

Weiterführende Untersuchungen und Monitoring der grünen Wände am GRG 7 Kandlgasse

A. Korjenic, J. Hollands, A. Pichlhöfer,
T. Gonaus, E. Sesto, M. Mitterböck

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

16/2021

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe
unter <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI Michael Paula

Auszugsweiser Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet. Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung der Republik Österreich und der Autorin/des Autors ausgeschlossen ist. Nutzungsbestimmungen:
<https://nachhaltigwirtschaften.at/de/impressum/>

Weiterführende Untersuchungen und Monitoring der grünen Wände am GRG 7 Kandlgasse

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Azra Korjenic,
Dipl.-Ing. Jutta Hollands BSc, Alexander Pichlhöfer,
Tamara Gonaus BSc, Eldira Sesto Michael Mitterböck
TU Wien, Institut für Werkstofftechnologie, Bauphysik und Bauökologie,
Forschungsbereich Ökologische Bautechnologien

Wien, Februar 2021

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm Stadt der Zukunft des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK). Dieses Programm baut auf dem langjährigen Programm Haus der Zukunft auf und hat die Intention Konzepte, Technologien und Lösungen für zukünftige Städte und Stadtquartiere zu entwickeln und bei der Umsetzung zu unterstützen. Damit soll eine Entwicklung in Richtung energieeffiziente und klimaverträgliche Stadt unterstützt werden, die auch dazu beiträgt, die Lebensqualität und die wirtschaftliche Standortattraktivität zu erhöhen. Eine integrierte Planung wie auch die Berücksichtigung von allen betroffenen Bereichen wie Energieerzeugung und -verteilung, gebaute Infrastruktur, Mobilität und Kommunikation sind dabei Voraussetzung.

Um die Wirkung des Programms zu erhöhen sind die Sichtbarkeit und leichte Verfügbarkeit der innovativen Ergebnisse ein wichtiges Anliegen. Daher werden nach dem Open Access Prinzip möglichst alle Projektergebnisse des Programms in der Schriftenreihe des BMK publiziert und elektronisch über die Plattform www.NachhaltigWirtschaften.at zugänglich gemacht. In diesem Sinne wünschen wir allen Interessierten und AnwenderInnen eine interessante Lektüre.

DI Michael Paula
Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	1
2	Abstract	3
3	Ausgangslage	5
4	Projekthalt und Methoden	7
4.1	Vorgangsweise	7
4.2	Messtechnik	8
4.2.1	Bereits aus dem Vorprojekt vorhandene Messtechnik	8
4.2.2	Neu installierte Messtechnik	10
4.3	Selbstbauwände	11
4.3.1	Vergleich: Selbstbauwand und Wandgebundene Innenbegrünung	11
4.3.2	Aufbau	12
4.3.3	Bepflanzung, Pflege und Beleuchtung	13
4.3.4	Messungen	15
4.3.4.1	Bewertungsmatrix	18
4.3.4.2	Temperatur und Luftfeuchtigkeit	18
4.3.4.3	Feinstaub	19
4.3.4.4	CO ₂ -Konzentration	19
4.3.4.5	Raumakustik	20
4.3.4.6	Schimmelsporenkonzentration	21
4.4	Wandgebundene Innenbegrünung	22
4.4.1	Auswirkungen auf die Hygrothermische Behaglichkeit nach Wetterverhältnissen	22
4.5	Wandgebundene Außenbegrünung	23
4.5.1	Methode zur Ermittlung der Auswirkung von Außenbegrünung auf das Innenklima ..	23
4.5.1.1	Untersuchte Systeme	23
4.5.1.2	Datenanalyse	25
4.5.1.3	Modellierung der Fassadenbegrünung	25
4.5.1.4	Simulation	27
4.5.1.5	Sommerliche Überwärmung	28
4.5.2	Mikroklimasimulation	29
4.5.3	Methode zur Ermittlung der Wechselwirkungen von wandgebundener Außenbegrünung und Photovoltaik	30
5	Ergebnisse	33

5.1	Selbstbauwände: Leistungsbewertung der unterschiedlichen Pflanzenarten.....	33
5.1.1	Übersicht und Bewertungsmatrix	33
5.1.2	Auswirkungen auf die Luftfeuchtigkeit und Lufttemperatur	33
5.1.3	Auswirkungen auf die Feinstaub-Konzentration.....	36
5.1.4	Auswirkungen auf die CO ₂ -Konzentration.....	39
5.1.5	Auswirkungen auf die Raumakustik	40
5.1.5.1	Nachhallzeit	40
5.1.5.2	Schallabsorptionsgrad	42
5.1.6	Auswirkungen auf die Schimmelsporenkonzentration	44
5.1.6.1	Messung 1 (Juni 2020).....	44
5.1.6.2	Messung 2 (Jänner 2021)	44
5.2	Wandgebundene Innenbegrünung	45
5.2.1	Beschreibung der Auswirkungen der Innenraumbegrünung auf das Raumklima nach Wettergegebenheiten (Hygrothermische Behaglichkeit)	45
5.2.1.1	Behaglichkeit: ausgewertet nach Jahren.....	45
5.2.1.2	Sonnig an Sommertagen	48
5.2.1.3	Bewölkt an Sommertagen	51
5.2.1.4	Sonnig an Wintertagen.....	53
5.2.1.5	Bewölkt an Wintertagen.....	54
5.2.1.6	Hohe relative Luftfeuchtigkeit.....	57
5.2.1.7	Niedrige relative Luftfeuchtigkeit.....	59
5.2.1.8	Fazit	60
5.3	Wandgebundene Außenbegrünung.....	61
5.3.1	Ergebnisse zur Ermittlung der Auswirkung von Außenbegrünung auf das Innenraumklima	61
5.3.1.1	U-Wert Berechnung für den Sommerfall	61
5.3.1.2	Simulation.....	62
5.3.1.3	Sommerliche Überwärmung	65
5.3.2	Ergebnisse Mikroklimasimulation	68
5.3.3	Ergebnisse zur Ermittlung der Wechselwirkung von wandgebundenen Außenbegrünung und Photovoltaik	71
6	Schlussfolgerungen.....	74
6.1	Innenbegrünung	74
6.2	Außenbegrünung.....	75
7	Ausblick und Empfehlungen.....	76

8	Verzeichnisse	77
8.1	Abbildungsverzeichnis	77
8.2	Tabellenverzeichnis	79
8.3	Literaturverzeichnis	80
8.4	Abkürzungsverzeichnis	83
9	Anhang.....	84
9.1	Datenblätter	84
9.2	Data Management Plan (DMP)	87
9.2.1	Datenerstellung und Dokumentation.....	87
9.2.2	Ethische und rechtliche Sicherheitsaspekte.....	87
9.2.3	Datenspeicherung und -erhalt	88
9.2.4	Wiederverwendbarkeit der Daten	88

1 Kurzfassung

Städte weltweit wachsen und die steigenden Einwohnerzahlen erfordern eine immer dichtere Bebauung. Dadurch müssen immer mehr Grünflächen weichen. So führt nicht nur der Klimawandel, sondern auch der verstärkte Urban Heat Island Effekt zu immer höheren Temperaturen im urbanen Raum. Dies beeinflusst nicht nur die Wohn- und Lebensqualität, sondern auch den Arbeits- und Schulalltag in Innenstädten. Während vermehrt Klimaanlage als kurzfristige Lösung zur Kühlung des Innenraums eingesetzt werden, heizen diese den Außenraum noch stärker auf und stellen demnach keine nachhaltige Lösung zur Anpassung der Stadt der Zukunft dar. Es bedarf daher innovativer Ansätze und Lösungsmöglichkeiten, insbesondere für Kinder und Jugendliche als Generation der Zukunft, die Lern- und Lehrumgebung qualitativ zu gestalten. Denn diese Lern- und Lehrräume weisen auch ohne die zusätzliche Herausforderung steigender Temperaturen bereits großen Bedarf an Verbesserung der Raumluftqualität auf. Die Nutzung von Klassenräumen durch eine große Anzahl von Schülerinnen, Schülern und Lehrpersonen zum konzentrierten Lernen und Arbeiten stellt hohe Anforderungen an gesunde Raumluft, die oft nicht erfüllt werden können.

Gebäudebegrünung sowohl im Außenbereich an der Fassade und am Dach, sowie an Wänden im Innenraum bietet die Möglichkeit für Grün an Orten, an denen bisher kein Platz dafür zu sein schien. Die positiven Auswirkungen derartiger Begrünungsmaßnahmen sind vielseitig und konnten teilweise bereits in nationalen sowie internationalen Forschungsprojekten nachgewiesen werden. Es fehlt jedoch weiterhin an Langzeitergebnissen und detaillierten Betrachtungen einzelner Einflussfaktoren, um zuverlässige nachhaltige Aussagen über die Wirkungsweise von Gebäudebegrünung treffen zu können. Derartige Erkenntnisse können dazu beitragen, optimal an den Schulalltag und die jeweilige Schulsituation angepasste Begrünungslösungen zu ermitteln und Empfehlungen zu formulieren.

Anknüpfend an das abgeschlossene Forschungsprojekt „GrünPlusSchule“, in dessen Rahmen verschiedene Begrünungsmaßnahmen an und in einer Schule im 7. Wiener Gemeindebezirk (GRG7) umgesetzt werden konnten, greift das vorliegende Folgeprojekt weitere offene Fragen auf und widmet sich detaillierten Messdatenauswertungen zu den Auswirkungen der Innen- sowie Außenbegrünungen. Dazu wurden sowohl vorhandene Messdaten aus dem Vorprojekt weiterführend und mit anderem Fokus ausgewertet sowie neue Messdaten gewonnen und entsprechend analysiert. Das Projekt konzentrierte sich dabei unter anderem auf die Auswirkungen der wandgebundenen Innenraumbegrünung auf die hygrothermische Behaglichkeit in Abhängigkeit der Wetterbedingungen. Dabei wird zwischen verschiedenen Strahlungsverhältnissen sowie der Temperatur unterschieden. Die Auswertungen kommen dabei zu dem Ergebnis, dass vor allem an sonnigen Sommertagen ein Kühleffekt durch die Begrünung besteht und die Feuchteabgabe der Pflanzen im Winter für ein behagliches Raumklima sorgt. Im Fokus der durchgeführten Untersuchungen an der wandgebundenen Außenbegrünung stehen sowohl die Auswirkungen auf das Innenklima der angrenzenden Räume und die Einflüsse auf das Mikroklima als auch die tiefere Untersuchung der Zusammenhänge zwischen der Kombination von vertikaler Außenbegrünung und Photovoltaik. Die Einflüsse der gesamten Innenhof-Begrünung auf das Mikroklima wurden anhand einer Simulation mit dem uhiSolver untersucht und kamen zu dem Ergebnis, dass ein Kühleffekt von bis zu 2°C festgestellt werden kann, jedoch die gefühlte Temperatur aufgrund geringerer Luftgeschwindigkeiten und Reflexion der Oberflächen deutlich höher liegt. Eine

Simulation mit dem Programm WUFI erfolgte zur Analyse der Auswirkungen der Begrünung auf das Innenklima. Diese Untersuchung anhand verschiedener Varianten ergab, dass die Fassadenbegrünung sowohl als Verschattung der dahinterliegenden Ebene dient, sowie die Wärmedämmung der Wand verbessert und auf das Mikroklima und die Umgebung der Begrünung kühlende Auswirkungen hat. Durch die Kombination dieser drei Effekte wird auch das Innenraumklima etwas positiv beeinflusst. Die Synergieeffekte von Begrünung und Photovoltaik am Dach konnten im Projekt GrünPlusSchule bereits dargestellt werden. Im vorliegenden Projekt wurde die Kombination von Photovoltaik und Begrünung an Fassaden untersucht. Dabei wurde dargestellt, wie sich das Begrünungselement auf die Temperatur und Leistung der PV-Module auswirkt, mit dem Ziel herauszustellen, inwieweit unterschiedliche Abstände zwischen Fassadenbegrünung und Photovoltaik-Paneele zu unterschiedlichen Oberflächentemperaturen der Module führen. Diese Untersuchungen werden im Rahmen dieses Folgeprojekts an grüner Infrastruktur durchgeführt, die bereits im Rahmen des Vorprojekts installiert wurde.

Die Umsetzung insbesondere von vertikalen Begrünungsmaßnahmen ist oft mit höheren Kosten verbunden. Ein Bestreben besteht demnach darin, kostengünstige Alternativen zu schaffen, die insbesondere für den Schulalltag und durch Schülerinnen und Schüler selbst umgesetzt werden können. Eine derartige Begrünungsvariante konnte in einem weiteren vom Projektteam durchgeführten Vorprojekt entwickelt werden und diese wurde im Projekt gemeinsam mit den Schülerinnen und Schülern des GRG7 umgesetzt. Die Bepflanzung der fertiggestellten Wände erfolgte mit unterschiedlichen einzelnen Pflanzenarten sowie einer Mischung, die sich für derartige Begrünungsformen eignen und üblicherweise verwendet werden. Ziel war es, durch die messtechnischen Untersuchungen zu prüfen, ob sich eine Pflanzenart besonders zur Verbesserung der Raumluftqualität eignet.

Für die messtechnischen Untersuchungen wurde einerseits auf aus dem Vorprojekt (2015-2018) vorhandene Messdaten zurückgegriffen sowie andererseits neue Messdaten generiert. Die neuen Messdaten wurden einerseits durch noch vorhandene Messinfrastruktur für Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsdaten gewonnen sowie durch neu hinzugefügte Messinstrumente erlangt. Die neuen Messgeräte enthalten unter anderem Sensoren für Feinstaub und CO₂, um Aussagen über die Raumluftqualität und die Auswirkungen der Begrünungssysteme treffen zu können.

Die im Rahmen dieses Forschungsprojekts gewonnen Erkenntnisse leisten erneut einen wichtigen Beitrag zum Verständnis und Nachweis der Auswirkungen von grüner Infrastruktur in und an Schulgebäuden im urbanen Raum.

2 Abstract

Cities around the world are growing and the increasing number of inhabitants requires ever denser development. As a result, more and more green spaces have to give way. Thus, not only climate change, but also the intensified urban heat island effect is leading to ever higher temperatures in urban areas. This not only affects the quality of living and life, but also the daily routine at work and school in inner cities. While air conditioning systems are increasingly used as a short-term solution to cool the interior, they heat up the exterior even more and therefore do not represent a sustainable solution for adapting the city of the future. Innovative approaches and possible solutions are needed, especially for children and young people as the generation of the future, to design the learning and teaching environment in a quality manner. These learning and teaching spaces already have a great need for indoor air quality improvement even without the additional challenge of rising temperatures. The use of classrooms by large numbers of students and teachers for concentrated learning and work places high demands on healthy indoor air that often cannot be met.

Building greening, both externally on the façade and roof, and on walls internally, offers the opportunity for greenery in places where previously there seemed to be no room for it. The positive effects of such greening measures are manifold and have already been partially proven in national as well as international research projects. However, there is still a lack of long-term results and detailed observations of individual influencing factors in order to be able to make reliable, sustainable statements about the effectiveness of greening buildings. Such findings can help to identify greening solutions that are optimally adapted to everyday school life and the respective school situation and to formulate recommendations.

Following on from the completed research project “GrünPlusSchule”, in which various greening measures were implemented at and in a school in Vienna's 7th district (GRG7), this follow-up project takes up further unanswered questions and is dedicated to detailed measurement data evaluations of the effects of indoor and outdoor greening. For this purpose, existing measurement data from the previous project were evaluated further and with a different focus, and new measurement data were obtained and analysed accordingly. The project focuses, among other things, on the effects of wall-mounted indoor greening on hygrothermal comfort as a function of weather conditions. A distinction is made between different radiation conditions and temperature. The evaluations concluded that the greening has a cooling effect, especially on sunny summer days, and that the plants' moisture release provides a comfortable indoor climate in winter. The focus of the investigations carried out on the wall-mounted outdoor greening is both the effects on the indoor climate of the adjacent rooms and the influences on the microclimate, as well as the more in-depth investigation of the relationships between the combination of vertical outdoor greening and photovoltaics. The influences of the entire courtyard greening on the microclimate were investigated by means of a simulation with uhiSolver and concluded that a cooling effect of up to 2°C can be determined, but the perceived temperature is significantly higher due to lower air velocities and reflection of the surfaces. A simulation with the program WUFI was carried out to analyse the effects of greening on the indoor climate. This study, based on different variants, showed that the greening of the façade serves both as shading of the plane behind it, as well as improves the thermal insulation of the wall and has cooling effects on the microclimate and the environment of the greening. The combination of these three effects also has a minor positive impact on the indoor climate. The synergistic effects of

greening and photovoltaics on the roof have already been highlighted in the project GrünPlusSchule. In the present project, the combination of photovoltaics and greening on facades was investigated. It was shown how the greening element affects the temperature and performance of the PV modules, with the aim of highlighting to what extent different distances between façade greening and photovoltaic panels lead to different surface temperatures of the modules. In this follow-up project, these investigations were carried out on green infrastructure that has already been installed as part of the preliminary project.

The implementation of vertical greening measures in particular is often associated with high costs. Accordingly, one endeavour is to create more cost-effective alternatives that can be implemented in particular for everyday school life and by students themselves. Such a greening option could be developed in another preliminary project carried out by the project team and was implemented in this project together with the students of GRG7. The planting of the completed walls was carried out with different individual plant species as well as a mixture, which are suitable for such forms of greening and are usually used, with the aim of finding out through the metrological investigations whether a plant species is particularly suitable for improving the indoor air quality.

For the metrological investigations, existing measurement data from the preliminary project (2015-2018) was used on the one hand, and new measurement data was generated on the other. The new measurement data were obtained by still existing measurement infrastructure for temperature and humidity data and by newly added measurement instruments. The new measuring instruments included sensors for fine dust and CO₂ to be able to make statements about the indoor air quality and the effects of the greening systems.

The findings obtained in this research project once again make an important contribution to understanding and demonstrating the effects of green infrastructure in and on school buildings in urban areas.

3 Ausgangslage

Die weltweiten Prognosen zeigen, dass im Jahr 2050 zwei Drittel aller Menschen in Städten leben werden [1]. Dies führt zwangsläufig zu einer dichteren Bauweise und somit zur Reduktion grüner Flächen in der Stadt. Das Ersetzen grüner Flächen durch Gebäude führt zur Zunahme der Bevölkerungsdichte, erhöhtem Verkehrsaufkommen und mehr anthropogenen Emissionen. Dadurch nehmen nicht nur die Emissionen von Wärme, Treibhausgasen und Staub, sondern auch die Lärmemissionen zu. Zusätzlich führen die versiegelten Flächen zu einer noch größeren Erwärmung der Stadt und verhindern das Auskühlen während der Nächte, was wiederum zu einer Verstärkung des Urban Heat Island Effekts führt. Die Anzahl der Hitzetoten steigt an [2][3][4][5][6]. Es werden mehr Klimaanlageanlagen installiert, die jedoch nur bestimmte Bereiche kühlen und die Umgebung zusätzlich aufheizen. Der Strombedarf der Klimaanlageanlagen reduziert darüber hinaus verfügbare Ressourcen und verstärkt den Treibhauseffekt. Es bedarf daher alternativer, innovativer Methoden, die zu einer ressourcenschonenden Kühlung in Städten beitragen, um einen lebenswerten Raum in Städten zu erhalten bzw. zu schaffen. Gebäudebegrünung am Dach und an der Fassade bietet die Möglichkeit zur Begrünung im urbanen Raum an Orten, an denen bisher kein Platz dafür zu sein schien, und stellt damit eine Möglichkeit für Grün im Spannungsfeld immer stärker verdichteter Städte dar.

Schulen stellen besonders hohe Anforderungen an das Raumklima. SchülerInnen und LehrerInnen verbringen viel Zeit in den Innenräumen der Schulgebäude. Viele Personen befinden sich auf engem Raum und alle sollen die Möglichkeit haben, konzentriert zu arbeiten und zu lernen. Insbesondere für Kinder und Jugendliche, die sich in der Entwicklung befinden, ist ein gesundes Raumklima und eine hohe Innenraumluftqualität wichtig. Dabei sind die Luftfeuchtigkeit, die Temperatur, die Akustik, die CO₂-Konzentration und die Staubkonzentration zu berücksichtigen. Aufgrund der großen Anzahl der Personen in einem Raum und deren Aktivitäten steigt die CO₂-Konzentration in Klassenräumen bei geschlossenen Fenstern schnell an. Das Lüften durch geöffnete Fenster verringert insbesondere im Winter neben der Temperatur auch die Luftfeuchtigkeit im Innenraum und reduziert somit die hygrothermische Behaglichkeit. Die Akustik ist insbesondere dann von großer Bedeutung, wenn mehrere Personen gleichzeitig sprechen (z. B. bei Gruppenarbeit) oder Fremdsprachen erlernt werden. Schulen im urbanen Umfeld haben aufgrund der wenigen Grünflächen und vielen Staubquellen in ihrer Umgebung mit erhöhter Feinstaubkonzentration zu kämpfen. Außerdem gibt es in Klassenräumen viele interne Staubquellen, z. B. von Lernunterlagen und Tafelkreide. In der Stadt der Zukunft wird die zusätzliche Verdichtung die Herausforderungen an Schulen erhöhen, sodass wirksame Gegenmaßnahmen erforscht werden müssen, um auch in Zukunft qualitätsvolle Lern- und Lehrräume zu erhalten und zu schaffen.

Die bisher bekannten Auswirkungen von Gebäudebegrünung im Innen- sowie Außenbereich sind vielseitig. Sie reichen vom Einfluss auf die hygrothermische Behaglichkeit im Innenraum und der Beeinflussung der Nachhallzeit bis zur Auswirkung auf den U-Wert der Fassade. Dies konnte bereits in eigenen Forschungsprojekten sowie international nachgewiesen werden [7]–[9]. Die bisherigen Untersuchungen basieren meist auf insitu-Messungen und bilden aufgrund der befristeten Dauer der Messungen eine bestimmte Situation ab. International gibt es keine vergleichbaren Studien zur Begrünung und deren Auswirkungen speziell auf den Schulalltag und das Schulgebäude. Es fehlen tiefere messtechnische Untersuchungen und Analysen von Langzeitdaten, die genauere

Aussagen über die Wirkungszusammenhänge erlauben, um einen gezielten Einsatz von Begrünung möglichst kosteneffizient zu ermöglichen, sodass möglichst viele SchülerInnen von den positiven Effekten profitieren können.

Das bereits abgeschlossene Forschungsprojekt GrünPlusSchule widmete sich dieser Herausforderung und erforschte erstmalig die Auswirkungen von Gebäudebegrünungen im Innen- sowie Außenbereich eines Schulgebäudes im 7. Wiener Gemeindebezirk mit dem Ergebnis, dass Begrünung großes Potential zur Verbesserung der Lernumgebung im urbanen Raum durch unterschiedliche Effekte bietet. Die Ergebnisse sind einem ausführlichen Endbericht zusammengefasst [10].

Anknüpfend an das bereits abgeschlossene Forschungsprojekt GrünPlusSchule (2015-2018) greift das vorliegende Projekt weitere Forschungslücken auf und profitiert dabei von bereits durchgeführten Analysen, vorhandener Infrastruktur sowie einer großen Menge vorhandener Langzeitmessdaten.

4 Projektinhalt und Methoden

Aufbauend auf dem Vorprojekt wurden im gegenständlichen Projekt weiterführende Untersuchungen zur Auswirkung von Innenraumbegrünung auf das Mikroklima sowie von Außenraumbegrünung auf einzelne Gebäudeteile durchgeführt. Der Schulalltag ist sehr komplex und in ihn eingebunden sind viele unterschiedliche AkteurInnen, wodurch sich wiederum vielseitige Einflüsse sowie Anforderungen an das Schulgebäude ergeben. Das Fortführen der insitu-Messungen für weitere 1,5 Jahre erlaubte es daher, die bereits erhaltenen Ergebnisse zu erweitern, zu präzisieren, neue Daten zu erheben und vor allem, die Einflüsse verschiedener Faktoren genauer zu erforschen.

