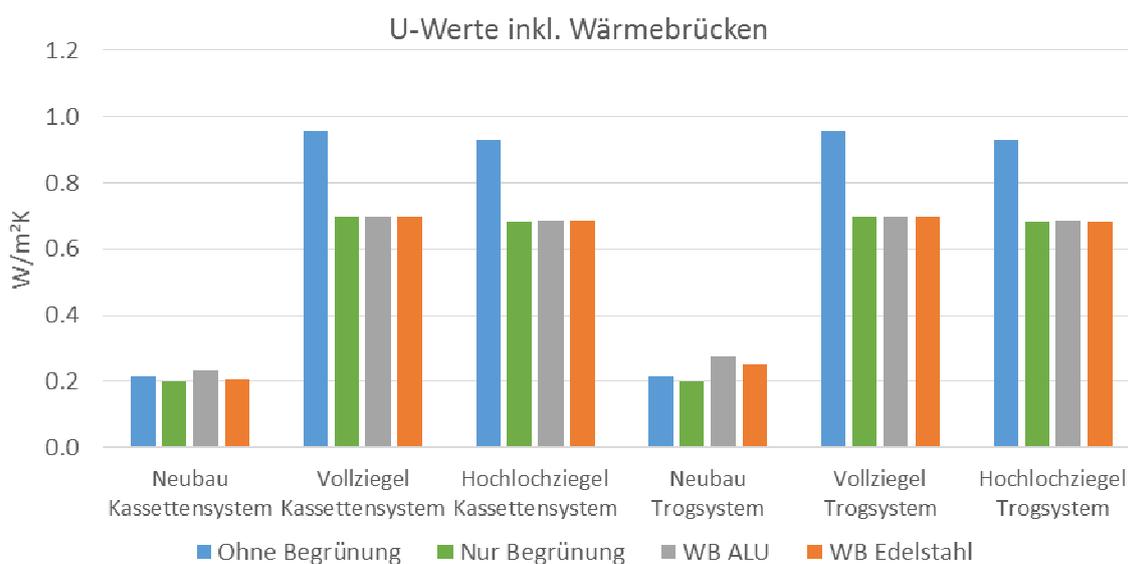


Abbildung 17: Das Diagramm zeigt die U-Werte des begrünten und nicht begrünten Abschnittes der Fassade, mit und ohne Berücksichtigung der Wärmebrücken an gedämmten und nicht gedämmten Fassaden.

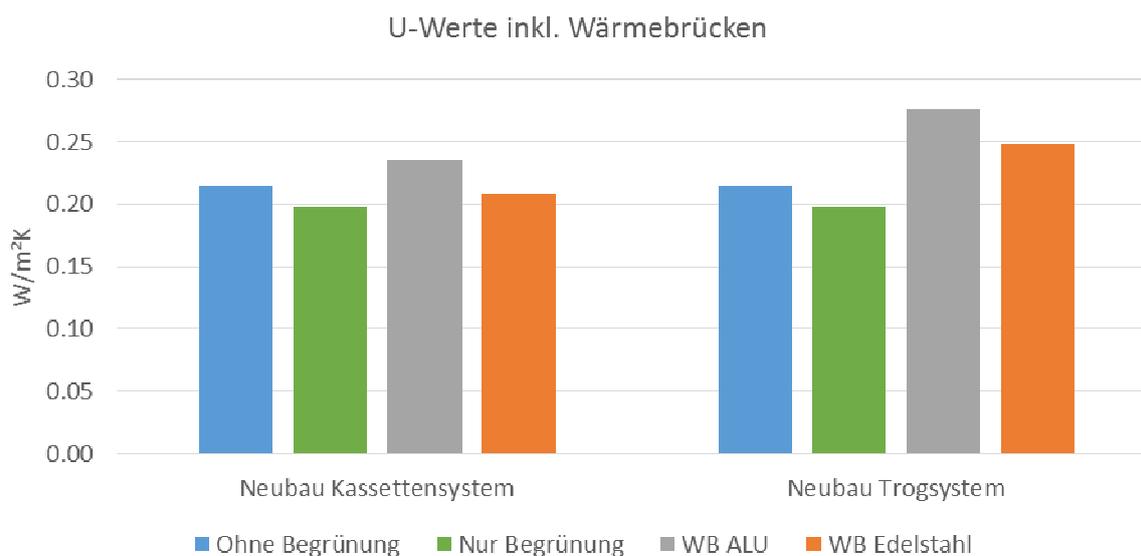


Abbildung 18 Das Diagramm zeigt die U-Werte des begrünten und nicht begrünten Abschnittes der Fassade, mit und ohne Berücksichtigung der Wärmebrücken gedämmten Fassaden.

Die Wärmebrücken wirken sich signifikant stärker auf gedämmten Fassaden aus als auf nicht gedämmten. Für die beiden hier beschriebenen nicht gedämmten Fassaden, Fassade 2 (siehe Tabelle 2) und Fassade 3 (siehe Tabelle 3), sind die Wärmebrücken in den betrachteten Szenarien vernachlässigbar. Die ΔU -Werte sind kleiner als $0.01 \text{ W/m}^2\text{K}$. Für die gedämmte Fassadenkonstruktion können diese Wärmebrücken nicht vernachlässigt werden. Abbildung 18 zeigt dass die U-Werte der Fassade aufgrund der Verankerungen/Befestigungen der Begrünung steigen können. Die Wärmebrücken können je nach Ausführung auch zu einer beträchtlichen Erhöhung der U-Werte führen. Es ist auch zu erkennen, dass die U-Werte niedriger sind, wenn die Verankerungen aus Edelstahl und nicht aus Aluminium sind. Das liegt an der höheren Wärmeleitfähigkeit von Aluminium. Wenn fassadengebundene Begrünung ohne Befestigungselemente ausgeführt werden kann (z.B. mit Stützelementen am Boden), führt das in jedem Fall zu einer Verbesserung der Dämmung der Fassade. Kommen Verankerungen zum Einsatz, muss die Gesamtkonstruktion betrachtet werden, um eine Aussage treffen zu können. An ungedämmten, dicken Altbaufassaden sind die Auswirkungen der Befestigungselemente vernachlässigbar. An gedämmten Fassaden ist darauf zu achten, dass eine möglichst gute thermische Entkoppelung bei den Befestigungselementen erreicht wird. Das ist entscheidend dafür ob sich der U-Wert aufgrund von fassadengebundener Begrünung verbessert oder verschlechtert. Bei allen Szenarien in Abbildung 17 und Abbildung 18 wird von einem großflächigen Begrünungssystem ausgegangen bei dem die Öffnungen verblendet sind. Bei einem kleinflächigen Begrünungssystem ohne Verblendung wäre der Wärmedurchgangswiderstand um $0.27 \text{ m}^2\text{K/W}$ geringer. Somit wäre eine Verbesserung des U-Wertes an den gedämmten Fassaden mit Verankerungen in der Fassade nur noch sehr schwer erreichbar.

5.2.2. Auswirkungen der Innenraumbegrünung auf das hygrothermische Raumklima

Es gibt verschiedene Methoden die hygrothermische Behaglichkeit in einem Raum zu bewerten. In der vorliegenden Dissertation wurde zur Bewertung die Methode von W. Frank [23] herangezogen. Die Abbildungen Abbildung 19, Abbildung 20, Abbildung 22 und Abbildung 23, stellen die Messwerte in einem solchen Bewertungsdiagramm dar. Jeder Punkt (blau oder grün) präsentiert eine bestimmte (gemessene) Temperatur und eine bestimmte Luftfeuchtigkeit.

In den Abbildungen Abbildung 19 und Abbildung 20 wird nur der Zeitraum von 1. Oktober und 31. März betrachtet. Während dieser Monate ist es selten zu warm in den Räumen. Aufgrund der gut funktionierenden Heizung ist es nicht zu kalt. Der Grund für nicht behagliches und noch behagliches Raumklima ist in Abbildung 19 die trockene Luft. In Abbildung 20 ist ersichtlich, wie sich die Luftfeuchtigkeit aufgrund der Begrünung gegenüber dem nicht begrünenden Raum erhöht. Das führt zu einer häufigeren hygrothermischen Behaglichkeit im begrünenden Klassenraum.

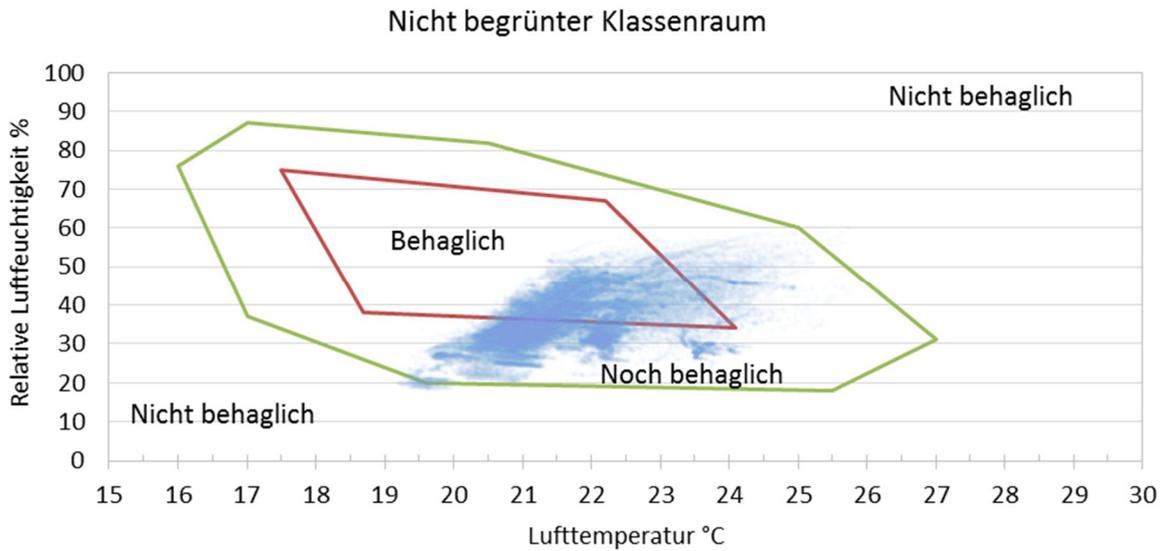


Abbildung 19: Verteilung der Messwerte im nicht begrüntem Klassenraum zwischen 1. Oktober und 31. März in den Jahren 2016, 2017 und 2018.

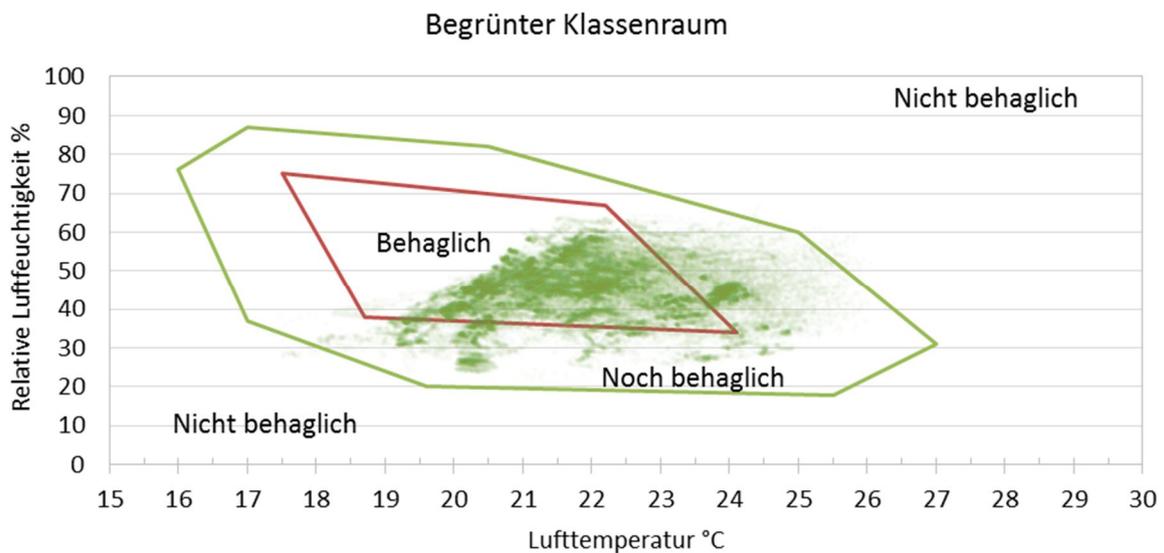


Abbildung 20 Verteilung der Messwerte im begrünten Klassenraum zwischen 1. Oktober und 31. März in den Jahren 2016, 2017 und 2018.

In Abbildung 21 wird gezeigt wie viel Anteil die jeweiligen Behaglichkeitsstufen (behaglich, noch behaglich und nicht behaglich), in den betrachteten Monaten von Abbildung 19 und Abbildung 20, relativ zu einander haben. Es ist sichtbar, dass während der kalten Monate (1. Okt. bis 31. Mär.) der begrünte Raum häufiger behaglich ist, als der nicht begrünte Raum. Das liegt daran, dass die Luftfeuchtigkeit im begrünten Klassenraum höher ist. Höhere Luftfeuchtigkeit ist gerade im Winter wichtig für die menschliche Gesundheit [49]. Im begrünten Klassenraum ist das Raumklima für 71 % der Zeit behaglich, im nicht begrünten sind es 42 %. Im begrünten Raum ist es um 69 % häufiger behaglich als im nicht begrünten Raum.

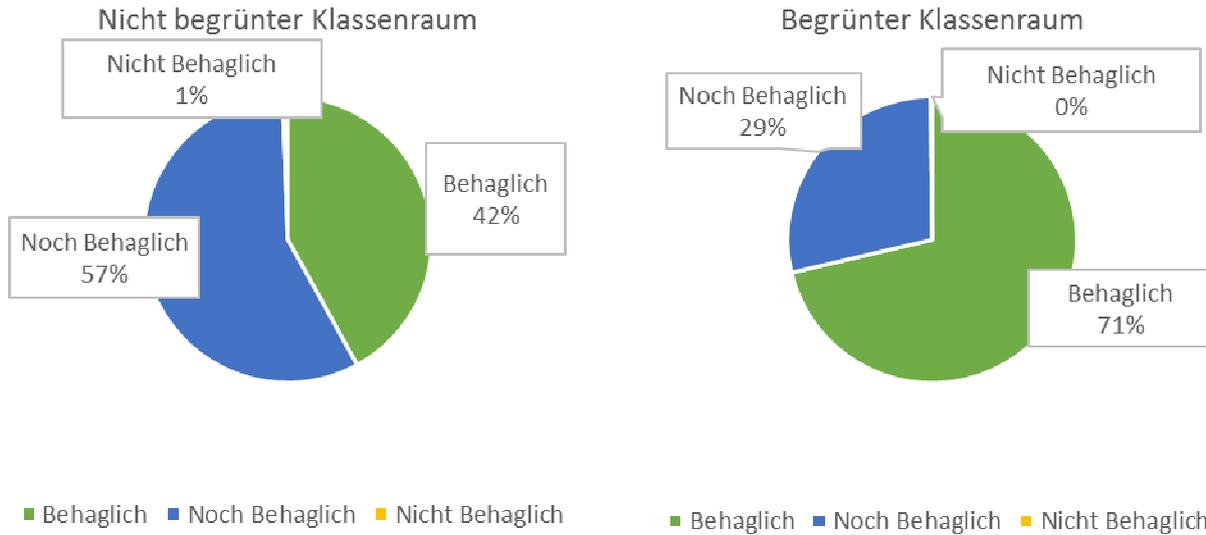


Abbildung 21 Häufigkeiten der unterschiedlichen Behaglichkeitsstufen im nicht begrünten Klassenraum (links) und im begrünten Klassenraum (rechts), zwischen 1. Oktober und 31. März in den Jahren 2016, 2017 und 2018.

Gemessen wurde die hygrothermische Behaglichkeit aber nicht nur während der kalten Jahreszeit (die in Abbildung 19 und Abbildung 20 dargestellt wird). Zwischen 2. Februar 2016 und 28. Juni 2018 wurde durchgehend alle 5 bis 10 Minuten ein Punkt generiert. Abbildung 22 und Abbildung 23 zeigen alle Messwerte unabhängig von der Jahreszeit. Ganzjährig betrachtet, ist der häufigste Grund für nicht behagliches Raumklima die Überwärmung. Im begrünten Raum sind 10 % aller Messwerte über 27°C, im nicht begrünten Raum sind es 12 %. Dafür liegt die relative Luftfeuchtigkeit dieser Messwerte im begrünten Klassenraum höher. Es kann davon ausgegangen werden, dass die gefühlte Lufttemperatur in der begrünten und der nicht begrünten Klasse im Sommer annähernd gleich ist.

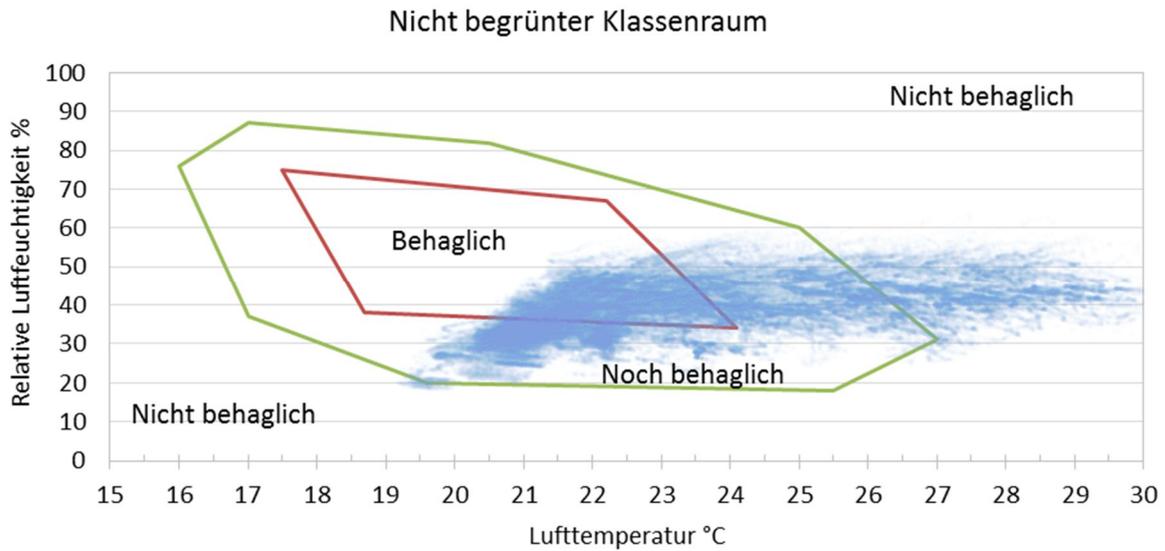


Abbildung 22 Verteilung der Messwerte im nicht begrünten Klassenraum, zwischen 2. Feb. 2016 und 28. Jun. 2018.

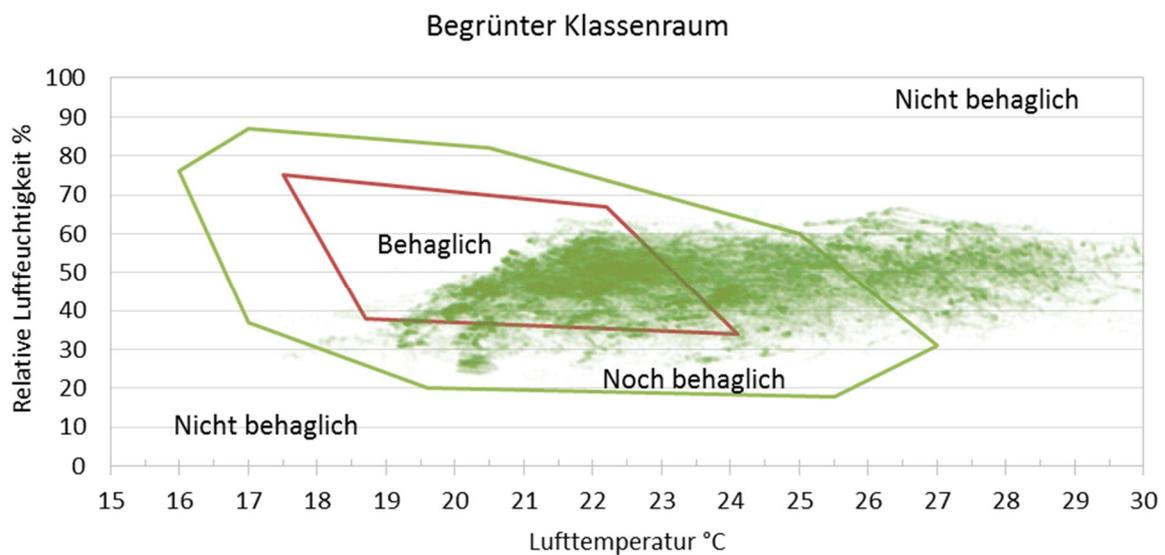


Abbildung 23 Verteilung der Messwerte im begrünten Klassenraum, zwischen 2. Feb. 2016 und 28. Jun. 2018.

Um die Auswirkungen von Fassadenbegrünung auf die sommerliche Überwärmung im Innenraum zu ermitteln wurden die Innenraumtemperaturen mit dem Berechnungsprogramm WUFI Plus 3.0 berechnet und mit Messdaten verglichen. Die Wetterstation hat die Parameter Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit und Globalstrahlung gemessen. Die gemessenen Wetterdaten wurden als Randbedingung in die Berechnung eingespielt. Da zeitgleich auch die Messungen in den Wohnungen stattgefunden haben, konnten die Messdaten als Validierung für die berechneten Werte verwendet werden. Tabelle 4 und Abbildung 12 zeigen die Objekte an denen Messungen stattgefunden haben und unterschiedliche Varianten simuliert wurden.

Zu den untersuchten Maßnahmen zählen unter anderem zusätzliche Außenverschattung, erhöhte Nachtlüftung, veränderte Fassadenfarbe sowie Fassaden- und Loggienbegrünung. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die effektivste Einzelmaßnahme sommerliche Überwärmung im

Innenraum zu reduzieren vom jeweiligen Gebäude abhängig ist (siehe Abbildung 24). Eine Kombination aus allen unterschiedlichen Maßnahmen führt zu den besten Ergebnissen.

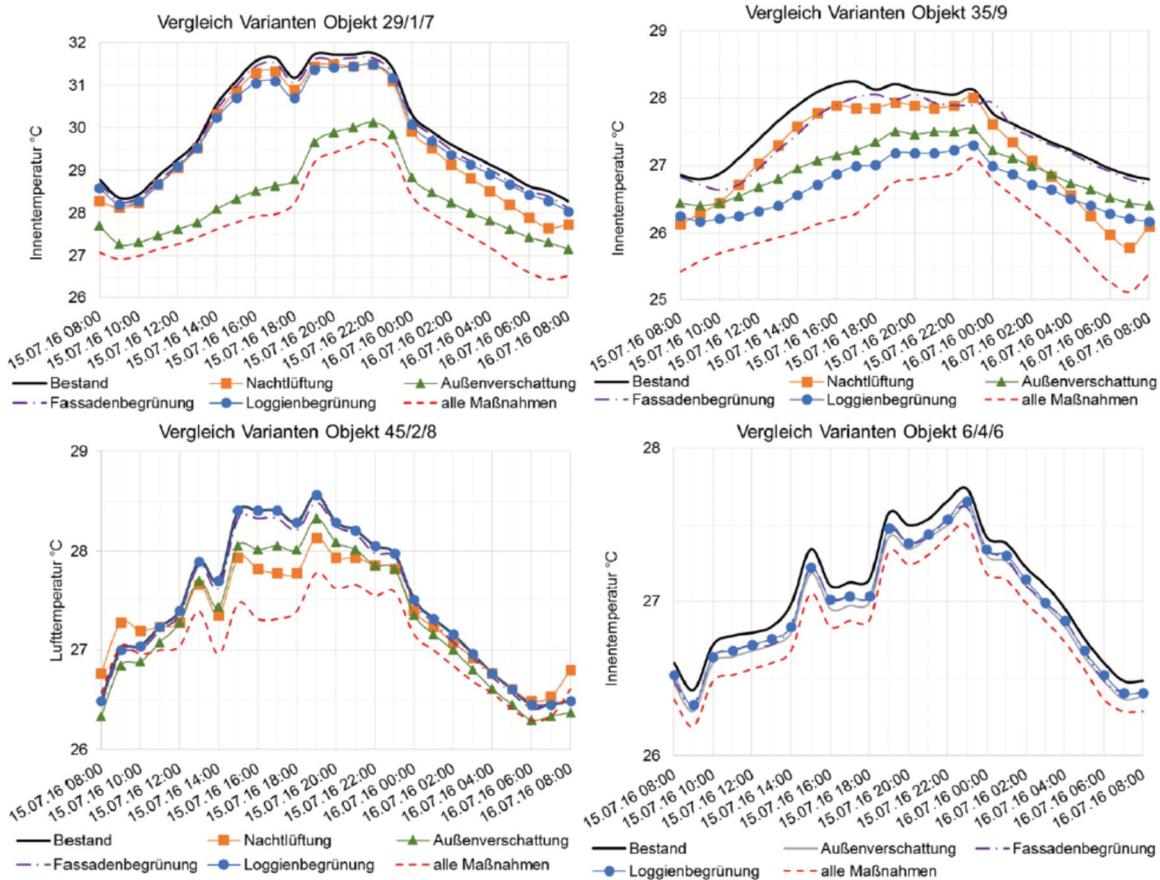


Abbildung 24: Darstellung der untersuchten Szenarien an den oben angeführten Objekten.

Fassadenbegrünung und Loggienbegrünung können auch im Innenraum an heißen Tagen die Lufttemperatur senken. Die Auswirkungen sind jedoch, so wie in Abbildung 24 ersichtlich, gering. Für Objekte die gegenüber Sonnenstrahlen sehr exponiert sind, (siehe Objekt 29/1/7) empfiehlt sich in erster Linie eine Außenverschattung der transparenten Flächen. Bei großen südseitigen Loggien, ist eine Loggienbegrünung sinnvoll (siehe Objekt 35/9). Nicht berücksichtigt wurde der Effekt, dass Begrünung auch die Außenluft etwas kühlt. Kühlere Außenluft führt auch in den Räumen zu geringeren Temperaturen. Die Kühlung der Außenluft ist allerdings sehr komplex, von der Umgebung und anderen Parametern, wie Wind, Pflanzenart, Blattgrößen und Bewässerungsvorgängen abhängig.

5.3. Schlussfolgerungen und Beitrag der Dissertation zu den offenen Forschungsfragen

Die Auswirkungen von Begrünungssystemen waren zu Beginn der Dissertation noch weitgehend unerforscht. Die im Zuge dieser Dissertation angestellten Untersuchungen haben gezeigt, dass sich fassadengebundene Gebäudebegrünung auf den U-Wert der Fassade auswirkt, sommerlicher Überwärmung entgegenwirkt und Innenraumbegrünung positive Auswirkungen auf die hydrothermische Behaglichkeit im Winter hat. Abhängig von der Flächengröße, den Anschlüssen und der Fassade selbst, sind die Auswirkungen unterschiedlich. Es steht nun fest, dass Fassadenbegrünung

den U-Wert von ungedämmten Gebäuden reduziert. Des Weiteren wurde gezeigt, dass sich der U-Wert von gedämmten Gebäuden aufgrund von Befestigungen der Fassadenbegrünung erhöhen kann, aber nicht muss. Diese Erkenntnis wird im Zuge dieser Dissertation erstmals festgestellt. Je nachdem ob Verankerungen an der Fassade notwendig sind und wie diese ausgeführt werden, kann es zu einer geringen Reduktion des U-Wertes oder zu einer Erhöhung kommen. Im Zuge jahrelanger in situ Messungen konnte eine Methode ausgearbeitet werden, in situ U-Wert Messungen hinsichtlich Gebäudebegrünung wissenschaftlich auszuwerten. Die entwickelte Methode beschreibt die Filterung der Messdaten nach den in Kapitel 3.3 dargestellten Kriterien. Basierend auf den Ergebnissen der Dissertation wird in den nächsten Monaten eine standardisierte Messung in einer Doppelklimakammer der MA39 durchgeführt. In weiterer Folge soll Gebäudebegrünung in den Energieausweis aufgenommen werden.

Die Auswirkungen von Fassadenbegrünung und Loggienbegrünung auf den Innenraum sind von zahlreichen Faktoren abhängig. Einige davon sind der Standort, die Jahreszeit, die Ausrichtung der Begrünung oder das Gebäude. Im Zuge der vorliegenden Dissertation wurden für Gebäude unterschiedlicher Bauart Begrünungsvarianten geplant. Mittels Computersimulationsprogramm wurden die Auswirkungen der Gebäudebegrünung auf die Raumtemperatur berechnet. Die Begrünung wurde dabei als Verschattungselement berücksichtigt, deren Temperatur sich nicht aufgrund der Strahlung erhöht. Die Gebäudebegrünung kühlt, im urbanen Bereich auch die äußere Umgebungsluft, ab. Da dadurch kein großer Einfluss auf das Raumklima erwartet wird, wurde dieser Effekt im Zuge der Berechnungen für diese Dissertation vernachlässigt. Es ist notwendig im urbanen Bereich jede Situation einzeln zu bewerten, um den Kühleffekt der Begrünung auf die Umgebungsluft seriös abbilden zu können. Die Ergebnisse der Berechnungen haben gezeigt, dass Fassaden-, Balkon-, oder Loggienbegrünung an heißen Tagen die Raumtemperatur reduziert. Die Auswirkungen auf den Innenraum sind jedoch kleiner als die anderen untersuchten Referenzmaßnahmen, Außenverschattung und Nachtlüftung. Die Dissertation konnte somit wissenschaftlich nachweisen, dass Gebäudebegrünung im Sommer die Innenraumtemperatur senkt und gleichzeitig einen Vergleich zu den anderen Technologien Außenverschattung und Nachtlüftung herstellen.

Innenraumbegrünung mit Zimmerpflanzen ist generell nichts Neues. Die Auswirkungen von vertikaler Innenraumbegrünung auf das hygrothermische Raumklima wurden jedoch im Zuge dieser Dissertation erstmals detailliert untersucht. Die Messungen konnten zeigen, dass Innenraumbegrünung die Luftfeuchtigkeit in den Räumen erhöht. Insbesondere während der Wintermonate führt das zu häufigerer Behaglichkeit. Im Sommer wird die Lufttemperatur minimal gekühlt, die feuchtere Luft kompensiert jedoch die gefühlte Abkühlung. Bei wetterbedingt hoher relativer Luftfeuchtigkeit nimmt die Verdunstung der Begrünungssysteme ab. Schimmelsporenmessungen haben gezeigt, dass es zu keiner Erhöhung der Schimmelsporenkonzentration in den Begrünungssystemen oder den untersuchten begrünten Räumen gekommen ist.

Zusammenfassend wird festgestellt, dass im Zuge dieser Dissertation die Auswirkungen von Fassadenbegrünung auf die thermische Qualität der Fassade sowie die Innentemperatur an Hitzetagen im Sommer erforscht wurde und die Auswirkungen von Innenraumbegrünung auf das hygrothermische Raumklima wissenschaftlich durchleuchtet wurde. Die Dissertation legt damit einen wissenschaftlichen Grundstein für die Einbindung von Fassadenbegrünung in den Energieausweis. Wärmeschutz und sommerliche Überwärmung wurden untersucht und die noch vorhandenen Forschungslücken werden aufgezeigt. Die hygrothermischen Auswirkungen von Innenraumbegrünung auf den Innenraum haben gezeigt, dass Innenraumbegrünung die Lufttemperatur im Raum nur geringfügig reduziert, die Luftfeuchtigkeit aber erhöht. Es konnte erstmals und eindeutig gezeigt werden, dass sich Innenraumbegrünung im Sommer nicht auf die hygrothermische Behaglichkeit auswirkt. Der Grund dafür ist, dass sich die feuchtere und ein bisschen kühlere Luft im Raum genauso

warm anfühlt wie die etwas trockenere, wärmere Luft ohne Begrünung. Im Winter jedoch nimmt die hygrothermische Behaglichkeit aufgrund von Innenraumbegrünung zu. Der Grund dafür ist die höhere Luftfeuchtigkeit.

6. Diskussion der Arbeit und Ausblick auf offene Forschungsagenden

Die Dissertation hat gezeigt, dass sich Fassadenbegrünung an ungedämmten Gebäuden positiv auf den U-Wert bzw. thermische Qualität der Konstruktion auswirkt. Die Auswirkung auf gedämmte Gebäude ist geringer. Außerdem kann es aufgrund der Befestigungselemente zu verstärkten Auswirkungen von Wärmebrücken kommen. Dadurch kann die thermische Dämmwirkung von Fassadenbegrünung noch reduziert werden. An ungedämmten Gebäuden ist das Ausmaß der thermischen Dämmwirkung davon abhängig, wie groß die Hinterlüftungsöffnungen im Verhältnis zur durchgängig begrünten Fassade sind. Im Zuge der vorliegenden Dissertation wurden diese Parameter in die beiden Kategorien „kleinflächig und nicht verblendet“ sowie „großflächig und verblendet“ getrennt. Es bleibt eine offene Forschungsfrage diese Parameter genauer zu beschreiben. Es gilt: umso größer die Hinterlüftungsöffnungen sind, desto geringer ist die Gefahr von Kondensationsbildung. Jedoch verringern größere Hinterlüftungsöffnungen den äußeren Wärmeübergangswiderstand. Eine weitere noch offene Forschungsagende ist, wie klein die Hinterlüftungsöffnungen mindestens sein müssen, um die Vermeidung von Kondensat zu gewährleisten. Eine Optimierung könnte die thermische Dämmwirkung von Fassadenbegrünung noch erhöhen.

Die Methode mit der die in situ U-Wert Messdaten ausgewertet wurden ist ein wissenschaftlicher Beitrag dieser Dissertation, der auf andere Messungen übertragbar ist. Alle Messungen die im Zuge der Dissertation durchgeführt wurden, waren in situ Messungen und bilden somit das tatsächliche Geschehen für bestimmte Situationen ab. Messungen im Labor oder an Prüfständen wurden nicht durchgeführt. Es wäre eine noch offene Forschungsagende die gewonnen Erkenntnisse in technischen Laboren durchzuführen. Damit könnten allgemein gültige Aussagen noch genauer getätigt werden. Auch für die Einbindung von Fassadenbegrünung in den Energieausweis wären solche Messungen noch unbedingt notwendig.

Die Dissertation hat zwei unterschiedliche Verankerungssysteme für zwei unterschiedliche Begrünungssysteme untersucht, um zu erforschen ob bzw. in welchem Ausmaß fassadengebundene Begrünung Wärmebrücken verursachen. Es gibt zahlreiche Alternativen um fassadengebundene Begrünung an Gebäuden zu installieren. Die Untersuchung von thermisch möglichst entkoppelten Verankerungssystemen, um fassadengebundene Begrünung zu befestigen, wäre eine noch offene Forschungsagende. Aber auch das Erforschen anderer Möglichkeiten der statischen Absicherung an der Fassade könnte zu interessanten Forschungsprojekten und zur zukünftigen Produktentwicklung beitragen. Für HerstellerInnen von Fassadenbegrünungssystemen wird es in Zukunft wichtiger werden, ohne (oder mit minimierten) Verankerungspunkten an den Fassaden die statischen Herausforderungen von fassadengebundener Begrünung zu lösen, jedenfalls aber bei den Verankerungen auf mögliche Wärmebrücken zu achten. Dieses Thema wurde bisher nicht berücksichtigt.