Im vorliegenden Projekt wurde untersucht, wie das Mikroklima in der begrünten und nicht begrünten Klasse beeinflusst wird. Während die Auswertungen im Vorprojekt die Unterschiede nach Jahreszeiten dargestellt haben, wurden in diesem Projekt die Auswirkungen auf das Innenraumklima nach Wettergegebenheiten messtechnisch analysiert. Die bereits im Vorprojekt gewonnenen Erkenntnisse der Unterschiede zwischen begrüntem und nicht begrüntem Klassenraum sowie die messtechnischen Analysen der Begrünungen im Außenraum konnten nachgeschärft und in Abhängigkeit von verschiedenen Einflussfaktoren herausgearbeitet werden. In einem weiteren Vorprojekt „GrüneZukunftSchulen“¹, in dem ebenso die Auswirkungen von Begrünungsmaßnahmen auf das Schulgebäude und den Schulalltag untersucht wurden, konnte mit der Unterstützung der BIG als Gebäudeeigentümer eine Low-Cost-Begrünungsmaßnahme in Form einer „Do-it-yourself-Selbstbauwand“ entwickelt werden [11]. Diese, im Vergleich zu den bisher am Markt vorhandenen wandgebundenen Innenraum-Systemen, kostengünstige Variante wurde speziell für die Anwendung in Schulen entwickelt. Um die mikroklimatischen und bauphysikalischen Auswirkungen dieser grünen Selbstbauwand zu erheben, wurde die Schule im vorliegenden Projekt im Zuge von in den Unterricht integrierten Workshops mit insgesamt vier Selbstbauwänden ausgestattet. Eine dieser Wände wurde mit einer für vertikale Innenraumbegrünungssysteme üblichen Mischung an Pflanzen bepflanzt und drei weitere mit jeweils einer dieser Pflanzenarten (Monokultur). Ziel der durchgeführten Untersuchungen war es herauszufinden, ob Unterschiede bezüglich der Leistung verschiedener Pflanzen bestehen und messbar sind, beziehungsweise welche Pflanze die beste „Performance“ bezüglich dem (Mikro-)Raumklima bietet. Um Einflüsse durch unterschiedliche Raumnutzung zu minimieren, wurden die Selbstbauwände für diese Untersuchungen gemeinsam in einem Klassenraum platziert und in unmittelbarer Nähe der Pflanzen Messgeräte installiert.

4.1 Vorgangsweise

Basierend auf dem Vorprojekt GrünPlusSchule wurden zu den bestehenden Begrünungssystemen und Messensoren im und am Schulgebäude weitere Messensoren installiert, sowie weitere Begrünung in Form von Selbstbauwänden geschaffen. Tabelle 1 listet alle im Rahmen des Vorprojekts GrünPlusSchule installierten Begrünungssysteme auf. Im Folgenden wird weiterhin zwischen wandgebundenen Begrünungssystemen und mobilen Do-it-yourself-Begrünungssystemen (Selbstbauwände) unterschieden. Im Speziellen wird bei der Selbstbauwand auf die unterschiedlichen Pflanzenarten und deren Auswirkungen eingegangen.

¹ Klima- und Energiefonds, <https://smartcities.at/stadt-projekte/smart-cities/#gruenezukunftschulen>

Alle Ergebnisse des Projekts GrünPlusSchule sind ausführlich im Endbericht des Projekts beschrieben und online frei zugänglich unter: <https://nachhaltigwirtschaften.at/de/sdz/projekte/gruenplusschule-ballungszentrum-hocheffiziente-fassaden-und-dachbegruenung-mit-photovoltaik-kombination-optimale-loesung-fuer-die-energieeffizienz-in-gesamtoekologischer-betrachtung.php>.

Tabelle 1: Bestehende wandgebundene Begrünungssysteme aus dem Vorprojekt GrünPlusSchule

	Begrünungssystem	Standort	Orientierung	Darstellung
Innen	Vliessystem 1	Eingangsbereich	Nord West	Abbildung 18
	Vliessystem 2	Eingangsbereich		
	Vliessystem 3	Klassenraum 308		
	Trogssystem	Biologiesaal		
Außen	Trogssystem	Außenfassade	Süd, Richtung Sportplatz	Abbildung 20
	Kassettensystem	Außenfassade	Süd, Richtung Sportplatz	Abbildung 20
	Kassettensystem	Außenfassade	Süd, vor Turnsaaldach	Abbildung 26
	Pannonische, extensive Dachbegrünung	Turnsaaldach	Süd, über Turnsaal	Abbildung 26

In diesem Projekt wurden Messdaten der folgenden Begrünungssysteme eingehend untersucht und analysiert:

- Do-it-yourself-Begrünungssysteme (Selbstbauwände)
- Vliessystem im Klassenraum 308
- Kassettensystem an der Außenfassade, Richtung Sportplatz
- Trogssystem an der Außenfassade, Richtung Sportplatz
- Kassettensystem in Kombination mit Photovoltaik an der Außenfassade, Richtung Turnsaaldach

4.2 Messtechnik

4.2.1 Bereits aus dem Vorprojekt vorhandene Messtechnik

Im Rahmen des Projekts GrünPlusSchule wurde umfassende Messtechnik im und am Schulgebäude des GRG7 installiert, auf die in diesem Folgeprojekt zurückgegriffen werden konnte. In der begrünten Klasse und der Referenzklasse wurden die Lufttemperatur, die rel. Luftfeuchtigkeit und CO₂ zeitgleich in Intervallen von mindestens 10 Minuten über einen Großteil der Projektlaufzeit des Forschungsprojekts GrünPlusSchule gemessen. Dafür wurden Geräte der Firma Lin Picco (A05) in Kombination mit einem Datenlogger der Fa. Agilent, sowie Sensoren mit integriertem Datenlogger der Fa. TandD (RTR) verwendet. Tabelle 2 gibt eine Übersicht über die aus dem Vorprojekt vorhandene Messtechnik. Die zur Messung der Lufttemperaturen verwendeten Instrumente im Außenbereich wurden mit einem Strahlungsschutz ausgestattet, um den Einfluss von Strahlung, Verdunstungskühlung oder Wind zu vermeiden. Abbildung 1 zeigt einen derartigen Strahlungsschutz auf dem Turnsaaldach des Schulgebäudes.

Tabelle 2: Zusammenfassung der aus dem Vorprojekt übernommenen Messtechnik

Messung	Sensor Bezeichnung	Standort	Kommentar
T, RL Oberflächentemperatur Wärmestrom	RTR PT1000 Phymeas 25 cm x 25 cm	Stiegenhaus Stiegenhaus Stiegenhaus	
Temperatur, Rel. Luftfeucht. Temperatur, Rel. Luftfeucht. Temperatur, Rel. Luftfeucht. Temperatur, Rel. Luftfeucht.	Lin Picco (A05) Lin Picco (A05) RTR RTR	Raum Raum Raum (Physiksaal) Raum (Chemiesaal)	Klasse Begrünt Klasse Referenz
Wärmestrom	Phymeas 25 cm x 25 cm	Raum (Chemiesaal)	
Globalstrahlung Temperatur, Rel. Luftfeucht. Temperatur, Rel. Luftfeucht.	Pyranometer RTR RTR	Turnsaaldach Turnsaaldach Turnsaaldach	Photovoltaik

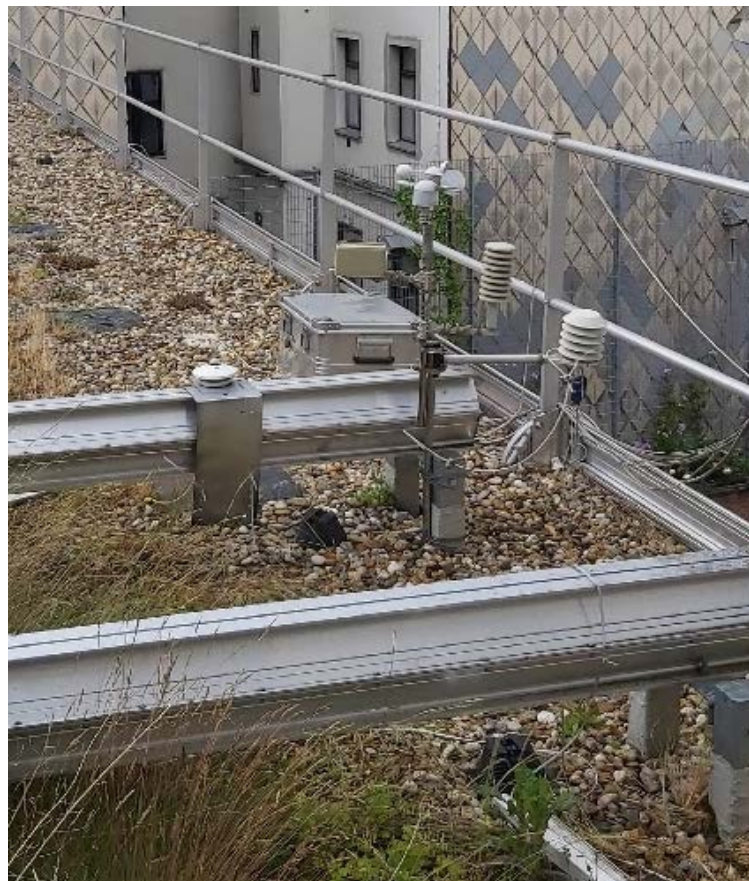


Abbildung 1: Sensoren mit Strahlenschutzschirm am begrünten Turnsaaldach

4.2.2 Neu installierte Messtechnik

Im Rahmen des Projekts wurden für die Messungen bezüglich der Auswirkungen der Selbstbauwände bzw. Pflanzenarten Messgeräte installiert, die unter dem Namen „AirSensEUR“ entwickelt und vertrieben werden und Teil eines von der Europäischen Union geförderten Open Source Projekts sind. Abbildung 2 zeigt den schematischen Aufbau der Instrumente und der optionalen, automatisierten Daten-Archivierung mittels Online-Datenbank (influxDB). Diese, im Weiteren als „Klimaboxen“ bezeichneten Geräte, wurden vor allem aufgrund ihrer offenen Architektur und vergleichsweise kostengünstigen Anschaffung ausgewählt. Da die traditionelle Messung von Parametern wie der Feinstaub-Belastung unter Realbedingungen aufwendig und kostspielig sind und somit Messungen oft nur punktuell stattfinden können, bieten Geräte wie dieses hingegen die Möglichkeit, bei vergleichbar geringem finanziellem Aufwand ein dichtes Netz an Sensoren zu installieren und die Raumluft über einen längeren Zeitraum an verschiedenen Punkten zu überwachen. Für vergleichende Messungen, wie sie in diesem Projekt durchgeführt wurden, muss jedoch die Korrelation der einzelnen Sensoren zueinander oder zu einer Messreihe an einer Referenzmessstelle, die über hohe Genauigkeit verfügt, festgestellt und die Messwerte entsprechend angepasst werden (siehe Kapitel 4.3.3). Tabelle 3 zeigt die Sensoren der „Klimaboxen“ mit der jeweiligen Sensor-Bezeichnung und den zugehörigen durchgeführten Messungen.

Tabelle 3: Verwendete Sensoren der „Klimaboxen“

Messung	Sensor Bezeichnung
Feinstaub (PM10, PM2.5)	Alphasense OPC-N3
Kohlendioxid (CO ₂)	ELT D-300G-3V
Temperatur	Sensirion STS3x
rel. Luftfeuchtigkeit	Sensirion SHT3x

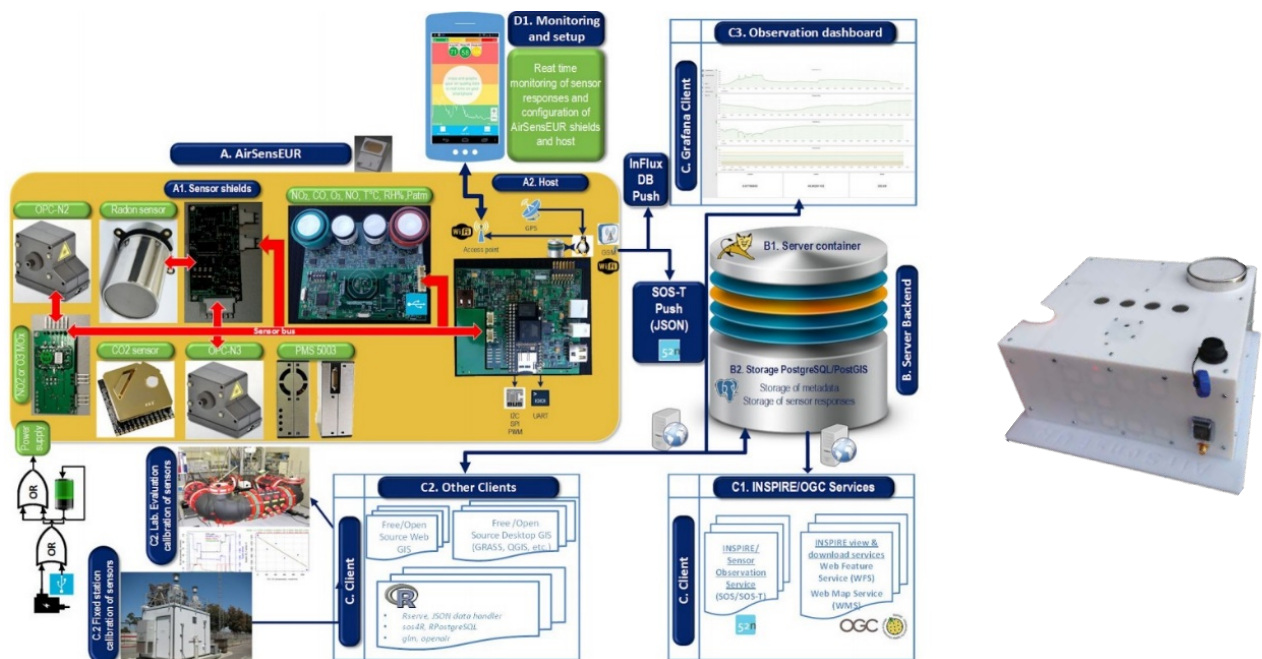


Abbildung 2: Schematische Darstellung der AirSensEUR-Plattform (links) und Darstellung einer Klimabox (rechts) [12]

4.3 Selbstbauwände

In den folgenden Kapiteln wird der Aufbau, die Pflege und Wartung sowie die messtechnische Untersuchung der gewählten DIY-Begrünungssysteme beschrieben. Als konstruktive Grundlage wurde auf die im Projekt GrüneZukunftSchulen [11] entwickelte Bauanleitung für eine Low-Cost-Begrünungsmaßnahme zurückgegriffen und entsprechend der Anforderungen des gegenständlichen Projekts angepasst. So wurde die bestehende Anleitung insofern abgeändert, dass jede Selbstbauwand um einen Trog erweitert, und somit eine Gesamthöhe von ca. 1,90 m erreicht wurde, um eine größere Anzahl an Pflanzen und somit eine höhere (messbare) Wirkung auf das Raumklima zu erzielen. Abbildung 3 zeigt den finalen Entwurf der Konstruktion (links), sowie eine Explosionszeichnung eines entsprechenden Trogs.

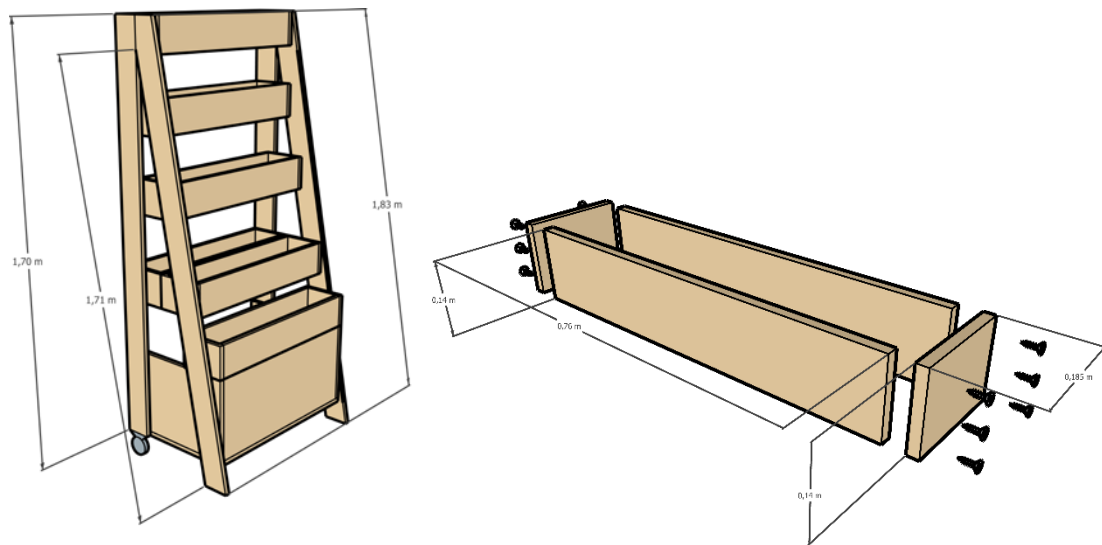


Abbildung 3: 3D-Entwurf der Selbstbauwand (links) und Explosionszeichnung eines Trogs (rechts)

4.3.1 Vergleich: Selbstbauwand und Wandgebundene Innenbegrünung

Um die Eigenschaften und Vorteile der Selbstbauwände im Gegensatz zu wandgebundenen Lösungen zu analysieren, werden diese in Tabelle 4 verglichen. Die Kosten beinhalten das Begrünungssystem inkl. Installation, Bepflanzung, Bewässerung, Beleuchtung und Pflege für drei Jahre. Da bei der genauen technischen Ausführung prinzipiell eine Vielzahl an Möglichkeiten bestehen, die je nach genauem Installationsort und Einsatzzweck variieren, können für die wandgebundenen Systeme nur ungefähre Kosten und die notwendige Infrastruktur geschätzt werden. So können diese zum Beispiel sowohl mit einem fixen Wasseranschluss als auch mit einer flexiblen Tank-Lösung mit Pumpe oder einer, den Gegebenheiten angepassten, Beleuchtung versehen werden. Nach [11] ist für wandgebundene Innenbegrünung eine Beleuchtung mit LED-Leiste und eine Lösung ohne Tank, also mit Wasseranschluss zu empfehlen. Ein wesentlicher Kostenpunkt bei wandgebundener Innenraumbegrünung ist auch die regelmäßige Pflege [10], welche bei selbstgebaute Begrünungssystemen minimiert werden kann, da die Profiteure durch ihre Involvement erfahrungsgemäß ein stärkeres Interesse an und eine stärkere Bindung zu der Begrünung haben und somit Teile der Grünpflege übernehmen können. Die messtechnisch erfassten Auswirkungen der unterschiedlichen Begrünungssysteme waren sowohl für das Vliesystem als auch für die einzelnen Selbstbauwände ein Kühleffekt, sowie eine Erhöhung der Luftfeuchtigkeit.

Tabelle 4: Vergleich Selbstbauwand mit handgebundener Innenbegrünung - Kosten und Fläche

	Hersteller	Notwendige Bodenfläche pro m ² Grünfläche	Infrastruktur	Pflanzen pro m ²	Kosten pro m ²
Selbstbauwand	-	~0,5 m ²	keine	~25	~300 €
Vliessystem	Florawall	~0,1 m ²	je nach Ausführung		~1300 €
Trogsystem	Techmetall	~0,3 m ²	je nach Ausführung		~1000 €

4.3.2 Aufbau

Unter Mitwirkung von interessierten SchülerInnen und LehrerInnen der Schule sowie MitarbeiterInnen der TU Wien wurden im Zuge des Werkunterrichts insgesamt vier Selbstbauwände von vier Schulklassen errichtet. Dazu wurden im Vorfeld alle notwendigen Materialien an die Schule geliefert und den SchülerInnen die angepasste Bauanleitung zur Verfügung gestellt. Abbildung 4 zeigt einzelne Schritte des Aufbaus, welcher reibungslos durchgeführt werden konnte.



Abbildung 4: Bau der Selbstbauwände mit SchülerInnen

4.3.3 Bepflanzung, Pflege und Beleuchtung

Nach der Fertigstellung aller Selbstbauwände im Rahmen des Werkunterrichts wurden die ausgewählten Pflanzen mit Hilfe von SchülerInnen im Zuge des Freifachs „Biologische Übungen“ eingesetzt. Als Substrat wurde dabei ein auf natürlichen Zeolithen basierendes, mineralisches Substrat verwendet, welches unter dem Namen „Zeobon® Zeostrat® 2/8“ (Datenblatt siehe Anhang) vertrieben wird.

Die verwendeten Pflanzenarten wurden in Abstimmung mit KollegInnen der Vegetationstechnik der Universität für Bodenkultur ausgewählt. Als Auswahlkriterien galten dabei unter anderem der Einfluss der jeweiligen Pflanzenart auf das Raumklima, die potenzielle Fähigkeit Feinstaubpartikel und andere Luftschadstoffe zu binden, sowie die Eignung für den Einsatz in einem automatisch bewässertem, auf Zeolith-Substrat basierendem Begrünungssystem. Um einen Vergleich verschiedener Vegetationsformen zu erreichen, wurden entsprechend unterschiedliche Pflanzen gewählt und beim Bepflanzen darauf geachtet, dass zu Beginn der Untersuchungen alle verwendeten Pflanzen die gleiche Größe und damit ähnliche Blattmasse aufwiesen. Im Projektverlauf wurde die Blattmasse nicht mehr von außen beeinflusst (z.B.: durch Rückschnitt) wodurch unterschiedliche Wachstumsraten Einflüsse auf die Ergebnisse haben konnten und somit auch dieser Aspekt in den Vergleich der Pflanzen miteinfluss. Die fertigen Selbstbauwände inklusive Bepflanzung sind in Abbildung 5 dargestellt. Tabelle 5 gibt eine Übersicht über die ausgewählten Pflanzenarten in den vier Selbstbauwänden. Bei Selbstbauwand 3 wurde im Projektverlauf *Chlorophytum comosum* (Grünlilie) gegen Pflanzen der Spezies *Spathiphyllum* (Einblatt) getauscht (siehe unten).

Tabelle 5: Ausgewählte Pflanzen für die Bepflanzung der Selbstbauwände

Selbstbauwand	Pflanzenart(en)	Bezeichnung
1	<i>Epipremnum aureum</i>	Efeutute
2	<i>Nephrolepis exalta</i>	Schwertfarn
3	<i>Chlorophytum comosum</i>	Grünlilie
(3)	<i>Spathiphyllum</i> sp.	Einblatt
4	<i>Nephrolepis exalta</i> , <i>Chlorophytum comosum</i> , <i>Ficus benjamina</i> , <i>Anthurium andreaeanum</i> , <i>Yucca filamentosa</i> , <i>Asplenium</i> sp., <i>Dieffenbachia</i> sp., <i>Spathiphyllum</i> sp.	Gemischt



Abbildung 5: Fertige Selbstbauwände inklusive Bepflanzung

Um ein stetiges Wachstum und eine vitale Erscheinungsform der Pflanzen sicherzustellen, wurden die Pflanzen regelmäßig mittels automatischer Bewässerung - durch regulierbare Tropfer mit Wasser je Selbstbauwand - aus einem 70 Liter-Tank inkl. Pumpe versorgt. Zusätzlich wurde Grünpflanzen-Dünger laut Herstellerangaben mit Hilfe einer Gießkanne händisch in regelmäßigen Abständen zugefügt. Die Bewässerungsintervalle wurden im Laufe des Projekts entsprechend der beobachteten Bedürfnisse der einzelnen Pflanzenarten angepasst. So wurde am Beginn des untersuchten Zeitraums für alle Pflanzenarten ein Bewässerungsschema mit einer Dauer von 15 Minuten, 3-mal pro Woche konfiguriert. Abbildung 6 zeigt die Selbstbauwände mit den jeweiligen Pflanzenarten in KW13 2020.



Abbildung 6: Unterschiedliche Pflanzenarten v.l.n.r.: Efeutute, Schwertfarn, Grünlilie und Gemischt

Im weiteren Verlauf wurde festgestellt, dass vor allem Grүнlilie und Schwertfarn unter Umständen einen geringeren Wasserbedarf aufweisen und durch Staunässe absterben können. Grundsätzlich verhindert das gewählte Substrat Staunässe. Da Pflanzen jedoch häufig in nicht drainagefähigem Substrat angeliefert werden, kann dennoch in gewissem Ausmaß Staunässe entstehen, wenn dieses vor dem Einpflanzen nicht vollständig entfernt werden kann, da ansonsten zu viele Wurzeln beschädigt werden müssten. Gemäß dieser Beobachtung wurde das Bewässerungsintervall für diese Selbstbauwände auf 20 Minuten, 2-mal pro Woche geändert, wodurch in weiterer Folge kein nennenswerter Anpassungsbedarf bemerkt wurde.

Für die zusätzliche Beleuchtung der Pflanzen wurden Pflanzenlampen der Marke MIXC mit 60W Leistung, aufgeteilt auf 5 LED-Leisten (Datenblatt siehe Anhang) über den einzelnen Trögen installiert. Im Projektverlauf hat sich herausgestellt, dass die Pflanzenlampen aufgrund der geringen Entfernung zu den Pflanzen und gleichzeitiger Wärmeentwicklung zu Schäden an den Pflanzen führten und daher nach Rücksprache mit dem verantwortlichen Lehrpersonal in KW 35 entfernt wurden.

In KW 32 wurde bei der Selbstbauwand „Grүнlilie“ Schädlingsbefall mit einer nicht endgültig identifizierten Spezies festgestellt (Abbildung 7). Nachdem der Versuch, die Schädlinge mittels biologischer Mittel (Lauge) zu bekämpfen, erfolglos blieb und bereits Messdaten für die betroffene Pflanzenart vorhanden waren, wurden alle Exemplare der Grүнlilien durch *Spathiphyllum* sp. (Einblatt) ersetzt und das Bewässerungsschema wieder auf 15 Minuten, 3-mal pro Woche eingestellt.