Bei der Untersuchung der Auswirkungen von Fassadenbegrünung und Loggienbegrünung auf die Innenraumtemperatur wurde lediglich die Beschattung der Begrünungselemente berücksichtigt. Die Verdunstungsenergie wurde dabei vernachlässigt. Sie wirkt sich in erster Linie auch auf die Umgebungstemperatur im Außenbereich aus. Abhängig von der Umgebung, der Tageszeit, der Bepflanzung und dem Wetter kann sie unterschiedlich stark ausfallen. Das Kühlen der Außenluft kann bei geöffneten Fenstern (insbesondere Nachtlüftung) dazu führen, dass sich die Wärme aus den

Räumen besser nach außen transportieren lässt. In weiterer Folge führt das zu einer zusätzlichen Abkühlung der Innenräume aufgrund von Fassaden- und Loggienbegrünung die in dieser Dissertation nicht bearbeitet wurde. Es bleibt eine offene Forschungsfrage die Auswirkungen von Gebäudebegrünung unter Berücksichtigung der Verdunstungsenergie zu ermitteln. Diese Forschungsfrage generell zu beantworten wird komplex sein und bedarf interdisziplinärer Zusammenarbeit von WissenschaftlerInnen aus technischen und biologischen Fachbereichen.

Um die hygrothermischen Auswirkungen von Innenraumbegrünung zu bewerten, wurden in situ Messungen in Schulkassen durchgeführt. Die Untersuchungen im Altbaugebäude mit alten Kastenfenstern haben gezeigt, dass die Luft in den Klassenräumen insbesondere während der kalten Jahreszeiten (1. Okt. bis 31. März) zu trocken ist. Auch in neuen gedämmten Gebäuden gab es Untersuchungen die zeigen, dass Innenraumbegrünung ebenso im Neubau die hygrothermische Behaglichkeit erhöht [50][51]. Eine offene Forschungsagenda in allen bisherigen wissenschaftlichen Arbeiten ist die Spezifizierung der Ergebnisse auf Raumvolumen, Luftwechselrate, Pflanzenarten, Pflanzendichte, Oberflächenbeschaffenheit des Begrünungssystems, Speichervermögen des Substrates oder des Vlieses und Begrünungsfläche. Diese Parameter spielen ineinander. Es wären noch zu lösende Forschungsaufgaben, diese Parameter in begrünten Räumen gegenüberzustellen und optimale Verhältnisse zu generieren.

7. Danksagungen

Unzählige FreundInnen, Bekannte, Familienmitglieder und KollegInnen haben mich in den letzten Jahren unterstützt und mir somit das Verfassen dieser Dissertation ermöglicht. Alle namentlich zu nennen würde den Rahmen sprengen, alleine deshalb weil die Gefahr zu groß wäre, dass ich auf ein paar Personen vergessen würde. Wesentliche Unterstützung durch interessante Diskussionen und wertvollen Input bekam ich von Hr. Simon Hinterseer BSc, Hr. Marián Vertaľ PhD., Hr. Dr. Christian Pöhn, Hr. Dipl.-Ing. Florian Teichmann, Fr. Dipl.-Ing. Vera Höckner, Dipl.-Ing. Jutta Hollands, Dipl.-Ing. Esther Sophie Blaimschein und Hr. Michael Mitterböck.

Besonderer Dank gilt meiner Betreuerin Fr. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Azra Korjenic. Sie hat mich vor einigen Jahren in ihr Team aufgenommen, als ich noch keine konkrete Vorstellung zu meiner beruflichen Zukunft hatte. Wie eine Berufsmama hat sie mich die vielen Facetten des wissenschaftlichen Arbeitens gelehrt und mir dabei geholfen meinen beruflichen Weg für die Zukunft zu beschreiten.

8. Literatur

- [1] United Nations - Department of Economic and Social Affairs/Population Division, „World Urbanization Prospects: The 2011 Revision“, United Nations - Department of Economic and Social Affairs/Population Division, New York, 2012.
- [2] U. Pitha u. a., „Leitfaden Fassadenbegrünung“, Bd. „ÖkoKauf W, Nr. Wien, 2013.
- [3] A. Korjenic u. a., „GrünPlusSchule@Ballungszentrum Hocheffiziente Fassaden- und Dachbegrünung mit Photovoltaik Kombination; optimale Lösung für die Energieeffizienz in gesamtökologischer Betrachtung“, Endbericht, Stadt der Zukunft, FFG/BMVIT, Wien, 2018.
- [4] J. Hollands, A. Korjenic, und D. Tudiwer, „Diplomarbeit Entwicklung eines Modells zur Bewertung der ökologischen, ökonomischen und energetischen Auswirkungen fassadengebundener Begrünungssysteme“, TU Wien, 2017.
- [5] OIB Richtlinie 6, *Energieeinsparung und Wärmeschutz*. Österreich, 2011.
- [6] DIN EN ISO 6946, „Bauteile – Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren (ISO/DIS 6946:2015)“. 2015.
- [7] P. Wegerer und T. Deseyve, Christoph Bednar, „In-situ-Bestimmung thermischer Eigenschaften von Baukonstruktionen“, Wien, 2012.
- [8] Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik ZAMG, „Klimatologische Kenntage in Wien 1955 bis 2017“, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.wien.gv.at/statistik/lebensraum/tabellen/eis-hitze-tage-zr.html>.
- [9] Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik ZAMG, „Hitzewellen: 2015 eines der extremsten Jahre der Messgeschichte“, 2018. [Online]. Verfügbar unter: https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/news/hitzewellen-2015-eines-der-extremsten-jahre-der-messgeschichte?utm_source=twitterfeed&utm_medium=twitter.
- [10] EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG, *DIN 1946-2 (1994-01) Raumluftqualität, Gesundheitliche Anforderungen*. Berlin: Beuth. Deutschland, 1994.
- [11] DIN EN ISO 7730:2006-03, „Ergonomie der thermischen Umgebung. Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit“.
- [12] N. Langner und M. Illner, „Thermische Behaglichkeit nach DIN EN ISO 7730 - Ein Ansatz zur vereinfachten Datenaufnahme und Berechnung für die Bewertung von Bürogebäuden“, Bd. 37, 2015.
- [13] EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG, *DIN EN 15251 Eingangsparemeter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden - Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik, Deutsche Fassung EN 15251:2007*. Deutschland, 2007.
- [14] Ö. Normungsinstitut, „ÖNORM B 8110-3:2012 Wärmeschutz im Hochbau - Teil 3: Vermeidung sommerlicher Überwärmung“. 2012.
- [15] H. Huang, S. Kato, und R. Hu, „Optimum design for indoor humidity by coupling Genetic Algorithm with transient simulation based on Contribution Ratio of Indoor Humidity and Climate analysis“, *Energy and Buildings*, Bd. 47, S. 208–216, 2012.
- [16] B. W. OLESEN, „Thermische Behaglichkeit“, *Technical Review*, Nr. 2, S. 30ff, 1982.

- [17] P. O. Fanger, „Thermal comfort – analysis and applications in environmental engineering“, *Danish Technical Press, Copenhagen*, 1970.
- [18] W. Richter, *Handbuch der thermischen Behaglichkeit – Sommerlicher Kühlbetrieb*. 2007.
- [19] A. Dentel und U. Dietrich, „Thermische Behaglichkeit - Komfort in Gebäuden“, *Rom-Umwelt-Stiftung.De*, S. 1–37, 2013.
- [20] A. Mair, I. Fakult, und G. D. Beurteiler, „Messung und Auswertung zur Behaglichkeit insbesondere im Sommerfall am Beispiel der Höttinger Hauptschule“, 2012.
- [21] A. Holm, H. M. Kuenzel, und K. Sedlbauer, „the Hygrothermal Behaviour of Rooms : Combining Thermal Building Simulation and Hygrothermal Envelope Calculation“, *Building Simulation*, S. 499–506, 2003.
- [22] S. Beranova, L. Feifer, M. W. Elkjær, M. K. Rasmussen, U. Bang, und J. Christoffersen, „Healthy Home Barometer – a survey among European citizens“, S. 1283–1287, 2016.
- [23] W. Frank, „Raumklima und Thermische Behaglichkeit“, *Berichte aus der Bauforschung*, Bd. 104, 1975.
- [24] Webpage, „System Grünwand. Tech Metall GmbH, Dachgrün Objektbe-grünungen GmbH.“, 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://gruenwand.com/>. [Zugegriffen: 08-Juli-2019].
- [25] Optigrün International AG, „Numerical solutions of Cauchy singular integral equations using generalized inverses“, Vienna, 2012.
- [26] International Organization for Standardization, *DIS 9869-1 Thermal insulation — Building elements -- In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance — Part 1: Heat flow meter method*. Schweiz, 2013.
- [27] WUFI, „Handling of typical constructions in WUFI®“, 2019. [Online]. Verfügbar unter: https://wufi.de/de/wp-content/uploads/sites/9/WUFIPro_Handhabung_typischer_Konstruktionen_201804.pdf. [Zugegriffen: 02-März-2019].
- [28] B. Schafaczek und D. Zirkelbach, „Ermittlung von Materialeigenschaften und effektiven Übergangs- parametern von Dachbegrünungen zur zuverlässigen Simulation der hygrothermischen Verhältnisse in und unter Gründächern bei beliebigen Nutzungen und unterschiedlichen Standorten“, Stuttgart, 2013.
- [29] Austrian Standards Institute/, Ö. N. (ON), und 1020 Wien Heinestraße 38, *Wärmeschutz im Hochbau — Teil 7: Tabellierte wärmeschutztechnische Bemessungswerte*. Wien, Austria, 2013.
- [30] O. Ö. Normungsinstitut, *Katalog für wärmeschutztechnische Rechenwerte von Baustoffen und Bauteilen*. Austria, 2001.
- [31] D. Tudiwer und A. Korjenic, „The effect of living wall systems on the thermal resistance of the façade“, *Energy and Buildings*, Bd. 135, S. 10–19, 2017.
- [32] D. Tudiwer, M. Vertal, A. Korjenic, und K. Cakyová, „Abbildung der wärmedämmenden Wirkung eines fassadengebundenen Begrünungssystems in einem“, *Bauphysik*, Bd. 41, Nr. 3, S. 155–161, 2019.
- [33] D. Tudiwer, V. Höckner, und A. Korjenic, „Greening Aspang – Hygrothermische Gebäudesimulation“, *Bauphysik*, Bd. 40, Nr. 3, S. 120–130, 2018.
- [34] D. Tudiwer und A. Korjenic, „The effect of an indoor living wall system on humidity, mould spores and CO₂-concentration“, *Energy and Buildings*, Bd. 146, S. 73–86, 2017.

- [35] DIN EN ISO 6946; Autor: DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau) ©, *Bauteile – Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren; DIN EN ISO 6946*. Deutschland, 2018.
- [36] H. Behrendt, W. Bischof, M. Excner, B. Heinzow, und O. Herbarth, „Leitfaden zur Ursachensuche und Sanierung bei Schimmelpilzwachstum in Innenräumen“, *Umweltbundesamt Dessau*, 2005.
- [37] B. Jaafar, I. Said, und M. H. Rasidi, „Evaluating the impact of vertical greenery system on cooling effect on high rise buildings and surroundings: a review“, *12th Sustainable Environment and Architecture Conference (SENVAR)*, S. 1–8, 2011.
- [38] H. Manz und T. Frank, „Thermal simulation of buildings with double-skin façades“, *Energy and Buildings*, Bd. 37, Nr. 11 SPEC. ISS., S. 1114–1121, 2005.
- [39] K. Perini, M. Ottel , A. L. A. Fraaij, E. M. Haas, und R. Raiteri, „Vertical greening systems and the effect on air flow and temperature on the building envelope“, *Building and Environment*, Bd. 46, Nr. 11, S. 2287–2294, 2011.
- [40] A. Korjenic, „Wärmedämmende Wirkung von Grünfassaden“, in *Stadtgr ngespr che, MA22 Wien*, 2016.
- [41] X. C. Pan und Y. X. Xiao, „Simulation Analysis of Building Green Facade Eco-Effect“, *Applied Mechanics and Materials*, Bd. 548, S. 1701–1705, 2014.
- [42] I. Susorova, M. Angulo, P. Bahrami, und B. Stephens, „A model of vegetated exterior facades for evaluation of wall thermal performance“, *Building and Environment ISSN: 0360-1323*, Bd. 67, S. 1–13, 2013.
- [43] K. Perini und P. Rosasco, „Cost-benefit analysis for green facades and living wall systems“, *Building and Environment*, Bd. 70, 2013.
- [44] J. Tarran, F. Torpy, und M. Burchett, „Use of living pot-plants to cleanse indoor air - research review“, *Proceedings of Sixth International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation & Energy Conservation in Buildings – Sustainable Built Environment, Oct 28-31, 2007, Volume III*, Bd. III, S. 249–256, 2007.
- [45] M. Burchett, „Towards improving indoor air quality with pot -plants – A multifactorial investigation“, S. 1–44, 2009.
- [46] C. G. Bornehag, J. Sundell, und T. Sigsgaard, „Dampness in buildings and health (DBH): Report from an ongoing epidemiological investigation on the association between indoor environmental factors and health effects among children in Sweden“, *Indoor Air, Supplement*, Bd. 14, Nr. SUPPL. 7, S. 59–66, 2004.
- [47] B. Brettschneider, A. Korjenic, U. Pitha, und M. Lutz, „Greening Aspang“, Endbericht; FFG; Wien, 2017.
- [48] J. Hollands, D. Tudiwer, A. Korjenic, und B. B. Brettschneider, „Greening Aspang - Messtechnische Untersuchungen zur ganzheitlichen Betrachtung mikroklimatischer Wechselwirkungen in einem Straßenzug einer urbanen Hitzeinsel“, *Bauphysik*, Bd. 40, Nr. 3, S. 105–119, 2018.
- [49] S. Rief und J. Mitja, „Luftfeuchtigkeit am Büroarbeitsplatz; Studie zur Bedeutung der Luftfeuchtigkeit im Büro“, *Arbeitswirtschaft, Fraunhofer-Institut für*, 2014.
- [50] L. Weber, A. Korjenic, und D. Tudiwer, „Influence of vertical interior wall greening on the indoor climate and comfort in schools Einfluss von vertikaler Innenwand-Begrünung auf das Raumklima und Behaglichkeit in Schulen“, Technische Universität Wien, 2019.

- [51] S. Strübing, A. Korjenic, und D. Tudiwer, „Vergleich raumklimarelevanter physikalischer Größen zweier Schulgebäude mit unterschiedlicher Belüftung, jeweils ausgestattet mit zwei verschiedenen Innenwandbegrünungssystemen“, Technische Universität Wien, 2019.

9. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Bodengebundene Fassadenbegrünung in der Werk und Kulturstätte Wien.....	4
Abbildung 2: Fassadengebundenes Begrünungssystem mit Trögen (Trogssystem) [3].....	4
Abbildung 3: Fassadengebundenes Begrünungssystem aus vertikal aufgehängten Behältern, horizontal wachsende Pflanzen (Kassettensystem) [3].....	5
Abbildung 4: Schematische Darstellung der vorgehängten hinterlüfteten Konstruktion einer fassadengebundenen Begrünung.....	6
Abbildung 5: Darstellung von Hinterlüftungsspalt und Hinterlüftungsöffnungen.....	7
Abbildung 6: Die untersuchte vertikale Innenraumbegrünung. Links: Trogssystem, Rechts: Vliestaschensystem.....	8
Abbildung 7: Darstellung der U-Werte die miteinander verglichen werden. U_g für den U-Wert mit Begrünung und U_{ng} für den U-Wert ohne Begrünung.....	10
Abbildung 8: Behaglichkeitsdiagramm zur Bewertung der hygrothermischen Behaglichkeit [23].....	12
Abbildung 9: Lin Picco, Messgerät zur Messung von Lufttemperatur und relativer Luftfeuchtigkeit...17	17
Abbildung 10: Links: Strahlenschutzschirm für die Messung der Außenlufttemperatur. Mitte: Wärmestrommessfolie von Phymeas 25 cm x 25 cm zur Messung der Wärmestromdichte durch die Konstruktion. Rechts: PT 1000 zur Messung der Oberflächentemperaturen innen und außen.....	17
Abbildung 11: Schematische Darstellung des Messaufbaus.....	18
Abbildung 12: Darstellung der detailliert untersuchten Gebäude (Google Maps, 2017).....	21
Abbildung 13: Simulierter Luftwechsel für das Szenario „Nachtlüftung“.....	21
Abbildung 14: Zeitplan für die Außenverschattung.....	22
Abbildung 15: Foto des Begrünungssystems im Winter.....	24
Abbildung 16: Schematische Darstellung des untersuchten Begrünungssystems (Quelle Hersteller)..	25
Abbildung 17: Das Diagramm zeigt die U-Werte des begrünten und nicht begrünten Abschnittes der Fassade, mit und ohne Berücksichtigung der Wärmebrücken an gedämmten und nicht gedämmten Fassaden.....	33
Abbildung 18 Das Diagramm zeigt die U-Werte des begrünten und nicht begrünten Abschnittes der Fassade, mit und ohne Berücksichtigung der Wärmebrücken gedämmten Fassaden.....	33
Abbildung 19: Verteilung der Messwerte im nicht begrünten Klassenraum zwischen 1. Oktober und 31. März in den Jahren 2016, 2017 und 2018.....	35
Abbildung 20 Verteilung der Messwerte im begrünten Klassenraum zwischen 1. Oktober und 31. März in den Jahren 2016, 2017 und 2018.....	35
Abbildung 21 Häufigkeiten der unterschiedlichen Behaglichkeitsstufen im nicht begrünten Klassenraum (links) und im begrünten Klassenraum (rechts), zwischen 1. Oktober und 31. März in den Jahren 2016, 2017 und 2018.....	36
Abbildung 22 Verteilung der Messwerte im nicht begrünten Klassenraum, zwischen 2. Feb. 2016 und 28. Jun. 2018.....	37
Abbildung 23 Verteilung der Messwerte im begrünten Klassenraum, zwischen 2. Feb. 2016 und 28. Jun. 2018.....	37
Abbildung 24: Darstellung der untersuchten Szenarien an den oben angeführten Objekten.....	38

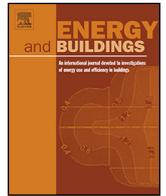
10. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Darstellung der Bestandteile von Fassade 1	14
Tabelle 2: Darstellung der Bestandteile von Fassade 2	15
Tabelle 3: Darstellung der Bestandteile von Fassade 3	15
Tabelle 4: Darstellung der Gebäudekonstruktionen für die Untersuchungen hinsichtlich sommerlicher Überwärmung.....	15
Tabelle 5: Abmessungen der beiden BRG7 Klassenräume die zur Untersuchung hygrothermischer Parameter ausgewählt wurden.	15
Tabelle 6: Erhöhung des Wärmewiderstandes durch die Fassadenbegrünung, nach Begrünungssystem und Datensatz.....	23
Tabelle 7: Schimmelsporen-Konzentration in den jeweiligen gemessenen Klassenräumen	27
Tabelle 8: L ^{3D} Werte des Kassettensystems für die unterschiedlichen Szenarien.....	31
Tabelle 9: L ^{3D} Werte des Trogsystems für die unterschiedlichen Szenarien.....	31
Tabelle 10: χ -Werte die auf Basis der L ^{3D} Werte in Tabelle 8 und Tabelle 9 berechnet wurden	32
Tabelle 11: Berechnete ΔU -Werte für die unterschiedlichen Szenarien	32

11. Anhang

Erste Publikation

STATUS	Veröffentlicht
Titel: (Deutsch)	Die Auswirkungen von Fassadenbegrünung auf den Wärmedurchgangswiderstand
Original Titel: (Englisch)	The effect of living wall systems on the thermal resistance of the facade
Autorinnen:	David Tudiwer, Azra Korjenic
ISBN/ISSN:	ISSN: 0378-7788 ; DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.11.023
Sprache:	Englisch
Schlagwörter:	Façade greening; Heat demand; Heat transfer; U-Value; Heat transmission coefficient
Quelle:	Energy & Buildings, 15 January 2017, Vol.135, pp.10-19 [Peer Reviewed Journal]



The effect of living wall systems on the thermal resistance of the façade



David Tudiwer*, Azra Korjenic

Vienna University of Technology, Institute for Building Construction and Technology, Research Centre of Building Physics and Sound Protection, Karlsplatz 13/206-2, 1040 Vienna, Austria

ARTICLE INFO

Article history:

Received 5 September 2016
Received in revised form 4 November 2016
Accepted 14 November 2016
Available online 15 November 2016

Keywords:

Façade greening
Heat demand
Heat transfer
U-Value
Heat transmission coefficient

ABSTRACT

This paper shows the investigation of the features of façade greening, concerning the reduction of heat demand in the winter. Supporters of façade greening claim that their systems can reduce the heat demand in the winter. But so far, there is no proof for that and each greening system is different. Two greened façades have been researched and measured for one heating season. The measurements were compared with parts of the same buildings which are not greened. So far there does not exist a general method, how to calculate the U-value at greened facades. The method which is developed in this paper makes the comparison between the greened part of the façade and the not greened part possible. It turned out that there is a difference of the thermal resistance between greened and not greened parts of the façades in winter. It is between 0,31 m²K/W and 0,68 m²K/W depending on the greening system and its location.

© 2016 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

The cities all over the world are growing. According to a projection of the UN in 2014, the number of people who live in cities will grow up to 66% in 2050 [1]. To provide housing for the future occupants, green areas will be reduced in the city and be replaced by buildings. This effects the life quality of urban inhabitants in a negative way. To set plants there is less area on the ground of the cities. A chance could be to set plants on buildings. Therefore the facades of the building could be used.

Additional to optical effects, the plants also influence the microclimate that surrounds them. They cool their surroundings on hot days, regulate the relative humidity, bind dust, reduce noise and provide habitat for animals [2–9]

Many product manufacturers of façade greening systems affirm that their systems also reduce the heating requirements of the building. So far there is no general proof for that. The published information are based on simulations. Usually only a few of several components which effect the thermal resistance of the façade are measured and the others are estimated. In [10] the wind speed behind the greening systems was measured to adapt the exterior surface resistance from the standardisation in [11]. As the measured wind speed behind the green system was lower than 0,2 m/s

the exterior surface resistance was equalised with the interior surface resistance what increases the resistance about 0,09 m²K/W. In [12] the total thermal resistance value of a green wall, is estimated to be 0.52 m²K/W when the whole system (not only the reduction of the wind speed) is taken into account. This means that a façade is insulated better by the resistance of 0.52 m²K/W when it gets greened. All parameters are considered in this estimation, not only the wind speed.

In [13] several simulations were calculated to investigate the effect of green facades on heat resistance value. Different simulation programs were used for that. The result of the calculations showed, that the heat resistance value can be increased by 23,7% by façade greening. As the paper [14] shows, the relative reduction of the energy demand caused by green roofs depends on the building itself. A well-insulated roof shows a lower reduction of the heat demand. The same is true for facades.

In [15] the green wall was simulated with the UFORE simulation program. This program could not give an output of the total reduction of the heat demand because of façade greening. But it was possible to find out, that the wind speed behind the greening is reduced. This reduces the heat demand.

Mahmudul Hasan showed in his master thesis [16], that green facades have a resistance value by 6,16 m²K/W. This is the sum of the heat resistances from the materials of a living wall system. The façade of the building and air gap behind the living wall are not considered. But the effect of the air gap, which is in contact with the exterior air, reduces the heat resistances dramatically. This is why

* Corresponding author.

E-mail address: david.tudiwer@tuwien.ac.at (D. Tudiwer).

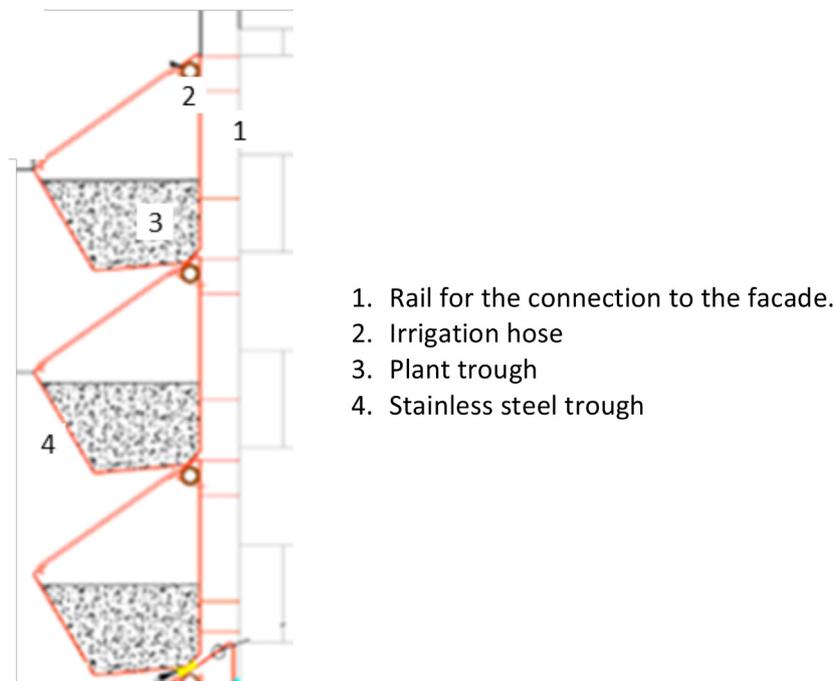


Fig. 1. Schematic representation of System A.

the heat resistance value is that high in this thesis. The thesis also investigates the temperatures in the ventilation gap but focuses on summer temperatures and the cooling effect of green walls. The heat resistance value is not calculated in detail.

Green roofs are better known than green facades. In [17] five different green roof systems were investigated on a test cell in Greece. The dimensions of the cell are $8.4\text{ m} \times 3.8\text{ m} \times 3.6\text{ m}$. On the top of the cell different roof greening systems were installed with the size of $0.6\text{ m} \times 1.2\text{ m}$. The heat flux was measured and simulations were performed. According to that simulations the energy savings for heating because of a green roof are 21.1%–28.4% in comparison with a non-insulated roof.

This paper is about the investigation of the effects of façade greening systems on the heat flux through the facade in the winter (during the heating period). Also temperatures were measured on several points to calculate the heat resistance values (details see in chapter 2). The heat flux of the façade was measured on two different parts of the façade, one part was greened, the other one not. So it was possible to compare the greened part of the facade with the not greened part. Two different locations and two different greening systems were investigated. The two locations are in Vienna in urban surroundings. In this area the heating degree is 2.767,7 K days within one year [18].

It is the first in situ measurement for u-values that were taken in that way on greened facades. The results which are shown in this paper are calculated with simple formulas, based on the measurement and not simulated.

2. Methods

The greening systems which were investigated, are kind of a curtain-wall with air space. They are installed on rails, which are mounted on the façade of the building. The effect of greened facades on the heat flux depend on the construction of the house. House facades which are weakly insulated have a higher potential to reduce their heat flux. Because of that, the whole construction need to be investigated.

The two locations that were investigated are:

- Office building of the Municipal Department 48 (MA 48)
- School Kandlgasse 39 (GRG 7)

The detailed features of the green facades and the measurement setup are described below.

2.1. Investigated walls

2.1.1. Office building of the Municipal Department MA 48

On the façade of this building a greening system is installed, which is made out of aluminium troughs (here it is called “System A”). These troughs are mounted on metal rails. The metal rails connect the façade with the troughs. The troughs are mated which creates a curtain façade (see Figs. 1 and 2, right picture). The distance from the house façade is determined by the thickness of the metal rails. In this case it is 6 cm. The left picture of Fig. 2 shows the part of the building with the measurement instruments. The picture in the middle shows the interior sensors.

2.1.2. School Kandlgasse 39 (GRG 7)

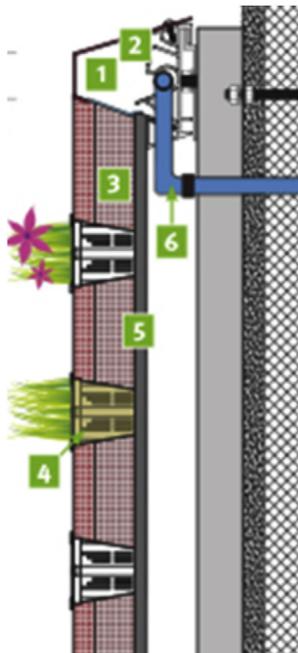
This location is a school. The vertical greening system was installed in Oct. 2015. It is a different system (here it is called “System B”) than the system that is shown in Figs. 1 and 2 (System A). The plants grow horizontal out of aluminium modules (see in Fig. 4, left and right picture). The roots of the plants are in direct contact with a capillary fleece, which distributes the water evenly. The substrate is inside the modules. They are mounted on metal rails, which are the connection to the façade (see Fig. 3). The system is highly ventilated, because there are no apertures on its sides (see Fig. 4 the right picture).

2.2. Measuring equipment

One difference to the method that was used in [5] is, that here the surface resistances themselves were measured. This demands the measurement of air temperatures, heat flux and surface temperatures as shown in Fig. 5. The heat flux, the air temperature (outdoor and indoor) and the surface temperature on the façade interior and



Fig. 2. Left: The stars (black and white) show the position of the installed sensors. Middle: Installed interior sensors. Right: Living wall system A on a façade.



1. Aluminium frame
2. Rail for the connection to the facade.
3. Fleece for the distribution of the water
4. Plant trough
5. Aluminium board
6. Irrigation hose

Fig. 3. Schematic representation of System B.



Fig. 4. Left: The façade of GRG 7 and its installed greening system. The white stars show the position of the installed exterior sensors. Middle: The interior sensors. Right: System B close.

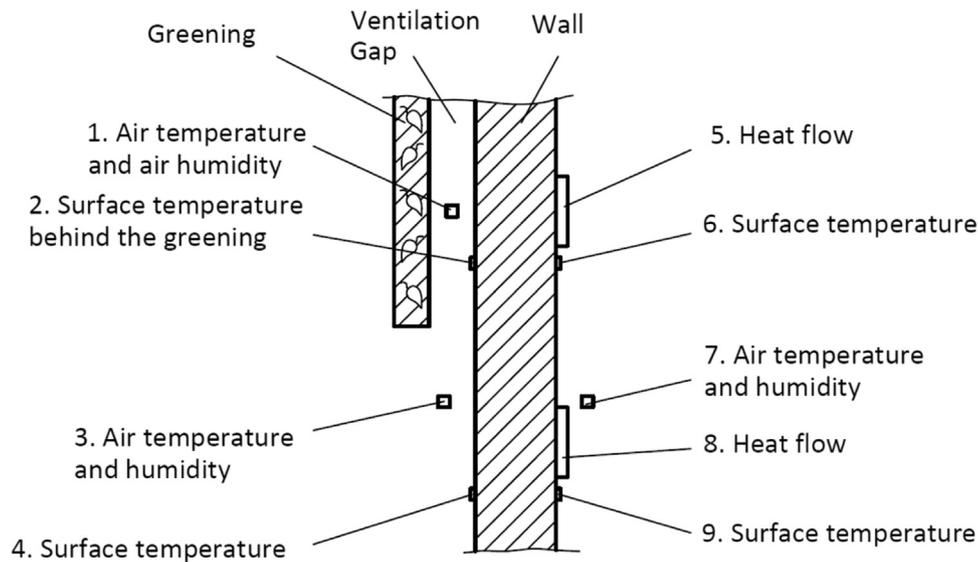


Fig. 5. Schematic representation of the installed sensors at the locations.

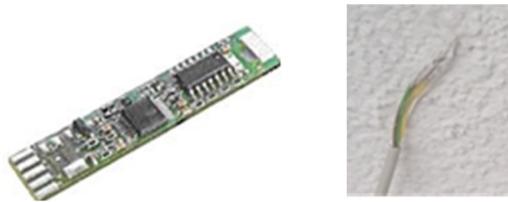


Fig. 6. Left Lin Picco A05: Used to measure air temperature and air humidity. Right PT 1000: Used to measure the temperature of the surface of the façade.



Fig. 7. Left: The Lin Picco sensor inside (protected by a plastic cover). Middle: Lin Picco sensor exterior protected by protective shield. Right: Heat flux film.

exterior was measured to get the needed information of the thermal insulation of the façade. It was measured at the same building, on the same façade on different parts (one part that is blade and the other one is greened).

The sensors that were used for the measurements are described within the following lines.

The Lin Picco A05 is used to measure the air temperature and the air humidity. A picture of that sensor is shown in Fig. 6 left. The temperature of the surface of the façade was measured by PT 1000 shown in Fig. 6 right. The accuracy of this sensor is 0,1 K. Its It is glued on the façade and painted by façade colour.

The Lin Picco sensor has a protection cover made out of plastic. It is shown in Fig. 7 left.

This plastic cover is the protection for the sensor. Exterior the Lin Picco A05 is also protected by a protective shield (shown in Fig. 7 middle).

The heat flux measurement was carried out by a heat flux film which was fixed with adhesive tape on the wall. The adhesive tape closes the border of the heat flux film airtight. The heat flux film measures the power of heat that leaves the room into the wall. The specific power is displayed by W/m^2 . The accuracy of this device is 5%.

3. Results

In this chapter the measuring data are shown. The chapters 3.1 and 3.2 show the measured and calculated data of different data pools. But also the not filtered data (including all outliers) during the winter (September until April) show that there are significant differences between the surface temperature of the greened and the blade façade (see Fig. 8). The fluctuation of the surface temperature is much lower behind the greened wall. The air temperature (see Fig. 9) is mostly higher behind the ventilation gap what suggests a lower heat demand for greened buildings.

Fig. 10 shows that the surface temperature on cold winter days of the façade is higher behind the greening than at the blade façade. The same is true for the air temperature that verge the façade. The days which are shown in this figure were cloudy and the radiation from the sun was very low. On warm winter days with high radiation (the façade is faced to south) the air temperature is higher behind the greening system, than in front of the blade façade. The surface temperature of the blade façade raises to a high level for a short time and cools again quickly. In Fig. 11 it is illustrated how short the days are in the winter compared to the nights. Even though the façade faces south the surface temperature of the blade façade is colder than the façade behind the greening for the most time.

The measurements were taken under real condition, not laboratory conditions. This causes fluctuating temperature of the air interior and exterior. Also the temperatures on the surface of the wall are not stable. Reasons for that are the radiant power of surrounding buildings and the weather outside. Inside the rooms, the behaviour of employees induce outliers. The investigated facades are south facing, what increases the influence of the sun. This increases the measured temperature at the façade for a short time. And because of the storage energy in the building, this data should not be considered in the calculations. The data were filtered into data pool A and data pool B, explained in the following chapters 3.1 and 3.2.

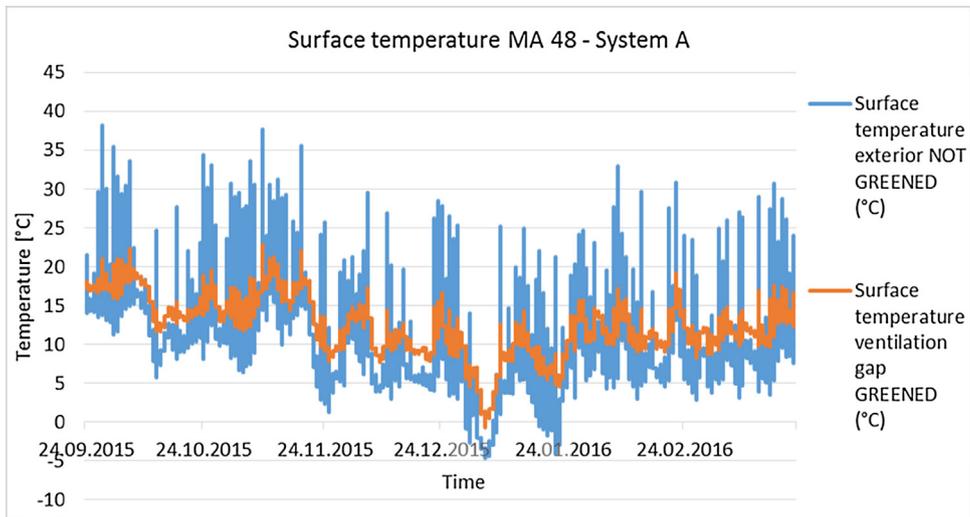


Fig. 8. Surface temperatures of the greened and the not greened part of the facade, location MA 48 System A.