Abbildung 7: Schädling in Pflanztrug

4.3.4 Messungen

Für die Bestimmung der Auswirkungen der verschiedenen Pflanzenarten auf Parameter der Raumluftqualität wurden Klimaboxen (siehe Punkt 4.2.2) im Abstand von ca. 20 cm zu den bepflanzten Trögen der jeweiligen Selbstbauwand installiert (Abbildung 8). Zusätzlich wurde ein fünftes Messgerät auf einer nicht bepflanzten Konstruktion in gleicher Höhe als Referenz verwendet (Abbildung 9).

Vorerst wurden die Selbstbauwände gemeinsam in einem wenig genutzten Gang platziert, um einerseits den Pflanzen Zeit zu geben, sich an die Bedingungen zu gewöhnen und andererseits zu bestimmen, inwiefern der genaue Standort in einem Raum die Messungen beeinflusst. Es wurde festgestellt, dass vor allem die Nähe zu Heizkörpern und Durchgängen oder offenen Türen die

Messungen stören. Um die Pflanzenarten vergleichen zu können, wurden die Selbstbauwände für die Messungen gemeinsam in einem großen Klassenraum platziert und diese am Projektende entsprechend der ursprünglichen Idee, die Selbstbauwände mehreren Klassen zur Verfügung zu stellen, aufgeteilt. Somit konnte sichergestellt werden, dass grundsätzlich Einflüsse, die den ganzen Raum betreffen (Lüften, Nutzung), eliminiert werden und eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse vorliegt. Die Tür der Klasse wurde nur in Pausen geöffnet. Tabelle 5 gibt eine Übersicht der Standorte und den zugehörigen Zeiträumen, zu denen sich die Selbstbauwände an diesen befanden. Tabelle 6 listet die Maße und Volumen der untersuchten Räume auf.

Tabelle 6: Übersicht der Standorte der neuen Begrünungssysteme

Zeitraum	Standort	Kommentar
KW 50 (2019) – KW8 (2020)	Gang vor Musikzimmer	
KW9 (2020) - KW25 (2020)	Klassenraum 121	
KW25 (2020) – KW27 (2020)	Raum 101	Nachhallzeit & Schimmelsporen
KW28 (2020) – KW2 (2021)	Klassenraum 121	
KW2 (2021) – KW3 (2021)	Raum 101	Schimmelsporen

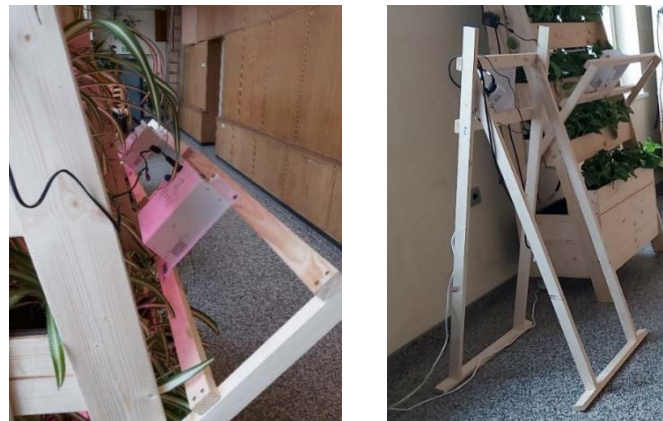


Abbildung 8: Selbstbauwand (Grünlilie) mit installierter „Klimabox“ (links), „Klimabox“ Referenzmessgerät (rechts)



Abbildung 9: Selbstbauwände im Klassenraum 121 (v.l.n.r. Schwertfarn, Efeutute, Einblatt, Gemischt)

Tabelle 7: Abmessungen der im vorliegenden Projekt zusätzlich untersuchten Räume

	Höhe	Breite	Länge	Volumen	Fenster
Klassenraum 121	4 m	6 m	10 m	240 m ³	4
Raum 101	4 m	3 m	6 m	72 m ³	1

Für die Auswertung der erhobenen Messdaten wurden die Messgeräte (Klimaboxen, siehe 4.2.2) anhand der aufgezeichneten Messreihe der Referenzmessstelle „Taborstraße“ kalibriert. Um die Genauigkeit zu überprüfen, wurden die Messgeräte für sieben Tage nebeneinander bei der Referenzstelle positioniert, Daten aufgezeichnet und die Korrelation berechnet. Anschließend wurden die Daten entsprechend korrigiert und für die Auswertungen herangezogen.

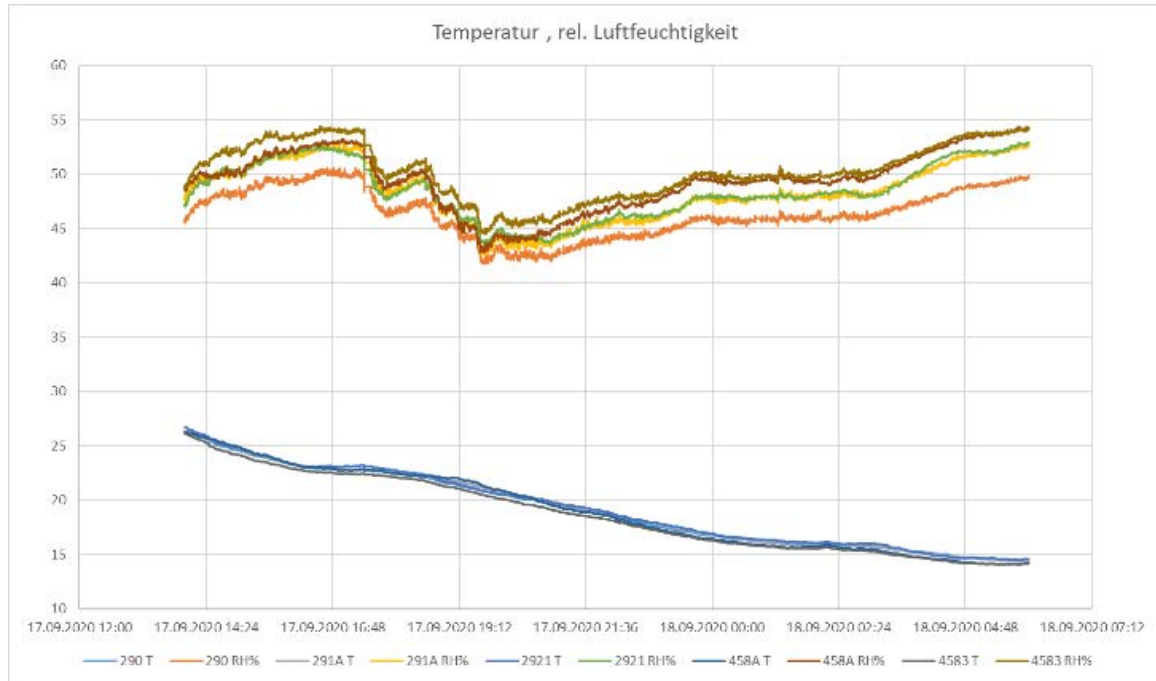


Abbildung 10: Verlauf der Temperatur und Luftfeuchtigkeit bei der Kalibration



Abbildung 11: Referenzmessstelle Taborstraße, Wien

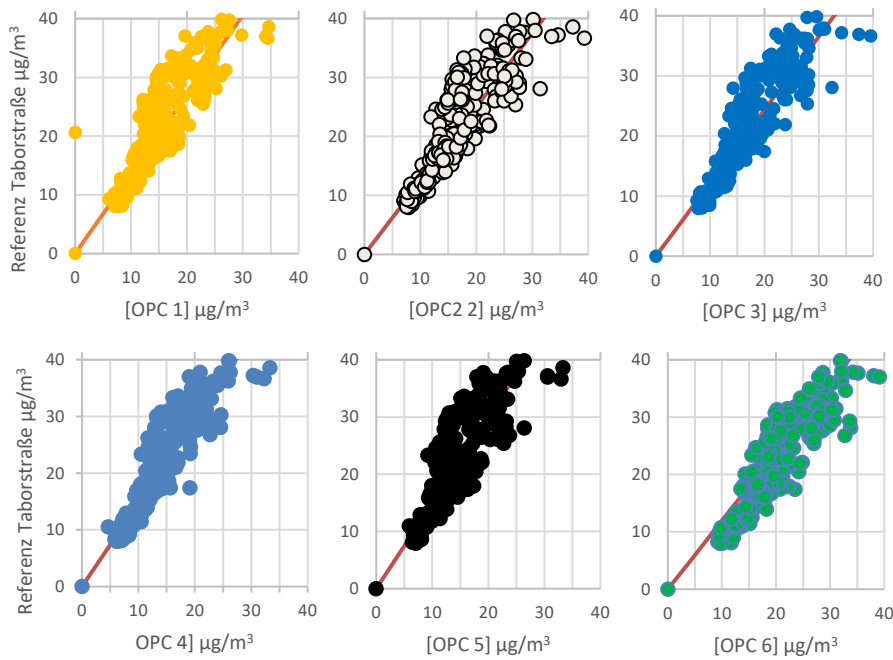


Abbildung 12: Korrelation der eingesetzten Feinstaub-Sensoren (OPC) und Referenzmessstelle Taborstraße

4.3.4.1 Bewertungsmatrix

Um eine Übersicht über die gewonnenen Ergebnisse aus den einzelnen Untersuchungen zu den unterschiedlichen Pflanzenarten zu erhalten, wurde eine simple Bewertungsmatrix erstellt. Daraus folgend wurden entsprechende Kriterien und ein Benotungssystem definiert. Da ein Vergleich der Pflanzenarten zueinander und mit einer Variante ohne Pflanzen erzielt werden soll, wurde bei der hydrothermischen Behaglichkeit und der Feinstaub- bzw. CO₂-Konzentration die durchschnittliche prozentuale Differenz zu der Variante ohne Pflanzen bewertet, indem die Werte gereiht und den Platzierungen anschließend Punkte zugeordnet wurden. Für die Reihung der vier betrachteten Varianten ergibt sich demnach für Platz 1 eine Bewertung mit 4 Punkten, für Platz 2 gibt es 3 Punkte und so weiter. Bei den Ergebnissen zur Nachhallzeit und zum Schallabsorptionsgrad wurde diese Bewertung für jedes untersuchte Frequenzband durchgeführt und anschließend daraus eine Gesamtbewertung errechnet. Tabelle 8 zeigt als Beispiel die Bewertung fiktiver Ergebnisse zu der Feinstaubkonzentration und die entsprechende Punktevergabe.

Tabelle 8: Beispiel der Bewertung der Feinstaub-Ergebnisse

	Reduktion der Feinstaub-Konzentration in %	Punkte
Pflanze 1	13	3
Pflanze 2	24	4
Pflanze 3	7	2
...

4.3.4.2 Temperatur und Luftfeuchtigkeit

Aus den im Intervall von einer Minute aufgezeichneten Messdaten von Lufttemperatur und rel. Luftfeuchtigkeit wurden im Rahmen der Auswertung 15-Minuten-Mittelwerte gebildet. Die aufgezeichneten Daten wurden vor der eigentlichen Auswertung mit Hilfe der errechneten

Korrelationsfaktoren angeglichen und anschließend mit der Datenverarbeitung fortgefahren. Für die Darstellung des Verlaufs wurde direkt auf die 15-Minuten-Mittelwerte zurückgegriffen, für die statistische Auswertung wurden Tages-Mittelwerte (TMW) ermittelt. Die Auswertung der Messdaten von Lufttemperatur und rel. Luftfeuchtigkeit im Vorprojekt erfolgte anhand der Definition der hygrothermischen Behaglichkeit nach Frank [13]. Da sich die Selbstbauwände während der Messdatenerhebung in bescheidenem Abstand zueinander in einem Raum befinden, sind keine aussagekräftigen Unterschiede im Behaglichkeitsdiagramm zwischen den einzelnen Pflanzen zu erwarten. Als Methode zur Auswertung wurde daher in diesem Projekt der direkte Gewinn an absoluter Feuchtigkeit, berechnet nach Formel 1, und eine etwaige, lokale Reduktion der Temperatur untersucht.

$$[\text{abs. Luftfeuchtigkeit}] \text{ g(H}_2\text{O)/m}^3 = \frac{M_{\text{H}_2\text{O}} * 6,1078 * 10^5 * \%RL}{R * 100} * \frac{10^{\frac{7,5 * T}{237,3 + T}}}{T + 273,15}$$

Formel 1: absolute Luftfeuchtigkeit in g(H₂O)/m³

4.3.4.3 Feinstaub

Die theoretischen Grundlagen der Feinstaub-Messungen und den durchgeführten Auswertungen wurden bereits im Endbericht des Vorprojekts GrünPlusSchule unter Punkt 2.6 [10] ausführlich erläutert. Es sollen hier daher nur die für dieses Projekt relevanten Fakten erwähnt werden. Grundsätzlich wurde die Feinstaub-Konzentration, wie im Vorprojekt, mit „OPC“ (optical particle counter) gemessen. Da für die Kalibration der Sensoren jedoch nur Messreihen für die Fraktion PM10 und PM2.5 aufgezeichnet werden konnten, wurde die Auswertung auf eben diese Fraktionen beschränkt. Die aufgezeichneten Daten wurden vor der eigentlichen Auswertung mit Hilfe der errechneten Korrelationsfaktoren angeglichen und der Vergleich der Pflanzenarten in Abhängigkeit der jeweiligen Messreihe durchgeführt.

Für die Darstellung der Konzentration in Abhängigkeit der Zeit wurden aus den im Intervall von einer Minute aufgezeichneten Daten 1-Stunden-Mittelwerte (SMW) berechnet und herangezogen (siehe Kapitel 5.1.2). Für die Berechnung der relativen Unterschiede zwischen den untersuchten Pflanzenarten wurden Tages-Mittelwerte (TMW) miteinander verglichen.

4.3.4.4 CO₂-Konzentration

Die Messung der CO₂-Konzentration in unmittelbarer Umgebung der Bepflanzung wurde mit Hilfe von Infrarotsensoren der Fa. ELT durchgeführt. Für die Darstellung des Verlaufs wurden 15-Minuten-Mittelwerte der im Intervall von einer Minute aufgezeichneten Daten verwendet. Für die Berechnung der relativen Unterschiede zwischen den untersuchten Pflanzenarten wurden Tages-Mittelwerte miteinander verglichen.

Wie bereits im Vorprojekt festgestellt wurde, ist es anhand von Langzeitmessungen, die im realen Schulalltag durchgeführt wurden, nicht möglich, den Einfluss von Begrünung verlässlich quantitativ zu bestimmen. Da aber gerade die Aufnahme der realen Verhältnisse in einer Schulklasse wertvolle Informationen und Schlüsse über die mikroklimatischen und messtechnischen Gegebenheiten und Herausforderungen bietet, wurden erneut derartige Messungen durchgeführt.

Darüber hinaus ist aufgrund der steigenden Anforderungen an Innenraumluftqualität in Bezug auf Aerosole und deren Verbreitung ein Trend zur Nutzung von sogenannten CO₂-Ampeln als Indikator für die Notwendigkeit eines Lüftungsvorgangs in öffentlichen Gebäuden wie Schulen zu erkennen [14][15][16][17][18][19]. Dabei wird unter der Annahme, dass während der Nutzung eines Raumes die Aerosol-Konzentration mit der CO₂-Konzentration korreliert, ein Signal ausgegeben, wenn eine bestimmte CO₂-Konzentration überschritten wird. Daraus folgend ist es interessant zu verstehen, wie und ob Begrünung im Innenraum einen Einfluss auf die tatsächlich „messtechnisch erfassbare“ CO₂-Konzentration hat und somit die gewünschte Aussagekraft oben genannter Geräte bzgl. der Verbreitung der Aerosole negativ beeinflusst wird.

4.3.4.5 Raumakustik

Im Endbericht des Vorprojekts GrünPlusSchule, unter Punkt 2.8 und 3.6 [10], wurde bereits ausführlich auf die theoretischen Grundlagen der Akustik und Messung der Nachhallzeit, sowie der Berechnung der Schallabsorptionsgrades eingegangen. Anknüpfend daran werden hier die für dieses Projekt spezifischen Fakten erwähnt.

Für die Bestimmung der Auswirkungen auf die Raumakustik wurde die Nachhallzeit angelehnt an ISO 3382-3 [20] im Raum 101 gemessen. Dazu wurden die Selbstbauwände einzeln, nacheinander in den Raum eingebracht und anschließend die Nachhallzeit mit Kombinationen von zwei Mikrofon- und zwei Impulspositionen für jede der Pflanzenarten ermittelt (siehe Abbildung 13, Abbildung 14). Konkret wurden für die Messungen als „Mikrofon“ zwei „Norsonic Nor140“ Schallanalysatoren den Gegebenheiten entsprechend möglichst unsymmetrisch im Raum verteilt und als „Impuls“ anschließend ein Luftballon zum Platzen gebracht.

Die Ergebnisse wurden in Abhängigkeit der Frequenz dargestellt und die relative Abweichung der einzelnen Pflanzenarten zueinander berechnet (siehe Kapitel 5.1.5). Zusätzlich wurde der Schallabsorptionsgrad der unterschiedlichen Pflanzen berechnet und verglichen.



Abbildung 13: 360°-Aufnahme von Raum 101 mit positionierter Begrünungsmaßnahme und zwei Mikrofonen zur Messung der Nachhallzeit

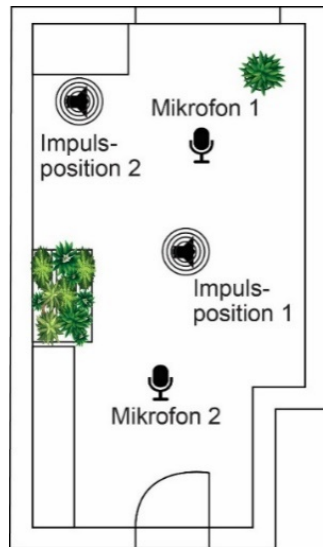


Abbildung 14: Grundriss Raum 101 (links) und Foto von Raum 101 mit installierten Mikrofonen (rechts)

4.3.4.6 Schimmelsporenkonzentration

Die Schimmelsporenkonzentration, angegeben als „Koloniebildende Einheiten (KBE) pro m³ Luft“, wurde analog zur Nachhallzeit im Raum 101 gemessen, der mit seiner Fläche und Raumhöhe ein für die Untersuchungen geeignetes Raumvolumen darstellt. Dazu wurden die DIY-Begrünungsmaßnahmen nacheinander, einzeln in den Raum eingebracht, für 24 Stunden im ungelüfteten Raum belassen und anschließend die Raumluft mit Hilfe eines Luftkeimsammlers (Abbildung 15), angelehnt an DIN ISO 16000-18 [21] beprobt. Die beladenen Nährböden wurden anschließend normgerecht bei ca. 23°C und 40% rel. Luftfeuchtigkeit bebrütet und die Anzahl der koloniebildenden Einheiten nach 3, 5 und 10 Tagen bestimmt. Als Nährböden wurden Malzextrakt-Agar und DG18-Agar für die Bestimmung der Gesamtsporenzahl verwendet.

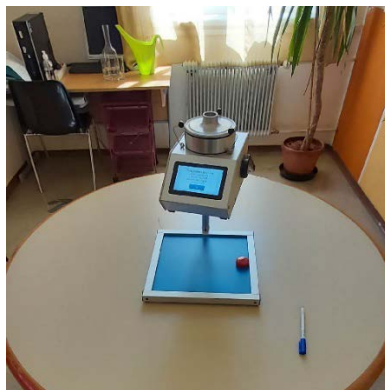


Abbildung 15: Luftkeimsammler im beprobten Raum (links), Bebrüteter Nährboden (rechts)

Da die Durchführung der Bestimmung wesentlich vom gewählten Probevolumen abhängt und es bei der ersten Messreihe, bei einem Probevolumen von 300 bzw. 150 Liter teilweise zu einer Überladung der Nährböden gekommen ist (Anzahl KBE größer als 100, siehe ISO 16000-17 [22]), wurde im Jänner 2021 eine zweite Messkampagne unter gleichen Bedingungen, jedoch mit angepassten Probevolumina von 50 bzw. 100 Liter durchgeführt. Für alle Pflanzenarten wurde anschließend der Mittelwert aus den entsprechenden Messungen berechnet und diese miteinander und mit Richtwerten des Umweltbundesamt Deutschland verglichen. Diese Richtwerte wurden aus einer Vielzahl von empirischen Daten berechnet und werden als 95. Perzentil angegeben. Das bedeutet,

dass 95% der Messergebnisse kleiner als oder gleich dem angegebenen Wert waren. Tabelle 9 zeigt die entsprechenden Werte aus dem Leitfaden zur Vorbeugung, Erfassung und Sanierung von Schimmelbefall in Gebäuden [23].

Tabelle 9: Ausschnitt Schimmelleitfaden Anhang 8 [23]

Kategorie	95. Perzentil Gesamtsporenzahl in KBE/m ³
Innenluft Sommer (IL-S)	743
Innenluft Winter (IL-W)	589

4.4 Wandgebundene Innenbegrünung

Im Vorprojekt GrünPlusSchule wurde die hygrothermische Behaglichkeit vor allem in Abhängigkeit der Nutzung der Klassenräume und Jahreszeiten bestimmt. Ziel dieser Arbeit war es, diese Auswertung um ein Kriterium - das Wetter (außen) - zu erweitern, um beurteilen zu können, ob die Wettergegebenheiten einen Einfluss auf die Wirkung der Begrünung haben.

4.4.1 Auswirkungen auf die Hygrothermische Behaglichkeit nach Wetterverhältnissen

Im mit dem Vliessystem begrünten Klassenraum (Abbildung 16) sowie in der danebenliegenden gleichen Referenzklasse wurden Messdaten über den gesamten Messzeitraum von 2016 bis Sommer 2019 ausgewertet. Dabei wurde der Fokus auf die Behaglichkeit abhängig von der gemessenen Lufttemperatur und rel. Luftfeuchtigkeit in den Räumen gelegt und in Abhängigkeit der Wetterdaten miteinander verglichen. Da Wetterdaten mit einbezogen wurden, mussten diese hinsichtlich verschiedener Randbedingungen gefiltert werden. Als Filterkriterien wurden folgende Unterscheidungen gemacht: Winter, Sommer, sonnig, bewölkt, feucht und trocken. Des Weiteren wurde die Raumbelagung als Kriterium in die Filterung mit einbezogen. Die Filterung der Wetterdaten selbst erfolgte nach der gemessenen Sonneneinstrahlung, Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit, gemessen am Turnsaaldach der Schule.



Abbildung 16: Vliessystem im Klassenraum 308

Die Sonneneinstrahlung ist vom Vorhandensein von Wolken abhängig. An einem trübem Tag im Winter beträgt die Strahlungsleistung 50 W/m² oder weniger, während bei einem wolkenlosen Himmel bis zu 1000 W/m² möglich sind [24].

Die Wetterstatistiken der Stadt Wien definieren einen Sommertag mit Mindesttemperaturen von 25°C. Die rel. Luftfeuchtigkeit ist im Sommer niedriger als im Winter, erkennbar in den Klimadaten der Stadt Wien [25]. Aufgrund dessen wurden folgende Kategorien für die Unterscheidung der Wetterverhältnisse anhand der Strahlung und Temperatur festgelegt und die Daten danach gefiltert:

Tabelle 10: Filterkriterien der Wetterverhältnisse

Bezeichnung	Filterkriterien (Strahlung, Temperatur, Luftfeuchtigkeit)
sonnig an Sommertagen	>700 W/m ² und >25°C
bewölkt an Sommertagen	<200 W/m ² und >25°C
sonnig an Wintertagen	>500 W/m ² und <5°C
bewölkt an Wintertagen	<100 W/m ² und <5°C
hohe Luftfeuchtigkeit	rel. Luftfeuchtigkeit >90%
niedrige Luftfeuchtigkeit	rel. Luftfeuchtigkeit <60%

Für die Temperatur und die rel. Luftfeuchtigkeit wurden Tagesmittelwerte und für die Strahlungsleistung die Maximalwerte herangezogen.

4.5 Wandgebundene Außenbegrünung

4.5.1 Methode zur Ermittlung der Auswirkung von Außenbegrünung auf das Innenklima

Aufbauend auf den Auswertungen aus dem Vorprojekt, bei dem die thermischen Dämmeigenschaften von fassadengebundener Begrünung im Winter betrachtet und erforscht wurden, wurde im Rahmen dieses Projektes der Einfluss derselben Außenbegrünungsmaßnahmen auf das Raumklima im Sommer bzw. auf die sommerliche Überwärmung untersucht.

4.5.1.1 Untersuchte Systeme

Es wurden zwei unterschiedliche, an der Südfassade in Richtung Sportplatz im Innenhof angebrachten, Fassadenbegrünungssysteme (Trogssystem, Kassettensystem) untersucht (Abbildung 17).



Abbildung 17: Begrünungssysteme im Innenhof des Gymnasiums. Links im Bild: Trogsystem, rechts im Bild: Kassettensystem

Folgende Messwerte sind für beide Begrünungssysteme vorhanden (siehe Abbildung 18):

- Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit der Außenluft
- Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit der Innenraumluft
- Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit der Luft im Hinterlüftungsspalt
- Oberflächentemperaturen innen
- Oberflächentemperaturen außen, jeweils am begrünten und am nicht begrünten (Referenz-)Wandbereich
- Wärmestrom durch die Fassade, jeweils am begrünten und am nicht begrünten (Referenz-) Wandbereich

Das umgebende Außenklima wurde mittels einer Wetterstation am Turnsaaldach (ebenfalls im Innenhof der Schule) gemessen.