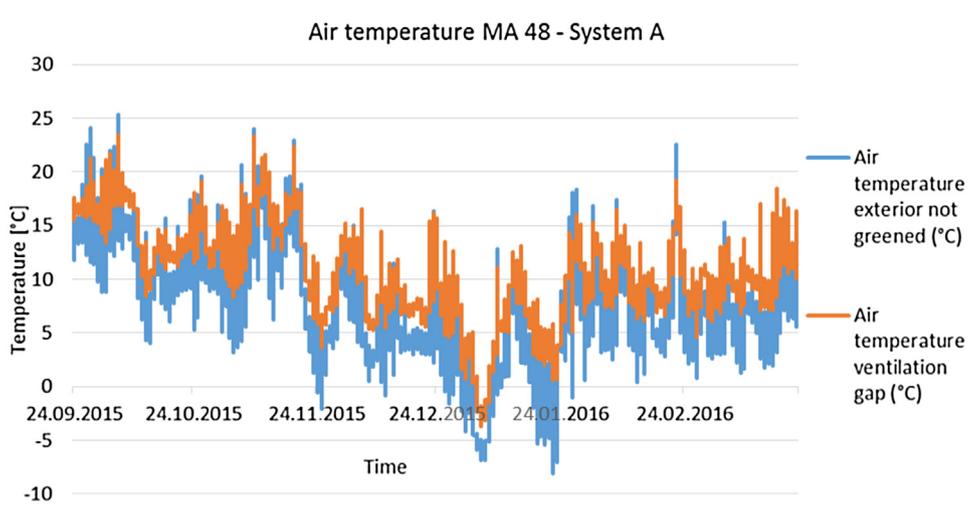


Fig. 9. Air temperatures of the greened and the not greened part of the facade, location MA 48 System A.

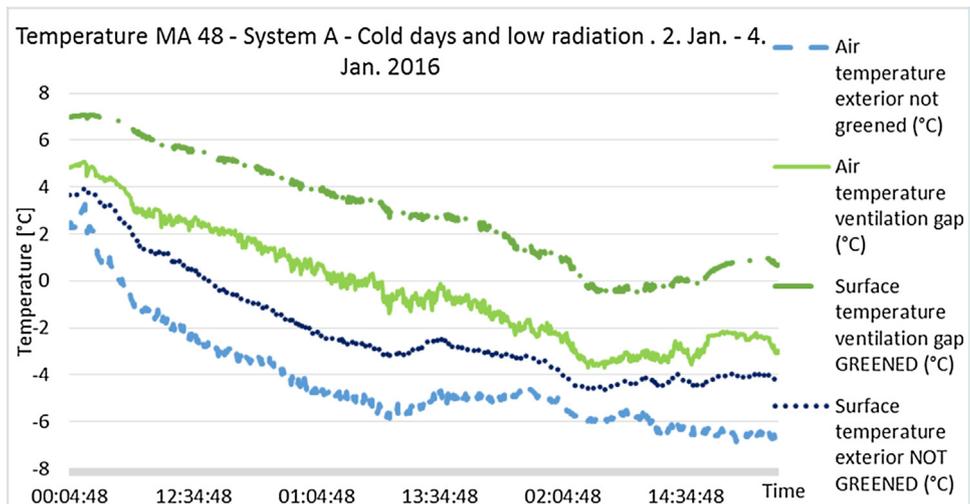


Fig. 10. The air temperatures and the surface temperatures exterior of the greened part of the facade and of the not greened part of the facade on three cold winter days, are shown in this figure.

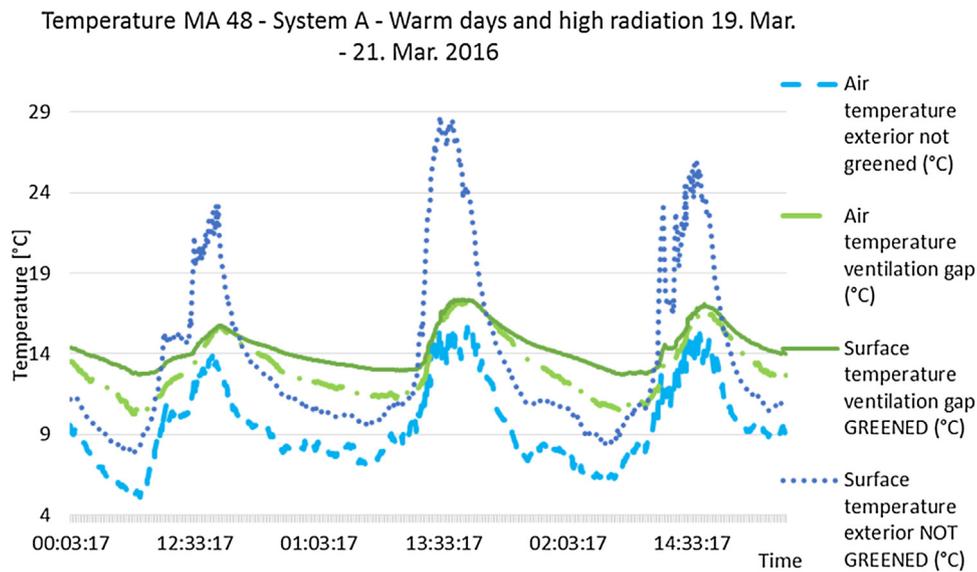


Fig. 11. The air temperatures and the surface temperatures exterior of the greened part of the façade and of the not greened part of the façade on three warm winter days, are shown in this figure.

3.1. Data Pool A

- Measurement period (Nov. 2015–Apr. 2016)
- The difference between the air temperature outdoor and indoor was in average above 10 °C within the last 24 h and never below 0 °C within the last 24 h.
- The measured heat flux was bigger than 0.
- MA48–System A: The shown data are the average of 19.542 different measuring cycles.
- GRG7–System B: The shown data are the average of 31.800 different measuring cycles

The first result that is shown, is the heat flux (see in Fig. 12). The heat flux is the measured heat power, which is lost through the façade. It does not consider the difference of interior and exterior temperature of the building. This causes that no statement concerning the heat insulation of the construction can be deduced. But under the estimation that the temperatures inside the rooms are the same, the relationship between the two heat flux (greened part of the façade and not greened part of the façade) can give an idea of the relationship between the heat flux. In the building MA48 both parts of the façade (greened and not greened) are measured in the same room. In GRG7 two different rooms are necessary to measure both conditions (greened and not greened).

To consider the different temperatures in the room, or parts of the rooms and to get absolute values to compare between the greened and not greened parts of the facades, the resistances of the heat conductivity are calculated (formulas shown in Equation (1), and Equation (3)) or defined (Equation (2)).

Equation (1) shows the way the resistances of the facades were calculated, by the measured data. Equation (2) is reduced to the definition of [11]. The interior surface resistance is not changed because of the greening. The same is true for the resistance of the facade, but as the wall might be different (because in GRG7 two different floors are investigated). Equation (3) shows the formulas to calculate the exterior surface resistances by the measured data. In [11] this value is definite with $R_{SE} = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$. The R_{SE} is much higher than in the definition of [11] (see Figs. 13, 14, 17 and 18). The reason for that is, that both locations are urban and in a wind shadow zone. In [11] a wind speed of 4 m/s is assumed for the calculation.

Table 1

Averaged surface temperatures of the facades. The data of Data Pool A are considered.

	GRG7 Data Pool A	MA48 Data Pool A
Surface temperature of the facade behind the greened wall	6,83 °C	9,45 °C
Surface temperature of the blade facade	6,39 °C	6,32 °C

Table 2

Averaged surface temperatures of the facades. The data of Data Pool B are considered.

	GRG7 Data Pool B	MA48 Data Pool B
Surface temperature of the facade behind the greened wall	3,33 °C	8,27 °C
Surface temperature of the blade facade	2,80 °C	4,75 °C

Units

Temperatures = °C

Heat flux = W/m²

$R_{wall} + R_{SE} + R_{SI} = \text{m}^2\text{K/W}$

U-Value = W/m²K

$$R_{Wall} = \frac{\text{delta surface temperature (interior - exterior)}}{\text{Heat flow}}$$

Equation (1): The heat resistance of the wall

$$R_{SI} = 0,13 \text{ [11]}$$

Equation (2): The interior surface resistance

$$R_{SE} = \frac{\text{air temperature (exterior)} - \text{surface temperature exterior}}{\text{Heat flow}}$$

Equation (3): The exterior surface resistance

The additional heat resistance of the greening system is considered in the R_{SE} . The exterior air temperature is much lower than the temperature of the façade behind the greening system, because the greening system protects the façade and composes a buffer that is warmer than the exterior temperature. This causes a higher surface temperature of the façade behind the greening system. The averaged surface temperatures are shown in Tables 1 and 2. In GRG7 the difference between the surface temperature of the façade behind the greened wall and the surface temperature of the blade façade is

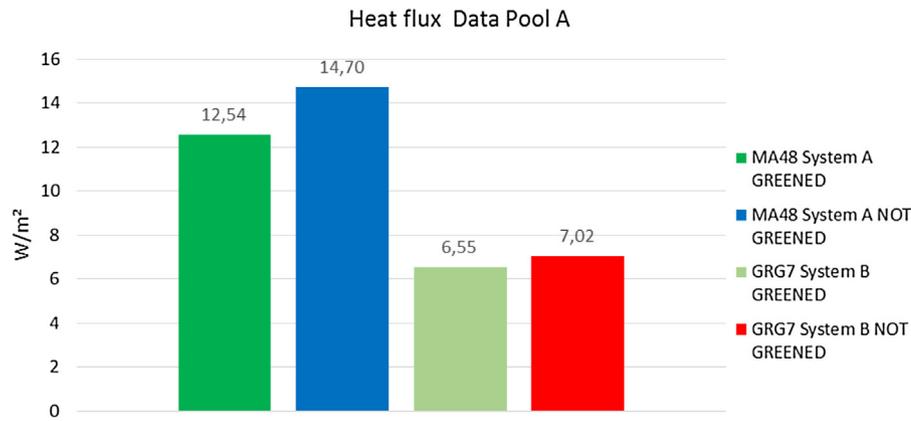


Fig. 12. The heat flux through the wall of the buildings.

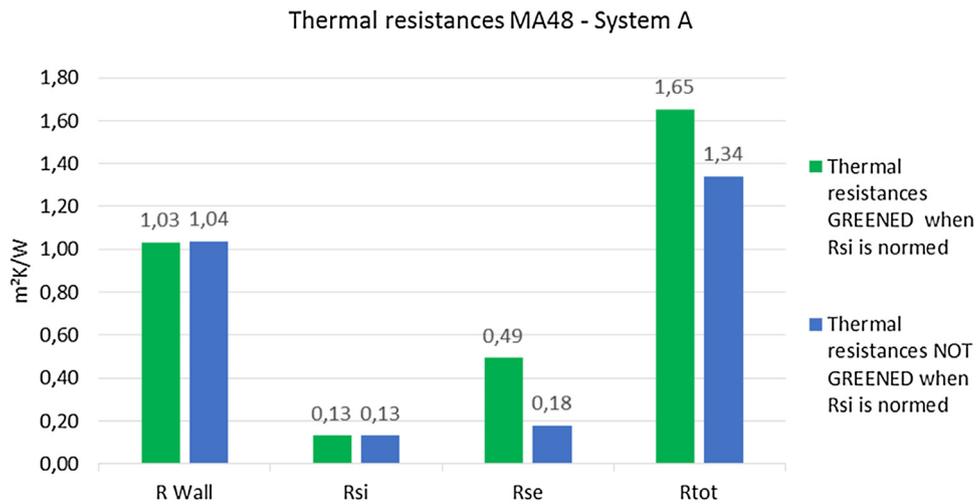


Fig. 13. The calculated heat resistances based on the measured data and [11] for the greened part of the facade (green, left) and the not greened part of the facade (blue, right). (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

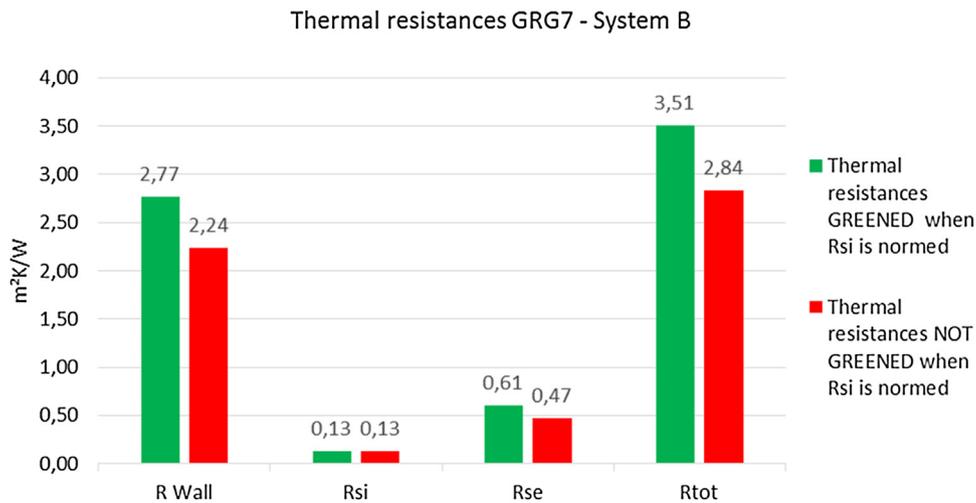


Fig. 14. The calculated heat resistances for the greened part of the facade (green, left) and the not greened part of the facade (red, right). (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

less than in the case of MA48. This is caused by the sun. The blade façade of GRG7 is in the third floor and faced to south. The next building is far enough away, that the sun can heat the façade for the whole day. The blade façade of MA48 is in the ground floor. Even though this façade is also faced to the south the effect is less.

As shown in Equation (4) the higher difference between the surface temperature of the façade and the higher exterior air temperature causes a higher R_{SE} .

$$R_{SE} = \frac{\text{air temperature (exterior)} - \text{surface temp. of facade behind greening system}}{\text{Heat flow}}$$

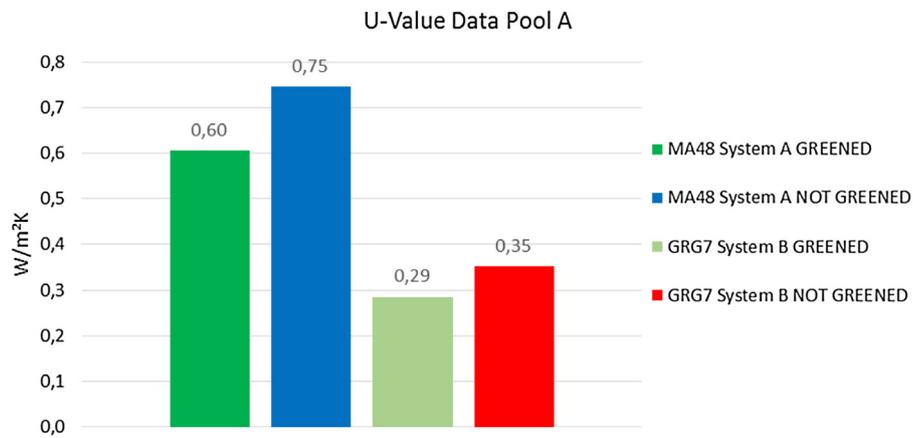


Fig. 15. The calculated u-value of the façades. The greened part of the facade is shown in the left (green) columns and the not greened value is shown in the right (blue and red) columns. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

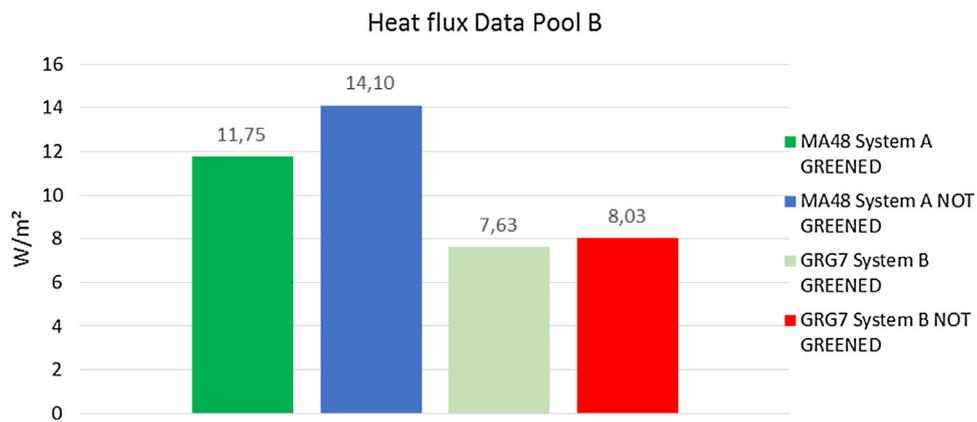


Fig. 16. The heat flux through the wall of the buildings.

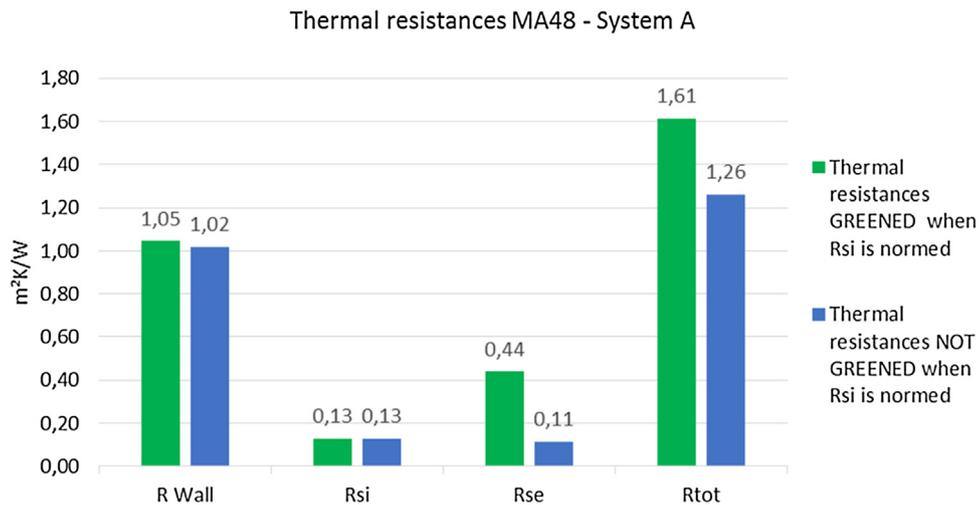


Fig. 17. The calculated heat resistances for the greened part of the facade (green, left) and the not greened part of the facade (blue, right). (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

Equation (4): The exterior surface resistance of the greened part of the façade

The sum of the heat resistances (see Equation (5)) are the total heat resistance. Its inverse is the heat transfer coefficient “u-value”, see Equation (6).

$$R_{tot} = R_{Wall} + R_{SI} + R_{SE}$$

Equation (5): The formula to calculate the total heat resistance of the whole construction.

$$U - Value = heat\ transfer\ coefficient = \frac{1}{R_{tot}}$$

Equation (6): The formula to calculate the heat transfer coefficient (U-value).

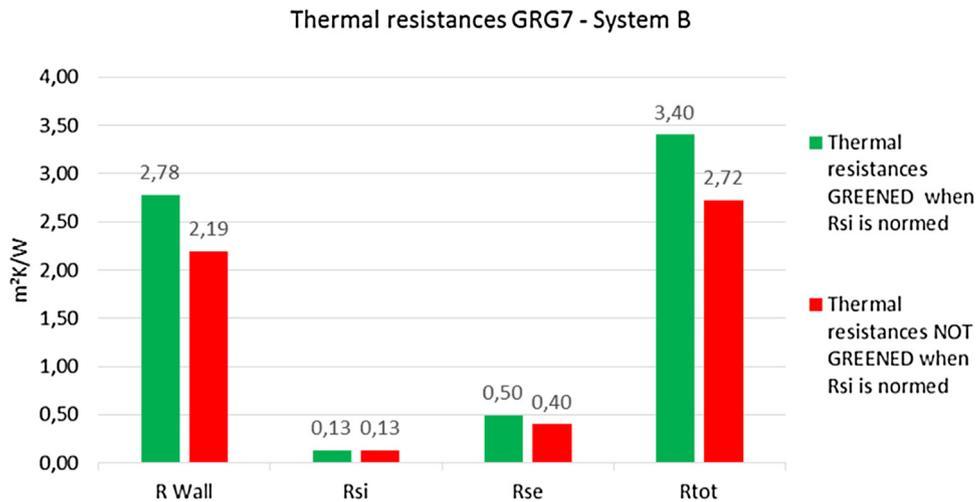


Fig. 18. The calculated heat resistances for the greened part of the facade (green, left) and the not greened part of the facade (red, right). (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

The outputs of Equation (6) are shown in Fig. 15.

The results of data pool A show that there is a difference of the greened and the not greened part of the façade. System A increases the thermal resistance by 0,31 m²K/W. System B raises the thermal resistance by 0,67 m²K/W.

- GRG7–System B: The shown data are the average of 1.389 different measuring cycles

In Data Pool B the data are investigated with hardly stationary conditions around the measuring systems. This is close to laboratory conditions. Stored heat energy does not affect this data. This data pool is analysed in the same way as Data Pool A. It is shown below.

Fig. 16 shows the heat flux, Figs. 17 and 18 the thermal resistances and Fig. 19 the U-values.

Table 2 shows the surface temperatures at the blade and greened part of the façades. There is a difference of the temperatures between the locations. This is caused by the positions of the sensors. At GRG7 the sensors to measure the surface temperature are in the second and the third floor of an old building. It is in an inner court yard with plants and no street, or car. The sensors at MA48 are at the ground floor, only 2 m above the sidewalk of a frequently used big street. During the night, the façade of GRG7 gets colder than the façade of MA48. The street, very close to the sensors of MA48 does not cool as fast, as the greened inner court yard of GRG7.

The results of data pool B also show a difference between the greened and the not greened part of the façade. System A increases

3.2. Data Pool B

- Measurement period (Nov. 2015–Apr. 2016)
- The difference between the air temperature outdoor and indoor was in average above 10 °C within the last 24 h and never below 0 °C within the last 24 h.
- The measured heat flux was bigger than 0.
- To make sure that there is not too much heat energy stored in the façade, only data with a fluctuation of 2 °C within the last 24 h was considered. This means that the difference between the highest and the lowest value of the air in the rooms, the air outside and the surfaces of the façade interior and exterior was below 2 °C. This causes hardly stationary conditions, comparable with the conditions in a laboratory.
- MA48–System A: The shown data are the average of 395 different measuring cycles.

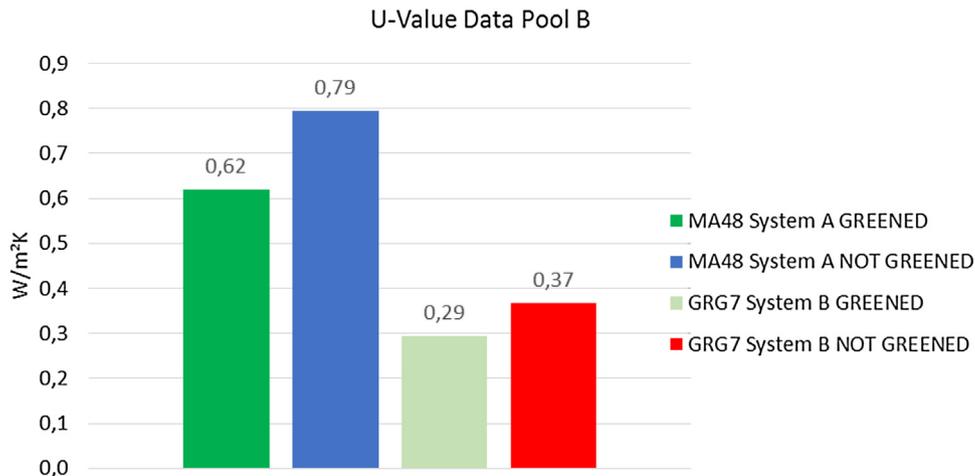


Fig. 19. The calculated u-value of the facades. The greened part of the facade is shown in the left (green) columns and the not greened value is shown in the right (blue and red) columns. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

Table 3

The increased thermal resistances caused by the facade greening.

	System A	System B
Data Pool A	0,31 m ² K/W	0,67 m ² K/W
Data Pool B	0,35 m ² K/W	0,68 m ² K/W

the thermal resistance by 0,35 m²K/W. System B raises the thermal resistance by 0,68 m²K/W.

4. Discussion

Data Pool A and Data Pool B show very similar results. This means that they confirm each other.

The thermal resistances are supposed to be the same at the wall (R_{Wall}) and interior (R_{Si}) for the greened façade and the blade façade. R_{Se} is changed by the greening. In System A – MA48 the measured data is closer than in System B – GRG7. In System A – MA48 all measurements were taken in the same room. The measured surface temperature of the greened part of the façade is 1,2 m higher, than the measured surface temperature of the not greened part of the façade. The same is true for the measured heat flux in this rooms.

In the case of System B the blade part of the façade is one floor above the greened part. The measurements were taken in two different rooms. The room with the greened façade is in the second floor and the room with the not greened façade is in the third floor. This means, that the radiant heat from the inner yard does not affect the surface temperature in the same way. In the lower floor (greened part of the façade) the affect is higher. In the third floor the wall is not as wide as in the second floor. The façade is made out of vertically perforated bricks. It is 45 cm wide in the second floor and 43 cm wide in the third floor. The difference is 2 cm.

5. Conclusion

The measurements were taken for only one heat season. It is obvious that the size of the ventilations gap is important for the results. As this is the first step of several investigations concerning the reduction of heat demand because of green facades, the main conclusions that can be drawn from the presented results are:

- The averaged surface temperature of the blade façades are lower without greening in the winter, even though the facades are facing south. The averaged difference of the blade and the greened façade are between 0,44 °C and 3,52 °C.
- The fluctuation rate of the surface temperature is also reduced by greening.
- The heat flux of a façade is reduced because of greening.
- Even the lowest additional heat resistance, cause by greening is positive between 0,31 m²K/W and 0,68 m²K/W. Even though all investigated systems are in southward directions (see Table 3).
- The thermal resistance of a greening system depends on its construction and ventilation gap. The results cannot be generalised to all greening systems. This will be the next step within the following years.

Acknowledgements

This paper was supported by grants of the Projects 850124 FFG/BMVIT “GrünPlusSchule@Ballungszentrum”, and “MA 22–154330/2015, Erforschung von Grünfassaden hinsichtlich deren wärmedämmenden Wirkung mittels flächigen Wärmeflussmessungen“. For important advice and discussion acknowledgement goes to Simon Hinterseer and Christian Pöhn

References

- [1] World Urbanization Prospects The 2014 Revision; Published by the United Nation 2014; <http://esa.un.org/unpd/wup/Highlights/WUP2014-Highlights.pdf>, download on 5. Sept. 2016.
- [2] M.T. Hoelschera, T. Nehlsa, B. Jänickeb, G. Wessolekaa, Quantifying cooling effects of facade greening: shading transpiration and insulation, *Energy Build.* 114 (2016) 283–290.
- [3] R.W.F. Cameron, J.E. Taylor, M.R. Emmett, What's 'cool' in the world of green façades? How plant choice influences the cooling properties of green walls, *Build. Environ.* 73 (2014) 198–207.
- [4] M. Rakhshandehroo, M.J.M. Yusof, M.D. Najd, Green façade (Vertical greening): benefits and threats, *Appl. Mechan. Mater.* 747 (2015) 12–15.
- [5] M. Haggag, A. Hassan, S. Elmasry, Experimental study on reduced heat gain through green facades in a high heat load climate, *Energy Build.* 82 (2014) 668–674.
- [6] C. Nori, F. Olivieri, R.C. Grifoni, C. Bedoya, Testing the performance of a green wall system on an experimental building in the summer PLEA2013 – 29th Conference, *Sust. Arch. Renew. Future* (2013).
- [7] B. Jaafar, I. Said, M.H. Rasidi, Evaluating the impact of vertical greenery system on cooling effect on high rise buildings and surroundings: a review, *Senvar* (2011).
- [8] S. Mohamed Sheweka, N.M. Mohamed, Green Facades as a New Sustainable Approach Towards Climate Change Energy *Procedia* 18 (2012) 507–520.
- [9] U. Pitha et al. Leitfaden Fassadenbegrünung 2013 <https://www.wien.gv.at/umweltschutz/raum/pdf/fassadenbegruenung-leitfaden.pdf> download on 5 Sept. 2016.
- [10] K. Perini, P. Rosasco, Costebenefit analysis for green façades and living wall systems, *Build. Environ.* 70 (2013) 110–121.
- [11] EN ISO 6946 Bauteile – Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren Berechnungsverfahren für Wärmedurchlass – hinterlüftet Luftschichten (2015).
- [12] K. Perini, M. Ottelé, E.M. Haas, R. Raiteri, Greening the building envelope, façade greening and living wall systems, *Open J. Ecol.* 1 (2011) 1–8.
- [13] X. Pan, Y. Xiao, Simulation analysis of building green facade eco-effect, *Appl. Mech. Mater.* 548–549 (2014) 1701–1705.
- [14] A. Gupta, M.R. Hall, C.J. Hopfe, Y. Rezgui, Building integrated vegetation as an energy conservation measure applied to non-domestic building typology in the UK, *Proc. Build. Simul.* (2011) 14–16.
- [15] B. Bass, Green roofs and green walls: potential energy savings in the winter, *Res. Gate* (2007).
- [16] M.M. Hasan, Investigation of Energy Efficient Approaches for the Energy Performance Improvement of Commercial Buildings, Master thesis, 2013.
- [17] G. Kotsiris, A. Androutsopoulos, E. Polychronis, P.A. Nektarios, Dynamic U-value estimation and energy simulation for green roofs, *Energy Build.* 45 (2012) 240–249.
- [18] Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft Austria <http://www.bmwf.w.gv.at/EnergieUndBergbau/klimadatenrechner/Seiten/ZurBerechnung.aspx> download at 19. Aug. 2016.

Zweite Publikation

STATUS	Veröffentlicht
Original Titel: (Deutsch)	Abbildung der wärmedämmenden Wirkung eines fassadengebundenen Begrünungssystems in einem Simulationsmodell
Titel: (Englisch)	Illustration of the thermal insulation effect of a living wall system in a simulation model
Autorinnen:	David Tudiwer; Marián Vertal'; Azra Korjenic; Katarína Čakyová
ISBN/ISSN:	ISSN: 01715445 ; E-ISSN: 14370980 ; DOI: 10.1002/bapi.201900009
Sprache:	Deutsch
Schlagwörter:	Building Component Greening ; Building Envelope ; Energy Performance ; Façade Greening ; Heat Resistance Value ; in Situ U-Value Measurement ; Modelling ; Thermal Insulation and Heat ; U-Value
Quelle:	Bauphysik, June 2019, Vol.41(3), pp.155-161 [Peer Reviewed Journal]

David Tudiwer
 Marián Vertal'
 Azra Korjenic
 Katarína Čakyová

Abbildung der wärmedämmenden Wirkung eines fassadengebundenen Begrünungssystems in einem Simulationsmodell

Im vorliegenden Aufsatz wird die wärmedämmende Wirkung eines Fassaden-Begrünungssystems in einem Simulationsmodell dargestellt. Für die Abbildung wurden in situ-Messungen an einem fassadengebundenem Trogsystem, das an einem Bürogebäude in Wien installiert wurde, verwendet. Das untersuchte Bürogebäude ist ungedämmt und die Fassade besteht aus Vollziegeln. Über einen Zeitraum von zwei Jahren wurden in-situ U-Wert-Messungen an zwei Positionen der Fassade durchgeführt. Eine Position ist an einem begrünten Fassadenabschnitt, die andere an einem unbegrünten Abschnitt. Die Messstellen liegen im selben Stockwerk, grenzen an denselben Raum und sind in dieselbe Richtung (südwärts) ausgerichtet. Die Auswertung der Messungen zeigt, dass der U-Wert am begrünten Teil der Fassade um rund 20 Prozent geringer ist, als am unbegrünten. Der Wärmedurchgangswiderstand erhöht sich um $0,33 \text{ m}^2\text{K/W}$. Im Simulationsprogramm WUFI wurde die gemessene Situation nachgestellt und der zusätzliche Wärmedurchgangswiderstand dynamisch berechnet. Die Ergebnisse zeigen, dass die gemessenen Oberflächentemperaturen eine hohe Übereinstimmung mit den simulierten haben. In der Simulation sind die Extremwerte (besonders hohe oder niedrige Temperaturen) weniger ausgeprägt als bei der in situ-Messung. Die Erhöhung des Wärmedurchgangswiderstandes aufgrund der Begrünung beträgt bei der Simulation $0,25$ bis $0,27 \text{ m}^2\text{K/W}$ und ist somit geringer als die der in situ-Messung.

Stichworte: Fassadenbegrünung; in situ U-Wert-Messung; Modellbildung, U-Wert; Wärmedurchgangswiderstand; Bauteilbegrünung

1 Einleitung und Motivation

Die Städte weltweit wachsen [1]. Um Wohnraum für die zukünftigen Bewohner schaffen zu können, werden grüne Flächen in der Stadt reduziert und durch Gebäude ersetzt. Das Reduzieren der grünen Flächen wirkt sich negativ auf die Lebensqualität aus. Der UHI-Effekt wird aufgrund der Reduktion von Grünflächen verstärkt [2, 3]. Außerdem bindet Gebäudebegrünung Staub und verringert die Lärmbelastung aufgrund des hohen Schallabsorptionsgrades [4, 5].

Auch die Auswirkung von Fassadenbegrünung auf deren thermische Dämmung wurde bereits in einigen Publikationen präsentiert. Der bereits genannte Bericht [5] beschreibt auch Messungen die an einer teilweise begrünten Altbaufassade durchgeführt wurden und vergleicht begrünte Fassadenabschnitte mit nicht begrünten. Der Wärmedurchgangswiderstand ist an den begrünten Fassaden-

Illustration of the heat-insulating effect of a façade greening system in a simulation. *In the present article the investigations of a façade greening system concerning the thermal insulation is shown. It is a greening system which is made out of boxes and installed at an office building in Vienna. The office building has no thermal insulation and the facade is made out of solid bricks. Over a period of about two years, in situ U-value measurements were taken at two positions of the facade. One position is on the greened part of the façade, the other on the not greened part of the façade. The measuring points are located at the same floor, bordering on the same room and facing the same direction (southwards). The evaluation of the measurements shows that the U-value at the greened part of the facade is about 20 % less than at the non-greened one. The heat transfer resistance increases by $0.33 \text{ m}^2\text{K/W}$. In the simulation program WUFI the situation was adjusted and the increase of the heat resistance value was calculated dynamically. The comparison of the measured and simulated values shows that the extreme values of the measured values are more pronounced than the simulated ones. The heat transfer resistance increases by 0.25 – $0.27 \text{ m}^2\text{K/W}$.*

Keywords: Façade greening; in situ u-value measurement; Modelling, U-value; Heat resistance value; Building component greening

abschnitten höher als an den nicht begrünten. Je nachdem wie großflächig das Begrünungssystem ist und wie gut die Seitenränder des Systems verblendet sind, schwankt der zusätzliche Wärmedurchgangswiderstand zwischen $0,12 \text{ m}^2\text{K/W}$ und $0,39 \text{ m}^2\text{K/W}$. In [6] wurden ebenfalls in situ-Messungen an zwei unterschiedlichen Begrünungssystemen durchgeführt. Es wurde ein zusätzlicher Wärmedurchgangswiderstand zwischen $0,31 \text{ m}^2\text{K/W}$ und $0,68 \text{ m}^2\text{K/W}$ aufgrund der Fassadenbegrünung festgestellt.