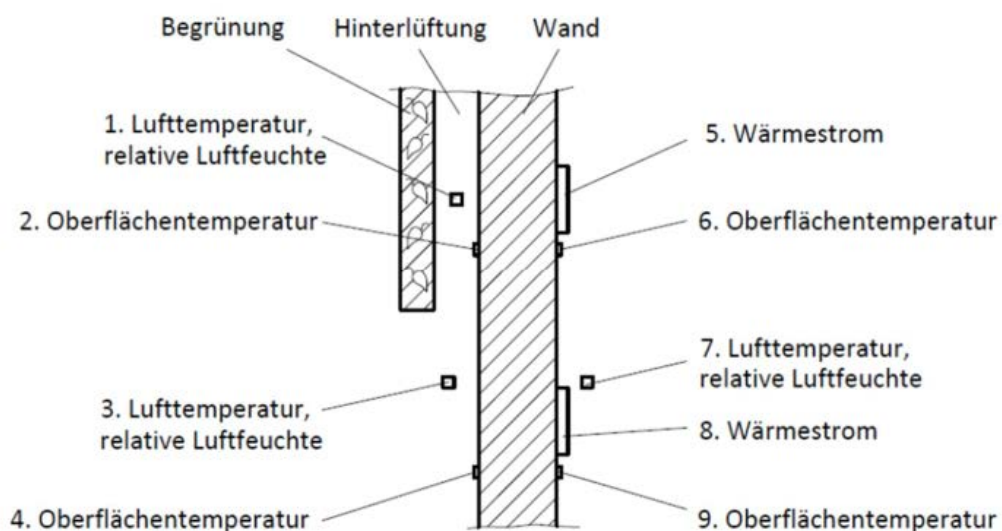


Abbildung 18: Schematische Darstellung des Messaufbaus [10]

Das Trogsystem ist an einer 60 cm starken, ungedämmten Altbauwand (Vollziegel) angebracht und hat eine Fläche von 58 m². Bei der Wand handelt es sich um die Außenwand des Stiegenhauses. Auch die Referenzmessungen an einem nicht begrünten Wandbereich sind an der Außenwand des Stiegenhauses erfolgt. Da sich hier hinter der begrünten Wand und der Referenzfläche das Stiegenhaus befindet, wird die Innenraumtemperatur und die rel. Luftfeuchtigkeit der Innenraumluft nur an einem Ort (im Stiegenhaus) gemessen.

Das Kassettensystem ist an einem später errichteten Zubau der Schule mit ungedämmten Hochlochziegelwänden angebracht und hat eine Fläche von 14,4 m². Bei der Wand handelt es sich um eine Außenwand eines Klassenzimmers. Die Referenzmessungen am nicht begrünten Wandelement erfolgten hier an der Außenwand des Chemieraumes.

4.5.1.2 Datenanalyse

Für die Untersuchungen wurden Daten der aufgezeichneten Jahre 2016 bis 2019 auf bestimmte „typische Sommerverhalten“ untersucht. Da sich die Untersuchungen auf das Verhalten im Sommer beschränken, kommen nur repräsentative Tage mit Außentemperaturen von ≥ 25 °C über einen Zeitraum von mindestens fünf Stunden in Betracht.

Folgende maßgebende (repräsentative) Tage im Jahr 2016 wurden für die eindeutige Darstellung der Bewertung/Ergebnisse ausgewählt:

22.05.2016 / 30.06.2016 / 22.07.2016 / 03.08.2016 / 09.09.2016

Um das Aufheiz- und Auskühlverhalten der nicht begrünten Wand quantifizieren zu können, wurde für die Auswertung zusätzlich noch ein repräsentativer längerer Zeitraum vom 18.07.2016 bis zum 04.08.2016 mit hohen Außentemperaturen ausgesucht.

In den Jahren 2017 bis 2019 wurden anstelle maßgebender Sommertage Messwerte der Temperatur und Luftfeuchtigkeit auf ein typisches Sommerverhalten (analog zum Jahr 2016) untersucht. Die folgenden Zeiträume beinhalten eine Vielzahl an Sommer- und Hitzetagen und wurden für die Darstellung der Beurteilung herangezogen:

2017: 09.07.17 – 13.08.17

2018: 04.06.18 – 09.07.18

2019: 09.07.19 – 13.08.19 (nur System 1 – Trogsystem)

4.5.1.3 Modellierung der Fassadenbegrünung

Nach [26] sind die hier untersuchten Systeme aufgrund der stark belüfteten Luftschicht zwischen dem Begrünungssystem und der bestehenden Wandoberfläche wie eine vorgehängte hinterlüftete Fassade zu modellieren. Dabei wird der Wärmedurchgangswiderstand der Luftschicht und aller weiteraußenliegenden Schichten vernachlässigt. Stattdessen wird ein erhöhter Wärmeübergangswiderstand zur Anwendung gebracht: Anstelle eines Wärmeübergangswiderstandes von $R_{se} = 0,04 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$, wird $R_{se} = 0,13 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ empfohlen. Es ist jedoch anzumerken, dass dieser Wert als ein technischer Richtwert zu betrachten ist. Der Wärmeübergangswiderstand hängt von der Lage des Gebäudes und seiner Umgebung ab und kann von dem in [26] empfohlenen Wert abweichen. Der Wärmedurchgangswiderstand ist der Kehrwert des U-Wertes (siehe Formel 2).

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

Formel 2: Verhältnis zwischen Wärmedurchgangswiderstand und U-Wert.

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 3).

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

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

Formel 3: Berechnung Wärmedurchgangswiderstand durch Summieren der Wärmedurchlasswiderstände und Wärmeübergangswiderstände.

Im Vorprojekt wurde der Einfluss der Fassadenbegrünung auf den U-Wert im Winter ermittelt. Ziel ist es nun, den Einfluss der Fassadenbegrünung auf den U-Wert bzw. Wärmestrom durch die Wand im Sommer zu berechnen.

Es wurden Teile einer homogenen Fassade begrünt, deren ΣR_i und R_{si} an den gewählten Messstellen gleich ist. Die vorgehängte Begrünung wirkt sich nur auf den R_{se} aus. Der veränderte R_{se} verändert den R_T und in weiterer Folge nach Formel 2 den U-Wert. Die U-Werte können danach verglichen werden. Der U-Wert mit begrünter Fassade wird in Abbildung 19 mit „U_g“, und der U-Wert mit nicht begrünter Fassade mit „U_ng“ schematisch dargestellt.

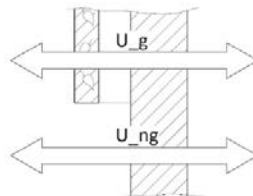


Abbildung 19: Darstellung der U-Werte, die miteinander verglichen werden. U_g für den U-Wert mit Begrünung und U_{ng} für den U-Wert ohne Begrünung.

Sowohl für den begrünten Teil der Fassade als auch für den nicht begrünten Teil wurden jeweils zum selben Zeitpunkt die jeweiligen Wärmedurchgangswiderstände aus den Messdaten berechnet (nach Formel 4).

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

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

Formel 4: Berechnung der Wärmedurchgangswiderstände

4.5.1.4 Simulation

Die Stärke der Hinterlüftungsebene hat erheblichen Einfluss auf das hygrothermische Verhalten einer Wandkonstruktion. Je nach Temperatur und Feuchteverhältnissen im Bauteil und in der Außenluft können dadurch Wärme und Feuchte ins Bauteil oder aus dem Bauteil transportiert werden [27].

Je mehr Wärme durch die Hinterlüftungsebene in das Bauteil transportiert wird, umso wärmer wird die Oberfläche an der Innenseite der Wand. Durch die Simulation des Wandaufbaus mit unterschiedlichen Stärken der Hinterlüftungsebene von Trog- und Kassettensystem wurde der Einfluss dieser auf die Oberflächentemperatur im Innenraum untersucht.

Für die Simulationen wurde die Software „WUFI 2D“ des Fraunhofer Instituts für Bauphysik IBP in der Version 4.2.1 verwendet. Mit „WUFI“ (**W**ärme und **F**euchte **I**nstationär) können Bauteile auf ihr wärme- und feuchtetechnisches Verhalten überprüft werden. Die Software basiert auf den neuesten Erkenntnissen in Bezug auf Dampfdiffusion und Flüssigtransport. Als Randbedingungen können gemessene Außenklimawerte einschließlich Schlagregen und Sonneneinstrahlung verwendet werden, wodurch sich das Verhalten mehrschichtiger Bauteile, zweidimensionaler Anschlüsse und sogar mehrzonaler Gebäude unter Einfluss natürlicher Bewitterung realistisch untersuchen lässt [28].

Um die vor Ort gemessenen Klimadaten verwenden zu können, wurden aus den Messwerten Stundenmittelwerte generiert. Insgesamt beträgt die Simulationsdauer jeweils ein Jahr, wobei für die jeweilige Simulation der in Betracht gezogene Zeitraum dargestellt wird.

4.5.1.4.1 Randbedingungen und Einstellungen

Da beim Trogsystem, anders als beim Kassettensystem, die Tröge mit Abstand zueinander montiert sind, wurde dies bei der Modellierung berücksichtigt. Um das Trogsystem inklusive der Zwischenräume in der verwendeten Software modellieren zu können, wurde die Substratschicht mit einer Stärke von 10 cm „verschmiert“ auf die gesamte Höhe der Konstruktion angenommen. Für die Simulationen wurde die Fläche des Begrünungssystems über die gesamte Fläche der Außenwand des Klassenzimmers modelliert.

Um den Luftwechsel in der Hinterlüftungsebene in den Simulationen zu berücksichtigen, wurden Luftwechselquellen in dieser Ebene eingefügt. Die Höhe der Luftwechselzahl hängt von der Stärke der Hinterlüftungsebene ab. Richtwerte dafür wurden in [29] definiert. Da das Trogsystem an der Ober- und Unterseite eine Verblendung aufweist, wurden die Werte hier um 30 % abgemindert.

Zur Berechnung werden die Bauteilschichten in ein numerisches Gitter aufgeteilt. In der Simulation werden die berechneten Variablen für jedes Gitterelement konstant angenommen. In Abbildung 20 ist als Beispiel das Gitter des mit dem Kassettensystem begrüntes Wandelementes abgebildet.

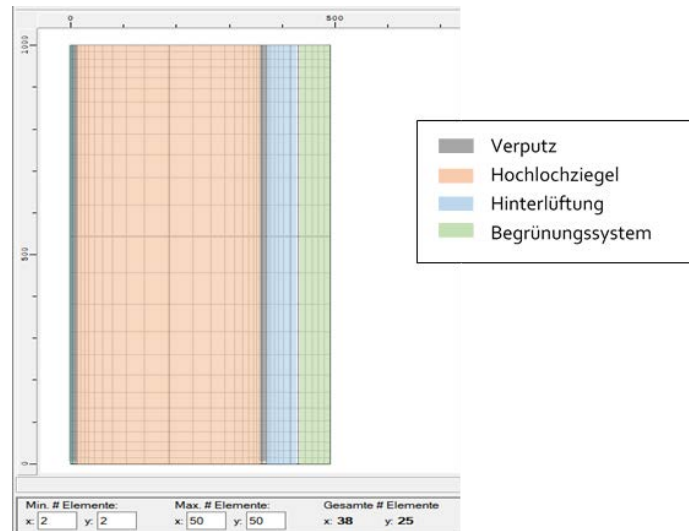


Abbildung 20: Beispiel für ein Numerisches Gitter – Wandelement mit Begrünung durch das Kassettensystem

4.5.1.4.2 Variation der Stärke der Hinterlüftungsebene

Da das Kassettensystem aufgrund seines homogeneren Systemaufbaus in der Simulation besser abgebildet werden kann, wurde dieses System für die Untersuchung des Einflusses der Stärke der Hinterlüftungsebene auf die Oberflächentemperatur an der Innenseite herangezogen.

Ziel der Untersuchung war es, eine optimale Stärke der Hinterlüftungsebene anzugeben. Die beiden verbauten Systeme weisen einen Abstand von ca. 6 cm zur Außenwand auf. In den Simulationen wurden fünf Varianten der Stärke der Hinterlüftungsebene in Schritten von 2 cm bis max. 10 cm untersucht. Hierbei wird nur die Temperatur betrachtet. Bei zu kleinen Hinterlüftungsöffnungen muss beachtet werden, dass kein Kondensat in der Hinterlüftungsebene entsteht.

4.5.1.5 Sommerliche Überwärmung

Ziel der Untersuchungen war es, eine Möglichkeit zu finden, wie die Gebäudebegrünung in der Berechnung der sommerlichen Überwärmung berücksichtigt werden kann. Basis für die Überlegungen dazu sind die Ergebnisse der Auswertung der Messwerte der begrünten Fassaden, sowie die dazu durchgeführten Simulationen. Folgende Ansätze wurden dabei verfolgt:

- Abminderung solarer Einstrahlung und Wärmegewinne durch opake Bauteile
- Erhöhung des äußeren Wärmeübergangswiderstands R_{se}
- Reduktion des Tagesmittelwerts der Außentemperatur

Für die Berechnungen der Luftdichtheit wurde ein Wert von $n_{50} = 3,50 \text{ h}^{-1}$ angenommen. Dieses Maß der Luftdichtheit entspricht der Luftdichtheit typischer Altbauten [30].

Für die inneren Lasten von Personen und Geräten wurde für die Untersuchung des Sommerverhaltens der Klasse ein Profil „Schulklasse (ganztags) mit 25 anwesenden Personen“ erstellt. Die Wärmeeinträge durch Personen, Geräte und die solaren Gewinne sind in Abbildung 21 dargestellt.

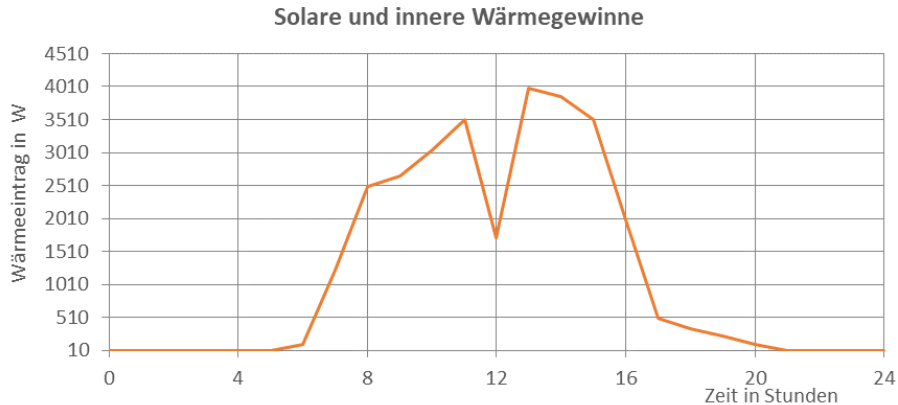


Abbildung 21: Interne und solare Wärmegewinne unter Berücksichtigung der Anwesenheit im Raum

Die Berechnung der sommerlichen Überwärmung wurde sowohl mit dem Normwert von $R_{se,norm} = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$ gemäß [26], als auch mit den veränderten Werten von $R_{se,Grün} = 1,93 \text{ m}^2\text{K/W}$ und $R_{se,NichtGrün} = 1,04 \text{ m}^2\text{K/W}$, wie in Kapitel 4.5.1.4 beschrieben, durchgeführt. Der Wärmeübergangswiderstand an der Innenseite R_{si} wurde nicht variiert. Hier wurde der in [26] definierte Wert $R_{si} = 0,13 \text{ W/m}^2\text{K}$ verwendet.

Das Klima wird durch die mittlere Tagestemperatur und den Standort definiert. Als mittlere Tagestemperatur wird die vom Österreichischen Institut für Bautechnik (OIB) definierte Normaußentemperatur mit einer durchschnittlichen Überschreitungshäufigkeit von 13 Tagen (NAT-T13) [31] verwendet.

4.5.2 Mikroklimasimulation

Unter Verwendung der uhiSolver-Software wurden dynamische 3D-Simulationen für den intensiv begrünten Innenhof der Schule durchgeführt, um Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftströmungsgeschwindigkeiten und Strahlungsdichte im Innenhof und seiner Umgebung zu bestimmen. Zur Validierung der Software wurden die Simulationsergebnisse mit Messdaten verglichen, welche eine gute Übereinstimmung zeigen. Basierend auf diesen Simulationsergebnissen wurde die gefühlte Temperatur [32] berechnet, um die Auswirkung der Fassadenbegrünung in einem typischen Innenhof eines Wohnblocks auf den thermischen Komfort des Menschen zu bewerten.

Als Input für die Simulation wurden die gesammelten Messdaten der Begrünungsmaßnahmen im Innenhof, Lufttemperatur und rel. Luftfeuchtigkeit hinter (im Lüftungsspalt) und vor der Fassadenbegrünung sowie auf dem begrünten Dach (siehe auch 4.2) verwendet. Die Grundlage der Simulation ist der 1. August 2017, ein wolkenloser heißer Tag mit innerstädtischen Temperaturen von 35 °C , die auch am Nachmittag in der Schule gemessen wurden. Zusätzlich zu der Wechselwirkung von Strahlung und Luft mit den Gebäuden, wurden die vorhandenen Pflanzen (grüne Wände, Bäume) mit all ihren thermodynamischen Effekten vollständig in die Simulation einbezogen: Reflexion, Schatten, Verdunstung und Feuchtigkeit.

Der sogenannte uhiSolver der Rheologic GmbH in Wien ist ein neuerlich entwickeltes Simulationsprogramm für das Mikroklima. Im Rahmen des von der FFG geförderten Forschungsprojekts "UHI Black Box" [33] wurde zwischen Mai 2019 und April 2020 die technische Machbarkeit eines "Black Box-Modells" getestet, um unterschiedliche Gebäudetypen und Bodenflächen in der uhiSolver-Software abzubilden. Der manuelle Aufwand bei der Modellerstellung sollte durch Reduzierung der Parametervielfalt minimiert werden, ohne die Genauigkeit der Simulation hinsichtlich der Ergebnisse für die Bewertung des städtischen Mikroklimas bedeutend zu beeinflussen. Untersucht wurden die fünf wichtigsten Gebäude- und Bodentypen in Wien.

Als wesentliche Parameter wurden Albedo, Dichte, Wärmewiderstand und die spezifische Wärmespeicherkapazität von Gebäuden und Bodenflächen identifiziert. Diese Parameter wurden verwendet, um das Wärmeverhalten der verschiedenen Arten von Gebäuden und Bodenoberflächen unter Verwendung des Algorithmus gemäß ÖNORM EN ISO 13786 [34] darzustellen.

4.5.3 Methode zur Ermittlung der Wechselwirkungen von wandgebundener Außenbegrünung und Photovoltaik

Aufbauend auf den seit 2009 durchgeführten zahlreichen Untersuchungen der Kombination von Photovoltaik und Fassadenbegrünung am Öko-Freiland-Prüfstand der TU Wien und Entwicklung der multifunktionalen Systemlösung „Fassade mit Begrünung“ im Rahmen der Dissertation Penaranda [42] wurden im Projekt GrünPlusSchule am GRG7 drei Versuchsflächen - zwei mit Kassettensystem und PV und eine mit nur PV als Referenz - installiert. Dabei wurde untersucht, wie sich das Begrünungselement auf die Temperatur und in weiterer Folge auf die Leistung der PV-Module auswirkt. Es sollte festgestellt werden, ob der unterschiedliche Abstand von fassadengebundener Begrünung und Photovoltaik-Paneelen zu unterschiedlichen Oberflächentemperaturen der Module führt. Die Temperaturverläufe dreier Photovoltaikmodule wurden dazu miteinander verglichen und analysiert. Zwei der Module sind in den Abständen 44 cm (F1) und 25 cm (F2) vor der Fassadenbegrünung angebracht, das dritte ohne Begrünung (F3) dient als Referenzmodul, siehe Abbildung 22. Die Oberflächentemperaturen der drei Module wurden im Fünf-Minuten-Rhythmus aufgezeichnet.



Abbildung 22: Photovoltaikmodule v.l.n.r.: F1 (44 cm Abstand), F2 (25 cm Abstand) und F3 (Referenzmodul) an der Außenfassade (links) & Seitenansicht der Photovoltaikmodule (rechts)

Der Ertrag einer Standard-Photovoltaikanlage hängt neben dem nominellen Wirkungsgrad der Module von deren Temperatur und der Ausrichtung zur Sonne ab. Treffen die Sonnenstrahlen senkrecht auf die Solarzelle auf, ist die Wirkung am größten.

Bereits vor der Installation war bekannt, dass das Flachdach und die Fassaden nicht zur Gänze beschattungsfrei für die Photovoltaik genutzt werden können. Die ökologische Ausrichtung des BRG7 und die Lage im zentralen urbanen Raum hatten bei der Standortentscheidung jedoch einen höheren Wert, deshalb mussten für die PV-Anlagen die besten für die Messungen geeigneten Standorte gefunden werden. Aus diesem Grund wurden im Rahmen des Projektes GrünPlusSchule an mehreren Punkten Sonnenwegdiagramme (siehe Abbildung 23 und Abbildung 24) vermessen, damit die schattenreduzierten Bereiche ermittelt werden konnten.

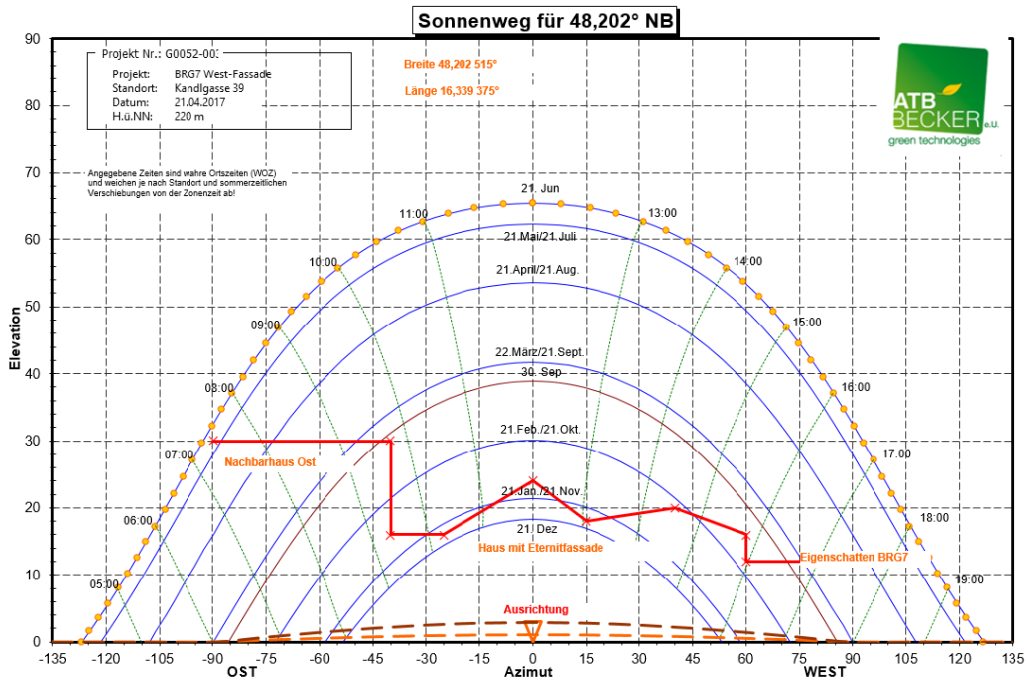


Abbildung 23: Sonnendiagramm Fassade West [35]

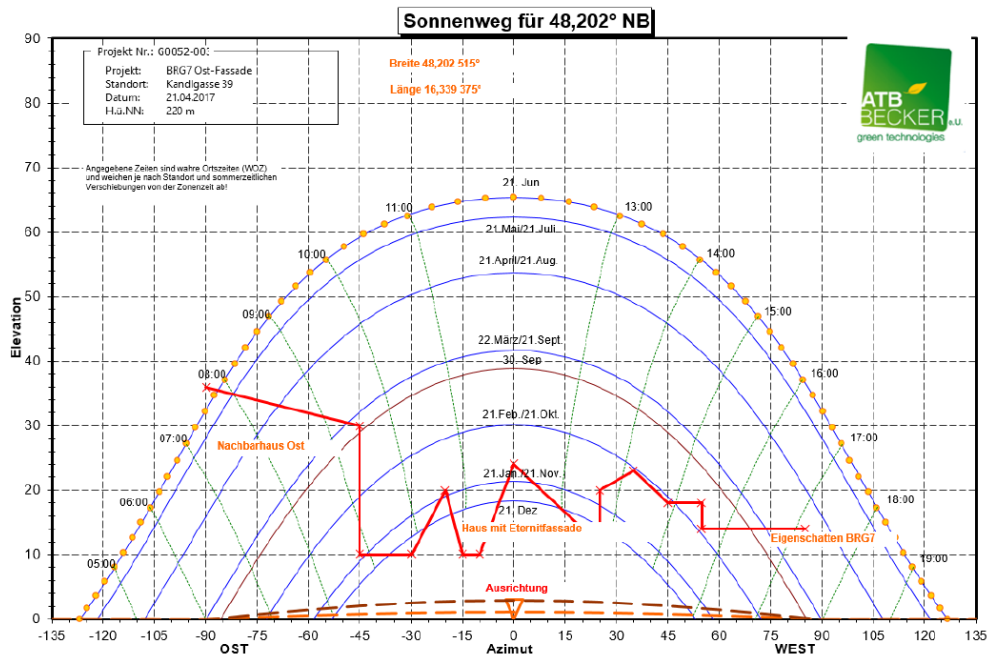


Abbildung 24: Sonnendiagramm Fassade Ost [35]

Für den Wirkungsgrad der Solarzelle spielt ihre Temperatur eine erhebliche Rolle. Warme Solarzellen weisen geringere Spannung bei gleichem Strom auf und können daher weniger Leistung abgeben.