Auch in [7] wurden in situ-Messungen durchgeführt, um den Einfluss von Fassadenbegrünung auf den U-Wert festzustellen. Es wurden drei unterschiedliche Fassadenbegrünungssysteme an drei unterschiedlichen Gebäuden vermessen. Bei den unterschiedlichen Mauerwerken handelte es sich um ein Vollziegelmauerwerk, eine Betonmauer mit 5 cm XPS-Dämmung und einer Mauer aus Hochlochziegeln. Das Ergebnis der Untersuchungen zeigt, dass die

Fassadenbegrünung die U-Werte um circa 20 Prozent verbesserte, abhängig von der Art und Ausführung des Begrünungssystems.

In [8] wurde die Windgeschwindigkeit im Hinterlüftungsspalt zwischen der bestehenden Fassade und dem Begrünungssystem gemessen. Es konnte festgestellt wer-

den, dass die Luftgeschwindigkeit hinter dem Begrünungssystem nicht schneller ist, als in Innenräumen. Deshalb wurde für den äußeren Wärmeübergangswiderstand der innere angenommen, was den gesamten Wärmeübergangswiderstand laut [9] um $0,09 \text{ m}^2\text{K/W}$ erhöht.

Die Auswirkungen von Fassadenbegrünungen auf den U-Wert wurden aber noch nicht in einem Simulationsmodell detailliert abgebildet, um diese simulationstechnisch untersuchen zu können. In [10] werden keine konkreten Angaben zur Erhöhung des Wärmedurchgangswiderstandes publiziert. Es wurden zwar Simulationen durchgeführt, der Wärmedurchgangswiderstand aber nur in einer relativen Verbesserung angegeben. Der U-Wert wurde mittels der Online-Plattform u-wert.net berechnet und es wurde festgestellt, dass sich der Wärmedurchgangswiderstand um bis zu 23,7 Prozent verbesserte.

In [11] wurde ein mathematisches Modell entwickelt, mit dem die Auswirkung von Kletterpflanzen auf den U-Wert untersucht wurde. Der Fokus der Untersuchungen liegt jedoch im Sommer und nicht wie im vorliegenden Aufsatz im Winter. Die errechnete Erhöhung des Wärmedurchgangswiderstands liegt zwischen 0 und $0,7 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Alle Publikationen berichten von einer Verbesserung der thermischen Dämmung aufgrund von Fassadenbegrünungssystemen. Das Maß der Verbesserung schwankt je nach Untersuchungsmethode und Begrünungssystem. Hier werden erstmals Untersuchungen gezeigt, die mittels dem Computerprogramm WUFI durchgeführt wurden. Im Zuge der Untersuchungen wurde ein Simulationsmodell vorbereitet. Gemessene Wetterdaten wurden als Randbedingungen verwendet. Das Ergebnis der Berechnungen



Bild 1. Foto des Begrünungssystems im Winter
Fig. 1. Picture of the greening system, in winter

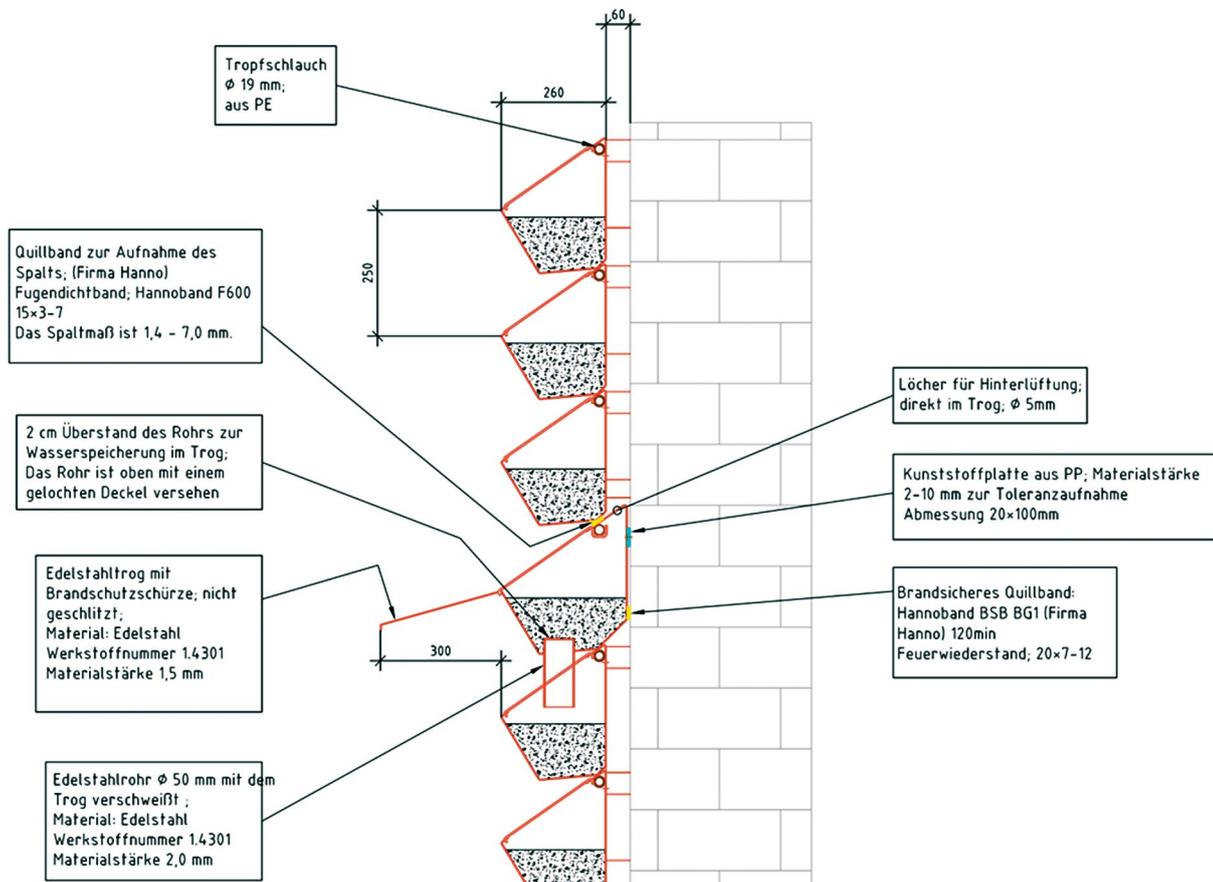


Bild 2. Schematische Darstellung des untersuchten Begrünungssystems (Quelle Hersteller)
Fig. 2. The investigated façade greening system

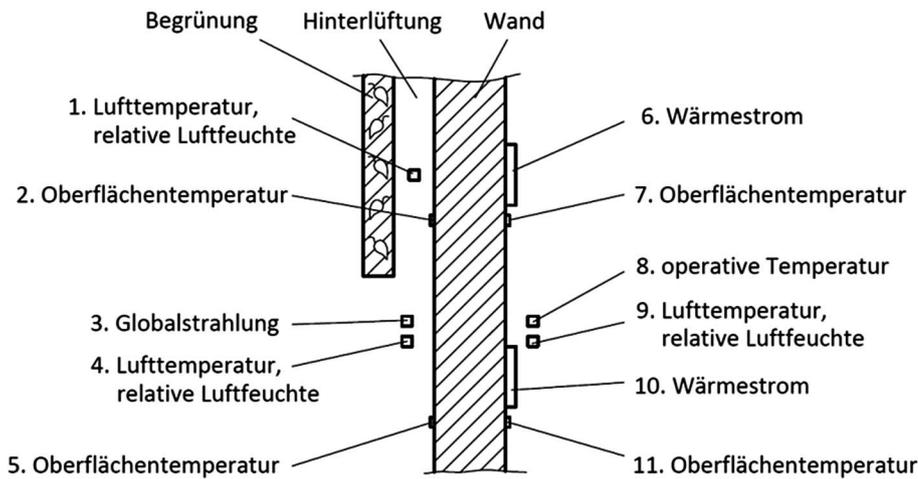


Bild 3. Schematische Darstellung des Messaufbaus
 Fig. 3. The measurement setup for the in situ measurements

wurde mit gemessenen Daten der Oberflächentemperatur validiert.

2 Untersuchtes Begrünungssystem

Das untersuchte Begrünungssystem ist in Wien an der Fassade eines Magistrats-Bürogebäudes installiert. Es besteht aus Aluminiumtrögen die übereinander an der Fassade montiert sind. Sie bilden eine vorgehängte Fassade, mit einem Abstand zum Gebäude von ungefähr 6 cm. Das System wird automatisch mittels Tropfschläuchen bewässert. Da der Abstand zwischen den Trögen nur 25 cm ist (zwischen den jeweiligen Trog-Oberkanten) überwachsen die Pflanzen die Tröge und bilden so eine dichte grüne Schicht in der die Tröge nach wenigen Jahren nicht sichtbar sind. Bild 1 zeigt die begrünte Fassade im Winter und Bild 2 stellt den Aufbau des Begrünungssystems schematisch dar.

3 Messdaten und deren Auswertung

3.1 Messmethoden

An einem begrünten und einem nicht begrünten Fassadenabschnitt wurden die Wärmeströme, die Oberflächentemperaturen (innen und außen), Lufttemperaturen (innen und außen) sowie die Temperatur und Luftfeuchte im Hinterlüftungsspalt gemessen (siehe Messaufbau in Bild 3). Gemessen wurde von 21. April 2015 bis 6. Juni 2017 in Abständen von 5 Minuten. Aus den gemessenen Wärmeströmen und Temperaturdifferenzen wurden die U-Werte berechnet.

3.2 Messgeräte

Die Lufttemperatur im Raum, im Hinterlüftungsspalt und der Außenluft wurde mit Lin Piccos A05 gemessen. Zur Messung der Außenluft wurde der Lin Picco A05 in einen Strahlenschutzschirm eingebaut (siehe Bild 4a). So konnte sichergestellt werden, dass die Lufttemperatur ohne Einfluss von Strahlung oder Verdunstungskälte gemessen wurde.

Der Wärmestrom wurde mit Wärmestrommessplatten von Phymas gemessen. Es wurden Platten mit einer Flä-

che von 25 cm × 25 cm ausgewählt (Bild 4b). Sämtliche Oberflächentemperaturen wurden mittels PT 1000 gemessen.

3.3 Datenanalyse

Die gemessenen Werte schwanken und bilden die Temperaturverläufe und Wärmeströme im Laufe des Bürotages ab. Die Temperaturen schwanken abhängig von Jahreszeiten, inneren Wärmequellen und Lüftungsverhalten. Die Wärmeströme sind vom Temperaturunterschied zwischen drinnen und draußen abhängig. Dabei ist nicht nur der momentane Temperaturunterschied relevant, sondern auch jener der Vergangenheit, da die Gebäudehülle die Wärme speichert. Diese führen zu vielen Werten, die bei der Berechnung des (möglichst) stationären U-Wertes nicht berücksichtigt werden dürfen. Beispiels-



Bild 4. a) Messgeräte im Außenbereich, b) Messgeräte im Innenraumbereich
 Fig. 4. a) Measurement equipment outdoor, b) measurement equipment indoor

weise kann das Öffnen eines Fensters im Winter dazu führen, dass die Oberflächentemperatur an der Innenseite der Fassade höher ist als die Lufttemperatur im Raum. Das würde dazu führen, dass die Wärme im Winter sowohl nach außen als auch von der Wand an den Raum abgegeben wird.

Um die Fehler bei der Auswertung der quasi stationären U-Werte so gering wie möglich zu halten, müssen die Messwerte gefiltert werden. Nur die ausgewählten Messwerte können für die Berechnung der (möglichst) stationären U-Werte herangezogen werden. Es wurden folgende Filter gesetzt:

1. Der Temperaturunterschied zwischen Innenluft und Außenluft muss größer als 15 K sein.
2. Der Oberflächentemperaturunterschied zwischen der Innen- und Außenseite der Fassade muss größer als 15 K sein.
3. Der Oberflächentemperaturunterschied zwischen der Innen- und Außenseite der Fassade muss in den letzten 24 Stunden im Mittel größer als 15 K sein.
4. Der Temperaturunterschied zwischen Innenluft und Außenluft darf in den letzten 24 Stunden nicht mehr als 2 K geschwankt haben.
5. Die Oberflächentemperaturen der Innen- und Außenfassadenoberfläche dürfen in den letzten 24 Stunden nicht mehr als 2 K geschwankt haben.

Die Filter 1–3 stellen sicher, dass nur Messungen an kalten Wintertagen berücksichtigt werden und das Mauerwerk nicht (z. B. durch die Sonnenstrahlung) aufgeheizt ist. Die Filter 4–5 filtern den größten Teil der Werte aus. Sie lassen nur noch Werte zu, die gemessen wurden, wenn in den letzten 24 Stunden weitgehend stationäre Bedingungen (mit weniger als 2 K Schwankung) gegeben waren. Trotz dieser Filterung wurden ausreichend viele Messwerte berücksichtigt und die Messungen so ausgewertet.

3.4 Auswertung der in situ Messungen

Es wurden nur Messwerte berücksichtigt, die nach Abschnitt 3.3 nicht ausgefiltert wurden. Für jeden Messzeitpunkt wurde nach folgender Formel der jeweilige Wärmedurchlasswiderstand berechnet, sowohl für den begrünten, als auch für den nicht begrünten Teil der Fassade.

$$R = \frac{\Delta T}{q}$$

mit

q Wärmefluss durch die Wand [W/m^2]

ΔT Temperaturdifferenz der des betrachteten Abschnittes [K]

$(T_{\text{Oberfläche Außen}} - T_{\text{LuftAußen}}$ für R_{se} , $T_{\text{Luft Innen}} - T_{\text{Oberfläche Innen}}$ für R_{si} , $T_{\text{Oberfläche Innen}} - T_{\text{Oberfläche Außen}}$ für R_{Wall}).

R Wärmedurchlasswiderstand des betrachteten Abschnittes [m^2K/W]

Basierend auf den daraus berechneten Wärmedurchlasswiderständen wurden die U-Werte für die begrünten und unbegrünten Fassadenteile berechnet. Die Ergebnisse werden in Bild 5 und Bild 6 dargestellt.

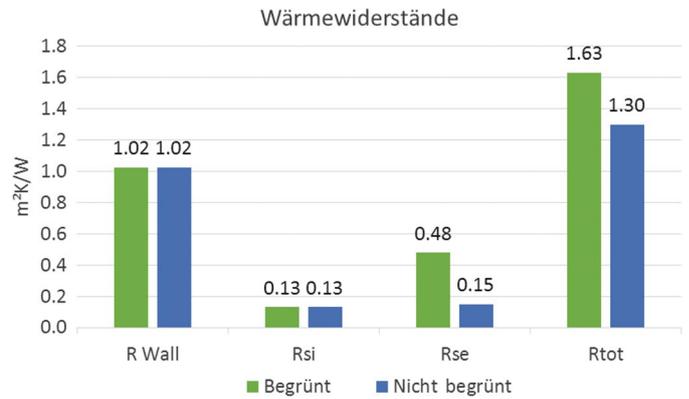


Bild 5. Die jeweiligen Wärmedurchlasswiderstände bzw. Wärmeübergangswiderstände am begrünten und am nicht begrünten Abschnitt der Fassade

Fig. 5. The heat resistance values and the thermal transfer resistance values for the greened and the not greened part of the façade

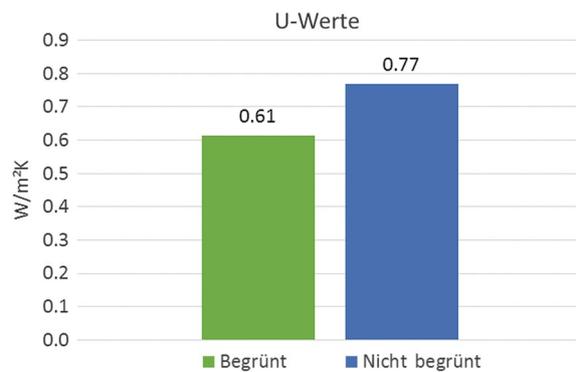


Bild 6. Die U-Werte am begrünten und am nicht begrünten Abschnitt der Fassade

Fig. 6. The U-values at the greened and the not greened part of the façade

Der gemessene R_{se} am nicht begrünten Abschnitt der Fassade war ungewöhnlich hoch. Er ist fast viermal so groß wie der standardisierte Wert in [9]. Das liegt daran, dass sich die Messstelle nur ungefähr 3 Meter über dem Boden befindet. Das Gebäude ist mehrstöckig. Es liegt zwar am Rand eines Gebäudeblocks, ist aber trotzdem nahe vieler hoher Gebäude, die dem Wind eine hohe Rauigkeit bieten. Außerdem liegt das Gebäude an einer vielbefahrenen Straße.

Am begrünten Abschnitt der Wand ist der R_{se} deutlich höher, als am nicht begrünten Abschnitt. Das Begrünungssystem schirmt die Fassade vor dem Wind ab und erhöht so die Temperatur an der Fassade. Umso geringer der Luftwechsel zwischen dem Hinterlüftungsspalt und der Außenluft, desto größer wird der R_{se} . Der R_{si} und der Wärmedurchlasswiderstand sind am begrünten und am nicht begrünten Fassadenabschnitt gleich groß. Die Erhöhung des Wärmedurchgangswiderstandes ist auf den höheren R_{se} zurückzuführen.

Die Reduktion des U-Wertes aufgrund der Begrünung entspricht einer Verbesserung der thermischen Fassadendämmung von rund 20 Prozent.

4 Simulation

Mittels WUFI Pro 6.2 wurde die Auswirkung von Fassadenbegrünung auf die Oberflächentemperaturen simuliert. Die gemessenen Lufttemperaturen bilden die Randbedingungen der Simulation. Die gemessenen Oberflächentemperaturen dienen zur Validierung und wurden mit den berechneten Oberflächentemperaturen aus der Simulation abgeglichen. Das Modell wurde so angepasst, dass der Verlauf der berechneten Oberflächentemperaturen mit den gemessenen Temperaturen die maximale Übereinstimmung erreicht hat. Auf Basis dieser Modellierung war es möglich, einen nichtstationären Wärmedurchlasswiderstand für das Begrünungssystem zu berechnen.

4.1 Modellierung

Das Modell wurde mittels 1D Konstruktion nachgestellt. Bild 7 zeigt die modellierte Konstruktion. Sie besteht aus fünf Schichten. Diese sind Innenputz, Vollziegelmauer, Außenputz, Luftschicht und Begrünungssystem. Um das Modell zu vereinfachen, wurde das Begrünungssystem als homogene Fläche angenommen. Die Luftschicht zwischen der Begrünung und der bestehenden Wand ist nicht ganz abgeschlossen. Die Verblendung des Begrünungssystems liegt zwar direkt am Fassadenputz an, kleine Löcher die aufgrund der Rauigkeit des Putzes entstehen, sorgen jedoch für eine undichte Grenzsicht und geringen Austausch zwischen Außenluft und Luftspalt. Außerdem ist die Verblendung selbst nicht luftdicht, sondern hat kleine Luftlöcher zur Belüftung des Spaltes. Der Austausch mit der Außenluft wurde mittels Luftwechselrate abgebildet. Diese beträgt im Modell $0,2 \text{ m}^3/(\text{hm}^2)$ [12]. An diesem Objekt wurde auch das Risiko von Kondensat aufgrund der Begrünung untersucht. Diese Untersuchungen wurden in [13] publiziert. Es hat sich gezeigt, dass die relative Luftfeuchtigkeit im Hinterlüftungsspalt niedriger ist als vor der nicht begrünten Fassade. Auch die absolute Luftfeuchtigkeit ist im Hinterlüftungsspalt nicht höher, als in der Außenluft. Um diese Situation nachzustellen, wurde angenommen, dass die Begrünung eine Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl einen Wert von $\mu = 1$ hat.

Die Abstrahlung des Modells wurde vereinfacht. Die langwellige Abstrahlung wird über die reduzierte kurzwellige Strahlungsabsorptionszahl mit berücksichtigt [14]. Diese wird mit dem vergleichsweise niedrigen Wert von 0,3 angenommen [14].

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar. The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

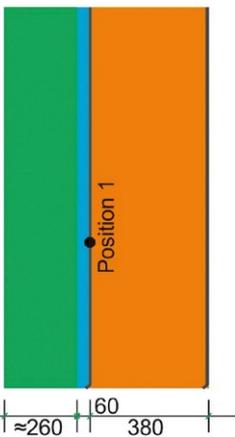


Bild 7. Darstellung des vereinfachten Modells mit Messpunkt (Position 1) für die Außen-Oberflächentemperatur (orange = Ziegelmauer, blau = Hinterlüftungsspalt, grün = Fassadenbegrünungssystem, schwarz = Innen- und Außenputz)

Fig. 7. Presentation of the simplified model with measuring point (position 1) for the outside surface temperature (orange = brick wall, blue = ventilation gap, green = living walls system, black = interior- and exterior plaster)

Bild 8 und Bild 9 zeigen die Temperaturverläufe der Oberflächentemperaturen von gemessenen und simulierten Werten. Bild 8 zeigt die Oberflächentemperaturen des unbegrünten Teils der Fassade und Bild 9 den begrünten Teil der Fassade. Es ist ersichtlich, dass unter den in Abschnitt 4.1 angegebenen Randbedingungen, die beiden Oberflächentemperaturen einen näherungsweise gleichen

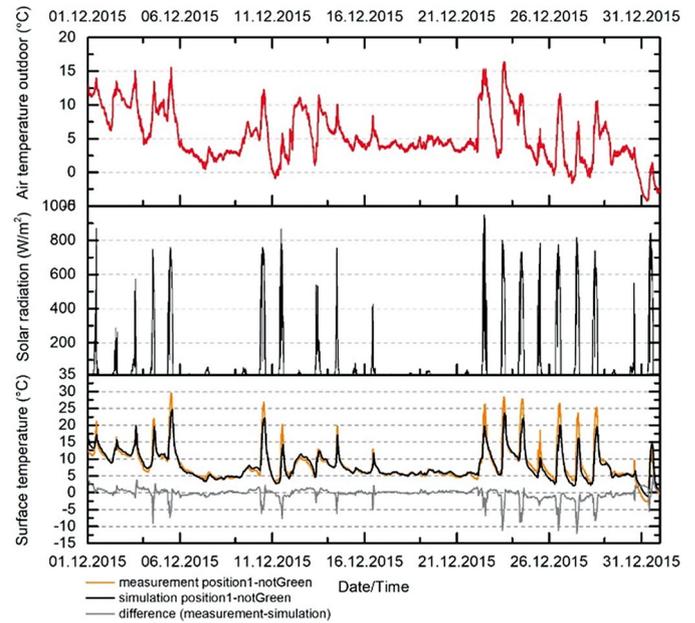


Bild 8. Vergleich der gemessenen Oberflächentemperatur mit der simulierten Oberflächentemperatur am nicht begrünten Fassadenabschnitt

Fig. 8. Comparison of the measured surface temperature with the simulated surface temperature at the not greened part of the façade

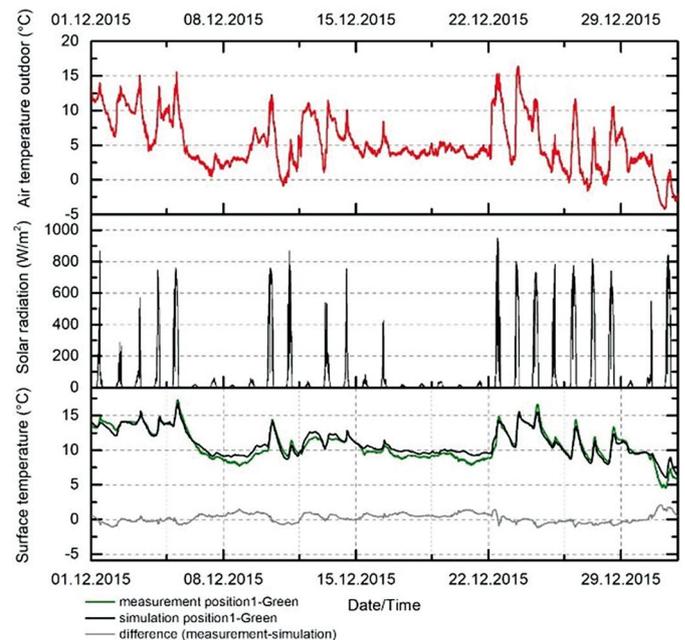


Bild 9. Vergleich der gemessenen Oberflächentemperatur mit der simulierten Oberflächentemperatur am begrünten Fassadenabschnitt

Fig. 9. Comparison of the measured surface temperature with the simulated surface temperature at the greened part of the façade

Verlauf haben. Die gemessenen Oberflächentemperaturen weisen stärker ausgeprägte Extremwerte auf. Das wurde auch in anderen Publikationen gezeigt, die gemessene Werte mit simulierten Werten verglichen haben [2, 3, 15].

Die Übereinstimmung von gemessenen und berechneten Oberflächentemperaturen bestätigt die Genauigkeit dieses Modells und die richtige Wahl der Parameter.

4.2 Auswertung der Simulation

Aus den dynamisch ermittelten Werten, der Wärmestromdichte und der Oberflächentemperaturen sowie den gemessenen Lufttemperaturen innen und außen (als Randbedingungen) konnten die jeweiligen Wärmedurchlasswiderstände der einzelnen Schichten berechnet werden. Die Wärmedurchlasswiderstände und Wärmeübergangswiderstände wurden mit derselben Methode wie in Abschnitt 3.4 beschrieben, berechnet. Diesmal jedoch wurden die dynamisch berechneten Parameter und nicht die Messdaten für die Berechnung verwendet. Es wurden vier Monate für die Berechnungen untersucht. Diese sind Dezember 2015, Februar 2016, Oktober 2016 und November 2016. Sie wurden ausgewählt, weil sie die kalte Jahreszeit repräsentieren. Im ersten Schritt wurden die Monate unabhängig voneinander betrachtet. Für jeden Monat wurde der zusätzliche Wärmedurchgangswiderstand aufgrund der Begrünung berechnet. Dieser schwankt je nach untersuchten Monat zwischen $0,25 \text{ m}^2\text{K/W}$ und $0,27 \text{ m}^2\text{K/W}$. Dieser Bereich ist mit der Literatur vereinbar (siehe Abschnitt 1).

5 Diskussion, Fazit und Ausblick

Die Recherchen sowie die hier präsentierten Untersuchungen haben gezeigt, dass fassadengebundene Begrünung den U-Wert an ungedämmten Gebäuden verbessert. Abhängig von der Methode der Untersuchungen ergeben sich unterschiedliche Werte für den zusätzlichen Wärmedurchgangswiderstand. Mittels Messungen wurde eine Erhöhung des Wärmedurchgangswiderstandes um $0,33 \text{ m}^2\text{K/W}$ ermittelt. Mittels Computersimulation wurde eine Erhöhung von $0,25$ bis $0,27 \text{ m}^2\text{K/W}$ errechnet. Die Messung zeigt also einen höheren Wärmedurchgangswiderstand als die Simulation. Ein Grund dafür kann sein, dass Berechnungsprogramme auf genormte Werte zurückgreifen. Die DIN EN ISO 6946 [9] gibt für ruhende Luftschichten (Öffnungen kleiner als 500 mm^2 je m Länge für vertikale Luftschichten) mit der Breite von 6 cm einen Wärmedurchlasswiderstand von $0,18 \text{ m}^2\text{K/W}$ an. Die Messungen zeigen einen deutlich höheren R_{se} für den äußeren Wärmeübergangswiderstand, als der von [9] vorgeschlagene. Das Abbilden einer lebenden Wand in einem idealisierten Computermodell mit 100%iger Genauigkeit ist nicht möglich, da sich einfließende Parameter mit der Veränderung der Pflanzen und Substratfeuchtigkeit stetig verändern. Im Zuge der hier präsentierten Untersuchungen konnte aufgezeigt werden, wie man den Wärmedurchgang durch eine ungedämmte und mit einem fassadengebundenem Begrünungssystem versehene Fassade in einem Modell abbilden kann, um die Temperaturverläufe sowie Wärmestrom durch die Fassade mit einer ausreichenden Genauigkeit berechnen zu können.

Danksagung

Dank geht an die Wiener Umweltschutzabteilung (Magistratsabteilung 22) für die Unterstützung der Messungen und Auswertungen sowie die Slovak Research and Development Agency (APVV) unter Grant number APVV SK-AT-2017-0023 bzw. ÖAD/ICM Zentrum für Internationale Kooperation & Mobilität AT, Project No. SK 07/2018 „Architecture for future school renovation (Architektúra obnovy škôl pre budúcnosť)“ für die Unterstützungen bei den Simulationsberechnungen.

Literatur

- [1] *United Nations – Department of Economic and Social Affairs/ Population Division: World Urbanization Prospects: The 2011 Revision*, New York, 2012.
- [2] *Bretschneider, B., Korjenic, A., Pitha, U., Lutz, M.: Greening Aspeng*, Endbericht; FFG; Wien, 2017.
- [3] *Hollands, J., Tudiwer, D., Korjenic, A., Bretschneider, B.: Greening Aspeng – Messtechnische Untersuchungen zur ganzheitlichen Betrachtung mikroklimatischer Wechselwirkungen in einem Straßenzug einer urbanen Hitzeinsel*, *Bauphysik* (40), H. 3, S. 105–119, 2018.
- [4] *Tudiwer, D., Korjenic, A.: The effect of an indoor living wall system on humidity, mould spores and CO₂-concentration*, *Energy and Buildings*, Bd. 146, S. 73–86, 2017.
- [5] *Korjenic, A. u. a.: GrünPlusSchule@Ballungszentrum Hoch-effiziente Fassaden- und Dachbegrünung mit Photovoltaik Kombination; optimale Lösung für die Energieeffizienz in gesamtökologischer Betrachtung*, Endbericht, Stadt der Zukunft, FFG/BMVIT, Wien, 2018.
- [6] *Tudiwer, D., Korjenic, A.: The effect of living wall systems on the thermal resistance of the façade*, *Energy and Buildings*, Bd. 135, S. 10–19, 2017.
- [7] *Korjenic, A.: Wärmedämmende Wirkung von Grünfassaden*, in: *Stadtgrüngespräche*, MA22 Wien, 2016.
- [8] *Perini, K., Otte, M., Fraaij, A. L. A., Haas, E. M., Raiteri, R.: Vertical greening systems and the effect on air flow and temperature on the building envelope*, *Building and Environment*, Bd. 46, Nr. 11, S. 2287–2294, 2011.
- [9] *DIN EN ISO 6946:2018-03*, Bauteile – Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren; Beuth, Berlin.
- [10] *Pan, X. C., Xiao, Y., X.: Simulation Analysis of Building Green Facade Eco-Effect*, *Applied Mechanics and Materials*, Bd. 548, S. 1701–1705, 2014.
- [11] *Susorova, I., Angulo, M., Bahrami, P., Stephens, B.: A model of vegetated exterior facades for evaluation of wall thermal performance*, *Building and Environment*, Bd. 67, S. 1–13, 2013.
- [12] *WUFI: Handling of typical constructions in WUFI®*, 2019. [Online]. Verfügbar unter: https://wufi.de/de/wp-content/uploads/sites/9/WUFIPro_Handhabung_typischer_Konstruktionen_201804.pdf. [Zugriff: 02.03.2019].
- [13] *Tudiwer, D., Korjenic, A.: The Risk of Humidity at Greened Façades*, *enviBUILD 2016 International Conference on Buildings and Environment, enviBUILD 2016 – Buildings and Environment International Conference Proceedings Brno, Czech Republic*, S. 117, 2016.
- [14] *Schafaczek, B., Zirkelbach, D.: Ermittlung von Materialeigenschaften und effektiven Übergangsparemtern von Dachbegrünungen zur zuverlässigen Simulation der hygrothermischen Verhältnisse in und unter Gründächern bei beliebigen Nutzungen und unterschiedlichen Standorten*, Stuttgart, 2013.
- [15] *Tudiwer, D., Höckner, V., Korjenic, A.: Greening Aspeng – Hygrothermische Gebäudesimulation*, *Bauphysik* (40), H. 3, S. 120–130, 2018.

Autoren dieses Beitrages:

Mag. David Tudiwer, david.tudiwer@tuwien.ac.at
Technische Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen
Institut für Werkstofftechnologie, Bauphysik und Bauökologie
Forschungsbereich ökologische Bautechnologien
Karlsplatz 13/207-03
1040 Wien, Austria

Marián Vertal, doc., Ing. PhD., marian.vertal@tuke.sk
Technical University of Košice, Civil Engineering Faculty
Institute of Architectural Engineering,
Department of Building Physics
Vysokoškolská 4
04200 Košice, Slovakia

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Azra Korjenic, azra.korjenic@tuwien.ac.at
Technische Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen
Institut für Werkstofftechnologie, Bauphysik und Bauökologie
Forschungsbereich ökologische Bautechnologien
Karlsplatz 13/207-03
1040 Wien, Austria

Katarína Čakyová, Ing., katarina.cakyova@tuke.sk
Technical University of Košice, Civil Engineering Faculty
Institute of Architectural Engineering,
Department of Building Physics
Vysokoškolská 4
04200 Košice, Slovakia

Dritte Publikation

STATUS	Veröffentlicht
Original Titel: (Deutsch)	Greening Aspang – Hygrothermische Gebäudesimulation zur Bestandsanalyse und Bewertung unterschiedlicher Szenarien bezogen auf das Innenraumklima
Titel: (Englisch)	Greening Aspang - Hygrothermal building simulation for analysis and evaluation of various scenarios related to indoor climate
Autorinnen:	David Tudiwer; Vera Höckner; Azra Korjenic
ISBN/ISSN:	ISSN: 01715445 ; E-ISSN: 14370980 ; DOI: 10.1002/bapi.201810015
Sprache:	Deutsch
Schlagwörter:	Building Envelope ; Building Simulation ; Façade Greening ; Indoor Climate ; Microclimatic ; Summer Overheating ; Surface Temperature ; Thermal Comfort ; UHI ; Urban Building Physics ; Urban Climate ; Urban Heat Island
Quelle:	Bauphysik, June 2018, Vol.40(3), pp.120-130 [Peer Reviewed Journal]

Greening Aspang – Hygrothermische Gebäudesimulation zur Bestandsanalyse und Bewertung unterschiedlicher Szenarien bezogen auf das Innenraumklima

Zu den durchgeführten hygrothermischen Messungen in Wohngebäuden im Zuge des Forschungsprojektes Greening Aspang [1] wurden Simulationen mit dem Berechnungsprogramm WUFI Plus 3.0 durchgeführt. Die Messungen aus dem Forschungsprojekt dienen dabei als Basis für die Gebäudesimulation. Um die gemessenen und die simulierten Daten abgleichen zu können, erfolgte eine detaillierte Darstellung der einzelnen Wohneinheiten. Nach Prüfung der realitätsgetreuen Abbildung durch das Simulationsmodell wurde dieses jeweils auf das gesamte Gebäude erweitert und der Einfluss verschiedener Maßnahmen auf die sommerliche Überwärmung überprüft. Die hygrothermische Behaglichkeit in den Innenräumen wurde untersucht und bewertet mit dem Ergebnis, dass für keines der untersuchten Gebäude die Sommernorm ÖNORM B 8110-3 [2] eingehalten werden konnte.

Es konnte gezeigt werden, dass die Simulationswerte mit den Messwerten übereinstimmen. Sie unterscheiden sich jedoch in ihrer Schwankungsbreite. Die Messwerte schwanken in einem größeren Bereich als die Simulationswerte.

Anhand einer Variantenstudie wurden anschließend Auswirkungen unterschiedlicher baulicher Maßnahmen auf das hygrothermische Innenraumklima während einer Hitzewelle untersucht. Zu den untersuchten Maßnahmen zählen unter anderem zusätzliche Außenverschattung, erhöhte Nachtlüftung, veränderte Fassadenfarbe sowie Fassaden- und Loggienbegrünung. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die effektivste Einzelmaßnahme sommerliche Überwärmung im Innenraum zu reduzieren die Außenverschattung ist. Eine Kombination aus mehreren unterschiedlichen Maßnahmen führt zu den besten Ergebnissen.