Durch den Stromfluss erhöht sich die Temperatur einer Solaranlage selbst an kalten Wintertagen schnell auf 25 °C oder mehr; im Sommer kann sie bei Normalbetrieb bis zu 70 °C heiß werden.

Die hier eingesetzten Solarzellen weisen einen negativen Temperaturkoeffizienten für die Leistung auf, wodurch es mit steigender Modultemperatur zur Abnahme der Leistung von bis zu 30 % gegenüber Standard-Testbedingungen kommt.

5 Ergebnisse

5.1 Selbstbauwände: Leistungsbewertung der unterschiedlichen Pflanzenarten

Aufgrund der unterschiedlichen Raumnutzungs-Szenarien von Schulklassen und der Tatsache, dass die untersuchten Räume im Messzeitraum durch coronabedingtes „Home-Schooling“ teilweise ungenutzt waren, wurden die Daten selektiert und die Tage herangezogen, an denen von allen eingesetzten Messgeräten ein PM10 Tages-Mittelwert (TMW) von mindestens 10 µg/m³ gemessen wurde und infolgedessen auf Raumnutzung rückgeschlossen werden konnte. Folgende Tage wurden repräsentativ für die Darstellung der Ergebnisse ausgewählt:

Tabelle 11: Für die Auswertung herangezogene Tage

Messreihe 1
02. – 03.; 06.; 09. – 13. & 24. März 2020
Messreihe 2
18. – 20.; 22. & 25. – 29. Mai 2020
Messreihe 3
03. - 05.; 08. – 10.; 12.; 15. & 30. Juni 2020

5.1.1 Übersicht und Bewertungsmatrix

Tabelle 12 zeigt die Bewertungsmatrix mit den entsprechenden Ergebnissen. Die Pflanzenart Efeutute weist knapp gefolgt von Schwertfarn insgesamt die höchste Wirkung auf, danach folgt Gemischt und Grünlilie. Anhand der Daten in der Tabelle ist ersichtlich, dass Efeutute im Gegensatz zu Schwertfarn vor allem bei Feinstaub, CO₂ und Akustik eine höhere „Leistung“ bietet.

Tabelle 12: Bewertungsmatrix für Innenraumluftqualität

		Efeutute	Grünlilie	Schwertfarn	Gemischt
Behaglichkeit	Temperatur	3	2	4	1
	Abs. Feuchtigkeit	4	2	3	1
	CO ₂	4	1	2	3
Feinstaub	Fraktion PM10	2	4	1	3
	Fraktion PM2.5	3	1	2	4
Akustik	Nachhallzeit	4	1	3	2
	Schallabsorptionsgrad	4	2	3	1
Punkte Gesamt		24	13	18	15

5.1.2 Auswirkungen auf die Luftfeuchtigkeit und Lufttemperatur

Für Auswertung und Darstellung der erhobenen Daten zu Lufttemperatur und rel. Luftfeuchtigkeit wurde auf die in Tabelle 11 definierten Schultage zurückgegriffen und die Messdaten entsprechend gefiltert. Bei Betrachtung des Datensatzes fällt auf, dass bei allen Pflanzen Veränderungen durch Einflüsse wie Lüften bei Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit gleichzeitig auftreten und die Messwerte durchgehend konstant voneinander abweichen (Abbildung 25).

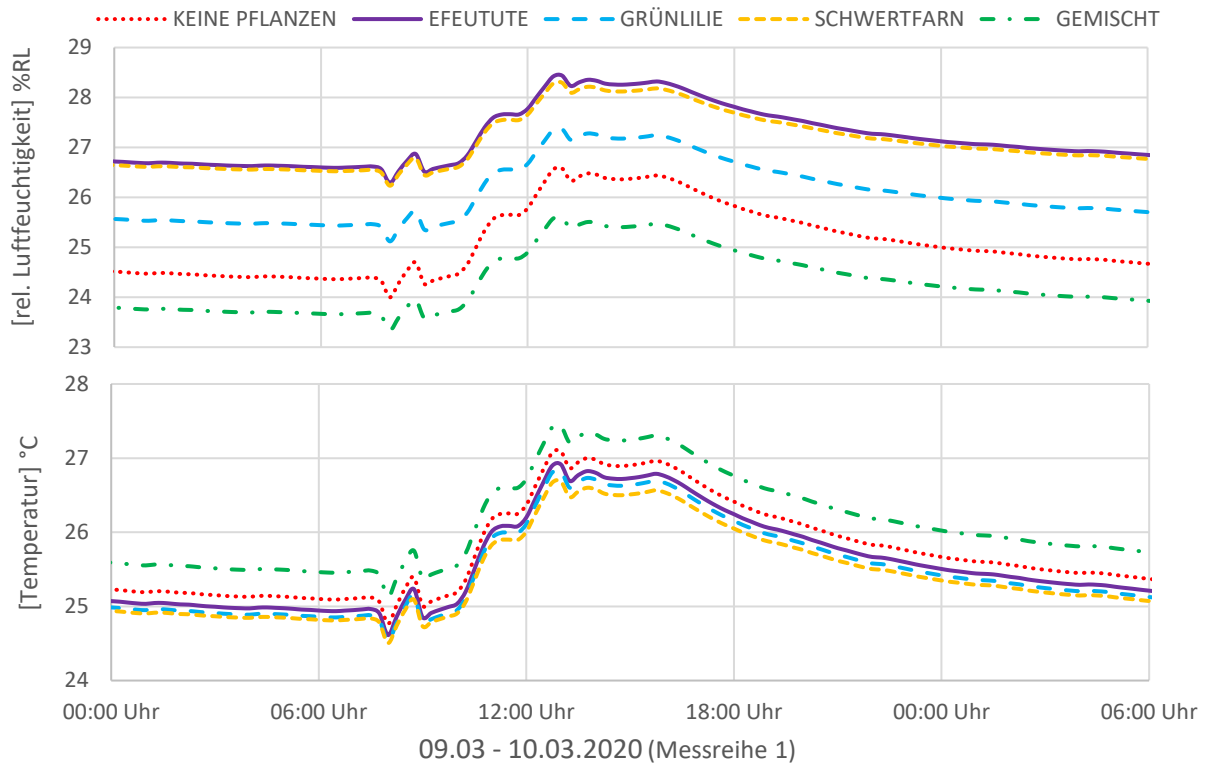


Abbildung 25: Relative Luftfeuchtigkeit (oben) & Lufttemperatur (unten)

Da die rel. Luftfeuchtigkeit maßgeblich von der Temperatur abhängig ist, wurde zusätzlich die absolute Luftfeuchtigkeit nach Formel 1 berechnet. Anschließend wurden die in Tabelle 13 ersichtlichen Werte berechnet, um die Messreihen statistisch zu beschreiben. Abbildung 26 zeigt den Verlauf der absoluten Luftfeuchtigkeit am ausgewählten Beispieltag.

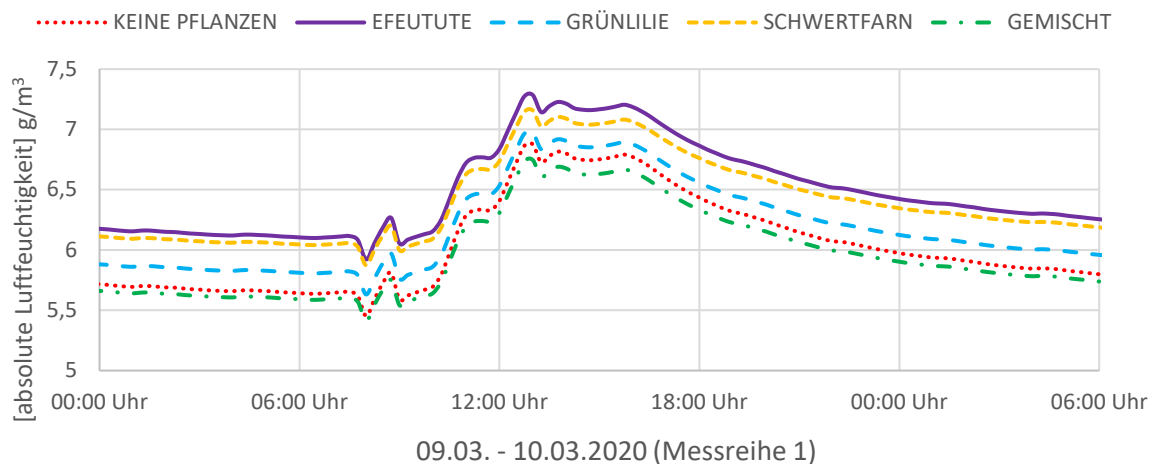


Abbildung 26: Absolute Luftfeuchtigkeit von 09.03 bis 10.03.2020

Die Unterschiede der Pflanzen zueinander sind, unter der Berücksichtigung der Messunsicherheit, nicht signifikant, jedoch führt Efeutute, gefolgt von Schwertfarn und Grünlilie in allen Messreihen reproduzierbar zu den größten Zuwächsen an (absoluter) Feuchtigkeit und die gemischte Bepflanzung scheint keinen Einfluss auf die Feuchtigkeit zu haben.

Tabelle 13: Statistische Auswertung der absoluten Luftfeuchtigkeit

		MW Gesamte Messreihe g(H ₂ O)/m ³	% Differenz zu MW Keine Pflanzen	% Tage mit höherer abs. Luftfeuchtigkeit als Referenz	% Tage mit geringerer abs. Luftfeuchtigkeit als Referenz
Messreihe 1 (9 Tage)	Efeutute	6,3	7,8	100	0
	Grünlilie	6,0	2,7	100	0
	Schwertfarn	6,2	6,5	100	0
	Gemischt	5,8	-1,1	22	78
Messreihe 2 (9 Tage)	Efeutute	6,8	6,7	100	0
	Grünlilie	6,5	2,0	100	0
	Schwertfarn	6,7	5,1	100	0
	Gemischt	6,3	-1,6	0	100
Messreihe 3 (9 Tage)	Efeutute	7,3	5,9	100	0
	Grünlilie	7,0	1,4	89	11
	Schwertfarn	7,2	4,0	89	11
	Gemischt	6,8	-1,9	0	100
Gesamt (27 Tage)	Efeutute	6,8	6,8	100	0
	Grünlilie	6,5	2,0	96	4
	Schwertfarn	6,7	5,2	96	4
	Gemischt	6,3	-1,5	7	93

Tabelle 14: Statistische Auswertung der Luft-Temperatur

		MW Gesamte Messreihe °C	% Differenz zu MW Keine Pflanzen	% Tage mit höherer Temperatur als Referenz	% Tage mit geringerer Temperatur als Referenz
Messreihe 1 (9 Tage)	Efeutute	25,1	-0,6	0	100
	Grünlilie	25,1	-1,0	0	100
	Schwertfarn	25,0	-1,2	0	100
	Gemischt	25,7	1,4	78	22
Messreihe 2 (9 Tage)	Efeutute	26,2	-0,6	0	100
	Grünlilie	26,1	-1,0	0	100
	Schwertfarn	26,0	-1,4	0	100
	Gemischt	26,7	1,3	100	0
Messreihe 3 (9 Tage)	Efeutute	27,0	-0,7	0	100
	Grünlilie	26,7	-1,0	0	100
	Schwertfarn	26,6	-1,5	0	100
	Gemischt	27,3	1,3	100	0
Gesamt (27 Tage)	Efeutute	26,1	-0,6	0	100
	Grünlilie	26,0	-1,0	0	100
	Schwertfarn	25,9	-1,3	0	100
	Gemischt	26,6	1,3	100	0

Bei der Lufttemperatur (Tabelle 14) verhält es sich ähnlich, wie bei der absoluten Luftfeuchtigkeit. Bei Betrachtung der statistischen Auswertung fällt auf, dass Schwertfarn gefolgt von Efeutute und Grünlilie durchgehend einen geringfügigen kühlenden Effekt, vermutlich durch Evapotranspiration, aufweisen, die gemischte Bepflanzung (Gemischt) jedoch nicht.

Für die Bewertung entsprechend Kapitel 5.1.1 wurden die Ergebnisse der Feuchtigkeit und Temperatur unabhängig voneinander betrachtet, die einzelnen Varianten nach dem Wert

„%Differenz zu Keine Pflanzen“ von groß nach klein gereiht und anschließend entsprechend der Platzierung Punkte zugewiesen. Somit haben bei der absoluten Feuchtigkeit Efeutute 4, Schwertfarn 3, Grünlilie 2 und Gemischt 1 Punkt(e) erhalten und bei der Temperatur Schwertfarn 4, Grünlilie 3, Efeutute 2 und Gemischt 1 Punkt(e).

5.1.3 Auswirkungen auf die Feinstaub-Konzentration

Für die Auswertung und Darstellung der Feinstaub-Konzentration wurde auf die unter Kapitel 5.1 beschriebenen Tage mit Raumnutzung zurückgegriffen.

Bei der Betrachtung des Verlaufs der 1-Stunden-Mittelwerte der Feinstaubkonzentration der Fraktion PM10 an einem beispielhaften Tag ist zu erkennen, dass bereits nach einer Raumnutzung von zwei Stunden eine Konzentration von ca. 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ vorliegt und im weiteren Verlauf des Tages auf bis zu 160 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ansteigt (Abbildung 27).

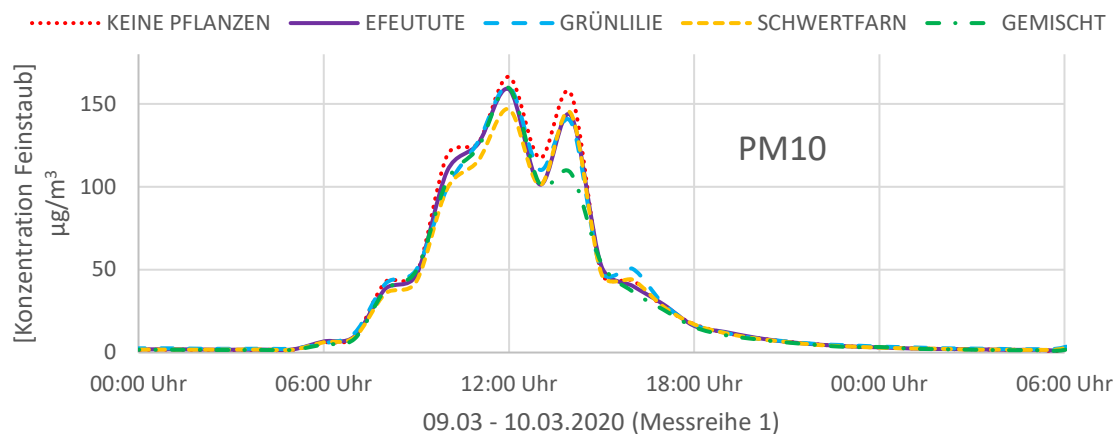


Abbildung 27: Verlauf der Feinstaub-Konzentration Fraktion PM10 am 09.03.2020

Bei der Fraktion PM2.5 ist ein ähnlicher Verlauf zu erkennen, wobei die absoluten Konzentrationen geringer ausfallen und der Effekt der Begrünung noch deutlicher zu erkennen ist. An dem in Abbildung 28 dargestellten Tag scheint vor allem Grünlilie eine besonders hohe Wirkung zu haben, was auch in der statistischen Auswertung (Tabelle 15) sichtbar wird. Grundsätzlich wurde bei allen Pflanzenarten mit ähnlicher Häufigkeit eine geringere Konzentration an Feinstaub als bei der Referenz (Keine Pflanzen) gemessen. Messreihe 1 & 2 zeigen dabei ein sehr ähnliches Bild: Partikel der Fraktion PM2.5 werden im Vergleich der TMW um bis zu 24% (Grünlilie) reduziert, Partikel der Fraktion PM10 konnten um bis zu ca. 8% verringert werden, wobei der Effekt bei Messreihe 1 deutlich stärker ausfällt.

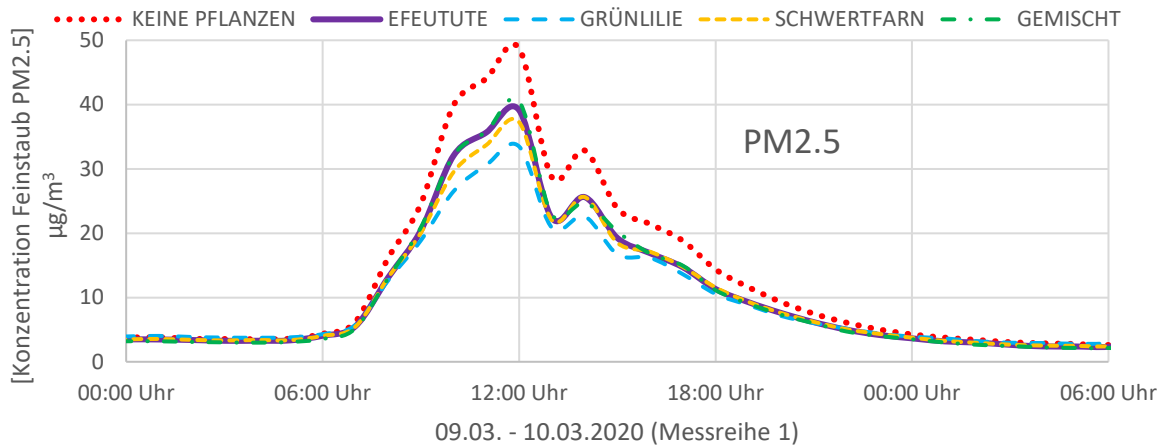


Abbildung 28: Verlauf der Feinstaub-Konzentration Fraktion PM2.5 am 09.03.2020

Abbildung 29 & Abbildung 30 zeigen einen anderen exemplarischen Tag, bei dem ebenfalls der Verlauf beider Feinstaub-Fraktionen grundsätzlich sehr ähnlich aussieht. Dies bestätigt einen starken Zusammenhang zwischen Raumnutzung und Feinstaub-Konzentration. Somit lässt sich in weiterer Folge auch die in Messreihe 2 und 3 vergleichsweise geringen durchschnittlichen Konzentrationen (Tabelle 15) bei beiden Feinstaub-Fraktionen erklären, da das Klassenzimmer in diesem Zeitraum (Mai und Juni) vermutlich regelmäßig gelüftet wird und sich somit insgesamt, über den ganzen Tag betrachtet, in Summe geringere Konzentrationen ergeben. Die Luftfeuchtigkeit hat einen signifikanten Einfluss auf die Agglomeration und Ablagerung von Partikeln, wodurch beispielsweise kleine, hygroskopische Partikel durch Wasseraufnahme zu größeren heranwachsen können und somit nicht nur der Effekt der Begrünung, sondern vor allem auch die Messung mittels optischer Partikelzähler beeinflusst wird. Bei der Gesamtbewertung fällt auf, dass alle Varianten einen vergleichbaren Effekt bieten, jedoch die gemischte Bepflanzung (Gemischt) die ausgewogenste Wirkung auf beide Feinstaub-Fraktionen hatte.

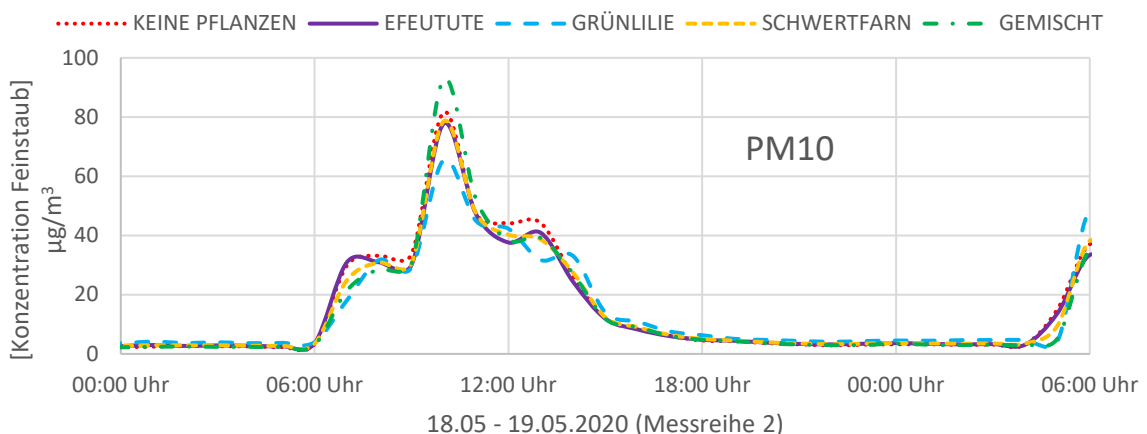


Abbildung 29: Verlauf der Feinstaub-Konzentration Fraktion PM10 am 18.05.2020

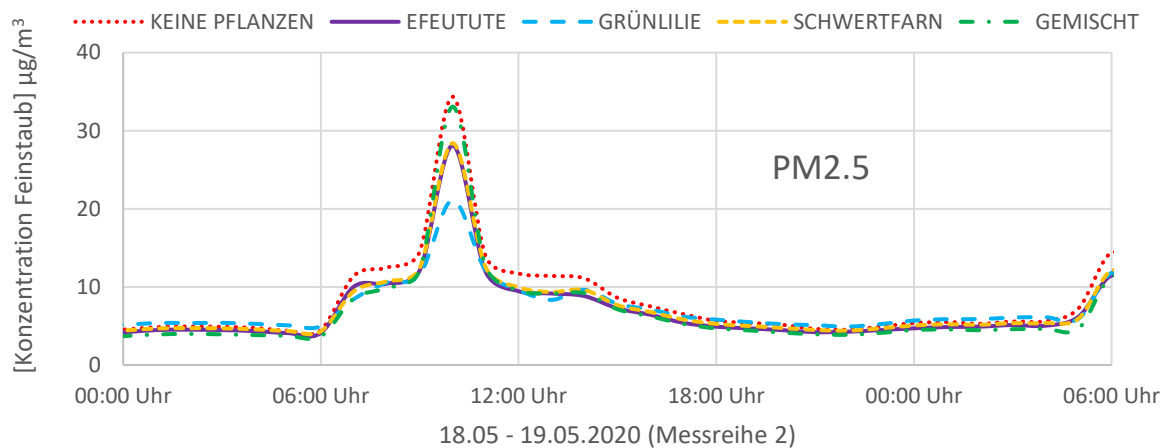


Abbildung 30: Verlauf der Feinstaub-Konzentration Fraktion PM2.5 am 18.05.2020

Tabelle 15: Statistische Auswertung der Feinstaub-Fractionen PM2.5 und PM10

		MW Gesamte Messreihe $\mu\text{g}/\text{m}^3$		% Differenz zu MW Keine Pflanzen		% Tage mit geringerer Konzentration als Referenz		% Tage mit höherer Konzentration als Referenz	
		PM2.5	PM10	PM2.5	PM10	PM2.5	PM10	PM2.5	PM10
Messreihe 1 (9 Tage)	Efeutute	10,5	31,9	18	3	100	78	0	22
	Grünlilie	9,8	31,1	24	3	100	78	0	22
	Schwertfarn	10,4	29,6	19	7	100	89	0	11
	Gemischt	10,4	29,6	19	8	100	78	0	22
Messreihe 2 (9 Tage)	Efeutute	7,6	18,7	17	6	100	89	0	11
	Grünlilie	7,5	19,8	18	0	100	56	0	44
	Schwertfarn	7,9	19,3	14	3	100	89	0	11
	Gemischt	7,7	19,3	17	3	100	78	0	22
Messreihe 3 (9 Tage)	Efeutute	8,7	19,3	30	32	100	100	0	0
	Grünlilie	7,4	19,8	36	30	100	78	0	22
	Schwertfarn	8,7	22,6	27	25	100	100	0	100
	Gemischt	7,4	18,1	37	37	100	100	0	100
Gesamt (27 Tage)	Efeutute	9,0	23,0	22	14	100	89	0	11
	Grünlilie	8,2	23,6	26	11	100	70	0	30
	Schwertfarn	9,0	23,8	20	12	100	93	0	7
	Gemischt	8,5	22,3	24	16	100	85	0	15

Für die Bewertung im Sinne der Bewertungsmatrix (5.1.1) wurden die Ergebnisse der Fraktionen unabhängig voneinander betrachtet und die einzelnen Varianten nach dem Wert „%Differenz zu MW Keine Pflanzen“ von groß nach klein gereiht und anschließend entsprechend der Platzierung Punkte zugewiesen. Somit hat bei PM2.5 Schwertfarn 4, Efeutute 3, Grünlilie 2, Gemischt 1 und bei PM10 Efeutute 4, Schwertfarn 3, Grünlilie 2 und Gemischt 1 Punkt(e) erhalten.