Stichworte: Städtische Hitzeinsel; UHI; Thermische Behaglichkeit; Oberflächentemperatur; Sommerliche Überwärmung; Stadtklima; Gebäudesimulation; Mikroklimatik; Fassadenbegrünung

1 Allgemeines

Aufgrund der globalen Klimaerwärmung, nimmt die Anzahl der Hitzetage zu [3–6]. Das führt zunehmend zu sommerlicher Überwärmung in Gebäuden. Es wird versucht mittels Vorgaben in Normen und Richtlinien (wie z. B. [7–10], [2]) diesem Problem entgegenzuwirken. In den Untersuchungen im Rahmen des Forschungsprojektes *Greening Aspang* wurde das Innenraumklima in Gebäuden unterschiedlicher Bauweisen an heißen Tagen erhoben und wird im Aufsatz *Greening Aspang – Messtechnische Untersuchungen zur ganzheitlichen Betrachtung mikroklimatischer Wechselwirkungen in einem Straßenzug einer*

Greening Aspang – Hygrothermal building simulation for analysis and evaluation of various scenarios related to indoor climate.

In the research project Greening Aspang [1] measurements were taken from different buildings concerning summery overheating. In the present paper simulations were taken with by „WUFI plus 3.0 dynamic building simulations“. The investigations of the research project serve as a basic for the simulations. The different buildings and its sample flats are explained in detail. The data of the simulation is validated by the measurements and extended to the entire building. The hydrothermal comfort inside the buildings has been investigated and evaluated. It turned out that none of the investigated objects, neither flats nor whole buildings, could satisfy the ÖNORM B 8110-3 [2].

A comparison between the values of measurements and simulations shows that the simulations are very close to the measured reality. The main difference between this values is, that the measurement values vary in a larger area than the values of the simulation.

By means of a variant study the effects of different methods structural measures on the hydrothermal indoor climate during a heatwave is investigated. The different structural measures are exterior shading, airing during the night, change of the colour of the façade, façadegreening and loggiagreening. Each of this structural measures reduce the summery overheating. The most effective one is exterior shading, but the more measures are combined, the better it is. A combination of all leads to the best results.

Keywords: Urban Heat Island; UHI; Thermal comfort; Surface temperature; Summer overheating; Urban climate; Building simulation; Microclimatic; Façade greening;

urbanen Hitzeinsel [23] präsentiert. Diese Gebäude befinden sich in einem dicht bebauten urbanen Umfeld, das stark von UHI (Urban Heat Islands) betroffen ist. Anschließend an die Messungen wurden die Auswirkungen unterschiedlicher Maßnahmen zur Reduktion der sommerlichen Überwärmung mittels WUFI-Simulation untersucht. Zur Beurteilung des Innenraumklimas wurden in Bild 1 angeführte Gebäude unterschiedlicher Bauweisen ausgewählt und in der Gebäudesimulation abgebildet.

Folgende Parameter wurden im Zuge der Simulation untersucht:

- Speichermasse der Gebäudehülle,
- Kompaktheit der Gebäudehülle,

- Dämmqualität der Gebäudehülle,
- Farbe der Gebäudehülle,
- Form der Gebäudehülle,
- Größe des Gebäudes,
- Ausrichtung des Gebäudes,
- Fensterarten und Lüftungsmöglichkeiten (Querlüften),
- Nutzerverhalten.

Im Simulationsprogramm WUFI (Wärme Und Feuchte Instationär) wurden Modelle erstellt, um das hygrothermische Verhalten der betrachteten Wohneinheiten bzw. der gesamten Gebäude bewerten zu können. WUFI wird erfolgreich für die Berechnung der hygrothermischen Behaglichkeit in Räumen verwendet. Beispiele dafür sind [11] oder [12].

Die vor Ort gemessenen Wetterdaten wurden als klimatische Randbedingungen für die Ist-Zustand-Simulation verwendet. Für die Variantenstudie wurden mittels ENVI-Met (dreidimensionales prognostisches Stadtklimamodell) berechnete Klimadaten herangezogen (repräsentative Sommerzeit). Alle sonstigen Randbedingungen wie die Belegung, die Lüftung und die Verschattung wurden aus der Realität übernommen. Sie werden in Abschnitt 3 dargestellt.

Die hygrothermische Behaglichkeit in den unterschiedlichen Gebäuden wurde im Ist-Zustand bewertet. Die Vorgehensweise bei der Bewertung der Behaglichkeit und die angewendete Methode werden in Abschnitt 4 dargestellt.

Abschnitt 5 beschreibt unterschiedliche Maßnahmen, die im Rahmen der Berechnungen mittels Simulationsprogramm an den Gebäuden gesetzt wurden, um der sommerlichen Überhitzung entgegenzuwirken.

Es gibt zahlreiche Publikationen bezüglich der sommerlichen Überwärmung von Gebäude. In [13] wurde beispielsweise der thermische Komfort eines sanierten Bürogebäudes untersucht. Zur Beurteilung des Komforts wurde hier auf die Richtlinie der DIN EN 15251 [10] zurückgegriffen. Auch [14] bedient sich dieser Richtlinie. Die behagliche Innenraumtemperatur ist bei dieser Bewertung vom gleitenden Tagesmittel der Außentemperatur abhängig. Die thermische Behaglichkeit wird in zahlreichen Berichten wie beispielsweise in [15–17] argumentiert und in mehreren Richtlinien definiert. Einige weitere Richtlinien sind DIN EN ISO 7730:2003 [8], EN ISO 7730:2006 [9], ÖNORM B 8110-3 [2] oder DIN 4108-2: 2001-03 [18], deren vereinfachtes Verfahren in [19] verifiziert wird. In die Behaglichkeitsbewertung fließen zahlreiche Faktoren ein. Einige davon sind Kleidung, Tätigkeit, gesundheitlicher Zustand, Geschlecht, Körpergröße, -masse und -form. Im Zuge dieses Projektes wird auf das hygrothermische Behaglichkeitsmodell aus [20] zurückgegriffen, welches in Abschnitt 4 erläutert wird.

In [14] wird der Einfluss der Wärmespeicherfähigkeit auf den thermischen Komfort untersucht. Die Simulationsberechnungen dafür wurden wie auch im vorliegenden Beitrag auf Basis von Stundenwerten durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass auch in kritischen Räumen der Komfort bei massiver Bauart zunimmt.

In [21] wird der sommerliche Wärmeschutz eines sanierten Wohngebäudes untersucht. Besonderer Fokus liegt auf der Betrachtung des Nutzerverhaltens und der Mög-

lichkeit des Lüftens. Die Möglichkeit des Querlüftens verstärkt den sommerlichen Wärmeschutz. Das Lüftungsverhalten der Nutzer beeinflusst die sommerliche Überwärmung stark. Im vorliegenden Beitrag wird das Lüftungsverhalten in Abschnitt 5.1 beschrieben und in Abschnitt 5.2 werden dessen Auswirkungen diskutiert.

Die Literaturrecherche hat gezeigt, dass die sommerliche Überwärmung bereits weitgehend untersucht ist. Dasselbe gilt für das Empfinden der hygrothermischen Behaglichkeit. Im vorliegenden Beitrag wird auf die Vorkenntnisse der Forschung zurückgegriffen und Maßnahmen untersucht, um der sommerlichen Überwärmung in Gebäuden eines typischen urbanen Straßenzugs entgegenzuwirken.

2 Die simulierten Objekte

Die detailliert simulierten Objekte sind alle nach Süd-Süd-Westen ausgerichtet.

Der Standort der Gebäude wird in Bild 1 dargestellt. Objekt 29 und Objekt 35 sind der Sonneneinstrahlung am stärksten ausgesetzt, da keine Verschattung durch Nachbargebäude vorliegt. Bei den anderen Gebäuden hingegen gibt es in den unteren Geschoßebenen Verschattungen aufgrund gegenüberliegender Gebäude. Diese werden in den Berechnungen berücksichtigt. Objekt 53/6/42 hat eine eingebaute Klimaanlage.

Die Gebäude unterscheiden sich bezüglich ihres Baujahrs, ihrer Bauweisen, ihrer Farben, ihrer Haustechnik sowie ihres Volumens und ihrer Form. Die relevanten Eckdaten der Gebäude werden in Tabelle 1 dargestellt.

Die unterschiedliche Art der Belüftung (natürlich oder mechanisch), die inneren Lasten und die Verschattung werden in Tabelle 2 zusammengefasst. Es erfolgt jeweils eine Darstellung des Gesamtgebäudes (Objekt + Nummer) sowie ein bis zwei darin befindlicher repräsentativer Wohnungen (Objekt + Nummer/Nummer). Bei natürlicher Lüftung wird der angenommene Luftwechsel angegeben und bei mechanischer Lüftung die relevanten Daten. Für innere Lasten nimmt WUFI Werte in Abhängigkeit der Anzahl der Bewohner an. Bei der Betrachtung der Gesamtobjekte wurden typische innere Lasten und eine übliche Belegung angenommen. Zur Abbildung der einzelnen Wohnungen wurde die Anzahl der Bewohner erhoben und entsprechend der Realität abgebildet. Bei der Verschattung wurden Außen- und Innenverschattung erhoben und deren Einsatz abhängig von der Innenraumtemperatur angenommen.

3 Vorgehensweise

3.1 Messwerte zur Validierung der Parameter

Über einen längeren Zeitraum wurden Temperatur und Luftfeuchtigkeit in den Innenräumen verschiedener Objekte erhoben, wie im Aufsatz *Greening Aspang – Messtechnische Untersuchungen* [23] dargestellt wurde. Auch die relevanten Wetterdaten wie Strahlung, Außenlufttemperatur, Außenluftfeuchtigkeit und Niederschlag wurden in einer nahegelegenen Wetterstation gemessen. Die ausgewählten Objekte wurden für die Simulation im WUFI abgebildet und detailliert untersucht. Für die Simulation wurden die realen Wetterdaten des Beobachtungszeit-

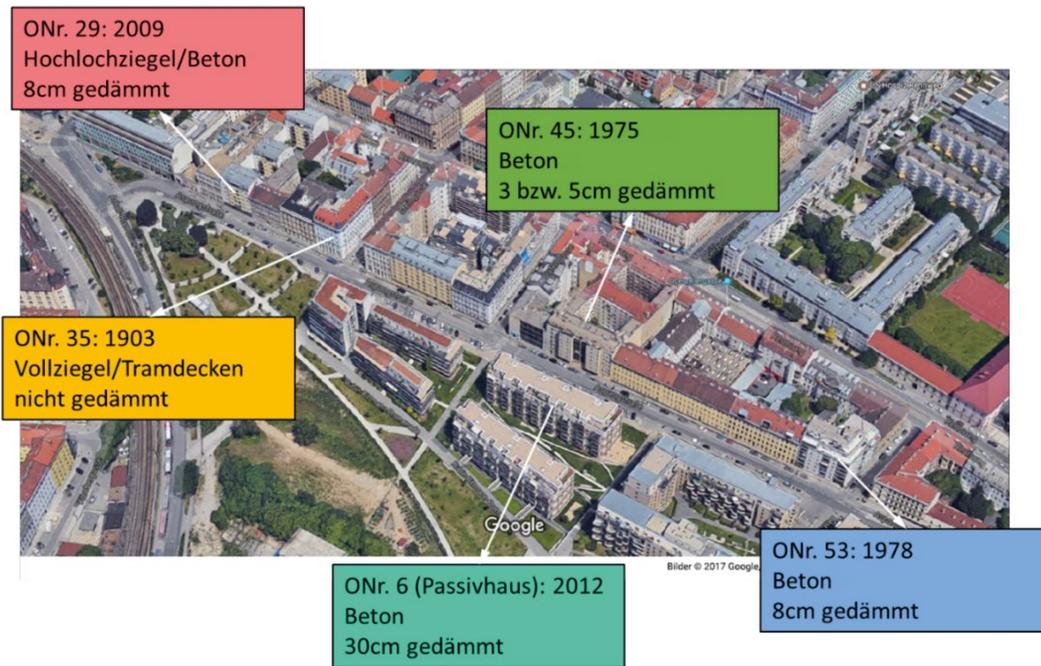


Bild 1. Darstellung der untersuchten Gebäude in Google Maps
 Fig. 1. The investigated buildings, shown in Google Maps

raums verwendet. Die Messwerte der Innenräume wurden sowohl für die Abbildung in der Simulation als auch für die Validierung verwendet. Um die Simulationsergebnisse an die gemessenen Werte anzupassen, wurde die Luftwechselrate geringfügig verändert. Es erfolgte ebenso eine Prüfung und Anpassung des Nutzerverhaltens. Dieses hat Einfluss auf die kurzfristige Entwicklung der Raumluftigenschaften und wurde daher zur Modellbildung variiert.

Die validierten Daten für die einzelnen Wohnungen wurden im Anschluss verwendet, um das Modell auf das gesamte Gebäude zu erweitern. Dabei wurde auf die Umgebung des Gebäudes sowie auf die Verschattung durch umliegende Gebäude Rücksicht genommen. Bild 2 zeigt

beispielhaft für Objekt 6/4/6 die Position der messtechnisch untersuchten und in der Simulation abgebildeten Wohnung im Gesamtgebäude.

Durch diese Vorgehensweise war es möglich, die Innenraumtemperatur und Innenluftfeuchtigkeit für das Gesamtgebäude realitätsnah abzubilden.

Für die Bestandsanalyse, welche in Abschnitt 4 näher beschrieben wird, wurden die gemessenen Wetterdaten als Randbedingungen angegeben. Dies ermöglicht einen Vergleich der Messwerte in den Objekten mit den simulierten Werten (siehe Abschnitt 4.1). Untersucht wurde der Zeitraum vom 1. Juni 2016 bis 30. September 2016 für die Gesamtgebäude.

Tabelle 1. Eckdaten der untersuchten Gebäude
 Table 1. Key figures of the investigated buildings

Objekt	Baujahr	Bauweise	Wände	Decken/Dächer	Farbe Oberfläche	Bruttovol. [m ³]	A/V-Verhältnis	Fensterfläche Außenwand	Lüftung
6	2012	schwer	STB +30 cm WDVS	STB Warmdach 40 cm EPS	beige/braun	22666	0,264	26,3 %	mech.
29	2009	mittelschwer	HLZ/STB +8 cm WDVS	STB Sargdeckel 16+5 cm MW	EG grau OG hellgrau/gelb	4700	0,381	27,1 %	Fenster
35	1903	mittelschwer	Vollziegel/ Holzrahmenbau gedämmt im DG	Holztram/ Dippelbaum	hellgrau	10369	0,346	26,6 %	Fenster
45	1975	mittelschwer	STB +3,5 cm HW innen +3,5 HW und 5 cm EPS außen	STB Umkehrdach 8 cm XPS (Annahme)	EG gelb, OG hellbraun	12688	0,362	22,8 %	Fenster
53	1978	schwer	STB+ 8 cm WDVS	STB +Dämmung (Annahme)	hellgrau	9582	0,333	22,1 %	Fenster

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar. The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



Für die Variantenstudie (Abschnitt 5) wurden Wetterdaten aus einer Simulation mit dem Programm ENVI-met entnommen [1]. Alle sonstigen Randbedingungen wie die

inneren Lasten, Lüftung und Verschattung wurden beibehalten. Der für die Variantenstudie betrachtete Zeitraum ist Juli 2016.

Table 2. Parameter of the buildings for the simulations

Tabella 2. Parameter für die Gebäudesimulationen

Objekt	Lüftung	Innere Lasten	Verschattung
6 Gesamt- gebäude	mechanisch n=0,4 1/h bei min. Temperatur- diff. 1K Nachtlüftung 17–8 Uhr n=0,5 1/h	52 Wohnungen: Tagesprofil WUFI Familienhaushalt 4P. 6 Wohnungen: Tagesprofil WUFI Single-Haushalt	Außenverschattung Fc=0,3 lt. Ansicht sonst Innenversch. Fc=0,75 geschlos- sen wenn Ti>24°C
6/4/6 Wohneinheit	mechanisch n=0,4 1/h bei min. Temperatur- diff. 1K einzelne Tage Nachtlüftung 18–8 Uhr n=2,0 1/h	Tagesprofil WUFI Familienhaushalt 4P.	Außenverschattung Fc=0,3 lt. Ansicht sonst Innenversch. Fc=0,75 geschlos- sen wenn Ti>24°C
29 Gesamt- gebäude	natürlich Luftwechsel tagsüber n=0,4 1/h Nachtlüftung 17–8 Uhr n=1,0 1/h (keine Quer- lüftung möglich)	23 Wohnungen: Tagesprofil WUFI Single-Haushalt 1,5P.	Innenverschattung Fc=0,75 geschlos- sen wenn Ti>25°C
29/1/7 Wohneinheit	natürlich 18–7 Uhr n=0,2 1/h sonst n=0,4 1/h einzelne Tage Nachtlüftung 18–7 Uhr n=1,0 1/h	Tagesprofil WUFI Single-Haushalt 2P. Wohnraum	Innenverschattung Fc=0,75 geschlos- sen nur an einzelnen Tagen
35 Gesamt- gebäude	natürlich Luftwechsel tagsüber n=0,4 1/h Nachtlüftung 17–8 Uhr n=1,5 1/h	22 Wohnungen: Tagesprofil WUFI Familienhaushalt 4P.	Außenverschattung Fc=0,3 im DG und lt. Ansicht Zwischenscheiben- versch. Fc=0,5 Kastenfenster sonst Innenversch. Fc=0,75 geschlossen wenn Ti>25°C
35/9 Wohneinheit	natürlich n=0,2 1/h einzelne Tage Nachtlüftung 18–8 Uhr n=2,0 1/h	Tagesprofil WUFI Single-Haushalt	Zwischenscheibenversch. Fc=0,5 Kas- tenfenster geschlossen wenn Ti > 25°C
45 Gesamt- gebäude	natürlich Luftwechsel tagsüber n=0,4 1/h Nachtlüftung 17–8 Uhr n=1,5 1/h	40 Wohnungen: Tagesprofil WUFI Familienhaushalt 4P. 4 Wohnungen: Tagesprofil WUFI Single-Haushalt	Außenverschattung Fc=0,3 lt. Ansicht sonst Innenversch. Fc=0,75 geschlos- sen wenn Ti>25°C
45/1/22 Wohneinheit	natürlich 8–17 Uhr gekippt n=0,4 1/h 17–8 Uhr offen n=2,0 1/h	Tagesprofil WUFI Single-Haushalt Schlafräum	Außenverschattung Fc=0,3 nach Zeitplan
45/2/8 Wohneinheit	natürlich 8–17 Uhr gekippt n=0,4 1/h 17–8 Uhr offen n=2,0 1/h	Tagesprofil WUFI Familienhaushalt 4P. Wohnraum	Innenverschattung Fc=0,75 nach Zeitplan
53 Gesamt- gebäude	natürlich Luftwechsel tagsüber n=0,4 1/h Nachtlüftung 17–8 Uhr n = 1,5 1/h	15 Wohnungen: Tagesprofil WUFI Familienhaushalt 4 P. 17 Wohnungen: Tagesprofil WUFI Familienhaushalt 2 P. 12 Wohnungen: Tagesprofil WUFI Single-Haushalt	Außenverschattung Fc=0,3 lt. Ansicht Sonst Innenversch. Fc=0,75 Geschlos- sen wenn Ti>24°C
53/6/42 Wohneinheit	natürlich n=0,4 1/h einzelne Tage Nacht- lüftung 17–8 Uhr n=2,0 1/h teilweise Klimaanlage mit 500 W	Tagesprofil WUFI Familienhaushalt 4P. Wohnraum	Außenverschattung Fc=0,3 geschlos- sen wenn Ti>24°C

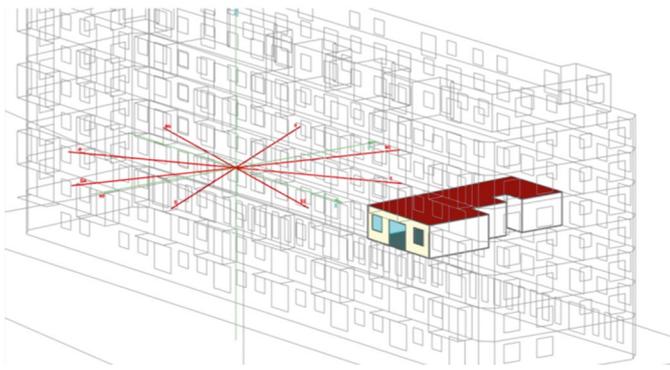


Bild 2. Darstellung einer Beispielwohnung im berücksichtigten Gesamtgebäude
 Fig. 2. Sample flat surrounded by the considered building

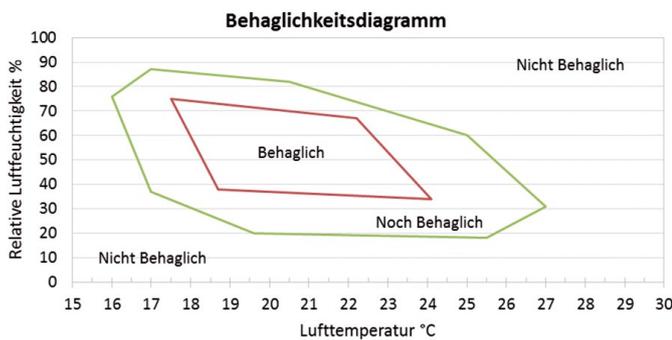


Bild 3. Behaglichkeitsdiagramm zur Bewertung der hygrothermischen Behaglichkeit
 Fig. 3. Diagram for the evaluation of the hydrothermal comfort inside the buildings

3.2 Bewertung der Behaglichkeit

Die hygrothermische Behaglichkeit wird in diesen Untersuchungen nach Frank [20] beurteilt.

Es wird sowohl die Lufttemperatur als auch die relative Luftfeuchtigkeit berücksichtigt. Die Außentemperatur wird in der verwendeten Bewertung nicht angeführt.

In Bild 3 werden die hygrothermischen Behaglichkeitsbereiche dargestellt, nach denen die Bewertung in dieser Untersuchung erfolgt. Innerhalb der inneren Abgrenzungen wird das hygrothermische Klima als „behaglich“ eingestuft. Befinden sich Temperatur und Luftfeuchtigkeit zwischen der inneren und der äußeren Abgrenzung, wird

Tabelle 3. Mittlere absolute Abweichung vom arithmetischen Mittel für Messung und Simulation
 Table 3. Mean absolute deviation from the arithmetic mean for the measurements and the simulation

	Messung	Simulation	Messung	Simulation
	rel. Feuchte in %	rel. Feuchte in %	Lufttemperatur [°C]	Lufttemperatur [°C]
6/4/6	2,94	3,05	0,74	0,50
29/1/7	4,73	2,16	1,20	0,98
35/9	3,71	2,93	1,11	1,02
45/1/22	4,09	2,28	1,07	0,76
45/2/8	4,99	3,19	1,09	1,24
53/42	4,29	2,64	0,64	0,41

das hygrothermische Klima als „noch behaglich“ eingestuft. Außerhalb der äußeren Abgrenzung ist es zu trocken, zu kalt, zu heiß oder zu feucht und deshalb „nicht behaglich“.

4 Bestandsanalyse

4.1 Untersuchte Wohnungen

Bei der Untersuchung werden die Messungen sowie die Wetterdaten aus Greening Aspang – Messtechnische Untersuchungen [23] verwendet.

Bild 4 zeigt die Temperaturen und die Luftfeuchtigkeit für sechs unterschiedliche Wohnungen. Links werden die gemessenen, rechts die simulierten Werte dargestellt. Es handelt sich um Stundenwerte für den Zeitraum vom 13. Juli 2016 bis 21. September 2016.

Die sommerliche Überhitzung in den Wohnungen im betrachteten Zeitraum ist in den Diagrammen deutlich sichtbar. Die Diagramme zeigen Temperaturen, die über dem behaglichen Bereich liegen.

Obwohl die Wohnungen in der Simulation mit den genauen Daten abgebildet sind, weisen die Messwerte eine breitere Streuung auf als die Werte aus der Simulation. Im Mittel stimmen Messung und Simulation jedoch überein.

Tabelle 3 zeigt die mittlere absolute Abweichung der Messwerte und der berechneten Simulationswerte von deren arithmetischen Mittel. Umso höher der Wert ist, desto größer ist die Streuung. Die mittlere absolute Abweichung wird mittels folgender Gleichung berechnet.

$$d_{\bar{x}}(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|$$

mit

- d Mittlere absolute Abweichung vom arithmetischen Mittel
- n Anzahl der Werte
- x_i Wert
- \bar{x} Arithmetisches Mittel

Bei der Bewertung von Simulationsergebnissen sollte immer darauf Rücksicht genommen werden, dass besonders hohe Werte und besonders niedrige Werte in der Realität häufiger auftreten als durch die Simulation abgebildet. Die Extremwerte sind in der Realität außerdem weiter voneinander entfernt als in Simulationen dargestellt.

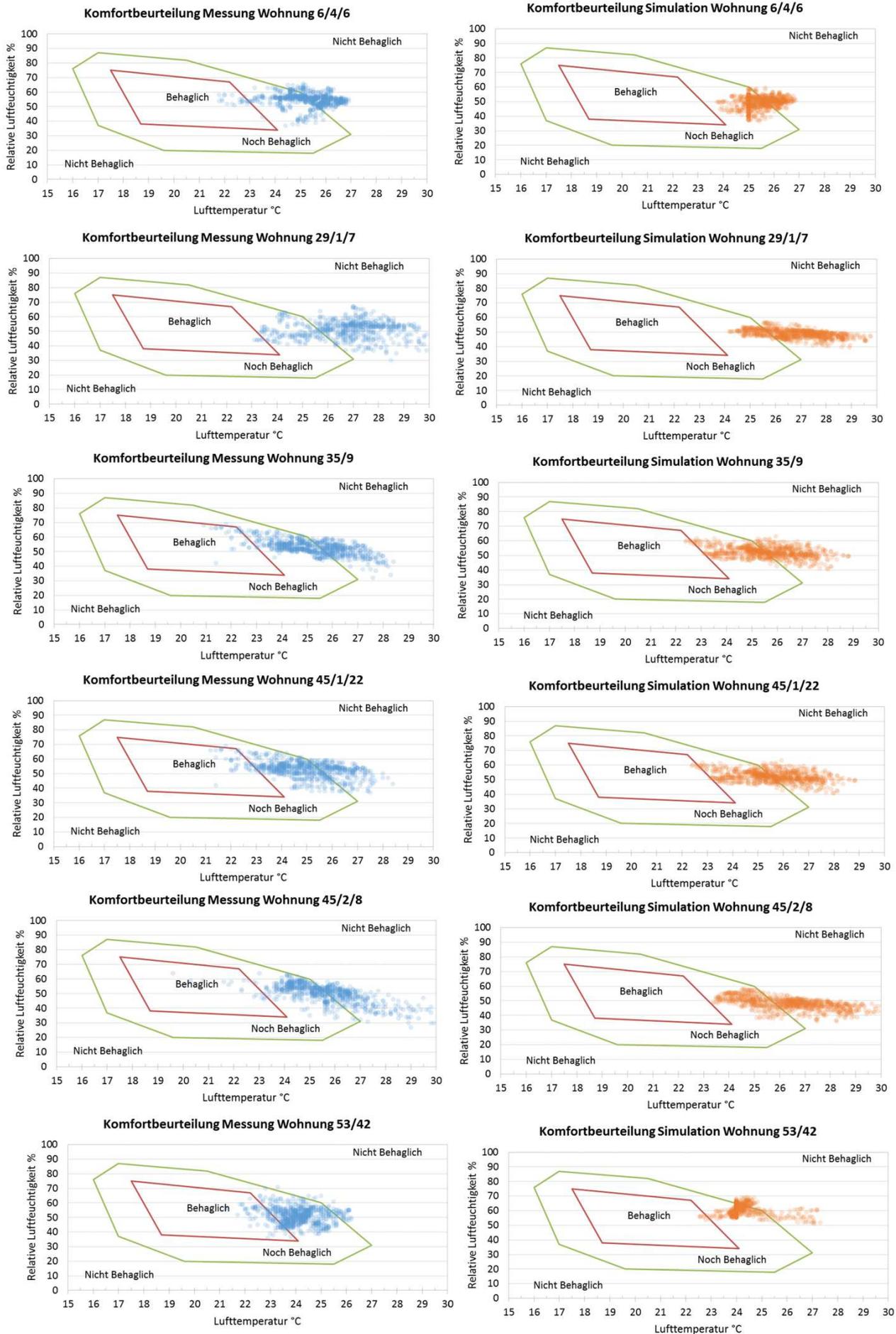


Bild 4. Vergleich der Messungen mit der Simulation
 Fig. 4. Comparison of the measurements and the simulation

Tabelle 4. Bewertung der mittels WUFI berechneten hygrothermischen Werte
Table 4. Evaluation of the hydrothermal values, calculated by WUFI

	Überschreitungsdauer 25°C Innenlufttemperatur		Überschreitungsdauer 27°C Innenlufttemperatur		Anzahl der Stunden beha./noch beha./nicht beha. nach [20]
	h	%	h	%	
Objekt 6/4/6	682 h	86,3%	0 h	0,0%	0/513/277
Objekt 29/1/7	732 h	92,7%	351 h	44,4%	0/154/636
Objekt 35/9	537 h	68,0%	115 h	14,6%	7/366/417
Objekt 45/1/22	625 h	79,1%	76 h	9,6%	0/362/428
Objekt 45/2/8	604 h	76,5%	260 h	32,9%	0/303/487

In Tabelle 4 wird dargestellt, wie oft sich die simulierten Werte im behaglichen Bereich nach Frank [20] befinden. Es wird die Stundenanzahl je nach Bereich angegeben. Außerdem wird die Überschreitungsdauer der Grenztemperaturen 25°C und 27°C angegeben. Diese Grenztemperaturen basieren auf Vorgaben der ÖNORM B 8110-3 [2]. 25°C ist die angegebene Grenztemperatur für Schlafräume und 27°C für andere Aufenthaltsräume. Der betrachtete Zeitraum für die Werte in Tabelle 4 ist vom 18. August – 20. September 2016.

In Bild 4 und Tabelle 4 ist ersichtlich, dass im Objekt 29/1/7 die Grenztemperaturen am häufigsten von allen untersuchten Wohnungen überschritten werden und die hygrothermische Behaglichkeit am häufigsten als nicht behaglich beurteilt wird. Das gesamte Gebäude ist der Sonneneinstrahlung am stärksten ausgesetzt, die Wohnung hat einen großen Fensterflächenanteil in einer Höhe von 34,7% und keine Möglichkeit der Querlüftung.

Das Objekt 53/6/42 ist von der Bewertung ausgenommen, da es in dieser Wohnung eine Klimaanlage gibt. Objekt 6/4/6 ist nach [20] und den Grenztemperaturen von [2] am besten zu bewerten. Die Innenlufttemperatur überschreitet die Grenztemperatur von 27°C während der gesamten Betrachtungsdauer nicht. Die als „nicht behaglich“ eingestuften Werte sind auf zu hohe Luftfeuchtigkeit bei grenzwertiger Temperatur zurückzuführen. Dies führt dazu, dass sich die Lufttemperatur noch wärmer anfühlt. Da es sich bei diesem Gebäude um ein Passivhaus handelt, hat das Nutzerverhalten besonders großen Einfluss auf das Innenraumklima.

Die Objekte 45/1/22 und 45/2/8 befinden sich im selben Gebäude. Technisch ist Objekt 45/1/22 besser ausgestattet. Es gibt eine Außenverschattung, die auch in der Simulation berücksichtigt wird. Das Objekt 45/2/8 ist nur mit einer Innenverschattung versehen. Deshalb ist es auch stärker von der sommerlichen Überwärmung betroffen. Das Objekt 35/9 ist der Sonne ähnlich stark ausgesetzt wie das Objekt 29/1/7. Aufgrund der Bauweise in Vollziegel ist die thermische Speicherkapazität jedoch wesentlich höher. Die sommerliche Überwärmung ist gegenüber 29/1/7 deshalb geringer.

4.2 Gesamtgebäudebewertung

Die Abbildung der einzelnen Wohnungen bzw. deren Simulationsmodelle wurden auf das Gesamtgebäude erweitert, um weitere Simulationen durchzuführen und die Auswirkung verschiedener Baumaßnahmen auf die sommerli-

che Überwärmung untersuchen und schlussendlich bewerten zu können. Für den Zeitraum vom 1. Juni 2016 bis 30. September 2016 wurden die fünf Gesamtgebäude simuliert. Die hygrothermischen Werte werden in Bild 5 dargestellt. Den größten Anteil der Werte im Bereich „behaglich“ weist das Objekt 53 auf, die wenigsten das Objekt 6. Allerdings befinden sich in Objekt 6 die meisten Werte im „noch behaglichen“ Bereich und die wenigsten im „nicht behaglichen“ Bereich. Aufgrund der guten Dämmung und der Lüftungsanlage sind die Werte über den gesamten Zeitraum in einem engen Bereich. Bei den ungedämmten Gebäuden schwankt die Temperatur wesentlich stärker. Dadurch liegen mehr Werten sowohl im „behaglichen“ als auch im „nicht behaglichen“ Bereich. Die meisten Werte im „nicht behaglichen“ Bereich weist Objekt 29 auf. Die besonders starke Überhitzung ist auf die Sonneneinstrahlung zurückzuführen. Objekt 29 ist der Sonneneinstrahlung besonders stark ausgesetzt, da kein anderes Gebäude gegenüberliegt. Außerdem ist die Speichermasse aufgrund der Bauweise in Hochlochziegel und Beton geringer als bei den anderen Objekten. Dem Objekt 35 liegt auch kein Gebäude gegenüber, es weist jedoch die größte thermische Speichermasse unter den verglichenen Gebäuden auf. Das Gebäude ist aus der Gründerzeit und die Wände bestehen aus Vollziegeln. Objekt 45 weist die zweitmeisten Werte im „nicht behaglichen“ Bereich und die drittmeisten Werte im „behaglichen Bereich“ auf. Das Objekt hat mehr thermische Speichermasse als Objekt 29 und profitiert von der Verschattung durch gegenüberliegende Gebäude.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass Objekt 53 die geringste sommerliche Überwärmung aufweist. Verschattung durch andere Gebäude und viel Speichermasse aufgrund der Bauweise sind die einflussreichsten Faktoren. Objekt 6 weist eine verhältnismäßig geringe sommerliche Überwärmung auf. Die Dämmung wirkt sich bei sinnvollem Lüftungs- und Verschattungsverhalten positiv auf das Innenraumklima aus. Geringe Speichermasse, große Fensterflächen und exponierte Lage nach Süden führen bei Objekt 29 zur stärksten sommerlichen Überwärmung.

5 Variantenstudie

5.1 Beschreibung der Varianten

Für die Variantenstudie werden unterschiedliche Maßnahmen simuliert und die Effektivität durch Vergleich mit dem Bestand abgeschätzt. Die Maßnahmen werden in den folgenden Abschnitten vorgestellt.

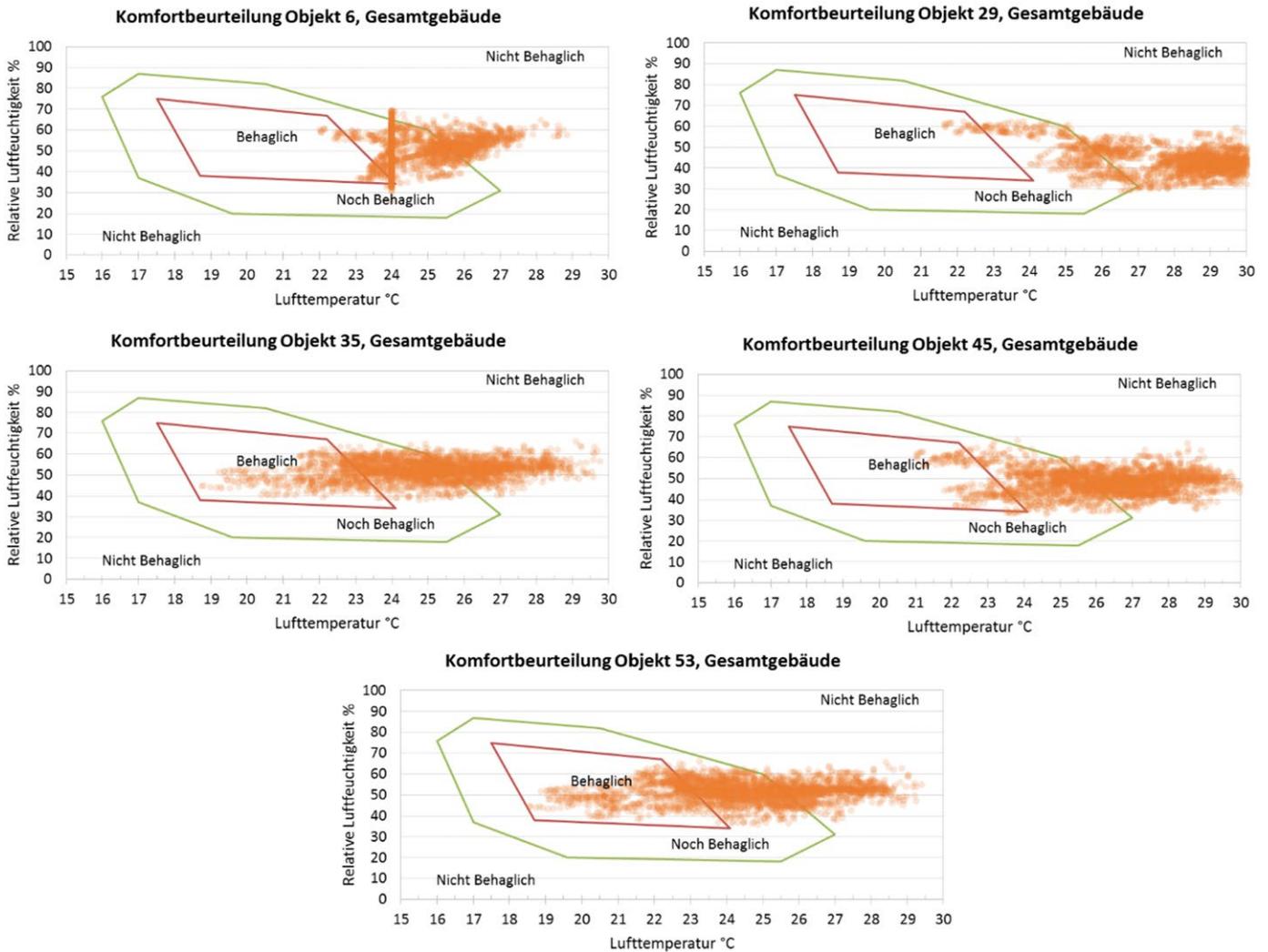


Bild 5. Darstellung der hygrothermischen Simulationswerte im Behaglichkeitsdiagramm
 Fig. 5. Hydrothermal values in the comfort chart

Nachlüftung, Verschattung und Begrünung

Nachlüftung

Es wird angenommen, dass die Fenster zu üblichen Arbeitszeiten tagsüber geschlossen sind, in den wärmeren Morgen- und Abendstunden nur zum Zwecke des hygienischen Luftwechsels gekippt bzw. leicht geöffnet werden und während der kühleren Nachtstunden vollständig geöffnet werden. Der Zeitplan wird in Tabelle 5 dargestellt. Der Infiltrationsluftwechsel n_x findet ganztägig statt.

Vertikale Außenverschattung

Analog zur Nachlüftung wurde für die Benutzung der Außenverschattung mit einem Verschattungsgrad von 0,2 ein Zeitplan angenommen, der auf die übliche Anwesenheit von Nutzern abgestimmt ist. Dieser Zeitplan ist in Tabelle 6 dargestellt.

Um natürliches Licht zu nutzen, wird die vertikale Verschattung als teilweise offen (50%) betrachtet, während sich die Nutzer im Gebäude befinden.

Horizontale Außenverschattung durch Markisen/Balkonplatten

Im Modell wurden Markisen ebenso wie Balkonplatten als opake Bauteile dargestellt. Zusätzlich wurde eine innenlie-

gende Verschattung mit einem Verschattungsgrad von 0,75 als ständig geschlossen in die Simulation einberechnet. Als Maßnahme werden alle Fenster, die der Sonneneinstrahlung ausgesetzt sind, damit versehen.

Tabelle 5. Simulierter Luftwechsel
 Table 5. Simulated air exchange

Uhrzeit	Annahme Luftwechsel
07–08 Uhr	0,4 h ⁻¹
08–17 Uhr	0,0 h ⁻¹
17–22 Uhr	0,4 h ⁻¹
22–07 Uhr	0,8 h ⁻¹ ohne Querlüftung 1,5 h ⁻¹ mit Querlüftung 2,0 h ⁻¹ mit Querlüftung im Dachgeschoß

Tabelle 6. Zeitplan der vertikalen Außenverschattung
 Table 6. Timetable for the vertical shading

Uhrzeit	Öffnung Verschattung
08–17 Uhr	Vollständig geschlossen
17–08 Uhr	50% geschlossen

Verschattung durch Fassadenbegrünung

Es wurde eine vollflächige Begrünung der Fassade mit sommergrüner Vegetation angenommen und für opake Bauteile der Reduktionsfaktor für die Verschattung von 0,1 angesetzt. Bei der WUFI Simulation wird nur der Effekt der Verschattung durch die Begrünung berücksichtigt. Weitere Änderungen des Klimas (Luftfeuchte, Temperatur, Windgeschwindigkeit, Kühlung aufgrund von Verdunstung) können nicht miteinbezogen werden.

Verschattung durch Balkon-/Loggienbegrünung

Für die Begrünung von Balkon- und Geländerkonstruktionen wurde für dahinterliegende transparente Bauteile der Reduktionsfaktor für Verschattung mit 0,7 angenommen. Es wird nur der Effekt der Verschattung durch die Begrünung berücksichtigt. Weitere Änderungen des Klimas (Luftfeuchte, Temperatur, Windgeschwindigkeit, Kühlung aufgrund von Verdunstung) können nicht miteinbezogen werden.

Oberflächenfarbe

Im Zuge der Simulationen wurde auch die Oberflächentemperatur innen unter Variation der Fassadenfarbe außen untersucht. Die innere Oberflächentemperatur wurde für

jedes Gebäude zweimal mit WUFI berechnet. Der einzige Unterschied zwischen den beiden Berechnungen war die äußere Oberflächenfarbe. Einmal wurde sie als hell und einmal als dunkel angegeben. Der Absorptionsgrad für hell wurde mit 0,4 und für dunkel mit 0,6 angegeben. Der Emissionsgrad ist in beiden Fällen 0,9.

5.2 Ergebnisse Varianten

Nachtlüftung, Verschattung und Begrünung

An den vier Gebäuden (Bild 6) wurden unterschiedliche Maßnahmen untersucht. Die Gebäude wurden zuerst im Ist-Zustand simuliert. Danach wurden die Maßnahmen am Bestand ergänzt und die unterschiedlichen Varianten (Abschnitt 5.1) berechnet.

Objekt 53/42 wurde nicht untersucht, da sich in diesem Objekt eine Klimaanlage befindet. Dominierend ist hier das Nutzerverhalten bezüglich des Einsatzes der Klimaanlage.

Alle untersuchten Maßnahmen weisen einen positiven Einfluss auf die Innenraumtemperatur auf. Das Objekt 29/1/7 zeigt die höchste sommerliche Überwärmung der untersuchten Wohnungen. Es ist der Sonneneinstrahlung besonders ausgesetzt. Die Verschattung befindet sich im

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar. The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

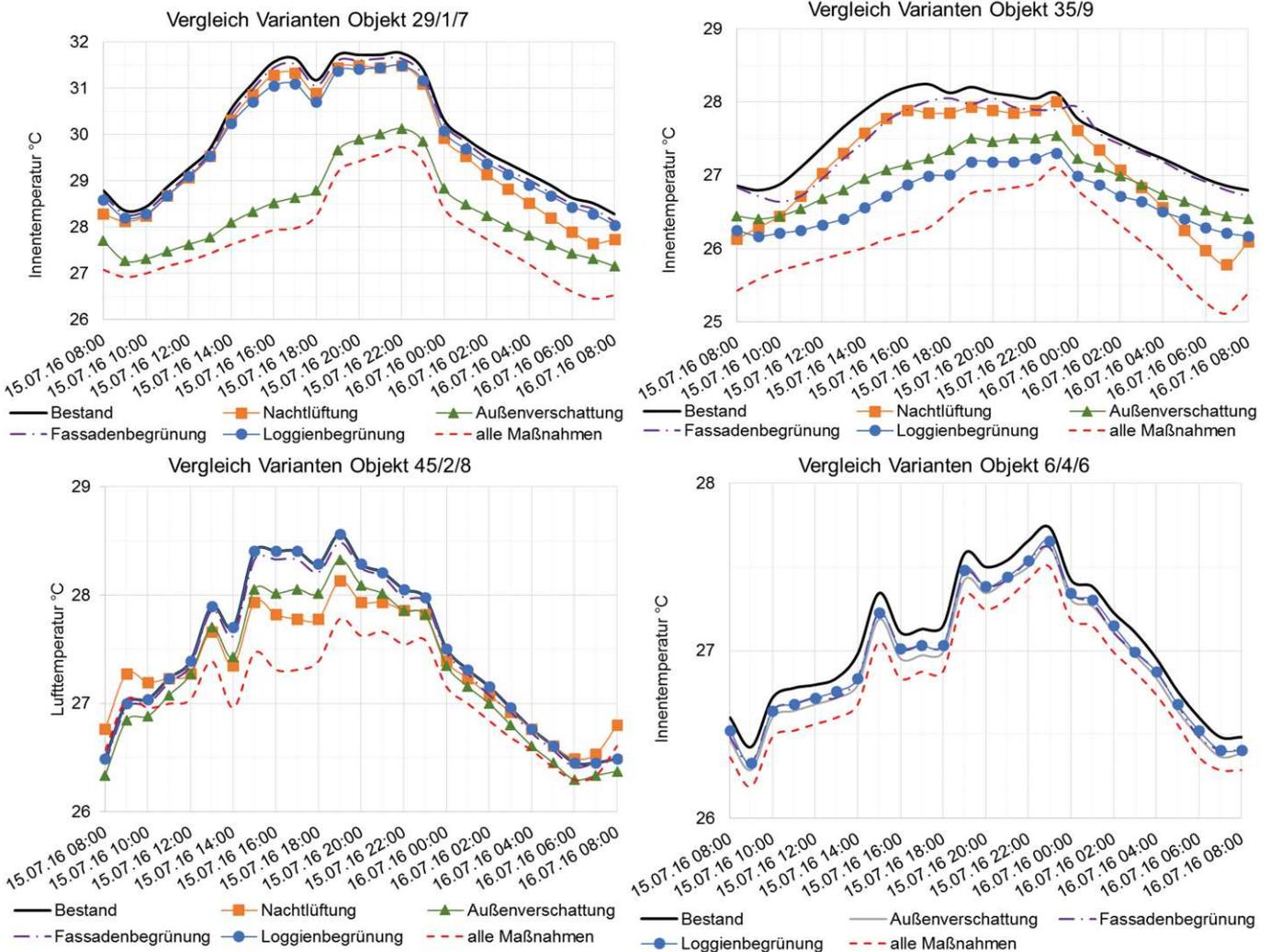


Bild 6. Die Auswirkungen unterschiedlicher Maßnahmen auf die Innenraumtemperatur an einem Hitzetag
 Fig. 6. The effects of different measures on the indoor temperature during a very hot day

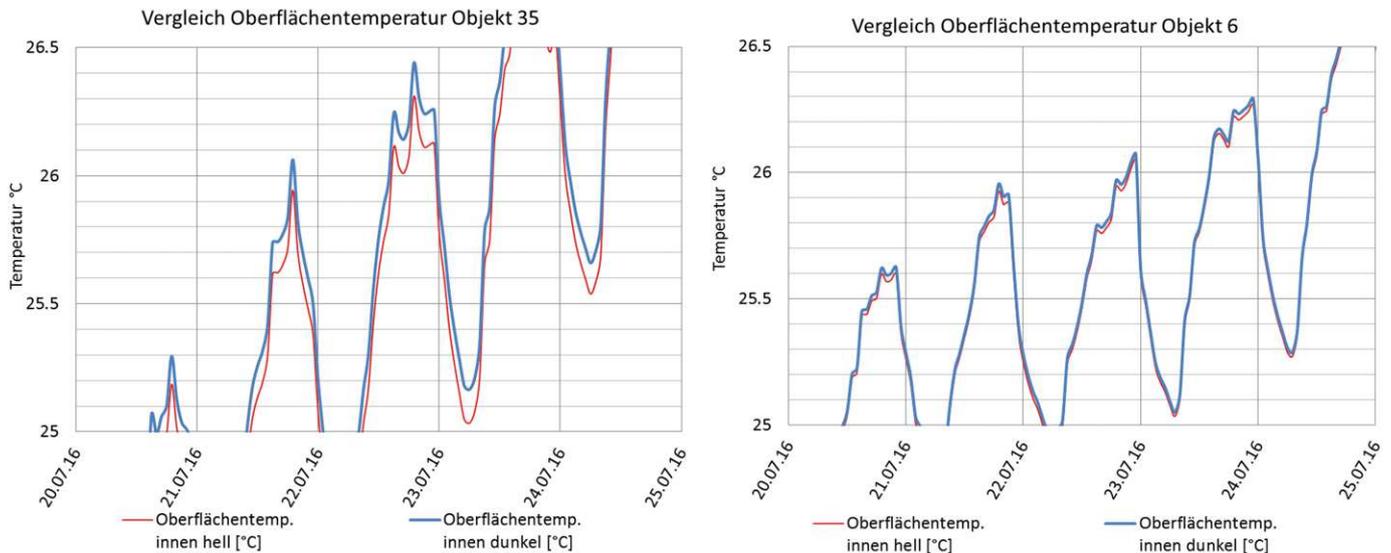


Bild 7. Auswirkung der äußeren Fassadenfarbe auf die innere Oberflächentemperatur der Wand für Objekt 35 (a) und Objekt 6 (b)

Fig. 7. Effect of the colour from the facade on the indoor surface temperature of the wall. a) object nr. 35, b) object nr. 6

Ist-Zustand nur innen, weshalb sich die Außenverschattung als wirksamste Maßnahme zeigt. Objekt 45/2/8 und Objekt 35/9 haben bereits eine Zwischen-Scheiben-Verschattung im Ist-Zustand. Die simulierte Außenverschattung ist deshalb verhältnismäßig weniger wirkungsvoll gegenüber dem Ist-Zustand.

Das Objekt 6/4/6 weist die geringste sommerliche Überwärmung der untersuchten Wohnungen auf. Die Dämmung des Passivhauses führt zu einem verhältnismäßig geringen Unterschied zwischen Tag und Nacht. Für dieses Objekt wurde die Maßnahme „Nachtlüftung“ nicht untersucht, da durch die kontrollierte Wohnraumlüftung bereits ein optimales Lüftungsverhalten vorhanden sein sollte. Alle simulierten Maßnahmen wirken sich auch bei diesem Objekt positiv aus. Der Unterschied zum Ist-Zustand ist allerdings wesentlich kleiner als bei den anderen betrachteten Gebäuden.

Die Loggien- und die Fassadenbegrünung wirken sich je nach allgemeinem Zustand des Gebäudes unterschiedlich stark auf die sommerliche Überwärmung aus. Generell wird die Kühlung aufgrund der Verdunstung vernachlässigt, was insbesondere Auswirkungen auf den Außenbereich hat. Innen wirkt sich die Verschattung aufgrund der Begrünung am stärksten aus.

Oberflächenfarbe

Die Oberflächenfarbe der Fassade wirkt sich im Sommer auf die äußere Oberflächentemperatur aus, wie auch in [23] erläutert wurde. Dunkle Oberflächen heizen sich stärker auf als helle. Auf den Innenraum wirkt sich die Oberflächenfarbe außen aber lediglich gering aus wie auch Bild 7 zeigt. Objekt 35 im Bild 7a ist nicht gedämmt, während es sich bei Objekt 6, dargestellt in Bild 7b um ein gedämmtes Passivhaus handelt.

Den größten Unterschied zwischen heller und dunkler Oberfläche gibt es während den Tagesspitzen und der Nacht. Die Auswirkungen auf die innere Oberflächentemperatur sind im nicht gedämmten Gebäude stärker als im gedämmten. Im nicht gedämmten Gebäude wird die

Wärme der aufgeheizten Außenoberfläche besser nach innen geleitet, da die Dämmung diesen Prozess hemmt.

6 Fazit und Ausblick

Alle untersuchten Objekte sind an heißen Tagen einer Überhitzung ausgesetzt. In jedem der Objekte sind hygrothermische Werte, die einem „nicht behaglichen“ Bereich zuzuordnen sind. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die sommerliche Überwärmung in gedämmten Bauweisen mit hoher Speichermasse weniger ausgeprägt ist und kürzer auftritt als bei Bauweisen mit geringerer Speichermasse und Dämmung. Sehr vorteilhaft wirkt sich die Möglichkeit einer Querlüftung aus.

Bei Gebäuden mit starker Dämmung stellen sich die Verschattung und das Nutzerverhalten als essentiell heraus. Denn Sonneneinstrahlung ohne Außenverschattung erhöht die Raumtemperatur und die starke Dämmung verhindert die nächtliche Auskühlung. Das Bestandsobjekt 29 ist besonders von sommerlicher Überwärmung betroffen. Tagsüber wird über die ziemlich großen transparenten Bauteile dem Innenraum viel Wärme zugeführt. In den Stunden mit niedrigeren Außentemperaturen kann diese durch die Dämmung nur verlangsamt wieder abgegeben werden. Obwohl im untersuchten Passivhaus eine bessere Situation herrscht, konnte die Norm jedoch bei keinem der untersuchten Gebäude eingehalten werden.

Die Annahmen, welche in der vereinfachten Berechnung der sommerlichen Überwärmung in der ÖNORM 8110-3 [2] für den Luftwechsel getroffen werden, sind im Vergleich zu den hier angestellten Berechnungen stark überhöht. In der Simulation wurden deutlich geringere stündliche Luftwechselraten ermittelt.

Es wird auch gezeigt, dass die Abweichung vom arithmetischen Mittel bei den Messungen größer ist als bei der Simulation. Bei der Bewertung von Simulationsergebnissen sollte deshalb immer darauf Rücksicht genommen werden, dass besonders hohe Werte und besonders niedrige Werte in der Realität häufiger auftreten als es die Simula-

tion darstellt. Die Extremwerte sind in der Realität weiter voneinander entfernt als es in Simulationen dargestellt wird.

Die untersuchten Varianten haben auch gezeigt, dass umso besser der Bestand bereits ist, desto weniger effektiv die Maßnahmen sind. Während Begrünungsmaßnahmen wie z. B. Fassadenbegrünung in vielen Fällen das Mikroklima stark beeinflussen können, fällt der Effekt für die Innenräume verhältnismäßig gering aus. Die Maßnahme der Außenverschattung ist am effektivsten. Das Einhalten der Grenztemperaturen von 27 °C und 25 °C wird durch keine der untersuchten Maßnahmen erreicht. Auch beim gemeinsamen Umsetzen aller Maßnahmen wäre ein Einhalten der Grenztemperaturen nicht möglich.

Die innere Oberflächentemperatur ist nur in sehr geringem Ausmaß von der äußeren Oberflächenfarbe abhängig. Umso stärker die Fassadendämmung ist, desto geringer wirkt sich die äußere Oberflächenfarbe aus.

Bei zukünftigen Bauvorhaben soll darauf geachtet werden, dass möglichst viele der vorgestellten Maßnahmen umgesetzt werden oder zumindest die Strukturen dafür geschaffen werden, um ein Nachrüsten der Maßnahmen einfach und günstig zu ermöglichen.

Danksagung

Diese Publikation ist im Rahmen des Projektes „Greening Aspang“ (FFG Projektnummer 855537) entstanden. Das Projekt wurde aus Mitteln des Klima- und Energiefonds gefördert und im Rahmen des Programms „Smart Cities“ durchgeführt. <http://www.smartcities.at/assets/Uploads/Projektbeschreibung-Greening-Aspang-Wien-Jaener-2017.pdf>

Literatur

- [1] *Bretschneider, B., Korjenic, A., Scharf, B. et al. (2017): Greening Aspang – Entwicklung eines Verfahrens zur gesamtenergetischen Optimierung von Stadtgebieten am Beispiel der Aspangstraße. Endbericht Smart Cities Demo – 07. Ausschreibung Smart Cities Demo – 07. Ausschreibung.*
- [2] ÖNORM B 8110-3 Ausgabe: 2012-03-15 Teil 3: *Vermeidung sommerlicher Überwärmung.* Austrian Standards Institute, Österreichisches Normungsinstitut.
- [3] *Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG):* <https://www.wien.gv.at/statistik/lebensraum/tabellen/eis-hitze-tage-zr.html> [Download am 27. März 2018]
- [4] *Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG):* <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/news/hitzetage-werden-immer-haeufiger> [Download am 27. März 2018]
- [5] *Wetterkontor GmbH:* <https://www.wetterkontor.de/wetter-rueckblick/gebietsmittel/jahreswerte/deutschland> [Download am 27. März 2018]
- [6] *MeteoSchweiz; Statista estimates:* <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/667050/umfrage/waermste-jahre-in-der-schweiz> [Download am 27. März 2018]
- [7] DIN 1946-2:1994-01 (1994) *Raumluftqualität; Gesundheitliche Anforderungen.* Berlin: Beuth.
- [8] DIN EN ISO 7730:2003-10 (2003) *Ergonomie des Umgebungs-klimas Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und der lokalen thermischen Behaglichkeit.* Berlin: Beuth.

- [9] EN ISO 7730:2006-05-01(2006) *Ergonomie der thermischen Umgebung – Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit.* Berlin: Beuth.
- [10] DIN EN 15251 *Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik; Deutsche Fassung EN 15251:2007.* Berlin: Beuth 2012.
- [11] *Holm, A., Kuenzel, H. M., Sedlbauer, K.:* The Hygrothermal behaviour of rooms: Combining thermal building simulation and hygrothermal envelope calculation. 8. Int. IBPSA Conf. Eindhoven, Netherlands, 2003.
- [12] *Lengsfeld, K., Holm, A.:* Entwicklung und Validierung einer hygrothermischen Raumklima-Simulationssoftware WUFI®-Plus. Bauphysik 29 (2007), H. 3.
- [13] *Bagherian, B.:* Thermischer Komfort im Sommer – Ergebnisse aus dem Energiemonitoring eines mit Passivhauskomponenten sanierten Bürogebäudes. Bauphysik 38 (2016), H. 5.
- [14] *Schlitzberger, S., Kempkes, C., Maas, A., Schäfers, M.:* Einfluss der Wärmespeicherfähigkeit auf Heizwärmebedarf und thermischen Komfort Bauphysik 39 (2017), H. 1.
- [15] *Fanger, P. O.:* Thermal Comfort Analysis and Applications in Environmental Engineering, Techn. University of Denmark, Laboratory of heating and Air Conditioning Copenhagen. 1970.
- [16] *Bischof, W., Hellwig, R. T., Brasche, S.:* Thermischer Komfort – die extraphysikalischen Aspekte. Bauphysik 29 (2007), H. 3. DOI: 10.1002/bapi.200710029
- [17] *Dentel, A., Dietrich, U.:* Thermische Behaglichkeit – Komfort in Gebäuden Hafen City. Universität Hamburg, 2009.
- [18] DIN 4108-2:2001-03 (2001) *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz.* Berlin: Beuth.
- [19] *Werner, H.:* Sommerlicher Wärmeschutz nach neuer DIN 4108-2 am Beispiel verschiedener Baukonstruktionen. Bauphysik 25 (2003), H. 3.
- [20] *Frank W.:* Berichte aus der Bauforschung – Raumklima und Thermische Behaglichkeit. Berlin-München-Düsseldorf: Ernst & Sohn KG 1975.
- [21] *Hoffmann, S., Geyer, C., Kornadt, O.:* Der sommerliche Wärmeschutz eines sanierten Wohngebäudes aus den 1950er Jahren unter Berücksichtigung des Nutzerverhaltens. Bauphysik 26 (2004), H. 4.
- [22] *Kosfeld, R., Eckey, H. F., Türck, M.:* Deskriptive Statistik. Grundlagen – Methoden – Beispiele – Aufgaben. Berlin, Heidelberg: Springer 2016.
- [23] *Hollands, J., Tudiwer, D., Korjenic, A., Bretschneider, B.:* Greening Aspang – Messtechnische Untersuchungen zur ganzheitlichen Betrachtung mikroklimatischer Wechselwirkungen in einem Straßenzug einer urbanen Hitzeinsel. Bauphysik 40 (2018), H. 3, S. 105–119.

Autoren dieses Beitrages:

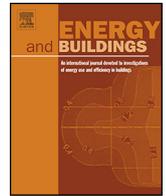
Univ.Ass. Mag.rer.nat. David Tudiwer, david.tudiwer@tuwien.ac.at
 Vera Höckner BSc, vera.hoeckner@gmx.at
 Associate Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Azra Korjenic, azra.korjenic@tuwien.ac.at

Alle

Technische Universität Wien,
 Institut für Hochbau und Technologie
 Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz
 Karlsplatz 13/206-2
 A-1040 Wien

Vierte Publikation

STATUS	Veröffentlicht
Titel: (Deutsch)	Die Auswirkungen von Innenraumbegrünung auf Feuchtigkeit, Schimmelsporen und die CO ₂ -Konzentration
Original Titel: (Englisch)	The effect of an indoor living wall system on humidity, mould spores and CO ₂ -concentration
Autorinnen:	David Tudiwer; Azra Korjenic
ISBN/ISSN:	ISSN: 0378-7788 ; DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.04.048
Sprache:	Englisch
Schlagwörter:	Indoor Greening ; Mould ; Indoor Climate ; Air Comfort ; Air Humidity
Quelle:	Energy & Buildings, 1 July 2017, Vol.146, pp.73-86 [Peer Reviewed Journal]



The effect of an indoor living wall system on humidity, mould spores and CO₂-concentration



David Tudiwer*, Azra Korjenic

Vienna University of Technology, Institute for Building Construction and Technology, Research Centre of Building Physics and Sound Protection, Karlsplatz 13/206-2, 1040 Vienna, Austria

ARTICLE INFO

Article history:

Received 30 December 2016
Received in revised form 5 April 2017
Accepted 17 April 2017
Available online 22 April 2017

Keywords:

Indoor greening
Mould
Indoor climate
Air comfort
Air humidity

ABSTRACT

This paper shows the investigation of a living wall system inside a classroom. Humidity, temperature and the CO₂-concentration were measured in two classrooms with the same volume. One of the classrooms is equipped with a living wall system. Air temperature and relative air humidity were investigated for 10 months including summer and winter months. In winter the increased relative air humidity of the greened classroom improved the comfort level. In summer mould spores were also investigated in the classrooms and outdoor. Spores from *Cladosporium*, *Penicillium*, *Aspergillus versicolor*, *Alternaria* and other were found, but the concentration of the mould spores in the greened classroom was below the mould spores concentration in the not greened classroom or outside. The volume of the mass of the plants is about 1 % of the classroom's volume. But still a small CO₂-reduction because of the plants was measured.

© 2017 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

While the effect of outdoor greening on its surrounding microclimate is investigated in many papers already [1–8], the effect of indoor greening on the indoor climate of the room is less known. Usually the effects of dust and volatile organic compounds (VOCs) are investigated of indoor pot plants [9–11]. In [11] the investigations were focused on the reduction of volatile organic compounds and the CO₂-concentration because of pot plants. It turned out that there is a high capacity for pot plants to remove VOCs. The CO₂-concentration was researched in a laboratory chamber. The result was, that there is a very low reduction of CO₂ because of pot plants. The uptake rate for these plants was measured to be 2.8 mg CO₂ m⁻³ m⁻² h⁻¹. But there were no investigations of the effect of living wall systems on the indoor climate in this paper. This is investigated in the present paper, by measurements in a school in Vienna, Austria.

The spatial conditions in schools have a significant influence on behaviour, welfare and on the performance of students and teachers. In most cases the conditions of the indoor climate in classrooms is not optimal what affects health and concentration of the students in a negative way [12,13]. For example the parameters temperature, relative air humidity, mould spores, and CO₂-concentration need to

be in a comfortable range. Each of them can influence the power of concentrations or cause illnesses when the comfortable range is exceeded [13].

There are several publications about the optimal temperature and the optimal humidity in houses and rooms [14–16]. In [16] it is evaluated that the temperature should range from 17 °C to 25.5 °C. The comfort area of relative air humidity depends on the temperature. It should never fall below 18 % or rise above 87 % [16]. The “comfortable”, “still comfortable” and “not comfortable” ranges of air temperature and relative humidity are shown in Fig. 1.

Critics of indoor greening claim, that indoor greening might cause mould. No articles are known to the authors which would prove that. Even though many building materials as wallpapers [17] were investigated already, a research concerning mould that is caused by indoor greening is not known. Mould is not healthy and its effects on the human health are investigated for many years already [18,19]. Motivated by this, according measurements have been carried out details in chapter 2.

In [20] international standards for indoor air are explained. For high air quality the CO₂-concentration should not rise above 400 ppm, medium air quality is between 400 ppm and 600 ppm, acceptable air quality is between 600 ppm and 1000 ppm and low indoor air quality is above 1000 ppm. Measurements that were taken within the investigations for this paper showed, that 1000 ppm are reached in the investigated classrooms every day, already after only 20 min. More than 2.000 ppm cause tiredness, headache and common discomfort. But in classrooms the CO₂-concentration exceeds

* Corresponding author.

E-mail address: david.tudiwer@tuwien.ac.at (D. Tudiwer).

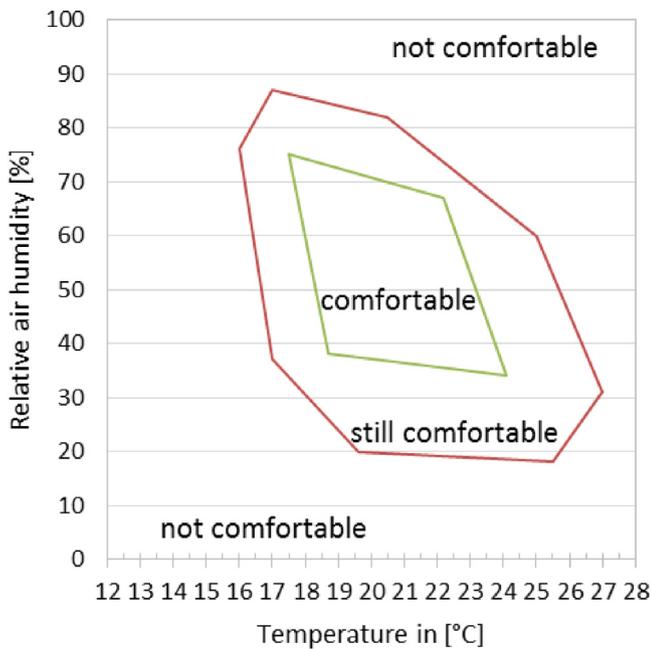


Fig. 1. Range of “comfortable”, “still comfortable” and “not comfortable” temperature and humidity in a room [16].

this values as well [20–23]. In the present paper it is investigated, if indoor greening could be a chance to reduce the indoor CO₂-concentration of occupied rooms.

2. Methods

2.1. Location

The research has been carried out in a school building built before 1900 in Vienna, Austria. It is situated in Vienna, Austria in urban surrounding, see Fig. 2. Both investigated classrooms (greened and not greened) are in the third floor and their windows are faced to south. Both of them have a volume of around 200 m³ (greened classroom about 202 m³ and not greened about 200 m³) and both classes do have 24 students. The greened classroom has a length of 8.47 m and is 6.45 m wide. The height of the classroom is 3.70 m. The not greened classroom is 8.47 m long and 6.28 m wide. Its height is 3.73 m. Based on this parameters the classrooms are similar and can be compared.

The air tightness of the rooms need also to be considered for the comparison. It is shown in chapter 2.5.

2.2. Living wall system

The living wall system is installed on a wall in the classroom (see Fig. 3). The size of the living wall system is 5488 m². The coverage of the plants during the measurement of the CO₂-concentration was 71.3 % and the volume of the mass of the plants was 2.1 m³. This is about 1 % of the volume of the room.

The living wall system is watered by an automatic watering system and lighted by LEDs.

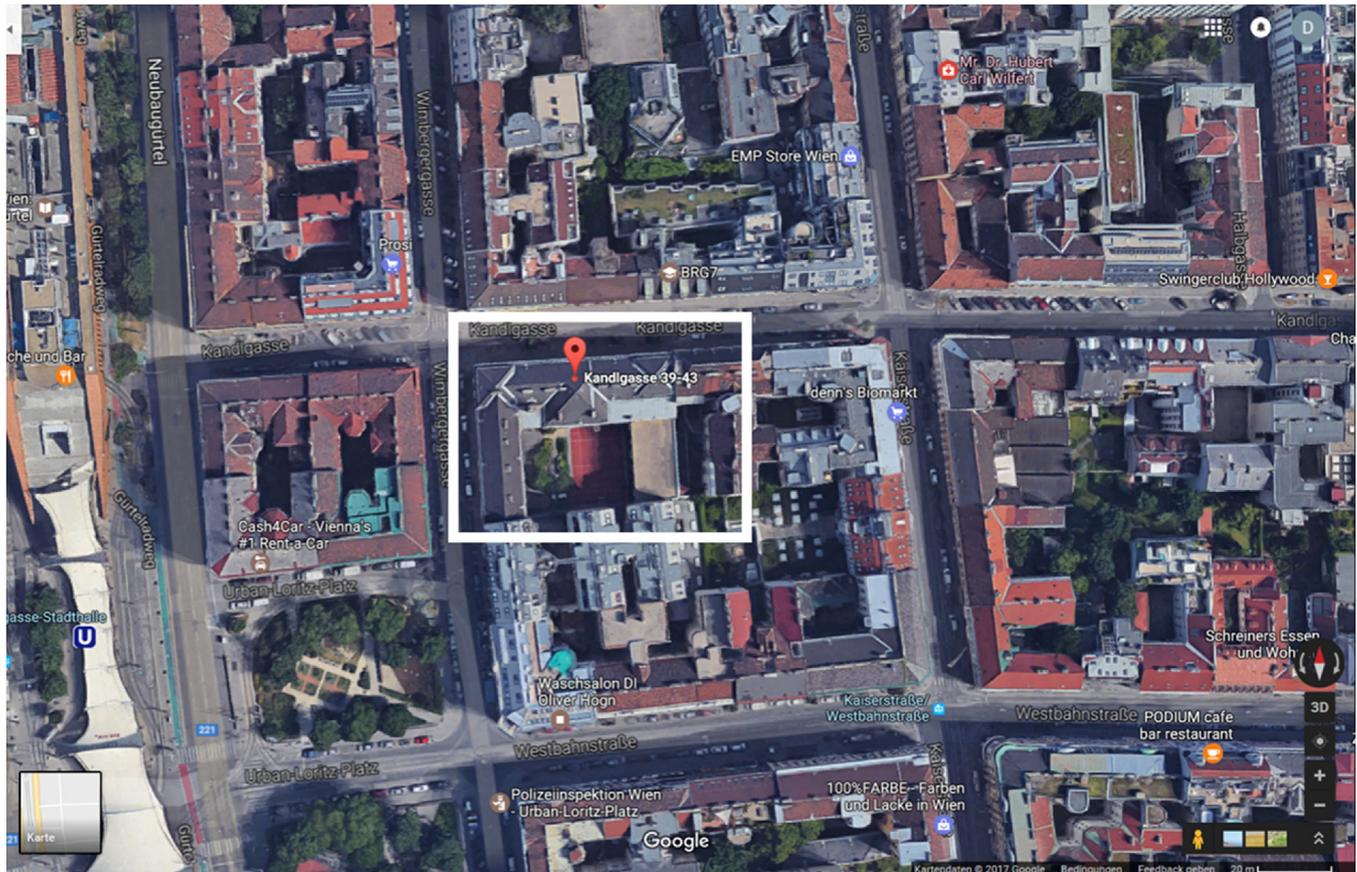


Fig. 2. Locations of the School building in Kandlgasse in Vienna, Austria (Google maps).