5.1.4 Auswirkungen auf die CO₂-Konzentration

Für die Auswertung und Darstellung der CO₂-Daten wurden zunächst die unter Kapitel 5.1.2 beschriebenen Tage mit Raumnutzung herangezogen. Fast über den gesamten Messbereich lag die gemessene CO₂-Konzentration bei den Selbstbauwänden unter der Referenz-Variante (Keine Pflanzen). In Abbildung 31 ist ersichtlich, dass die CO₂-Konzentration beispielsweise bei Efeutute, Schwertfarn und Gemischt um bis zu 200 ppm niedriger liegt, als bei Keine Pflanzen.

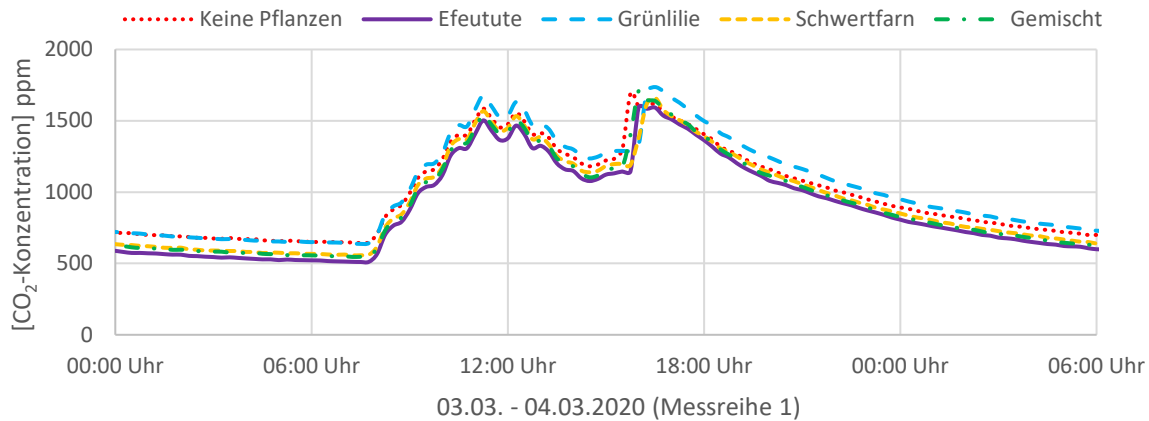


Abbildung 31: Verlauf der CO₂-Konzentration von 03.03. – 04.03.2020

Um ein besseres Bild über die Langzeit-Messwerte zu bekommen, wurden diese, wie in Tabelle 16 ersichtlich, einer statistischen Auswertung unterzogen.

Tabelle 16: Statistische Auswertung der CO₂-Messwerte

		MW Gesamte Messreihe ppm	% Differenz zu MW Keine Pflanzen	% Tage mit höherer Konzentration als Referenz	% Tage mit geringerer Konzentration als Referenz
Messreihe 1 (9 Tage)	Efeutute	1107	-7	0	100
	Grünlilie	1233	4	89	11
	Schwertfarn	1174	-1	56	44
	Gemischt	1132	-5	0	100
Messreihe 2 (9 Tage)	Efeutute	708	-16	0	100
	Grünlilie	826	-2	11	89
	Schwertfarn	733	-13	0	100
	Gemischt	752	-10	0	100
Messreihe 3 (9 Tage)	Efeutute	755	-17	0	100
	Grünlilie	801	-12	0	100
	Schwertfarn	792	-13	0	100
	Gemischt	776	-14	0	100
Gesamt (27 Tage)	Efeutute	855	-13	0	100
	Grünlilie	953	-3	33	67
	Schwertfarn	900	-9	19	81
	Gemischt	887	-10	0	100

Die Auswertung zeigt, dass Messreihe 1 eine deutlich geringere Reduktion der CO₂-Konzentration zeigt als Messreihe 2 und 3. Dies ist vermutlich einerseits auf das fortgeschrittene Wachstum der

Pflanzen zurückzuführen und andererseits von der Nutzung und den Wettergegebenheiten und daraus folgend der Temperatur und dem Lichteinfall im Klassenraum abhängig. Bei Schwertfarn ist dies deutlich zu sehen: Bei Messreihe 1 findet eine Reduktion der CO₂-Konzentration um durchschnittlich 1% statt, jedoch konnte bei Messreihe 2 bereits eine Reduktion von 13% gemessen werden. Insgesamt hat Grünlilie die geringste Reduktion der CO₂-Konzentration bewirkt. Bei Messreihe 1 wurde die Konzentration durch Grünlilie sowohl bei Tag als auch bei Nacht erhöht.

Tabelle 17 gibt einen Überblick über Studien, welche die CO₂-Reduktion einzelner Pflanzenarten unter Laborbedingungen untersucht haben. Suhaimi et. al. haben dabei festgestellt, dass zum Beispiel die Pflanzenart Chlorophytum comosum (Grünlilie) selbst bei einer Beleuchtung von 700 Lux die CO₂-Konzentration in der Testkammer um 0,1% erhöht hat.

Tabelle 17: Literatur zum CO₂-Verbrauch diverser Pflanzenarten

Autor	Pflanzentypen	Verweis
Suhaimi et. al.	Syngonium sp., Anthurium sp., Chlorophytum comosum, Maranta leuconeura, Asplenium sp., Dieffenbachia sp.	[36]
Sevik et. al.	Ficus sp., Dieffenbachia sp., Spathiphyllum sp., Yucca sp.	[37]

Für die Bewertung entsprechend der Bewertungsmatrix wurden die Ergebnisse der Messwerte herangezogen, die tagsüber aufgezeichnet wurden. Somit wurden Efeutute 4, Gemischt 3, Schwertfarn 2 und Grünlilie 1 Punkt zugewiesen. Da Gemischt und Schwertfarn unter Tags durchschnittlich die gleiche Reduktion bewirkt haben, wurden diese zusätzlich nach ihrer Performance in der Nacht bewertet: Schwertfarn -9% CO₂, Gemischt -12% CO₂.

5.1.5 Auswirkungen auf die Raumakustik

5.1.5.1 Nachhallzeit

Für den direkten Vergleich der gemessenen Werte, wie in Abbildung 32 dargestellt, wurden gemäß ÖNORM 8115-3 die Oktavbänder der Mittenfrequenzen 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz und 4000 Hz verwendet. Es ist ersichtlich, dass die Nachhallzeit im untersuchten Raum bei Ausstattung mit begrünten Wänden etwas geringer ist als ohne Begrünung, was grundsätzlich die Ergebnisse aus dem Vorprojekt bestätigt. Des Weiteren sind die Ober- und Untergrenze laut ÖNORM 8115-3 [38] dargestellt.

In Tabelle 18 sind die relativen Unterschiede der Pflanzenarten zu den Messungen ohne Begrünung dargestellt. Ein positiver Wert bedeutet eine Reduktion der Nachhallzeit, ein negativer Wert zeigt an, dass keine Verbesserung der Raumakustik erzielt werden konnte. Bei Efeutute und Schwertfarn ist dabei die größte Reduktion ersichtlich, wobei auch Grünlilie und Gemischt grundsätzlich eine Reduktion der Nachhallzeit bewirken. Lediglich bei Impulsposition 2 und Schallanalysator (Mikrofon) 1 wurde bei 250 Hz bei allen Pflanzen-Varianten eine Verschlechterung der Nachhallzeit festgestellt, welche bei Efeutute gefolgt von Schwertfarn, Gemischt und Grünlilie am geringsten ausgefallen ist.

Tabelle 18: Nachhallzeit Impulsposition 1, Differenz zu Raum ohne Begrünung in Prozent

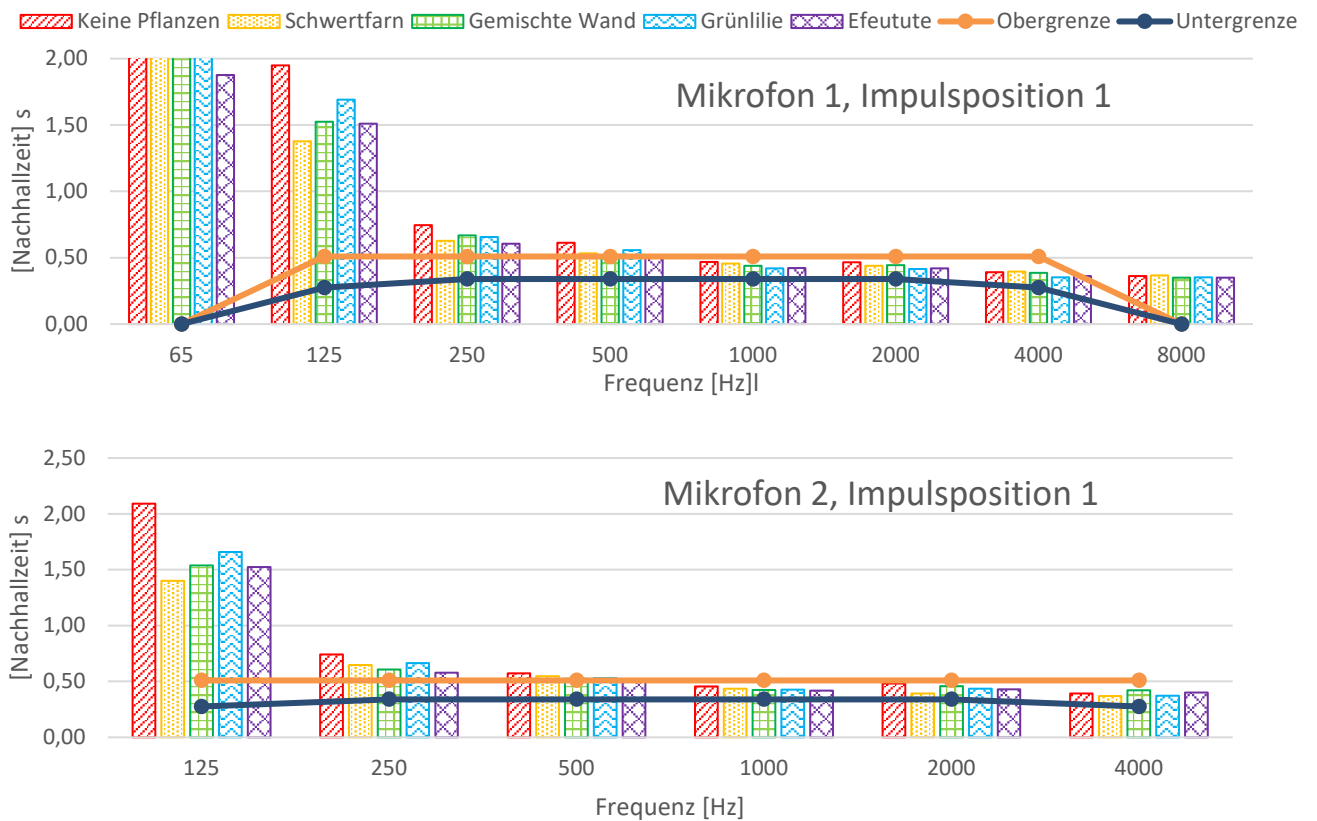
	[Frequenz] Hz	125	250	500	1000	2000	4000
Impulspos. 1 Mikrofon 1	Efeutute	23*	19	16	10	10	8
	Gemischt	22	10	16	6	5	1
	Grünlilie	13	12	9	10	11	10
	Schwertfarn	29	16	13	2	6	-1
Impulspos. 1 Mikrofon 2	Efeutute	27	22	9	8	11	-2
	Gemischt	26	18	9	7	5	-7
	Grünlilie	21	10	8	7	9	5
	Schwertfarn	33	13	4	4	18	6

*alle Angaben in %

Tabelle 19: Nachhallzeit Impulsposition 2, Differenz zu Raum ohne Begrünung in Prozent

	[Frequenz] Hz	125	250	500	1000	2000	4000
Impulspos. 2 Mikrofon 1	Efeutute	10	-2	4	15	18	10
	Gemischt	7	-3	3	13	18	4
	Grünlilie	-1	-7	6	4	17	15
	Schwertfarn	7	-3	7	6	17	10
Impulspos. 2 Mikrofon 2	Efeutute	22	1	14	11	14	15
	Gemischt	22	-8	10	13	10	13
	Grünlilie	14	9	7	10	14	14
	Schwertfarn	25	9	8	16	10	10

*alle Angaben in %



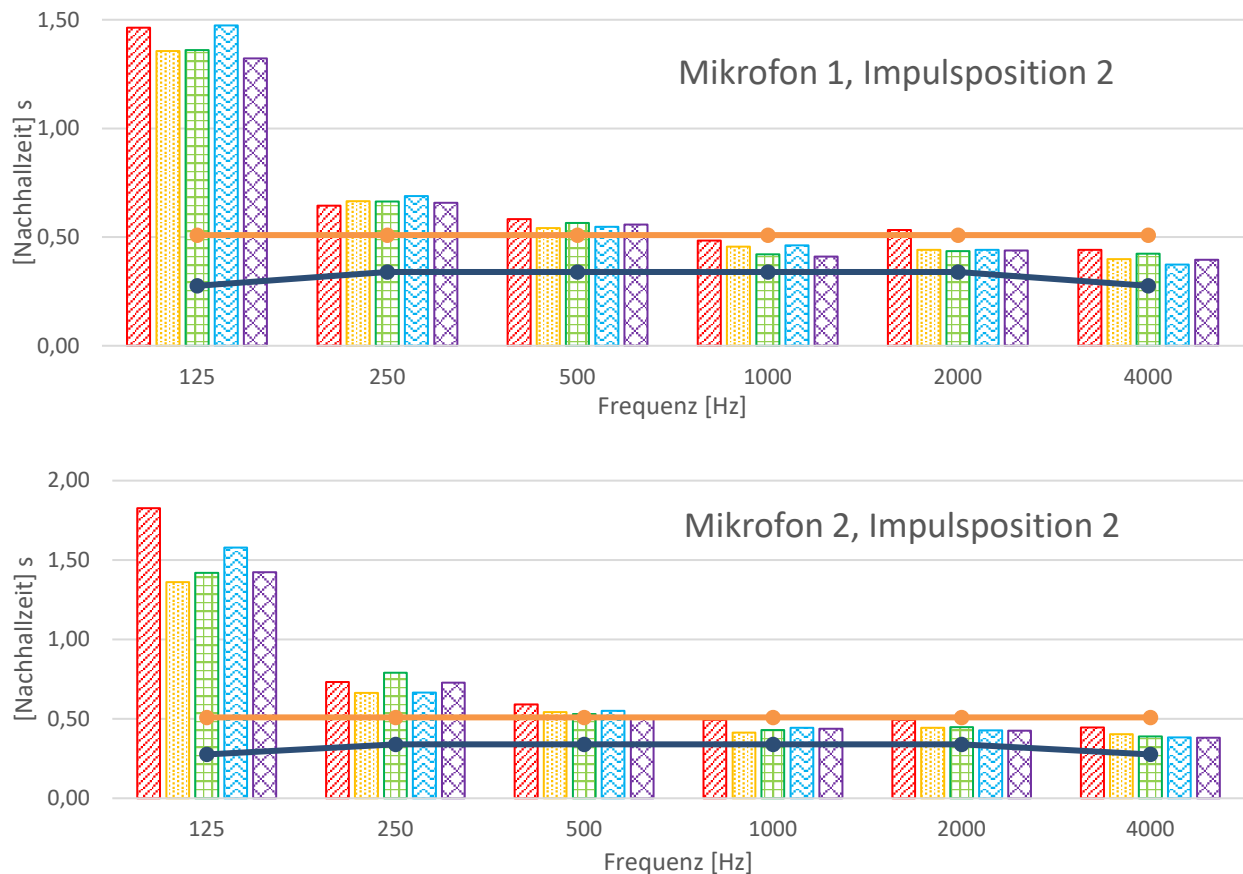


Abbildung 32: Ergebnisse der Messungen der Nachhallzeit im Vergleich

5.1.5.2 Schallabsorptionsgrad

Der Schallabsorptionsgrad wurde entsprechend [10], Kapitel 2.8.3 und 3.6, für jede Pflanzenart und den untersuchten Raum ohne Begrünung berechnet. Um einen besseren Überblick über die Daten zu bekommen, wurde für jede der Pflanzenarten und zu jeder Impulsposition der Mittelwert aus den für beide Messgeräte errechneten Werten gebildet und diese anschließend verglichen. Anschließend wurde mit einer Analyse der Maximalwerte in Microsoft Excel bestimmt, bei welchem Frequenzband welche Pflanze den größten Absorptionsgrad aufweist.

Wie bereits in [10] beschrieben, bedeuten für den Schallabsorptionsgrad Werte größer als 1, dass theoretisch mehr als 100 % der eintreffenden Schallenergie absorbiert wurde. Dies kommt in der Praxis vor, wenn Schall an eine stark absorbierende Probe gelangt und somit kaum reflektiert wird. Die Diskontinuität im Wellenfeld an der Kante der Probe erzeugt einen Beugungseffekt, der das Schallfeld verändert. Für den Schall wird dadurch die Probe um eine Viertel Wellenlänge größer [39]. Die Fläche nimmt zu und absorbiert pro Wandfläche mehr Schallenergie, als an der Wand angekommen wäre. Wie in Tabelle 18 ersichtlich, haben Efeutute und Schwertfarn bei allen Frequenzbändern außer bei 4000 Hz die größte Wirkung, wobei zwischen den Impulspositionen deutliche Unterschiede zu erkennen sind, da bei Position 2 durch die Nähe zur Wand mehr direkter Schall reflektiert wird. Grünilie hat bei 4000 Hz bei beiden Impulspositionen die größte Schallabsorption.

Bei Impulsposition 1 (Abbildung 33) lässt sich beim Schallabsorptionsgrad über alle Frequenzbänder aufgrund der Verteilung kein klares Muster herauslesen.

Bei Impulsposition 2 (Abbildung 34) ist der Schallabsorptionsgrad besonders im gut hörbaren Bereich (um 1000 Hz) hoch. Die geringste Absorption findet in den tieferen Frequenzbereichen statt. Tiefe Frequenzbänder wechselwirken nur mit schwereren Bauteilen, während höhere Frequenzen auch mit leichteren (wie etwa Pflanzen oder Blättern) in Interaktion treten [10] [40]. Daraus folgend sollten Pflanzenarten mit großer Oberfläche und oder einer Wuchsform, die eine starke Bedeckung der Konstruktion des Begrünungssystems zur Folge haben, einen größeren Schallabsorptionsgrad aufweisen.

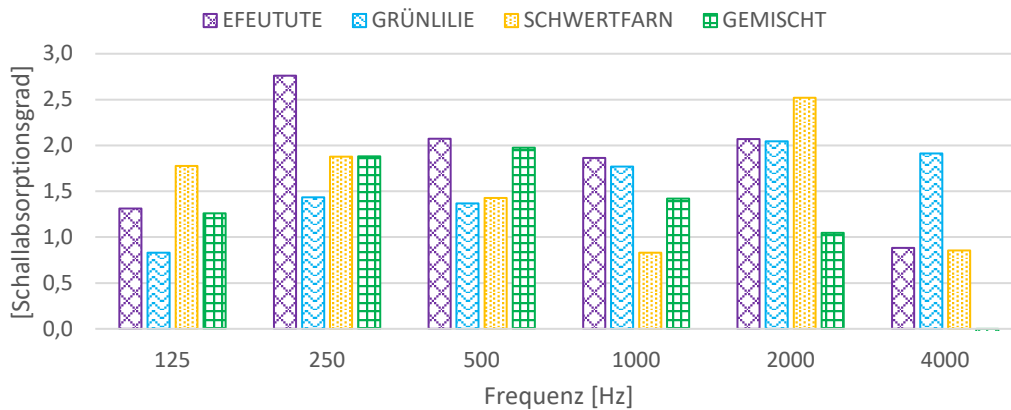


Abbildung 33: Schallabsorptionsgrad Impulsposition 1

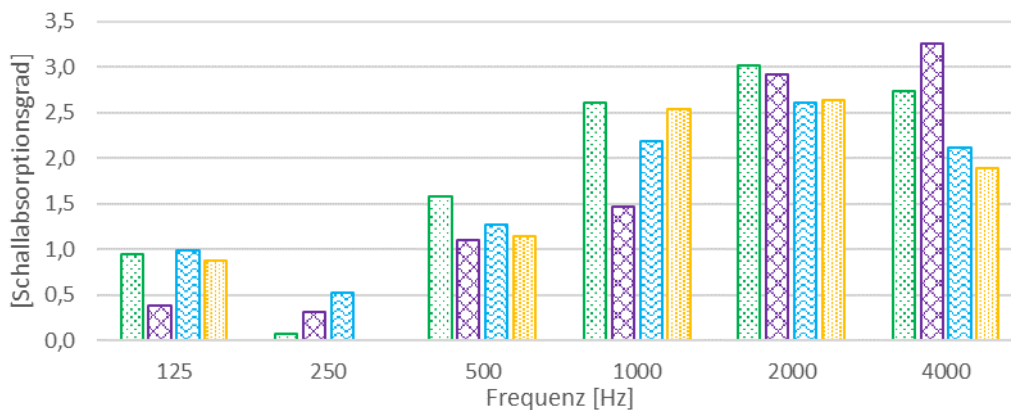


Abbildung 34: Schallabsorptionsgrad Impulsposition 2

Tabelle 20: Berechnete Schallabsorptionsgrade in Abhängigkeit der Frequenz, Pflanzenarten im Vergleich

	[Frequenz] Hz	125	250	500	1000	2000	4000
Impulsposition 1	Efeutute	1,3	2,8	2,1	1,9	2,1	0,9
	Grünlilie	0,8	1,4	1,4	1,8	2,0	1,9
	Schwertfarn	1,8	1,9	1,4	0,8	2,5	0,9
	Gemischt	1,3	1,9	2,0	1,4	1,0	-0,2
Impulsposition 2	Efeutute	0,9	0,1	1,6	2,6	3,0	2,7
	Grünlilie	0,4	0,3	1,1	1,5	2,9	3,3
	Schwertfarn	1,0	0,5	1,3	2,2	2,6	2,1
	Gemischt	0,9	-0,4	1,1	2,5	2,6	1,9

5.1.6 Auswirkungen auf die Schimmelsporenkonzentration

Da sich die in diesem Projekt durchgeführten Untersuchungen auf die quantitative Auswirkung der Pflanzen (im mobilen Begrünungssystem) konzentrierten, wurden für die einzelnen Messungen die Koloniebildenden Einheiten (KBE) pro m³ Raumluft berechnet und anschließend zur Beurteilung mit einem Richtwert aus dem Leitfaden zur Vorbeugung, Erfassung und Sanierung von Schimmelbefall in Gebäuden der Innenraumluftthygiene-Kommission des deutschen Umweltbundesamtes [23] verglichen. Für Messung 1 wurde ein Richtwert für den Innenraum im Winter und für Messung 2 im Sommer herangezogen [23]. Die Ergebnisse sind zusammen mit ihrer Standardabweichung (z.B.: ± 46) und der Anzahl der Messungen (z.B.: n = 1) in Tabelle 21 und Tabelle 22 dargestellt.

Bei keiner Pflanzenart wurde der passende Richtwert überschritten. Grundsätzlich kann im Vergleich zur Referenz-Messung festgehalten werden, dass die Selbstbauwände - egal mit welcher Pflanzart begrünt - keine Quelle für Schimmelsporen dargestellt haben.

5.1.6.1 Messung 1 (Juni 2020)

Tabelle 21: Ergebnis Messung 1 - Schimmelsporen

	Gesamtsporen KBE/m ³ bestimmt auf <i>DG-18-Agar</i>	Richtwert Anzahl Gesamtsporen pro m ³
Efeutute	576 ± 46 (n=3)	743
Grünlilie	73 ± 13 (n=3)	
Schwertfarn	186 ± 19 (n=3)	
Gemischt	640 (n=1)	
Keine Pflanzen	333 ± 28 (n =4)	

5.1.6.2 Messung 2 (Jänner 2021)

Tabelle 22: Ergebnis Messung 2 - Schimmelsporen

	Gesamtsporen KBE /m ³ bestimmt auf <i>DG-18-Agar</i>	Richtwert Anzahl Gesamtsporen pro m ³
Efeutute	332 ± 21 (n=4)	589
Einblatt	127 ± 16 (n=4)	
Schwertfarn	112 ± 33 (n=4)	
Gemischt	229 ± 45 (n=4)	
Keine Pflanzen	242 ± 27 (n=4)	

5.2 Wandgebundene Innenbegrünung

5.2.1 Beschreibung der Auswirkungen der Innenraumbegrünung auf das Raumklima nach Wettergegebenheiten (Hygrothermische Behaglichkeit)

In folgenden Unterkapiteln werden die Auswertungen der Messdaten der Lufttemperatur und relativen Luftfeuchtigkeit zum Einfluss der Innenraumbegrünung auf die hygrothermische Behaglichkeit nach den in Kapitel 4.4.1 definierten Kriterien beschrieben und analysiert.

5.2.1.1 Behaglichkeit: ausgewertet nach Jahren

In einem ersten Schritt erfolgt die Betrachtung der Messdaten zur hygrothermischen Behaglichkeit nach Jahren, mit dem Ziel, eine Vergleichbarkeit der betrachteten Jahre sowie die Langzeitwirkung der Innenraumbegrünung zu erfassen. In den folgenden Tabellen sind die absolute und die relative Anzahl der Werte, die in den verschiedenen Bereichen der Behaglichkeit liegen, nach Schuljahren angegeben. Die Balkendiagramme unter den jeweiligen Tabellen veranschaulichen die Messdatenauswertung und stellen die Anzahl der Messdaten für behagliche, noch behagliche und nicht behagliche Bedingungen im begrünten bzw. nicht begrünten Klassenraum nach Belegung. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass in allen hier dargestellten Schuljahren, 2015/16, 2016/17 und 2018/19, die Grünklasse mit einer besseren Behaglichkeit abschneidet. Beim Vergleich der Belegung der Klassenräume ist zu sehen, dass dieser Effekt bei belegten Klassenräumen vorhanden ist, aber noch deutlicher bei unbelegten Räumen auftritt. In den Grafiken ist deutlich erkennbar, dass die relative Luftfeuchtigkeit in der Grünklasse höher ist als in der Referenzklasse. Die Feuchteabgabe durch die Pflanzen erfüllt damit ihren Zweck.

Schuljahr 2015/16 Behaglichkeitsauswertung

Tabelle 23: Behaglichkeitswerte Schuljahr 2015/16

		Behaglich	Noch behaglich	Nicht behaglich	Noch behaglich oder Nicht behaglich	Unter 27 °C	Über 27 °C
Alle Daten	Nicht begrünt	32%	56%	12%	68%	95%	5%
Alle Daten	Begrünt	56%	33%	12%	44%	97%	3%
Besetzt	Nicht begrünt	23%	56%	21%	77%	92%	8%
Besetzt	Begrünt	32%	53%	16%	68%	94%	6%
Nicht besetzt	Nicht begrünt	35%	56%	9%	65%	96%	4%
Nicht besetzt	Begrünt	62%	28%	11%	38%	98%	2%

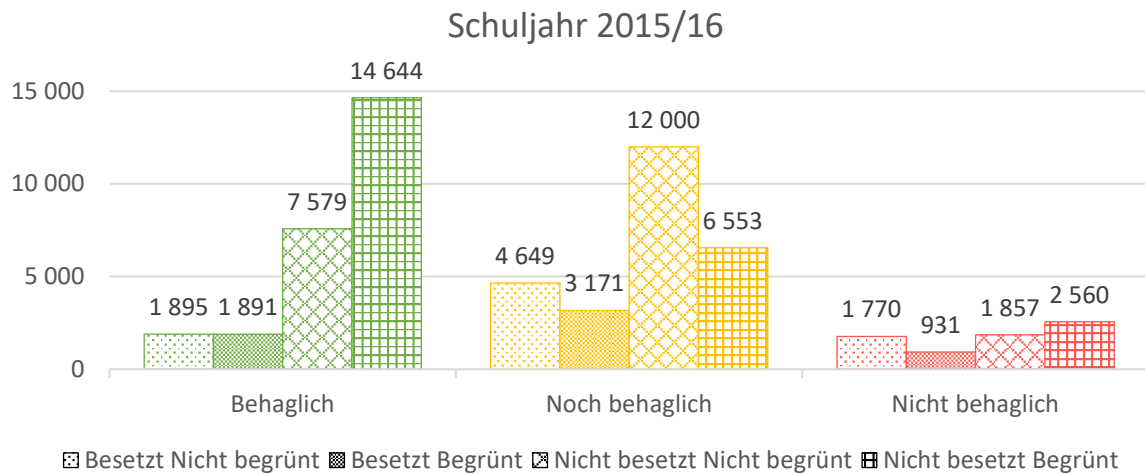


Abbildung 35: Darstellung der Behaglichkeitswerte in Abhängigkeit der Begründung und Besetzung der Klasse 2015/16

Schuljahr 2016/17 Behaglichkeitsauswertung

Tabelle 24: Behaglichkeitswerte Schuljahr 2016/17

		Behaglich	Noch behaglich	Nicht behaglich	Noch behaglich oder Nicht behaglich	Unter 27 °C	Über 27 °C
Alle Daten	Nicht begrünt	38%	49%	12%	62%	92%	8%
Alle Daten	Begrünt	61%	24%	15%	39%	92%	8%
Besetzt	Nicht begrünt	42%	43%	15%	58%	89%	11%
Besetzt	Begrünt	51%	31%	18%	49%	89%	11%
Nicht besetzt	Nicht begrünt	37%	52%	11%	63%	93%	7%
Nicht besetzt	Begrünt	65%	21%	14%	35%	93%	7%

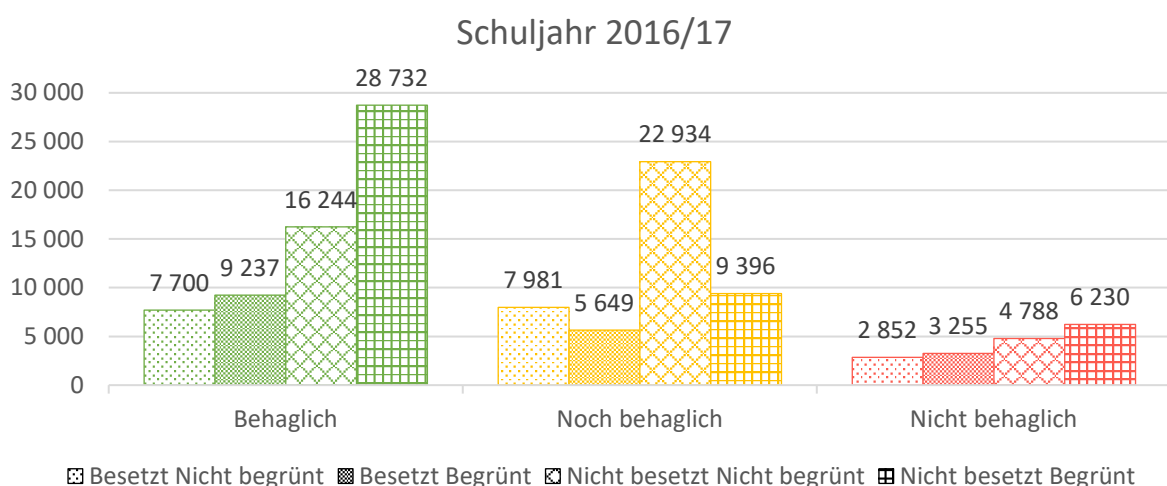


Abbildung 36: Darstellung der Behaglichkeitswerte in Abhängigkeit der Begründung und Besetzung der Klasse 2016/17

Schuljahr 2017/18: Behaglichkeitsauswertung

Tabelle 25: Behaglichkeitswerte Schuljahr 2017/18

		Behaglich	Noch behaglich	Nicht behaglich	Noch behaglich oder Nicht behaglich	Unter 27 °C	Über 27 °C
Alle Daten	Nicht	31%	52%	17%	69%	88%	12%
Alle Daten	Begrünt	26%	56%	19%	74%	90%	10%
Besetzt	Nicht	29%	50%	21%	71%	86%	14%
Besetzt	Begrünt	12%	64%	24%	88%	87%	13%
Nicht	Nicht	32%	53%	16%	68%	89%	11%
Nicht	Begrünt	30%	53%	17%	70%	91%	9%

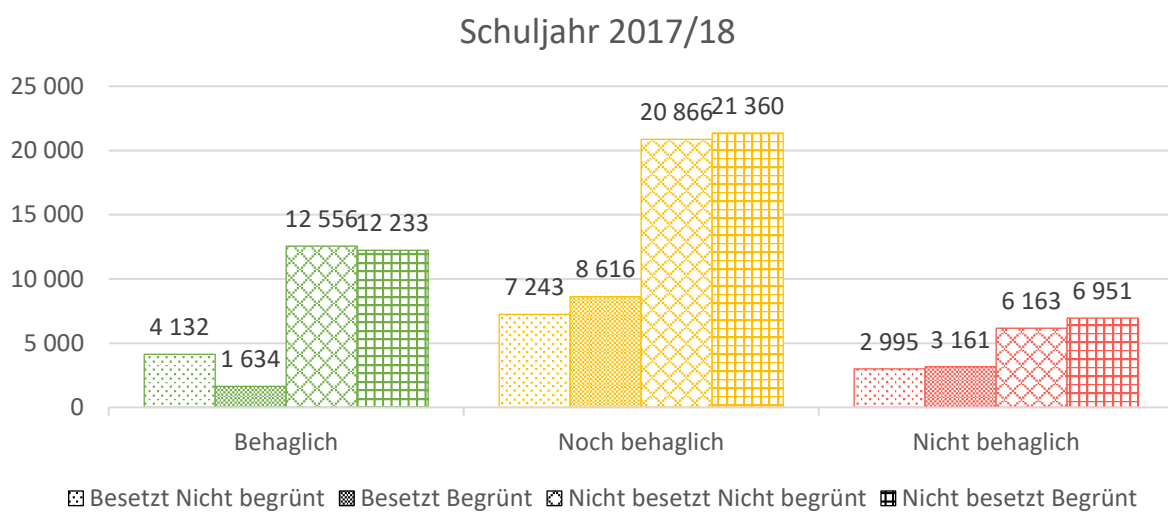


Abbildung 37: Darstellung der Behaglichkeitswerte in Abhängigkeit der Begrünung und Besetzung der Klasse 2017/18

Schuljahr 2018/19: Behaglichkeitsauswertung

Tabelle 26: Behaglichkeitswerte Schuljahr 2018/19

		Behaglich	Noch behaglich	Nicht behaglich	Noch behaglich oder Nicht behaglich	Unter 27 °C	Über 27 °C
Alle Daten	Nicht begrünt	44%	50%	7%	56%	98%	2%
Alle Daten	Begrünt	72%	18%	10%	28%	99%	1%
Besetzt	Nicht begrünt	47%	43%	10%	53%	96%	4%
Besetzt	Begrünt	63%	25%	12%	37%	98%	2%
Nicht besetzt	Nicht begrünt	42%	53%	5%	58%	99%	1%
Nicht besetzt	Begrünt	76%	15%	9%	24%	100%	0%

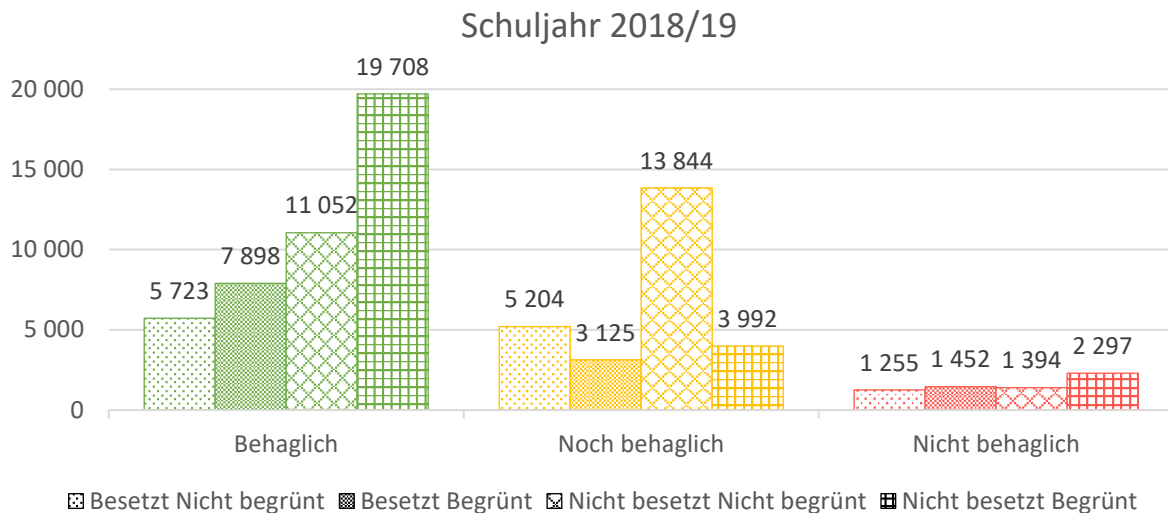


Abbildung 38: Darstellung der Behaglichkeitswerte in Abhängigkeit der Begrünung und Besetzung der Klasse 2018/19

5.2.1.2 Sonnig an Sommertagen

Die Ergebnisse der Auswertungen der Messdaten an sonnigen Sommertagen sind in der folgenden Tabelle 27 sowie in den folgenden Abbildungen dargestellt. Es ist erkennbar, dass das Raumklima an sonnigen Sommertagen grundsätzlich sehr unbehaglich ist.

Wenn die Klassenräume belegt sind, liegen alle erhobenen Messdaten im unbehaglichen Bereich, da vor allem die Temperaturen zu hoch sind. Die relative Luftfeuchtigkeit liegt dabei in einem angenehmen Rahmen. Beim Vergleich der Behaglichkeitsdiagramme in Abbildung 42 ist erkennbar, dass die rel. Luftfeuchtigkeit in der Grünklasse durchschnittlich etwas höher ist, was mit der Feuchteabgabe der Pflanzen zu erklären ist. Daraus resultiert allerdings, dass die Punktwolke der Messdaten sich verschiebt und das Raumklima „unbehaglich“ statt „noch behaglich“ ist, wenn die Räume nicht belegt sind. Dass bei Raumbellegung immer unbehagliche Bedingungen vorliegen, liegt an der Wärmeabgabe durch die Personen im Raum, was aus Tabelle 28 ebenfalls abzulesen ist, da der Anteil der Daten über 27°C bei Raumbellegung vergleichsweise höher liegt. Betrachtet man nur die Temperaturen über 27°C (Tabelle 28), so ist die Grünklasse etwas kühler. Die Transpiration der Pflanzen mit ihrem kühlenden Effekt zeigt hier ihre Wirkung. Noch deutlicher lässt sich dieser Effekt beispielsweise bei der Betrachtung des Raumtemperatur-Verlaufs in den Monaten Mai und Juni des Schuljahres 2015/2016 beobachten (Abbildung 39 und Abbildung 40). In diesem Zeitraum wurden 17.525 Messwerte (in Form von Datenpaaren) aufgezeichnet, wovon ca. 77% (13.435) eine niedrigere Temperatur in der begrünzten Klasse nachgewiesen haben (Tabelle 26). Hier ist aber zu betonen, dass für die Bewertung der Raumbehaglichkeit nicht die Temperatur allein ausschlaggebend ist.

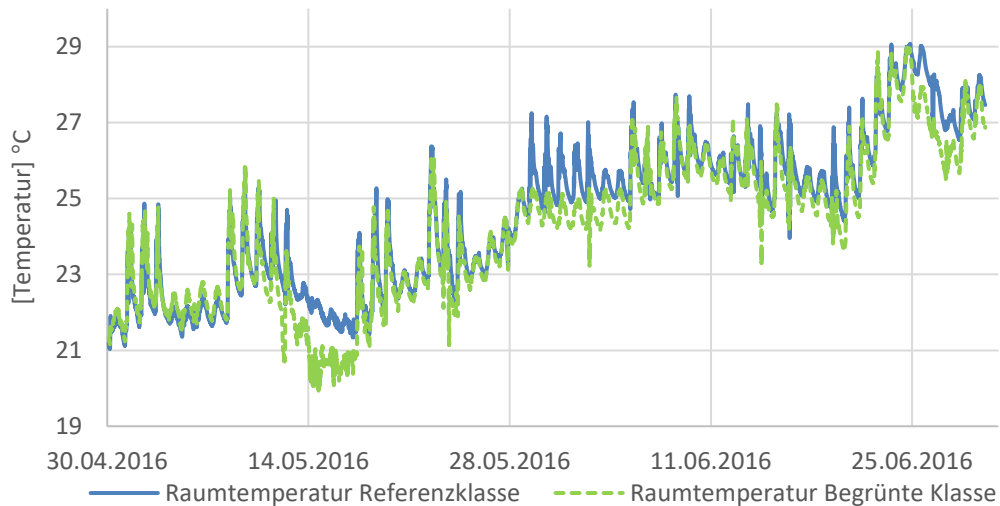


Abbildung 39: Kühleffekt der Begrünung im Vergleich zur Referenzklasse (Mai, Juni 2016)

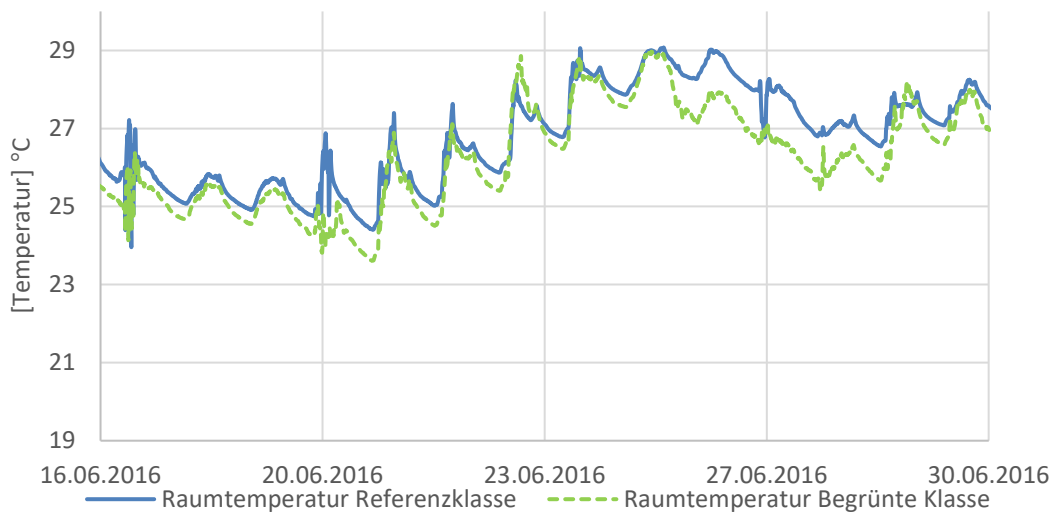


Abbildung 40: Kühleffekt im Detail über zwei Wochen

Tabelle 27: Kühleffekt der Begrünung anhand der Anzahl der aufgezeichneten Messwerte (als Datenpaare) im Zeitraum: Mai, Juni 2016

	Messwerte aufgezeichnet	[%]
Raumtemperatur [°C]: Referenzklasse > Begrünte Klasse	13.435	77
Raumtemperatur [°C]: Referenzklasse < Begrünte Klasse	4.090	23
Total (Mai und Juni 2016)	17.525	

Tabelle 28: Behaglichkeitswerte sonnig an Sommertagen, alle Schuljahre

		Behaglich	Noch behaglich	Nicht behaglich	Noch behaglich oder Nicht behaglich	Unter 27 °C	Über 27 °C
Alle Daten	Nicht	0%	4%	96%	100%	10%	90%
Alle Daten	Begrünt	0%	2%	98%	100%	20%	80%
Besetzt	Nicht	0%	0%	100%	100%	2%	98%
Besetzt	Begrünt	0%	0%	100%	100%	5%	95%
Nicht	Nicht	0%	7%	93%	100%	15%	85%
Nicht	Begrünt	0%	3%	97%	100%	26%	74%

Sonnig an Sommertagen

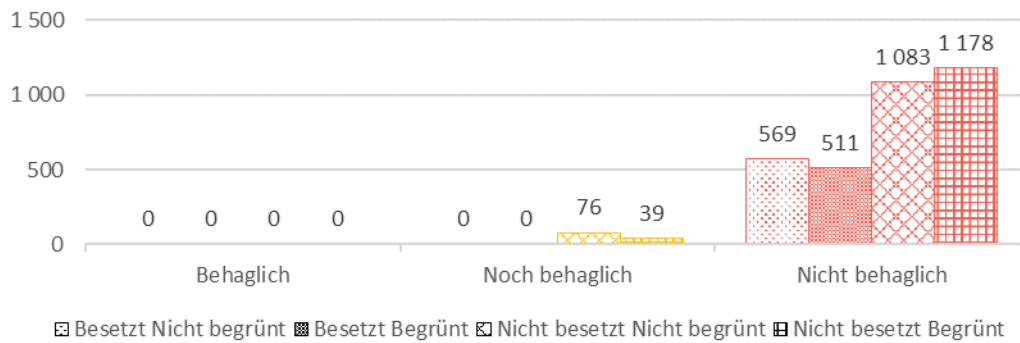


Abbildung 41: Behaglichkeitswerte sonnig an Sommertagen, alle Schuljahre

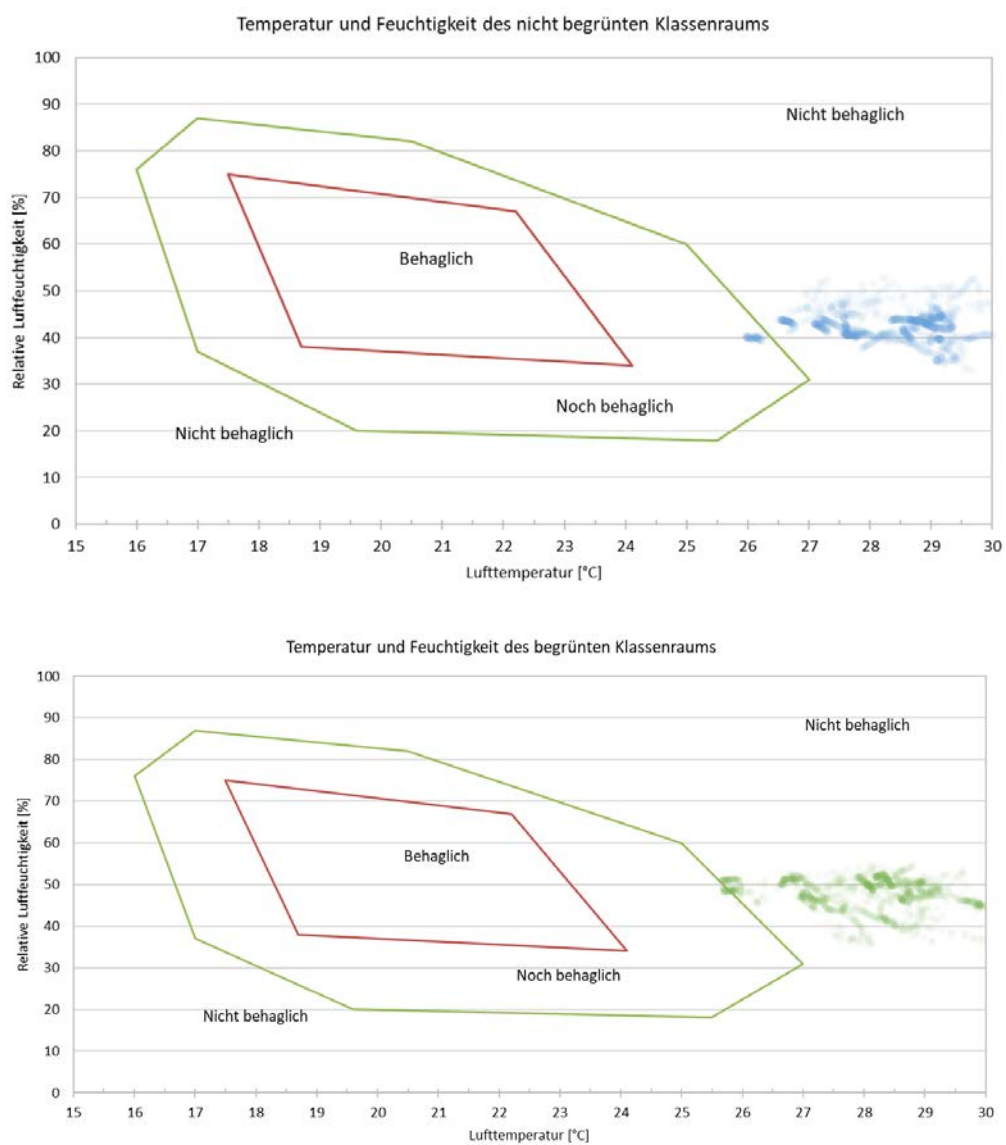


Abbildung 42: Behaglichkeitsfeld sonnig an Sommertagen, oben Referenzklasse, unten Grünklasse

5.2.1.3 Bewölkt an Sommertagen

Nach den in 4.4.1 definierten Kriterien gefilterte Messdaten für bewölkte Sommertage werden im Folgenden ausgewertet. Wie auch bei sonnigen Sommertagen liegen alle Werte, in denen die Räume belegt sind, im unbehaglichen Bereich. Wenn die Räume nicht belegt sind, liegen die Messdaten der Referenzklasse im noch behaglichen Bereich, während die Grünklasse schlechter abschneidet und größtenteils unbehaglich ist. Dies ist auf die höhere rel. Luftfeuchtigkeit zurückzuführen, die in Kombination mit hohen Temperaturen eher im unbehaglichen Feld liegt (Abbildung 44). Im Vergleich zu den sonnigen Sommertagen ist es an bewölkten Sommertagen kühler, es sind kaum Werte über 27°C vorhanden (Tabelle 29). Hier schneidet die Grünklasse mit prozentual mehr Werten unter 27°C etwas besser ab, was an der kühlenden Wirkung der Transpiration der Pflanzen liegen kann.