Fig. 3. Living wall system in the greened classroom.



Fig. 4. Lin Picco A05. Left: With protective cover. Right: The chip without the protective cover.

2.3. Measurement of air temperature and relative air humidity

The air temperature and the relative air humidity were measured in both classrooms for a period of each 5 min. The start of the measurements took place from February 2016 until December 2016. July and August were not used for analyses due to school holidays.

The installed sensors were Lin Piccos A05. They measure the air temperature and the relative air humidity. Pictures of that sensor are shown in Fig. 4.



Fig. 5. The MAS-100 to collect the airborne germ.

2.4. Mould spores measurement

The mould spores were measured in the greened classroom, the not greened classroom, outdoor at the street and outdoor in the inner court yard. The airborne germ were collected with the MAS-100 (shown in Fig. 5).

The nominal air stream while collecting a specimen was 100 l per minute ($\pm 2.5\%$). The air was ventilated through the MAS-100 and the airborne germ were collected for a duration of one minute for three times at each room (Fig. 6) and at the two measuring points outside (see Fig. 7). For the culture medium malt extract with chloramphenicol was used. Gentamicin and dichloran-glycerin (DG18)-agar was used for the insulation of the mould.

After collecting the specimen the cultural medium was hatched for one week by 25 °C. Then the concentration of the mould spores could be evaluated. This method is based on [24].

The measurements were taken in the middle of the room at a height of 1.5 m above the floor. Outdoor the measurements were also taken at a height of 1.5 m above the ground.

The whole measurement including the analyses were done by a company called “IBO Innenraumanalytik OG”. It is a company that investigates the interactions between human health, buildings and the environment. It is in collaboration with the IBO, the Austrian Institute for Healthy and Ecological Building.

2.5. CO₂-measuring

The CO₂-concentration was measured during the same time as relative air humidity and air temperature in the classrooms. First measurements revealed that the data from the different classrooms were not comparable. The CO₂-concentration is influenced by too many factors which had not been similar enough. Therefore the following measuring campaigns have been developed: In July and August 2016 pupils were on holiday. The airtightness of the class-



Fig. 6. Left: Green wall in the greened classroom. Middle: Measurement in the greened classroom. Right: Measurement in the not greened classroom. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)



Fig. 7. Left: Measurement at the street in front of the main entrance of the school (exactly 3 floors below the windows classrooms). Right: Measurement in the inner courtyard of the school.



Fig. 8. Blower door equipment in the greened classroom.

rooms were ascertained by a blower-door test (see Fig. 8). A fan was inserted into the doorframe of the classrooms. It blew the air out of the classroom and produced a constant depression by 50 Pa. Because of the depression, air streams inside the room through leaks.

By considering the speed of the fan and the depression of the room the airtightness of the classroom can be calculated by the so called “ n_{50} -value”. This n_{50} -value is the amount of exchanges of the whole air from the room based on a 50 Pa depression. The n_{50} -value is smaller when the room is more airtight. It is calculated by the volume of incoming air through the leaks and the volume of the room based on 50 Pa depression (see Equ. (1)).

n_{50} = Air exchange rate of the room. Amount of, the exchange of the whole air in the room is exchanged within one hour by a depression of 50 Pa [1/h]

V_{50} = Volume of the air that comes into the room through the leaks [m^3/h]

V = Volume of the room [m^3]

$$n_{50} = \frac{V_{50}}{V}$$

Eq. (1): n_{50} -value calculation as scale of airtightness.

A leak detection was performed using joss sticks and the leaks were sealed to increase air tightness of both rooms (see Fig. 9). After sealing the leaks, the n_{50} -values for both classrooms were 3.0/h.

During the measurement of airtightness, pupils and teachers were on holiday, so that both classrooms could be measured simultaneously. The impact of the air is not only influenced by the airtightness. Also weather (wind) influences the air flow through the building. So it was important to investigate both selected classrooms at the same time.

Two CO_2 -Sensors (Vaisala GMW22) were installed into each classroom (see Fig. 10 middle). The measuring range is from 0 ppm up to 2000 ppm. The accuracy is about $\pm 2.5\%$. The data were measured and logged each 10 s. The position of the sensors were identical in both classrooms. A further sensor was located at the corridor in front of the classrooms, to measure the CO_2 -concentration of the surrounding area of the classrooms. Two fans circulated the air in the classroom, so that the CO_2 was distributed equally (see Fig. 10 left). A CO_2 -pressure cylinder (see Fig. 10 right) was installed to put CO_2 into the classrooms until all sensors measured a concentration of 2.000 ppm. Then the CO_2 -input was stopped and the reduction of the CO_2 -concentration was measured.

It is known, that the reduction of CO_2 because of plants is in a small scale [10]. Little mistakes in the measuring can cause wrong assumptions. Especially when the volume of the plants is only about 1 % of the volume of the classroom (see chapter 2.2). Because of that the measurement was repeated for four times. This means that the whole measurement cycle was repeated, that the CO_2 was induced and its reduction was measured for four times.

3. Results

3.1. Relative air humidity and air temperature

The relative air humidity and air temperature were measured over 10 months in both classrooms during the same time. The data were logged each 5 min. The following chapters (chapter 3.1.1–chapter 3.1.3) show the results of the measurement for the whole measurement period, winter months and summer months.



Fig. 9. Examples for the sealed leaks in the classrooms.



Fig. 10. Left: Fans in the classroom to distribute the CO₂ equally in the room. Middle: CO₂-sensors in two different heights. Right: CO₂-pressure cylinder.

3.1.1. Whole measurement period

The relative air humidity did not rise above 70 % during the whole measurement period (see Figs. 11 and 12). The classrooms tended to be too hot. This was the most common reason, why the parameters air temperature and relative air humidity were “not comfortable”. By comparing the two figures it is possible to see, that the relative air humidity increases because of the greening.

In Fig. 11 the not greened classroom is shown. The most common reasons, the climate is not in the “comfortable” range are dryness and heat. Fig. 12 shows the greened classroom. Here the only reason (with the exception of very few measurements) why the climate is not in the “comfortable” range is heat. The dryness occurs very rare. It is visible that the plants emit humidity, especially when the air is dry.

3.1.2. Winter months

When only winter months are considered, more measurements showed cooler and more “comfortable” data (see Figs. 13 and 14). Again it is visible that the plants emit humidity to the air. As too high temperatures occur seldom during winter months, dryness is the most common reason for the climate to be not in the “comfortable” range. As the windows can be opened and the generators of the heating generators can be turned off anytime, it would have been possible that hardly for the whole time the climate in the greened classroom is in the “comfortable” range for winter months. In the not greened classroom the dryness causes a reduction of the “comfortable” climate.

Table 1 shows the amount of measurements taken in the classrooms, divided into categories of climate comfort. It is shown, that there were only very few times in winter, when the air temperature and relative air humidity were “not comfortable”. The “still comfortable” times need to be considered. As mentioned before, in the not greened classroom they are mostly caused by dry air. In this case the greening increases the amount of “comfortable” measurements, because of the evapotranspiration from the plants. In some cases the air temperature is too hot, caused by heating. This regards both classrooms, the greened and the not greened. Also the data when the classrooms were occupied and not occupied are divided. The focus is on the data, of the occupied rooms. They show the indoor climate that surrounds the pupils and the teachers. This is why the indoor climate of the classrooms is shown in Figs. 15 and 16 while occupation.

Figs. 15 and 16 show the climate while the classrooms are occupied. In the not greened classroom the air is still too dry. On the one hand human emit humidity while the classrooms are occupied. But on the other hand the windows of the classrooms are not opened, when they are not occupied. All in all the humidity of the occupied and the not occupied rooms are similar. Again only the temperature causes that the climate in the greened classroom is “not comfortable”.

3.1.3. Summer months

Figs. 17 and 18 show the measurements during in April, May, June and September. It is visible, that the most common reason for a “still comfortable” or “not comfortable” air climate is again

Table 1

Amount of measurements in the classrooms in February, March, October and November divided in categories of indoor climate comfort.

Amount of measurements		Comfortable	Still comfortable	Not comfortable	Still comfortable or Not comfortable
All Data	Not greened	15 738	14 723	3	14 726
All Data	Greened	26 542	3899	23	3922
Occupied	Not greened	6886	6872	3	6875
Occupied	Greened	10 838	2837	23	2860
Not occupied	Not greened	8852	7851	0	7851
Not occupied	Greened	15 704	1062	0	1062

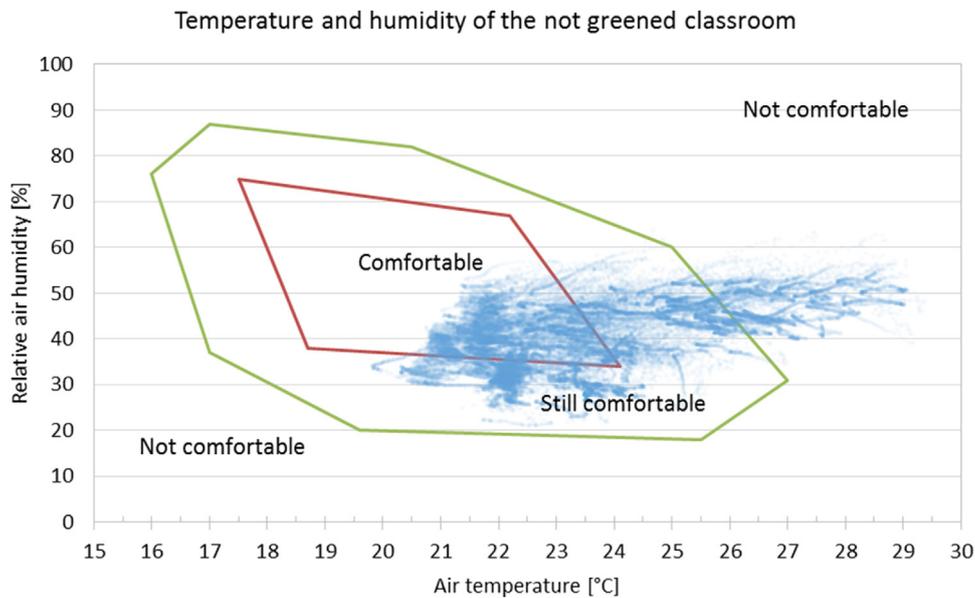


Fig. 11. Air temperature and relative air humidity in the not greened classroom, all data.

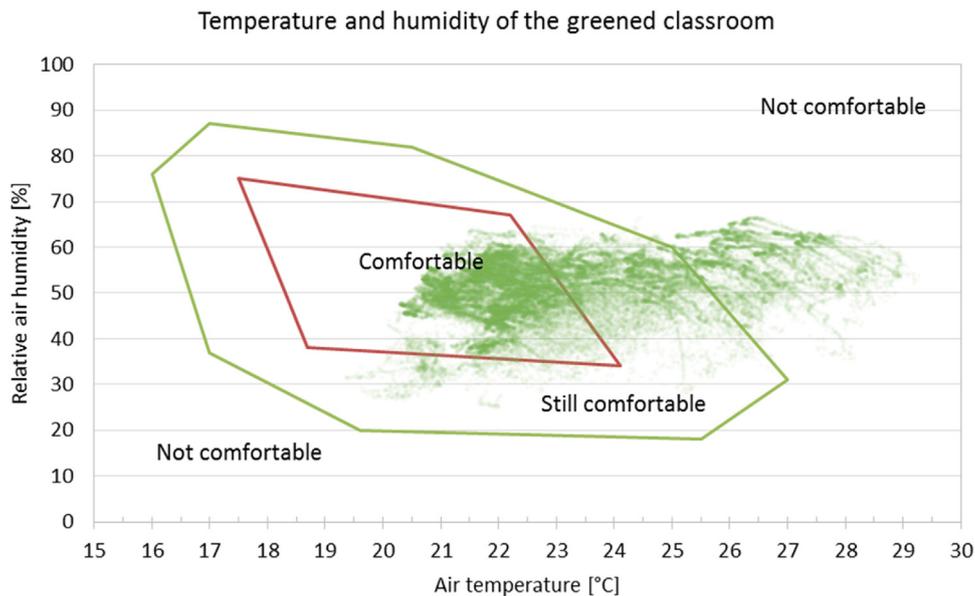


Fig. 12. Air temperature and relative air humidity in the greened classroom, all data.

Table 2

The amount of the measurements in the classrooms during the months April, May, June and September.

Amount of measurements		Comfortable	Still comfortable	Not comfortable	Still comfortable or Not comfortable
All Data	Not greened	9201	16 914	8704	25 618
All Data	Greened	11 231	13 221	10 367	23 588
Occupied	Not greened	2974	8605	4722	13 327
Occupied	Greened	4292	6688	5181	11 869
Not occupied	Not greened	6227	8309	3982	12 291
Not occupied	Greened	6939	6533	5186	11 719

high temperature. Dryness is not as relevant in summer as in winter. But still “comfortable” climate occur more often in the greened classroom than in the not greened classroom. This is also visible in Table 2.

In both cases, the greened classroom and the not greened classroom “still comfortable” and “not comfortable” climate dominate

the indoor climate of the classrooms. While the rooms are occupied the climate is more often “not comfortable” than “comfortable”. This is also true for the greened and the not greened classroom. As the dryness in both classrooms does not cause a “not comfortable” climate (see in Figs. 17 and 18) the amount of all “not comfortable” measurements in Table 2 is because of the high temperature. In

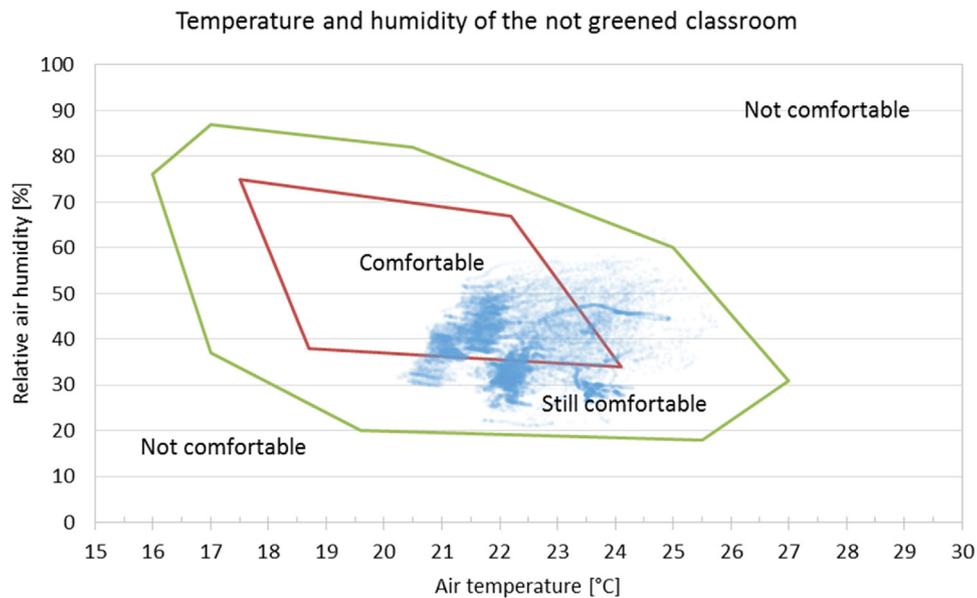


Fig. 13. Air temperature and relative air humidity in the not greened classroom, in February, March, October and November.

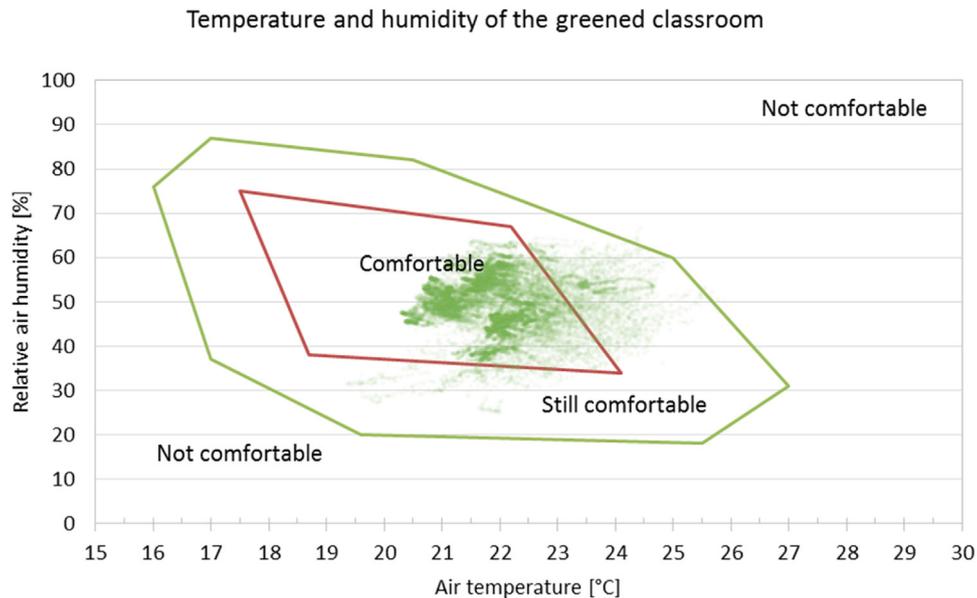


Fig. 14. Air temperature and relative air humidity in the greened classroom, in February, March, October and November.

winter the high temperatures can be reduced by turning off the generator, in summer the temperature depends highly on shadowing and ventilating during night. It cannot be said if indoor greening can reduce the temperature of the room during summer within this paper. Outdoor greening reduces the air temperature because of evapotranspiration. Indoor the humidity of the evapotranspiration causes a higher relative air humidity that cannot exit the room (as long as the windows are closed). The energy stays inside the room while outdoor it leaves the area of the micro climate. The user behaviours of the pupils and teachers in the room are crucial.

Even though it cannot be said within this paper, if greening influences the temperature to higher comfort, it is a result that the combination of temperature and relative air humidity gets influenced towards higher comfort. The amount of measurements in the “comfortable” range is higher in the greened classroom. When the rooms are occupied, the amount of the “comfortable” measurements is higher by 44 % in the greened classroom than in the not

greened classroom. Also when the classrooms are not occupied, the amount of measurements in the “comfortable” range is higher (see in Table 2).

Data from July and August have not been considered, due to school holidays and corresponding investigations uncertainties as for example maintenance, the blower door tests and CO₂-measurements.

3.2. Mould spores

Chapter 3.1 shows that relative air humidity increases because of an indoor living wall system. This chapter shows the results of mould spores concentration measurements. They are shown in Table 3. The concentrations are shown in the unit CFU (colony forming units)/m³.

The concentration of mould spores in the greened classroom is lower than outdoor in the surrounding of the school. Concerning

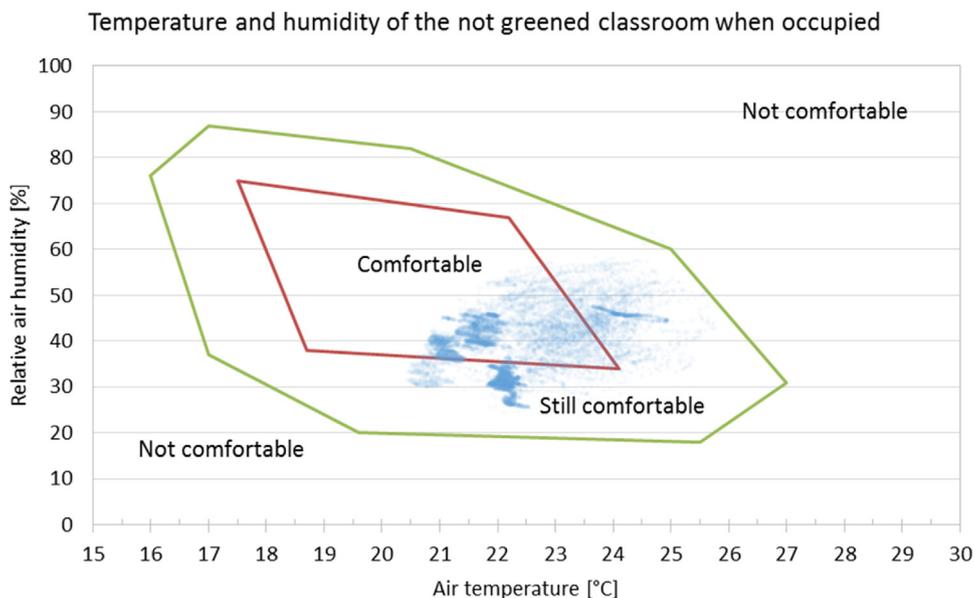


Fig. 15. Air temperature and relative air humidity in the not greened classroom, in February, March, October and November, while occupied.

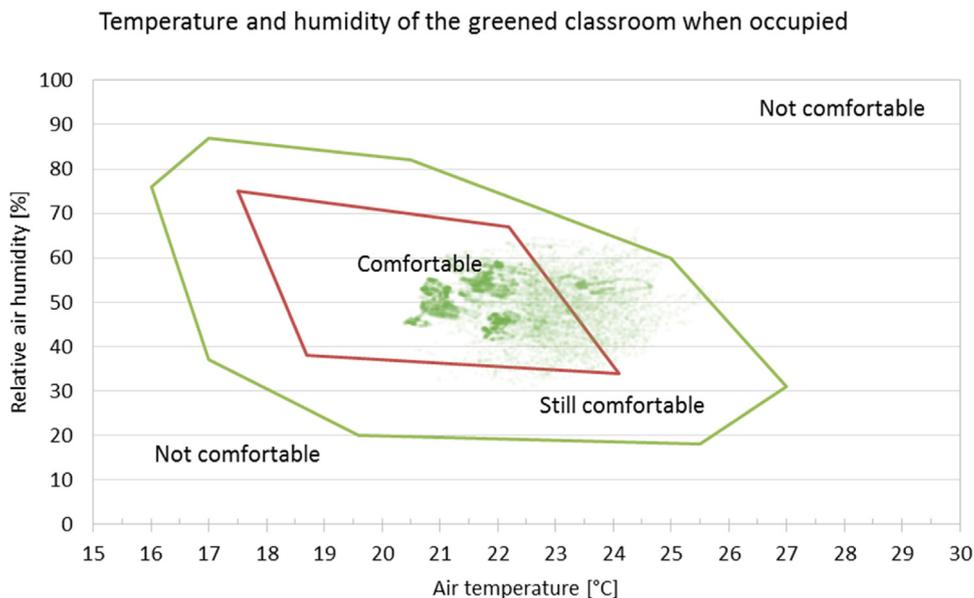


Fig. 16. Air temperature and relative air humidity in the greened classroom, in February, March, October and November, while occupied.

Table 3
Found mould concentrations at the measured places.

Place	Air temperature	Relative air humidity	Concentration of mesophilic mould [CFU/m ³]	Concentration of thermophilic mould [CFU/m ³]	Identified mould
Greened classroom	24.9	51	160	50	<i>Penicillium</i> spores 55 % <i>Cladosporium</i> 30 % Others 15 %
Not greened classroom	25.0	38	150	100	<i>Cladosporium</i> 45 % <i>Penicillium</i> spores 40 % <i>Aspergillus versicolor</i> 5 % <i>Wallemia sebi</i> 10 %
Outdoor street	20.4	45	1.000	50	<i>Penicillium</i> spores 75 % <i>Cladosporium</i> 20 % Others 5 %
Outdoor inner court yard	21.1	37	1.100	110	<i>Cladosporium</i> 55 % <i>Penicillium</i> spores 35 % <i>Aspergillus versicolor</i> and <i>Alternaria</i> together 5 % Others 5 %

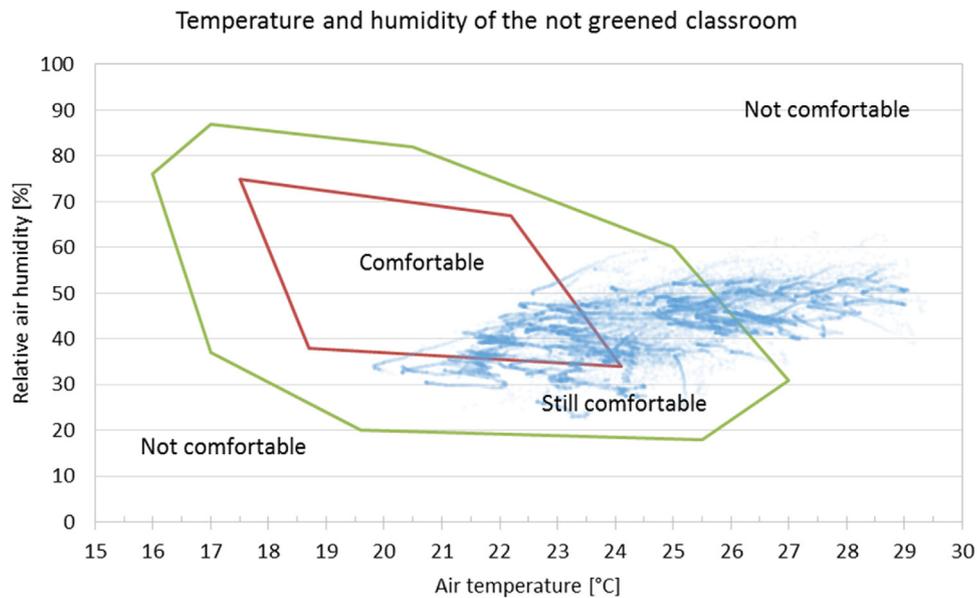


Fig. 17. Air temperature and relative air humidity in the not greened classroom, during the months: April, May, June and September.

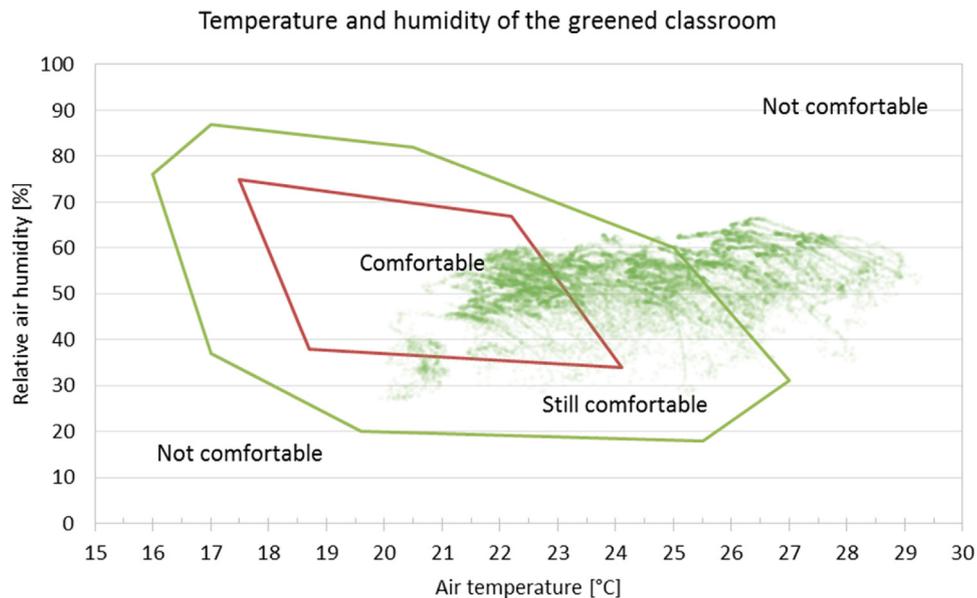


Fig. 18. Air temperature and relative air humidity in the greened classroom, during the months: April, May, June and September.

to the definition of [25] this means that a source in the room is “unlikely”. “Unlikely” is the lowest risk level of an indoor source that is defined in [25]. In addition, the not greened classroom has a higher concentration of thermophilic mould spores, even though the air humidity in the greened classroom is higher. The measurements were taken in June. Based on the data of Table 3 a higher risk of mould because of indoor greening cannot be found because the winter months are dryer.

3.3. CO₂-concentration

In this chapter the measured data of CO₂-concentration are analysed. The different measurements of the four replicates are called “measurement 1”, “measurement 2”, “measurement 3” and “measurement 4”.

The results of the first measurement are shown in Fig. 19. On the corridor, the CO₂-concentration stays quite equal. In the mea-

sured classrooms the CO₂-concentrations reduces to a lower level. Most of the reduction is caused by leaks in the rooms. But it is visible, that the two sensors in the greened room (“Greened room 1” and “Greened room 2”) show a faster reduction of the CO₂-concentrations, than the two sensors in the not greened room (“Not greened room 1” and “Not greened room 2”). At the beginning, the curves are falling steeply and they are flattening in both rooms when the CO₂-concentration in the rooms gets closer to the corridor CO₂-concentration. Based on this it can be said, that the reduction of the CO₂-concentration is mostly based on the leaks in the rooms and not on the plants. However, the plants still have an effect.

To compare the reduction of the CO₂-concentration an average of the investigated hours was calculated by Eq. (2). This way it was possible to compare the speed of the reduction of CO₂-concentration between the greened and the not greened classroom. In average the reduction of CO₂-concentration during one hour is shown in Tables 4–10 for the different measurements. Table 4

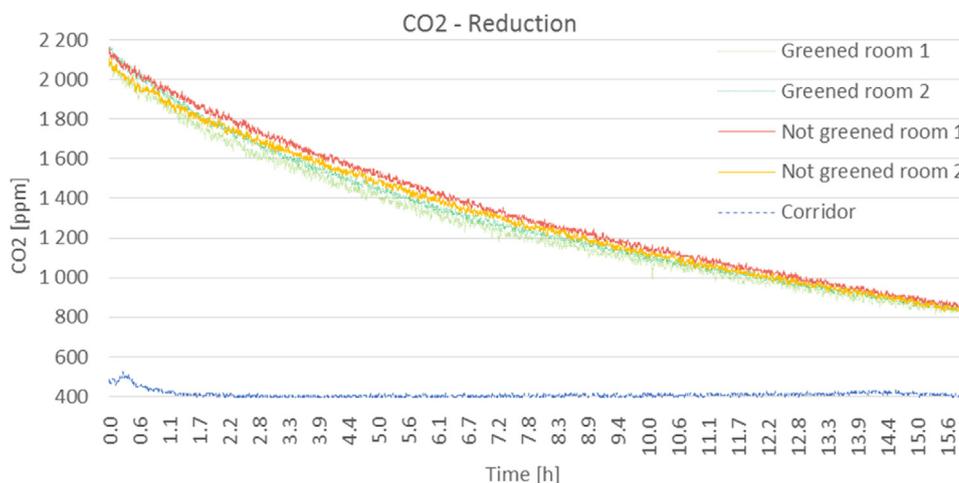


Fig. 19. The reduction of CO₂ during the first 16 h after inducing CO₂, measurement 1.

Table 4

Averaged CO₂-Reduction in ppm/hour for the first 16 h, measurement 1.

	Greened Room 1	Greened Room 2	Not greened Room 1	Not greened Room 2
Averaged CO ₂ -Reduction of one hour [ppm]	-74.50	-78.17	-77.68	-74.94
Averaged CO ₂ -reduction of one hour [ppm] (both sensors)	-76.34		-76.31	
Compared to the not greened room				100.04%

Table 5

Averaged CO₂-Reduction in ppm/hour for the first hour, starting from 1900 ppm, measurement 1.

	Greened Room 1	Greened Room 2	Not greened Room 1	Not greened Room 2
Averaged CO ₂ -Reduction of one hour [ppm]	-150.00	-170.00	-131.00	-111.00
Averaged CO ₂ -reduction of one hour [ppm] (both sensors)	-160.00		-121.00	
Compared to the not greened room				132.23%

Table 6

Averaged CO₂-Reduction in ppm/hour for the first 4 h, starting from 1900 ppm, measurement 1.

	Greened Room 1	Greened Room 2	Not greened Room 1	Not greened Room 2
Averaged CO ₂ -Reduction of one hour [ppm]	-115.96	-114.06	-103.06	-102.22
Averaged CO ₂ -reduction of one hour [ppm] (both sensors)	-115.01		-102.64	
Compared to the not greened room				112.06%

Table 7

Averaged CO₂-Reduction in ppm/hour for the first 8 h, starting from 1900 ppm, measurement 1.

	Greened Room 1	Greened Room 2	Not greened Room 1	Not greened Room 2
Averaged CO ₂ -Reduction of one hour [ppm]	-91.84	-90.85	-88.48	-87.64
Averaged CO ₂ -reduction of one hour [ppm] (both sensors)	-91.35		-88.06	
Compared to the not greened room				103.73%

Table 8

Averaged CO₂-Reduction during 1 h for the first 8 h, starting from 1900 ppm, measurement 2.

	Greened Room 1	Greened Room 2	Not greened Room 1	Not greened Room 2
Averaged CO ₂ -Reduction of one hour [ppm]	-89.35	-86.68	-86.13	-86.43
Averaged CO ₂ -reduction of one hour [ppm] (both sensors)	-88.02		-86.28	
Compared to the not greened room				102.01%

Table 9

Averaged CO₂-Reduction during 1 h, for the first 8 h starting from 1900 ppm, measurement 3.

	Greened Room 1	Greened Room 2	Not greened Room 1	Not greened Room 2
Averaged CO ₂ -Reduction of one hour [ppm]	-66.84	-69.79	-64.77	-63.22
Averaged CO ₂ -reduction of one hour [ppm] (both sensors)	-68.31		-64.00	
Compared to the not greened room				106.75%

Table 10

Averaged CO₂-Reduction during 1 h for the first 8 h, starting from 1900 ppm after reaching 1900 ppm, measurement 4.

	Greened Room 1	Greened Room 2	Not greened Room 1	Not greened Room 2
Averaged CO ₂ -Reduction of one hour [ppm]	-62.93	-58.14	-59.65	-59.66
Averaged CO ₂ -reduction of one hour [ppm] (both sensors)	-60.54		-59.65	
Compared to the not greened room				101.48%

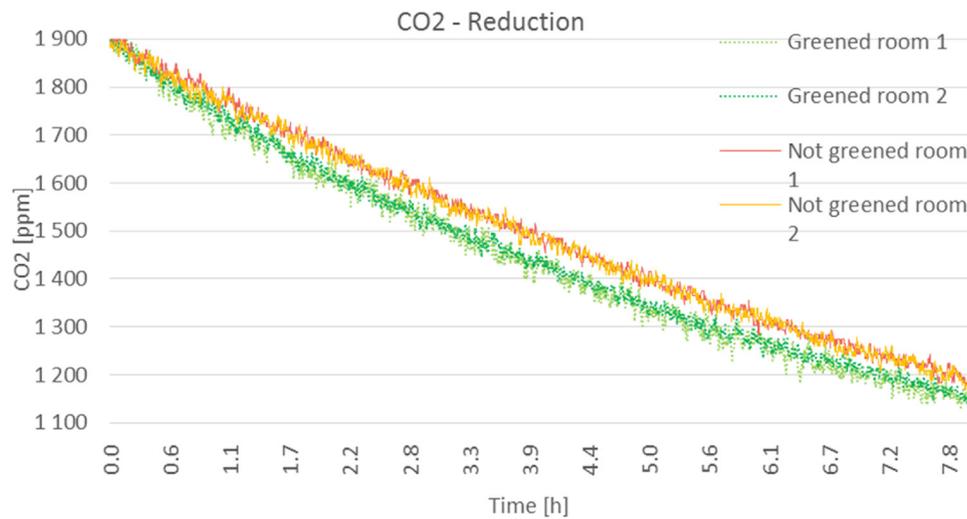


Fig. 20. The reduction of the CO₂-concentration, for the first 8 h after reaching 1900 ppm, measurement 1.

shows the measurement for 16 h. It is visible that there is hardly no difference between the greened and the not greened classroom. But by watching Fig. 19 it can be seen, that this is not true for the whole time. In the beginning, the reduction of CO₂-concentration is faster than in the end. This might be caused by the flattening of the curves. A higher CO₂-concentration causes a faster reduction.

The calculation of the averaged CO₂-reduction of one hour is shown in Eq. (2).

Δ = Average of all considered CO₂-reductions/hour [ppm]

μ_n = The “n” measurement value [ppm]

α = The amount of measurement values which are considered

$$\Delta = \sum_{n=361}^{n=\alpha} \frac{(\mu_n - \mu_{n-360})}{\alpha - 360}$$

Eq. (2): The calculation of the averaged CO₂-reduction during one hour.

To make another comparison, the curves were investigated from the same point of CO₂-concentration. As the CO₂-concentration in each room was increased by the CO₂-pressure cylinder up to more than 2000 ppm, the reduction of the CO₂-concentration was compared for 8 h, starting from 1900 ppm. This way all sensors started at the same concentration (see Fig. 20). Table 5–7 show the results of Measurement 1. Each table shows a different range of time after the reduction of CO₂-concentration is below 1900 ppm. Table 5 shows the reduction of CO₂-concentration in both classrooms, only for the first hour after reaching 1900 ppm. Table 6 shows the results of a longer range of time than Table 5, because the first 4 h were considered. Table 7 shows the first 8 h after reaching 1900 ppm. It is visible that the reduction of CO₂-concentration is faster within the first hours. The same is true for the increase of the CO₂-reduction because of the living wall system.

It is visible, that the CO₂-concentration in the greened classroom gets reduced faster by 3.73 % compared to the not greened classroom.

The measurements 2, 3 and 4 are shown in the following figures and tables. Fig. 21 and Table 8 show the reduction during the second measurement. The reduction during the first 8 h after reaching 1900 ppm is higher in the greened classroom by 2.01 %.

Fig. 22 and Table 9 show the reduction during measurement 3. It is higher in the greened classroom is higher by 6.75%.

Measurement 4 shows a similar result. Here the reduction in the greened classroom is also higher by 1.48 %.

Table 11

CO₂-reduction of the greened room compared to the not greened room, for the first 8 h, starting from 1900 ppm.

	Speed of reduction compared to the not greened room [%]
Measurement 1	3.73
Measurement 2	2.01
Measurement 3	6.75
Measurement 4	1.48
Average	3.49

The outcome of this chapter is summarized in Table 11. In average of the 4 measurements the reduction of the CO₂-concentration is faster in the greened than in the not greened classroom by 3.5%.

It is visible that the CO₂-reduction gets reduced faster in the greened room. But there can also be seen, that the “More Reduction” of the greened classroom fluctuates. This fluctuation might be caused by the weather especially the wind. The classrooms were not airtight. They had an n₅₀-value of 3/h. Wind causes pressure differences on different parts of the building and its surrounding. This brings on different airstreams through the leaks of the building surface.

As both rooms have a similar volume and size, the same air tightness, are faced into the same direction on the same level, the faster reduction of the high CO₂-concentration can only be caused by the plants. Because the plants are the only significant difference that effects the CO₂-concentration (Fig. 23).

4. Discussion

The greened classroom is greened by a living wall system that is 2.1 m³ and the greened classroom is 202 m³. This means that the volume of the living wall system is only about 1 % of the room volume. Still there is an effect to the indoor climate as this paper shows. In summer the effect is smaller than in winter. In this paper it cannot be said, if indoor greening can reduce the indoor temperature of the room in summer. It is important to find this out within following researches. Other behaviour of the users might lead to a cooling effect of the plants inside the room.

The mould spores were measured in June. It might happened, that mould only occurs in winter. But in this case winter should also be investigated because the building is old and not very well insulated. Cold surfaces on the windows and the external walls

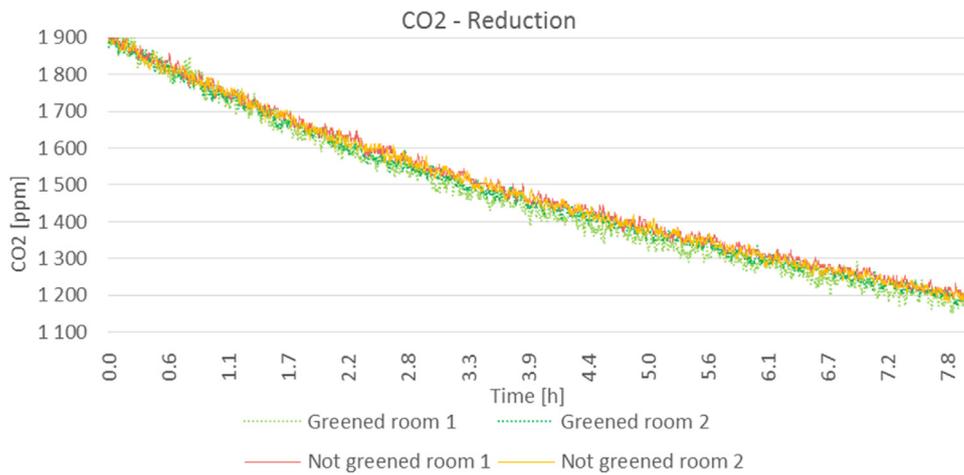


Fig. 21. The reduction of the CO₂-concentration, for the first 8 h, starting from 1900 ppm, measurement 2.

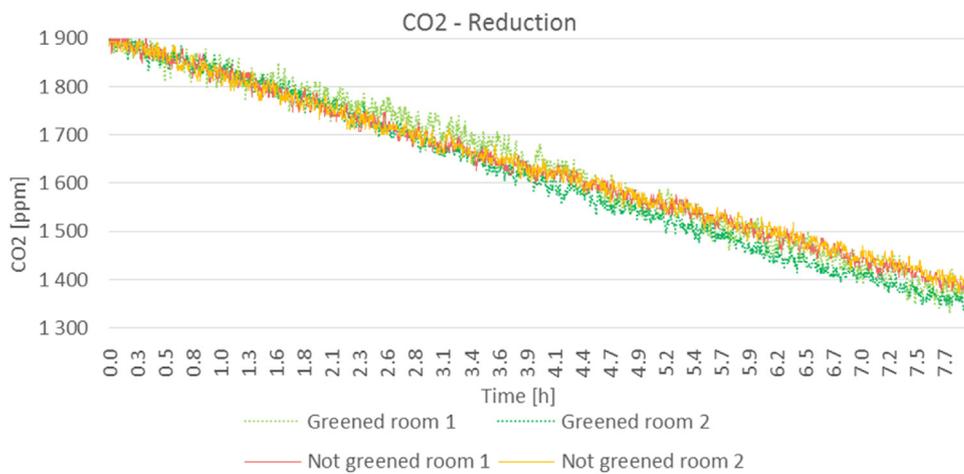


Fig. 22. The reduction of the CO₂-concentration, for the first 8 h after reaching 1900 ppm, measurement 3.

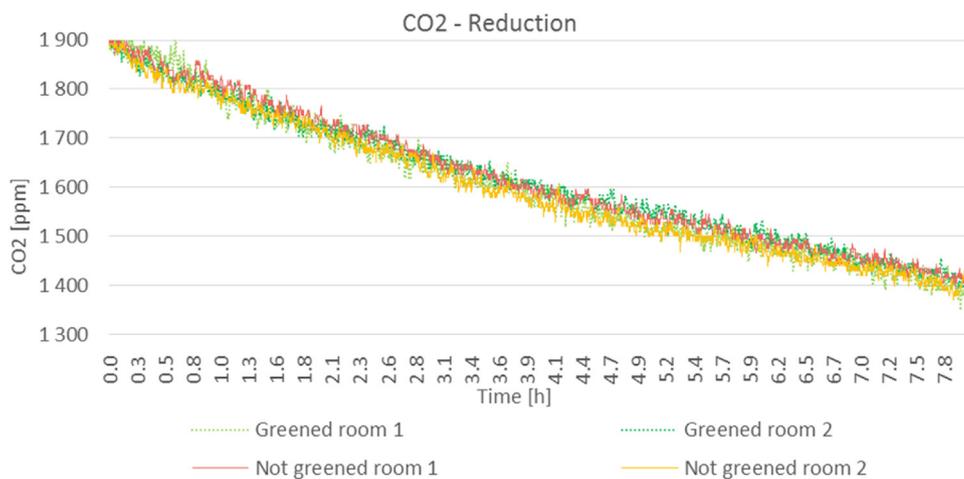


Fig. 23. The reduction of the CO₂-concentration, for the first 8 h, starting from 1900 ppm, measurement 4.

could lead to condensation, wetness and mould. This will also be investigated soon.

The reduction of the CO₂ concentration, which is caused solitary by the plants, is low. The main part of the reduction in this trial is caused by leakages. The classrooms have the same airtightness what makes them comparable considering the gas reduction. The greened classroom and the not greened classroom are also in the

same floor and its windows head into the same direction. They also have the same size.

The investigations of humidity, mould spores and CO₂-concentrations in a room with indoor greening are not completed yet. This paper is one of the first steps to get to know the possibilities how indoor greening could be used in future buildings.

Table 12
Share of times in winter concerning comfort of humidity and temperature.

Share of times in winter						
Filter	Room	Comfortable	Still comfortable	Not comfortable	Still comfortable or Not comfortable	Amount of measurements
All Data	Not greened	51.66%	48.33%	0.01%	48.34%	30464
All Data	Greened	87.13%	12.80%	0.08%	12.87%	30464
Occupied	Not greened	50.04%	49.94%	0.02%	49.96%	13761
Occupied	Greened	79.12%	20.71%	0.17%	20.88%	13698
Not occupied	Not greened	53.00%	47.00%	0.00%	47.00%	16,703
Not occupied	Greened	93.67%	6.33%	0.00%	6.33%	16,766

Table 13
Share of times in summer concerning comfort of humidity and temperature.

Share of times in summer						
Filter	Room	Comfortable	Still comfortable	Not comfortable	Still comfortable or Not comfortable	Amount of measurements
All Data	Not greened	26.43%	48.58%	25.00%	73.57%	34,819
All Data	Greened	32.26%	37.97%	29.77%	67.74%	34,819
Occupied	Not greened	18.24%	52.79%	28.97%	81.76%	16,301
Occupied	Greened	26.56%	41.38%	32.06%	73.44%	16,161
Not occupied	Not greened	33.63%	44.87%	21.50%	66.37%	18,518
Not occupied	Greened	37.19%	35.01%	27.80%	62.81%	18,658

5. Conclusion

The investigations in this paper showed that the relative air humidity in the greened classroom is higher than in the not greened classroom. This causes a higher comfort level in winter months. In summer the humidity is also higher, and the temperature is similar. As dryness indoor is not as common in summer as in winter, the greening does not affect the indoor climate as much in summer as in winter. In winter only 21 % (3922 data) of the “not comfortable” and “still comfortable” data were measured in the greened classroom and 79 % (14726 data) in the not greened classroom while the rooms were occupied. Tables 12 and 13 show the share of the times during the measurement in winter and in summer.

Mould spores were investigated in the classrooms and the air outside in June. Spores from *Cladosporium*, *Penicillium*, *Aspergillus versicolor*, *Alternaria* and others were found, but the concentration in the greened classroom was not higher than the mould spores concentration in the not greened classroom or outside (see in chapter 3.2, Table 3).

- During the heating season indoor greening reduces the times of “not comfortable” and “still comfortable” air climate concerning air temperature and air humidity. The time the air climate is “comfortable” is higher by 60 % because of the greening (50 % not greened room and 79 % greened classroom) while the rooms were occupied.
- This difference is even higher while the rooms are not occupied (because of less airing through opened windows).
- During the classrooms were occupied the humidity and the temperature are less comfortable. In winter this is because of the airing through the windows. Closed windows while the rooms are not occupied increase the humidity. In summer the reason for less comfort is the higher temperature caused by the occupier.
- In summer months the greening also increases the comfort of the indoor climate because of emitting humidity. As dryness in summer is not as relevant to the indoor climate as in winter, the effect of greening is smaller in summer.
- Even though the relative humidity of the air in the greened classroom is higher than in the not greened classroom, there is not a higher concentration of mould spores. The fear of mould because of indoor living wall systems could be disproved.

- The CO₂-concentration of a room can be reduced by an indoor living wall system. This is also true, when the volume of the mass of the plants is about 1 % of the room's volume.

Acknowledgements

This paper was supported by grants of the Projects 850124 FFG/BMVIT “GrünPlusSchule@Ballungszentrum” and the Bundesimmobiliengesellschaft m.b.H. Special thanks goes to Abel Elisabeth, Kopelent Barbara, Pitha Ulrike und Zluwa Irene from the University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna for general support and investigating the coverage and the volume of the plants on the living wall system.

References

- [1] D. Tudiwer, A. Korjenic, The effect of living wall systems on the thermal resistance of the façade, *Energy Build.* 135 (2017) 10–19.
- [2] M.T. Hoelschera, T. Nehlsa, B. Jänickeb, G. Wessolekaa, Quantifying cooling effects of facade greening: shading transpiration and insulation, *Energy Build.* 114 (2016) 283–290.
- [3] R.W.F. Cameron, J.E. Taylor, M.R. Emmett, What's 'cool' in the world of green façades? How plant choice influences the cooling properties of green walls, *Build. Environ.* 73 (2014) 198–207.
- [4] A. Korjenic, Fassadenbegrünung zum Nutzen von Bausubstanz, Klima und Wohlbefinden, *ANLiegen Natur* 37 (2016) 9–11.
- [5] A. Korjenic, D. Tudiwer, Begrünte Bauteile, Gebäudebegrünung im urbanen Gebiet, *BauphysikerInnen Treffen* 2015, Wien 01.10.2015; (2015), pp. 28–32.
- [6] A. Korjenic, D. Tudiwer, Erforschung von Grünfassaden (Energy Globe) Poster: Blickpunkt Forschung: Energie @ TU Wien, 28.09.2015.
- [7] A. Korjenic, Wärmedämmende Wirkung von Grünfassaden Presentation: “Stadtgrünesprache, MA22 Wien, 21.09.2016.
- [8] M. Pamminger, A. Korjenic, D. Tudiwer, *Entwicklung eines ökologischen Bewertungsmodells für Begrünungssysteme in Kombination mit PV-Modulen unter Betrachtung des gesamten Lebenszyklus*, University of Technology, Vienna, 2016 (master thesis).
- [9] J. Tarran, F. Torpy, M. Burchett, Use of living pot plants to cleanse indoor air, *Environment III* (2007) 249–256.
- [10] M. Burchett, et al., *Towards Improving Indoor Air Quality With Potted –Plants a Multifactorial Investigation*, University of Technology, Sydney, 2009.
- [11] C.-G. Bornehag, J. Sundell, T. Sigsgaard, Dampness in buildings and health (DBH): Report from an ongoing epidemiological investigation on the association between indoor environmental factors and health effects among children in Sweden, *Indoor Air* 14 (Suppl. 7) (2004) 59–66.
- [12] U. Pitha, et al., Leitfaden Fassadenbegrünung, 2013 (<https://www.wien.gv.at/umweltschutz/raum/pdf/fassadenbegrueung-leitfaden.pdf> download on 5. Sept. 2016).
- [13] E. Frenzel, Das Lernfördernde Klassenzimmer, Bayerischer Gemeindeunfallversicherungsverband, Bayerische Landesunfallkasse, Unfallkasse München

- (2009) https://www.google.at/url?sa=t&rc=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwiTij7NyvjQAhViLsAKHchIDYsQFggaMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.sichere-schule.de%2Fmedia%2Fupload%2FDas_Lernfoerdernde_Klassenzimmer_GUV_X.99966_2011.pdf&usg=AFQjCNEsg2eNVC8VH9Pr1pilrfqg1dV1aQ&sig2=pKXOYFQgSbr.Hz5fhT4QYA&bvm=bv.142059868,d.ZGg&cad=rja.
- [14] H. Huang, S. Kato, R. Hu, Optimum design for indoor humidity by coupling Genetic Algorithm with transient simulation based on Contribution Ratio of Indoor Humidity and Climate analysis, *Energy Build.* 47 (2012) 208–216.
- [15] B.W. Olesen, International standards for the indoor environment, *Indoor Air* 14 (2004) 18–26.
- [16] W. Frank, et al., *Raumklima und thermische Behaglichkeit Berichte aus der Bauforschung*, vol. 104, Ernst & Sohn KG, Berlin–München–Düsseldorf, 1975.
- [17] S.H. Ryu, H.J. Moon, J.T. Kim, Evaluation of the influence of hygric properties of wallpapers on mould growth rates using hygrothermal simulation, *Energy Build.* 98 (2015) 113–118.
- [18] T. Husman, Health effects of indoor-air microorganisms, *Environ. Health Scand. J. Work* (1996) 5–13.
- [19] J. Singh, Toxic moulds and indoor air quality indoor, *Built Environ.* 14 (2005) 229–234.
- [20] D.A. Krawczyka, A. Roderob, K. Gładyszewska-Fiedoruka, A. Gajewska, CO₂ concentration in naturally ventilated classrooms located in different climates—measurements and simulations, *Energy Build.* 129 (2016) 91–498.
- [21] M. Bergea, H. Martin, Mathisen perceived and measured indoor climate conditions in high-performance residential buildings, *Energy Build.* 127 (2016) 1057–1073.
- [22] D. Mumovic, J. Palmer, M. Davies, M. Orme, I. Ridley, T. Oreszczyn, C. Judd, H.A. Critchlowd, G. Medina, C. Pilmoor, P. Wayd Pearson, Winter indoor air quality, thermal comfort and acoustic performance of newly built secondary schools in England, *Build. Environ.* 44 (2009) 1466–1477.
- [23] M. Griffiths, M. Eftekhari, Control of CO₂ in a naturally ventilated classroom, *Energy Build.* 40 (2008) 556–560.
- [24] Richardson, Gabrio, Palmgren, Trautmann, Dill, Grüner, Trautmann Nachweis Bewertung Qualitätsmanagement Landes Gesundheits Amt Baden Württemberg, Schimmelpilze in Innenräumen. (2004).
- [25] B. Seifert, H. Behrendt, W. Bischof, et al., Leitfaden zur Ursachensuche und Sanierung bei Schimmelpilzwachstum in Innenräumen (Schimmelpilzsanierungs-Leitfaden), Umweltbundesamt, Berlin, 2005.

Publikationsliste

Im Druck erschienene Originalbeiträge

15 Datensätze:

Zeitschriftenartikel

1. J. Hollands, D. Tudiwer, A. Korjenic, B. Bretschneider:
"Greening Aspang - Messtechnische Untersuchungen zur ganzheitlichen Betrachtung mikroklimatischer Wechselwirkungen in einem Straßenzug einer urbanen Hitzeinsel";
Bauphysik (eingeladen), **40** (2018), Heft 3; S. 105 - 119.
2. D. Tudiwer, V. Höckner, A. Korjenic:
"Greening Aspang - Hygrothermische Gebäudesimulation zur Bestandsanalyse und Bewertung unterschiedlicher Szenarien bezogen auf das Innenraumklima";
Bauphysik, **40** (2018), Heft 3; S. 120 - 130.
3. D. Tudiwer, J. Hollands, A. Korjenic:
"Berechnung der Kühlgestehungskosten von fassadengebundenen Begrünungssystemen im städtischen Raum";
Bauphysik, **41** (2019), S. 120 - 124.
4. D. Tudiwer, A. Korjenic:
"The effect of an indoor living wall system on humidity, mould spores and CO₂-concentration";
Energy and Buildings, **146** (2017), S. 73 - 86.
5. D. Tudiwer, A. Korjenic:
"The Effect of Living Wall Systems on the Heat Resistance Value of the Façade";
International Journal of Earth & Environmental Sciences, **Volume 2** (2017), 141; S. 1 - 5.
6. D. Tudiwer, A. Korjenic:
"The effect of living wall systems on the thermal resistance of the facade";
Energy and Buildings, **135** (2017), S. 10 - 19.
7. D. Tudiwer, A. Korjenic:
"The Risk of Humidity at Greened Façades";
Applied Mechanics and Materials, **861** (2016), 1662-7482; S. 343 - 350.
8. D. Tudiwer, M. Penaranda Moren, E. Krasny:
"Gebäudebegrünung, Energieeffizienz und ökologische Bauweise sind große Zukunftsthemen. Diese drei Doktoranden forschen in Wien dazu.";
Heureka (eingeladen), **5** (2017), S. 4.

Beiträge in Tagungsbänden

1. A. Korjenic, D. Tudiwer:
"Begrünte Bauteile, Gebäudebegrünung im urbanen Gebiet";

Vortrag: BauphysikerInnen Treffen 2015, Wien (eingeladen); 01.10.2015; in: "BauphysikerInnen Treffen 2015", (2015), S. 28 - 32.

2. A. Korjenic, D. Tudiwer:
"The Risk of Humidity at Greened Façades";
Vortrag: 11th International Conference enviBUILD 2016, Tschechien (eingeladen); 22.09.2016 - 23.09.2016; in: "Buildings and Environment - Energy Performance, Smart Materials and Buildings", (2016), S. 343 - 350.
3. D. Tudiwer, A. Korjenic:
"Façade Greening On Buildings";
Vortrag: Juniorstav 2017, 19th International Conference of PhD Students, Brno University of Technology (eingeladen); 26.01.2017; in: "Sbornik abstraktu Proceeding", Brno University of Technology, (2017), ISBN: 978-80-214-5462-0; S. 50.
4. D. Tudiwer, A. Korjenic:
"Greening In And On Buildings";
in: "VSS VIENNA young SCIENTISTS SYMPOSIUM", TU Wien, TU Wien, 2016, (eingeladen), ISBN: 978-3-9504017-2-1, S. 54 - 55.
5. D. Tudiwer, A. Korjenic:
"Living wall systems' effect on the U-value of the façade";
Vortrag: 12th international enviBUILD Conference, 7th and 8th of September 2017 - Buildings and Environment, TU Wien (eingeladen); 07.09.2017 - 08.09.2017; in: "12th international enviBUILD Conference, 7th and 8th of September 2017 - Buildings and Environment: From Research to Application BOOK OF ABSTRACTS", (2017), S. 8.
6. D. Tudiwer, A. Korjenic:
"The Risk of Humidity at Greened Façades";
Vortrag: enviBUILD 2016 International Conference on Buildings and Environment, Brno, Czech Republic (eingeladen); 22.09.2016 - 23.09.2016; in: "enviBUILD 2016 - Buildings and Environment International Conference Proceedings", (2016), S. 117.
7. D. Tudiwer, A. Korjenic:
"Thermic Features Of Facade Greening";
Hauptvortrag: Vienna young Scientists Symposium 2015, Wien; 25.06.2015 - 26.06.2015; in: "Vienna young Scientists Symposium 2015", Published by Book-of-Abstracts.com, (2015), ISBN: 978-3-9504017-0-7; S. 74 - 75.

Vorträge und Posterpräsentationen

12 Datensätze:

1. A. Korjenic, D. Tudiwer:
"Begrünte Bauteile, Gebäudebegrünung im urbanen Gebiet";
Vortrag: BauphysikerInnen Treffen 2015, Wien (eingeladen); 01.10.2015; in: "BauphysikerInnen Treffen 2015", (2015), S. 28 - 32.
2. A. Korjenic, D. Tudiwer:
"Erforschung von Grünfassaden (Energy Globe)";
Poster: Blickpunkt Forschung: Energie @ TU Wien, Wien (eingeladen); 28.09.2015.

3. A. Korjenic, D. Tudiwer:
"Integrated building vision: exploration of greened facades, greened rooms and greened roofs on a public school in Vienna";
Poster: 1st European Urban Green Infrastructure Conference, Wien (eingeladen); 23.11.2015 - 24.11.2015.
4. A. Korjenic, D. Tudiwer:
"Montagsgespräche "Auf Sand gebaut"";
Vortrag: Montagsgespräche, Berlin (eingeladen); 06.06.2016.
5. A. Korjenic, D. Tudiwer:
"The Risk of Humidity at Greened Façades";
Vortrag: 11th International Conference enviBUILD 2016, Tschechien (eingeladen); 22.09.2016 - 23.09.2016; in: *"Buildings and Environment - Energy Performance, Smart Materials and Buildings"*, (2016), S. 343 - 350.
6. D. Tudiwer, A. Korjenic:
"Façade Greening On Buildings";
Vortrag: Juniorstav 2017, 19th International Conference of PhD Students, Brno University of Technology (eingeladen); 26.01.2017; in: *"Sbornik abstraktu Proceeding"*, Brno University of Technology, (2017), ISBN: 978-80-214-5462-0; S. 50.
7. D. Tudiwer, A. Korjenic:
"Green Facades and Green Roofs";
Hauptvortrag: Green.Building.Solutions. 2015 Summer University, Wien (eingeladen); 25.07.2015 - 16.08.2015.
8. D. Tudiwer, A. Korjenic:
"GrünPlusSchule@Ballungszentrum";
Poster: Blickpunkt Forschung: Energie @ TU Wien, Wien (eingeladen); 17.10.2016.
9. D. Tudiwer, A. Korjenic:
"Living wall systems' effect on the U-value of the façade";
Vortrag: 12th international enviBUILD Conference, 7th and 8th of September 2017 - Buildings and Environment, TU Wien (eingeladen); 07.09.2017 - 08.09.2017; in: *"12th international enviBUILD Conference, 7th and 8th of September 2017 - Buildings and Environment: From Research to Application BOOK OF ABSTRACTS"*, (2017), S. 8.
10. D. Tudiwer, A. Korjenic:
"The effect of living wall systems on the heat resistance value of the facade";
Vortrag: 3rd World Congress and Expo on Green Energy, Berlin, Germany (eingeladen); 28.09.2017 - 29.09.2017.
11. D. Tudiwer, A. Korjenic:
"The Risk of Humidity at Greened Façades";
Vortrag: enviBUILD 2016 International Conference on Buildings and Environment, Brno, Czech Republic (eingeladen); 22.09.2016 - 23.09.2016; in: *"enviBUILD 2016 - Buildings and Environment International Conference Proceedings"*, (2016), S. 117.
12. D. Tudiwer, A. Korjenic:
"Thermic Features Of Facade Greening";
Hauptvortrag: Vienna young Scientists Symposium 2015, Wien; 25.06.2015 - 26.06.2015; in:

Akademische Arbeiten

7 Datensätze:

Diplom- und Master-Arbeiten

1. R. Breu:
"Detaillierte Untersuchung eines Kühlelements auf Basis von Porenbeton und Evaluierung seiner Funktionalität, Bauweise, Kühlleistung und Betriebsverhalten bei einer Taupunktunterschreitung";
Betreuer/in(nen): A. Korjenic, D. Tudiwer; Institut für Hochbau und Technologie, Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz, 2016; Abschlussprüfung: 21.10.2016.
2. V. Höckner:
"Hygrothermische Gebäudesimulation eines Massivholz-Systems im Vergleich zum Monats-Bilanzverfahren";
Betreuer/in(nen): A. Korjenic, D. Tudiwer; Forschungsbereich Ökologische Bautechnologien/ Institut für Werkstofftechnologie, Bauphysik und Bauökologie, 2019; Abschlussprüfung: 12.04.2019.
3. J. Hollands:
"Entwicklung eines Modells zur Bewertung der ökologischen, ökonomischen und energetischen Auswirkungen fassadengebundener Begrünungssysteme";
Betreuer/in(nen): A. Korjenic, D. Tudiwer; Institut für Hochbau und Technologie, Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz, 2018; Abschlussprüfung: 19.01.2018.
4. M. Jonke:
"Verwendung von PCM (phase changing materials) im Gebäude zur Vermeidung der sommerlichen Überwärmung";
Betreuer/in(nen): A. Korjenic, D. Tudiwer; Institut für Hochbau und Technologie, Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz, 2015; Abschlussprüfung: 19.06.2015.
5. M. Pamminger:
"Entwicklung eines ökologischen Bewertungsmodells für Begrünungssysteme in Kombination mit PV- Modulen unter Betrachtung des gesamten Lebenszyklus";
Betreuer/in(nen): A. Korjenic, D. Tudiwer; Institut für Hochbau und Technologie, Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz, 2016; Abschlussprüfung: 17.06.2016.
6. S Strübing:
"Vergleich raumklimarelevanter physikalischer Größen zweier Schulgebäude mit unterschiedlicher Belüftung, jeweils ausgestattet mit zwei verschiedenen Innenwandbegrünungssystemen";
Betreuer/in(nen): A. Korjenic, D. Tudiwer; Forschungsbereich Ökologische Bautechnologien, Institut für Werkstofftechnologie, Bauphysik und Bauökologie, 2019; Abschlussprüfung: 15.03.2019.
7. L Weber:
"Einfluss von vertikaler Innenwand-Begrünung auf das Raumklima und Behaglichkeit in Schulen";
Betreuer/in(nen): A. Korjenic, D. Tudiwer; Forschungsbereich Ökologische Bautechnologien,

Institut für Werkstofftechnologie, Bauphysik und Bauökologie, 2019; Abschlussprüfung:
15.03.2019.

Wissenschaftliche Berichte

4 Datensätze:

1. B. Bretschneider, A. Korjenic, V. Höckner, D. Tudiwer, U. Pitha, B. Scharf:
"Greening Aspang / Entwicklung eines Verfahrens zur gesamtenergetischen Optimierung von Stadtgebieten am Beispiel der Aspangstraße";
Bericht für FFG / Klimafonds; 2017; 145 S.
2. A. Korjenic, S. Korjenic, D. Tudiwer:
"Feasibilitystudie NAWARO Putzsysteme";
Bericht für FFG; 2015; 91 S.
3. A. Korjenic, D. Tudiwer, M. Mitterböck, M. Grüner:
"Risikobewertung zur Kondensatbildung, an einem Fassadenbegrünungssystem";
Bericht für FFG; 2016; 30 S.
4. D. Tudiwer, S. Hinterseer, A. Korjenic:
"Erforschung von Grünfassaden hinsichtlich deren wärmedämmenden Wirkung mittels flächigen Wärmeflussmessungen";
Bericht für MA22; 2015; 36 S.

Lebenslauf

Name Mag. David Tudiwer
Geboren 24. Juni 1985, Wien
Adresse 1070 Wien, Bandgasse 9/4
E-Mail david.tudiwer@tuwien.ac.at
Staatsbürgerschaft Österreich



Ausbildung

- Seit 09/2014** Doktorats-Studium an der Fakultät für Bauingenieurwesen,
Dissertationsthema: "Untersuchung von Gebäudebegrünung hinsichtlich
Wärmedämmung und Innenraumklima", TU Wien
- 02/2010-12/2012** Master-Studium Umweltsystemwissenschaften mit Fachschwerpunkt
Physik
Masterarbeit: „Technische, ökologische und ökonomische Betrachtung von
Plusenergiegebäuden“ (Sehr Gut)
Karl Franzens Universität Graz und Technische Universität Graz
- 02/2011-06/2011** Auslandssemester: Sogang-Universität, Seoul, Südkorea
- 09/2005-02/2010** Bakkalaureat-Studium Umweltsystemwissenschaften mit Fachschwerpunkt
Physik
Bakkalaureats-Arbeit: Wirtschaftlichkeit von Photovoltaik (Sehr Gut)
Bakkalaureats-Arbeit: Wasserstoffbrennstoffzelle (Sehr Gut)
Karl Franzens Universität Graz und Technische Universität Graz
- 08/2008** Internationale Summerschool über Brennstoffzellen mit dem Titel:
„Advanced Studies of Polymer Electrolyte Fuel Cells“
Technische Universität, Graz
- 06/2003** AHS-Matura, Anton-Krieger-Gasse, 1230 Wien

Berufserfahrung

Seit 04/2015 Projektassistent bis 04/2016, danach Universitätsassistent im Forschungsbereich Bauphysik und Schallschutz am Institut für Hochbau und Technologie, TU Wien bis 01/2019, danach Universitätsassistent im Forschungsbereich Ökologische Bautechnologien am Institut für Werkstofftechnologie, Bauphysik und Bauökologie, TU Wien.
Akquise und Bearbeitung von Forschungsprojekten, in situ Messungen (Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Oberflächentemperatur, Wärmefluss, Globalstrahlung, Nachhallzeit, Schallpegel, Verdunstungsmengen), Laboruntersuchungen (Wärmeleitfähigkeit, Porenradiusverteilung, Wasserdampfdiffusionswiderstand, Sorptionsverhalten, Haftzugfestigkeit) Datenauswertungen und -analysen, Berichtslegungen, wissenschaftliche Publikationen, Konferenzbeiträge, Betreuung von Master-, Bachelor- und Projektarbeiten

Laufende Projekte (noch nicht in der Publikationsliste)

- GrünPlusSchule: 3-jähriges Forschungsprojekt; Untersuchung von Gebäudebegrünung an Fassaden, Dach und Innenraum an einem Altbaugebäude.
- GRÜNEzukunftSCHULEN: 3-jähriges Forschungsprojekt; Fortsetzung von GrünPlusSchule. Untersuchung von Gebäudebegrünung an Fassaden, Dach und Innenraum an zwei Neubaugebäuden (mit und ohne Lüftungsanlage).

04/2014-12/2014 Baxter Healthcare GmbH, Assistant to Global Marketing
Reiseabrechnungen, Recherchen, Inventur, andere administrative Tätigkeiten, Graphischer Entwurf von CD-Covers und anderem Werbematerial

10/2012-04/2013 e7 Energie Markt Analyse GmbH
Datenerhebung, Recherchen, Erstellung von Excel-Tools und Berechnung ökologischer und ökonomischer Aspekte von großvolumigen Wohngebäuden

09/2011-04/2012 JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH, Forschungsgruppe Energieforschung
Erstellung von Excel-Tools, Berechnung ökologischer und ökonomischer Aspekte von Gebäuden, Ökologische und Ökonomische Bewertung von Technologien zur Strom- und Wärmegewinnung in Gebäuden

- 07/2010-08/2010** JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH,
Forschungsgruppe Energieforschung *Untersuchung ökologischer
Eigenschaften von Gebäuden und Technologien zur Strom- und
Wärmegewinnung in Gebäuden*
- 08/2009-09/2009** Alpen-Adria Universität, Institut für Soziale Ökologie, *Datenaufbereitung für
wissenschaftliche Arbeiten, Recherche ökologischer Aspekte*
- 02/2009-03/2009** AIGNER-Kisten-Verpackung-Holz-GmbH & Co.KG, *Büroarbeit*
- 07/2004-06/2005** Rettungssanitäter, Rotes Kreuz Wien, Zivildienst

Aktivitäten

- Seit 12/2012** Gründung der Mon Ami KG (Gastronomiebetrieb in Wien 1060)
*Geschäftsführer (von 09/2016 bis 07/2017), davor und danach stiller
Teilhaber mit geringfügiger Beschäftigung*
- 08/2012-12/2012** R2R Entertainment KG: *Mitarbeit bei der Organisation von Events*
- 09/2008-06/2010** Studentenorganisation AIESEC Graz, ordentliches Mitglied
*Projektleitung des ersten AIESEC-BEST Projektes „Wanted“, Erstellung
von Verträgen und Verhandlungen mit Partnerfirmen.
Team-Mitglied im Studentenaustausch-Programm*

Besondere Kenntnisse

- EDV- Kenntnisse** MS-Office (European Computer Driving Licence ECDL)
Fortgeschritten in Excel, Word und Powerpoint
- Buchhaltung** Grundlagen der Buchhaltung und Bilanzierung (96 Übungseinheiten,
"Ausgezeichneter Erfolg")
- Personalverrechnung** Grundlagen der Personalverrechnung (96 Übungseinheiten,
"Ausgezeichneter Erfolg")
- Sprachen** Deutsch Muttersprache
Englisch Sehr Gut
Französisch Schulkenntnisse

Sonstiges

- 02/2009-06/2010** Karl Franzens Universität, Graz: Betreuung von AustauschstudentInnen