Tabelle 29: Behaglichkeitswerte bewölkt an Sommertagen, alle Schuljahre

		Behaglich	Noch behaglich	Nicht behaglich	Noch behaglich oder Nicht behaglich	Unter 27 °C	Über 27 °C
Alle Daten	Nicht	0%	50%	50%	100%	97%	3%
Alle Daten	Begrünt	0%	20%	80%	100%	100%	0%
Besetzt	Nicht	0%	0%	100%	100%	92%	8%
Besetzt	Begrünt	0%	0%	100%	100%	100%	0%
Nicht	Nicht	0%	88%	12%	100%	100%	0%
Nicht	Begrünt	0%	28%	72%	100%	100%	0%

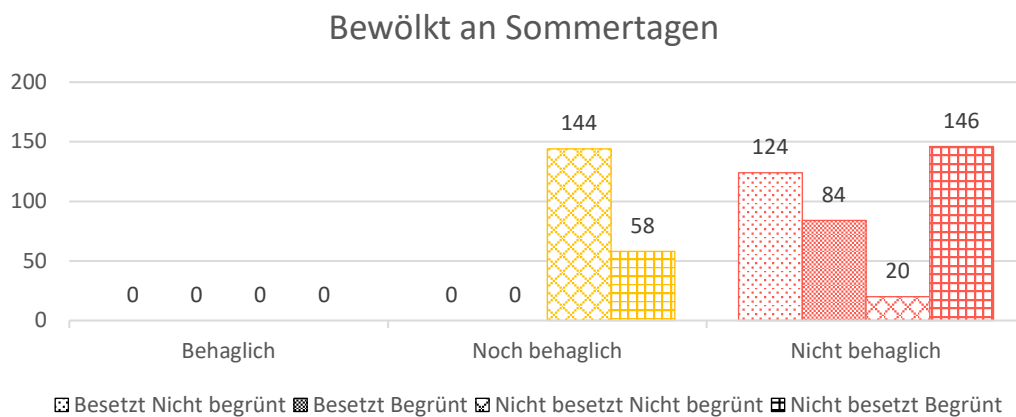


Abbildung 43: Behaglichkeitswerte bewölkt an Sommertagen, alle Schuljahre

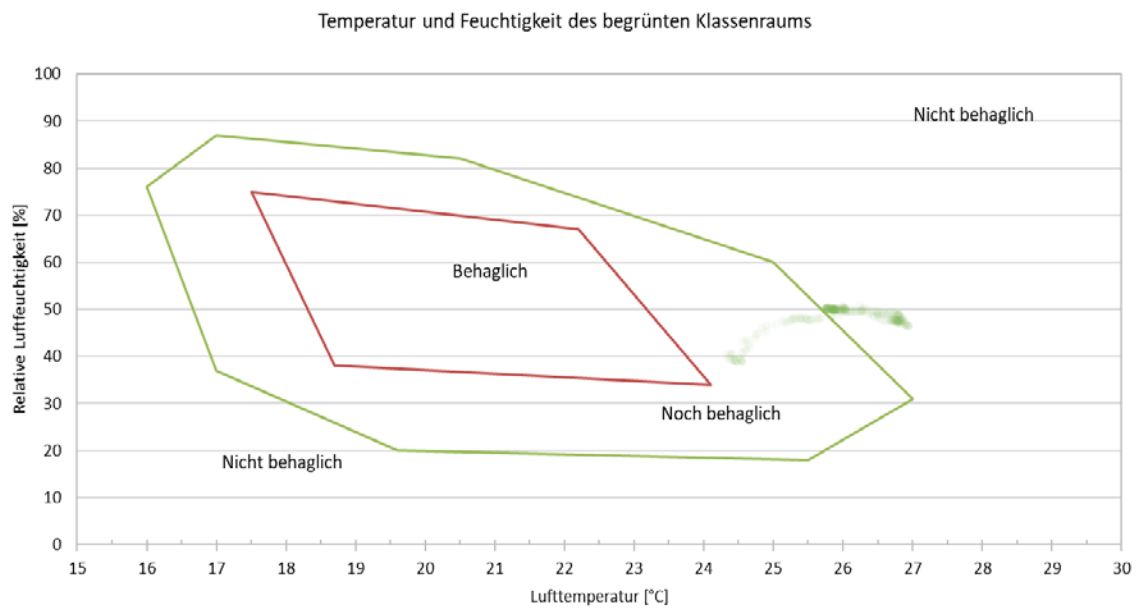
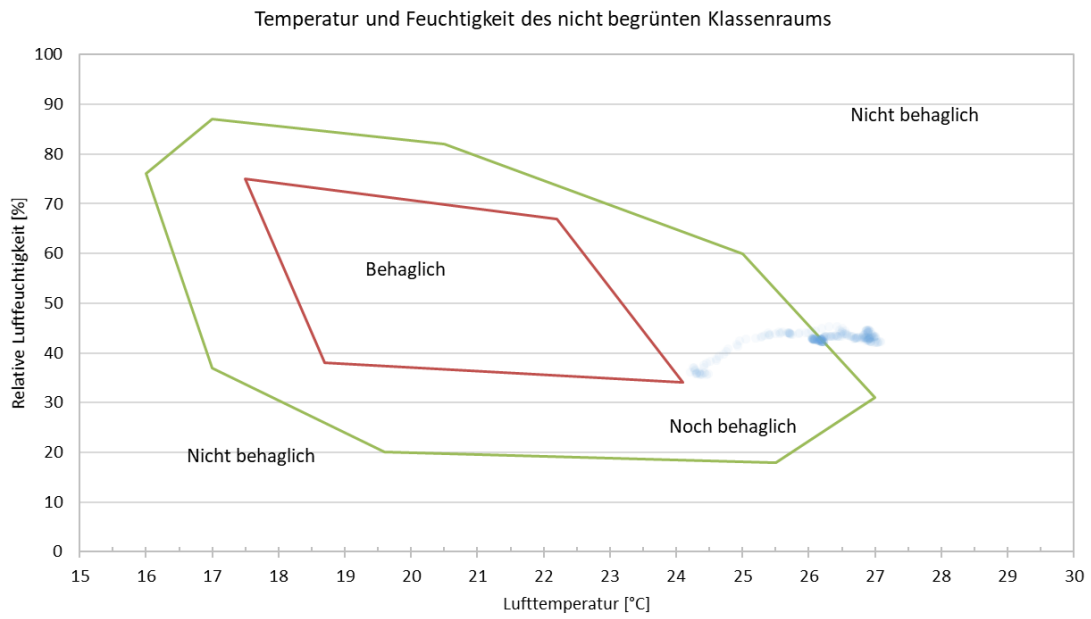


Abbildung 44: Behaglichkeitsfeld bewölkt an Sommertagen, oben Referenzklasse, unten Grünklasse

5.2.1.4 Sonnig an Wintertagen

Sonnige Wintertage zeichnen sich, gemäß den definierten Filterkriterien, durch maximale Strahlungswerte über 500 W/m² und einer Tagesmitteltemperatur kleiner als 5°C aus. An diesen sonnigen Wintertagen sind die Bedingungen bei belegten Räumen in der Grünklasse im Vergleich als behaglicher einzustufen als in der Referenzklasse. 76% der Messwerte liegen im entsprechenden Bereich, während es in der Referenzklasse 69% der Werte sind. In der Grünklasse herrscht eine höhere, rel. Luftfeuchtigkeit, was anhand von Abbildung 46 erkennbar ist. Sind die Räume nicht belegt, ist der Effekt der Feuchteabgabe durch die Pflanzen noch deutlicher erkennbar (belegt 76%, nicht belegt 98% behaglich).

Tabelle 30: Behaglichkeitswerte sonnig an Wintertagen, alle Schuljahre

		Behaglich	Noch behaglich	Nicht behaglich	Noch behaglich oder Nicht behaglich	Unter 27 °C	Über 27 °C
Alle Daten	Nicht begrünt	36%	64%	0%	64%	100%	0%
Alle Daten	Begrünt	90%	10%	0%	10%	100%	0%
Besetzt	Nicht begrünt	69%	31%	0%	31%	100%	0%
Besetzt	Begrünt	76%	24%	0%	24%	100%	0%
Nicht besetzt	Nicht begrünt	24%	76%	0%	76%	100%	0%
Nicht besetzt	Begrünt	98%	2%	0%	2%	100%	0%

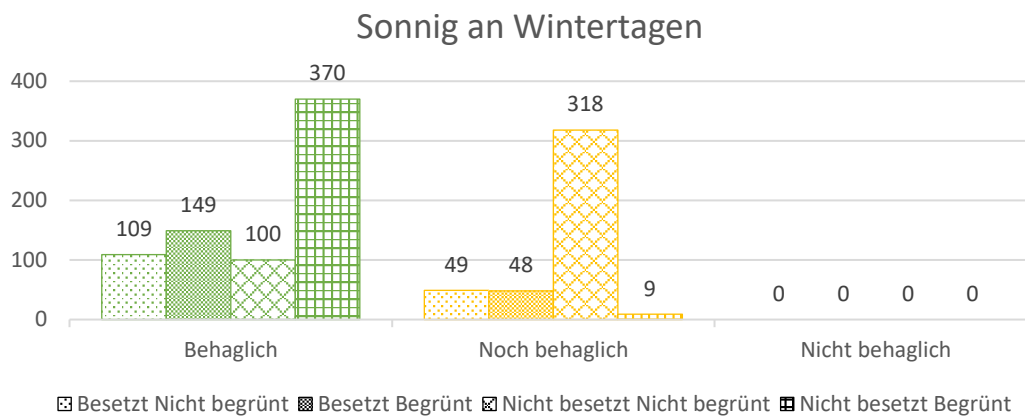


Abbildung 45: Behaglichkeitswerte sonnig an Wintertagen, alle Schuljahre

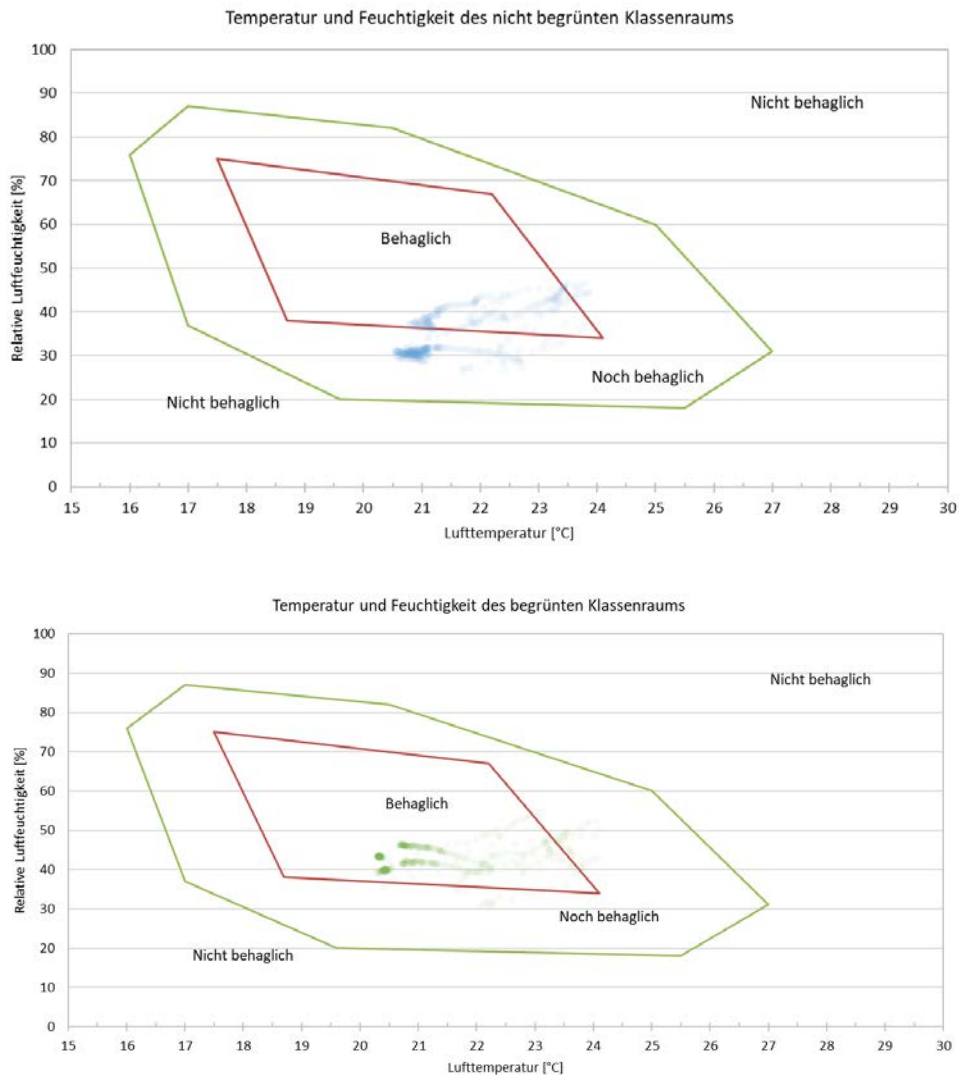


Abbildung 46: Behaglichkeitsfeld sonnig an Wintertagen, oben Referenzklasse, unten Grünklasse

5.2.1.5 Bewölkt an Wintertagen

In einem weiteren Schritt wurden die Daten bzgl. eines Zusammenhangs bewölkter Wintertage und den Auswirkungen der Innenraumbegrünung auf das Raumklima untersucht. Insgesamt liegen nur ca. 1% der gefilterten Werte in beiden Räumen im unbehaglichen Bereich. Die Grünklasse schneidet mit 67% behaglichen Werten bei Raumbelugung etwas schlechter ab als die Referenzklasse mit 71% behaglichen Werten. In den Behaglichkeitsdiagrammen in Abbildung 48 ist ersichtlich, dass die rel. Luftfeuchtigkeit in der Grünklasse zwar höher ist, aber die Temperaturen im Raum teilweise zu hoch für den optimalen Bereich sind. Im Vergleich dazu ist die Grünklasse bei Nichtbelugung mit 67% deutlich öfter behaglich als die Referenzklasse mit 38%. Wie auch im vorherigen Kapitel (siehe 5.2.1.4), trägt hier die Feuchteabgabe der Pflanzen in der Grünklasse dazu bei, dass auch außerhalb der Raumbelugung die rel. Luftfeuchtigkeit in einem behaglichen Bereich ist. Weiterhin ist die Anwesenheit der Personen und ihr Verhalten ausschlaggebend.

Tabelle 31: Behaglichkeitswerte bewölkt an Wintertagen, alle Schuljahre

		Behaglich	Noch behaglich	Nicht behaglich	Noch behaglich oder Nicht behaglich	Unter 27 °C	Über 27 °C
Alle Daten	Nicht	48%	52%	1%	52%	99%	1%
Alle Daten	Begrünt	67%	32%	1%	33%	99%	1%
Besetzt	Nicht	71%	28%	1%	29%	99%	1%
Besetzt	Begrünt	67%	31%	1%	33%	99%	1%
Nicht	Nicht	38%	61%	0%	62%	100%	0%
Nicht	Begrünt	67%	32%	1%	33%	99%	1%

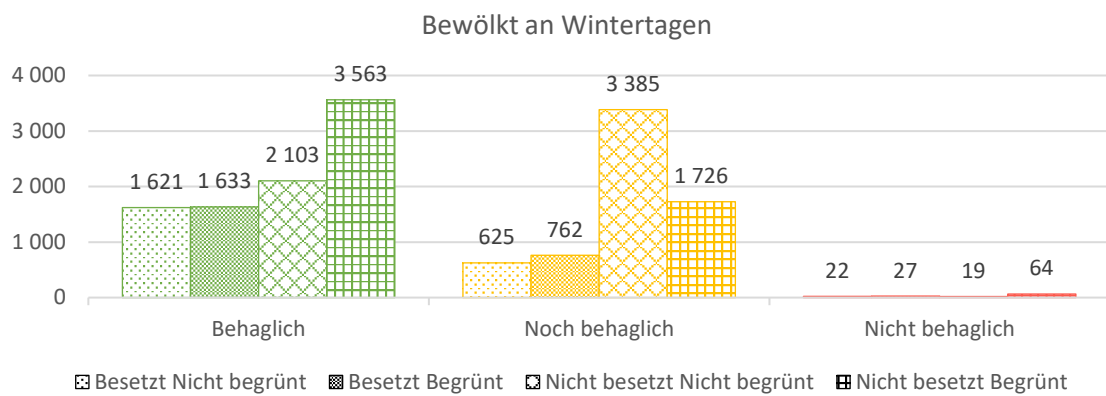


Abbildung 47: Behaglichkeitswerte bewölkt an Wintertagen, alle Schuljahre

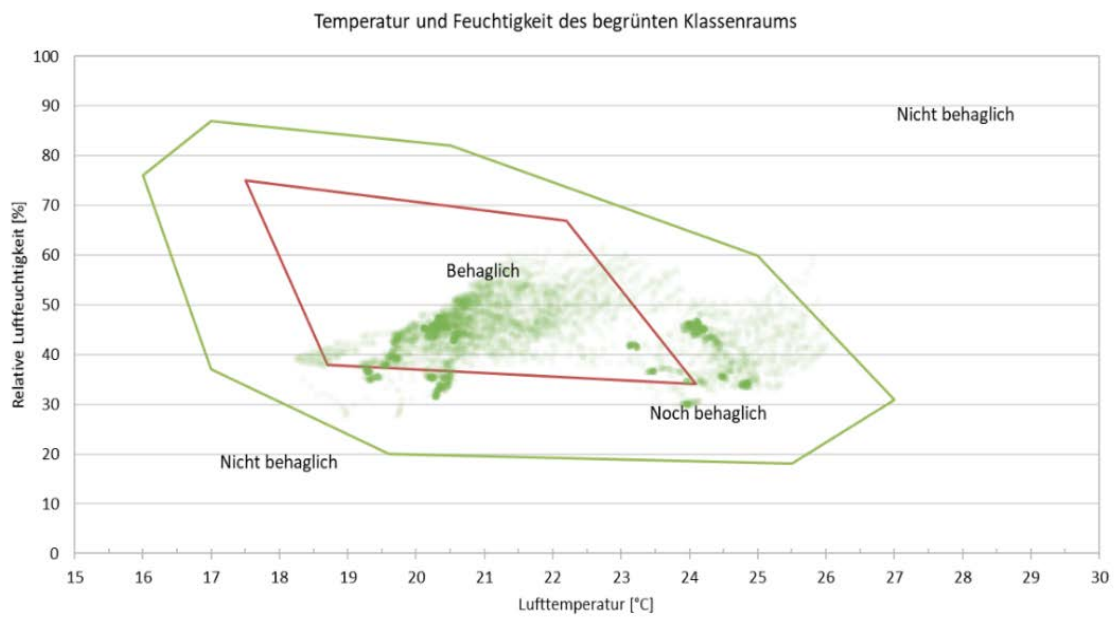
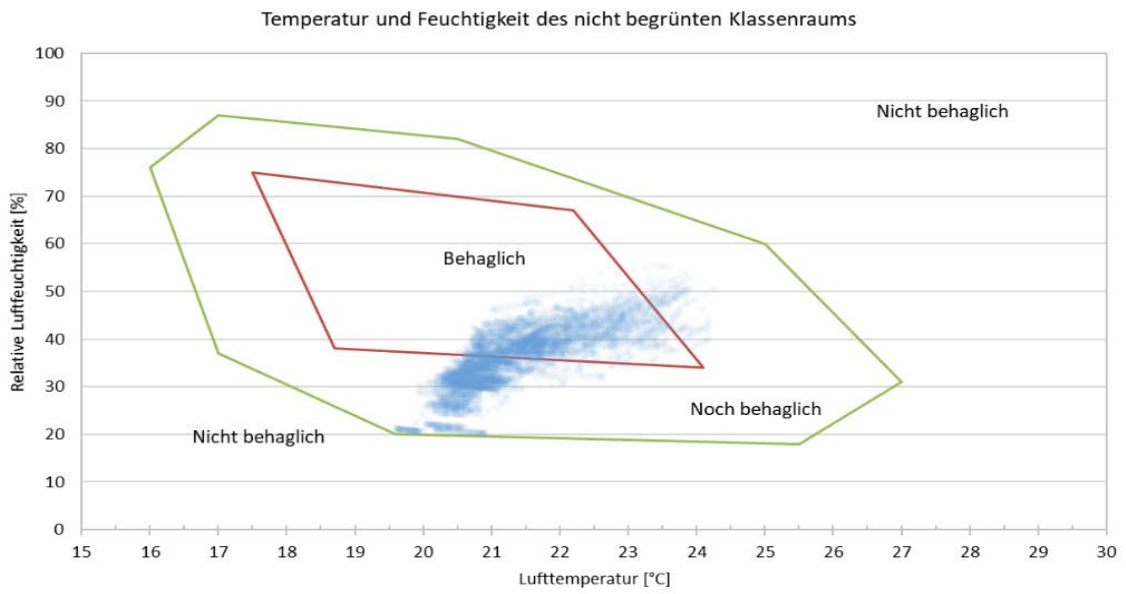


Abbildung 48: Behaglichkeitsfeld bewölkt an Wintertagen, oben Referenzklasse, unten Grünklasse

5.2.1.6 Hohe relative Luftfeuchtigkeit

Bei hoher rel. Luftfeuchtigkeit außen liegen grundsätzlich nur ca. 1-2% der Messwerte im Innenraum im nicht behaglichen Bereich. Bei belegten Räumen weisen sowohl rund 57% der Messwerte für die Grünklasse als auch für die Referenzklasse behagliche Bedingungen auf. In Abbildung 50 ist erkennbar, dass die rel. Luftfeuchtigkeit in der Grünklasse höher ist als in der Referenzklasse, wo die Werte im „noch behaglichen“ Bereich größtenteils zu trocken sind. Allerdings ist es in der Grünklasse teilweise zu warm. Es ist wahrscheinlich, dass die hohen Temperaturen auf das NutzerInnenverhalten, wie Heizen, zurückzuführen sind. Das lässt sich auch durch die behaglichen Werte bei nicht belegten Räumen bestätigen, wo durch Transpiration der Pflanzen die Grünklasse mit 65% Vorteile in der Behaglichkeit gegenüber der Referenzklasse mit 49% hat.

Tabelle 32: Behaglichkeitswerte hohe rel. Luftfeuchtigkeit, alle Schuljahre

		Behaglich	Noch behaglich	Nicht behaglich	Noch behaglich oder Nicht behaglich	Unter 27 °C	Über 27 °C
Alle Daten	Nicht begrünt	52%	47%	1%	48%	99%	1%
Alle Daten	Begrünt	63%	36%	1%	37%	99%	1%
Besetzt	Nicht begrünt	57%	42%	2%	43%	99%	1%
Besetzt	Begrünt	57%	42%	1%	43%	99%	1%
Nicht besetzt	Nicht begrünt	49%	50%	1%	51%	99%	1%
Nicht besetzt	Begrünt	65%	34%	1%	35%	99%	1%

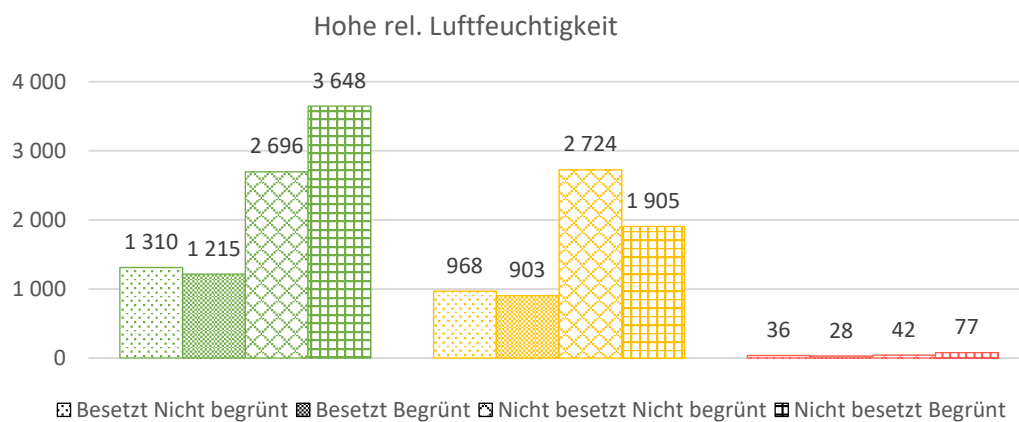


Abbildung 49: Behaglichkeitswerte hohe rel. Luftfeuchtigkeit, alle Schuljahre

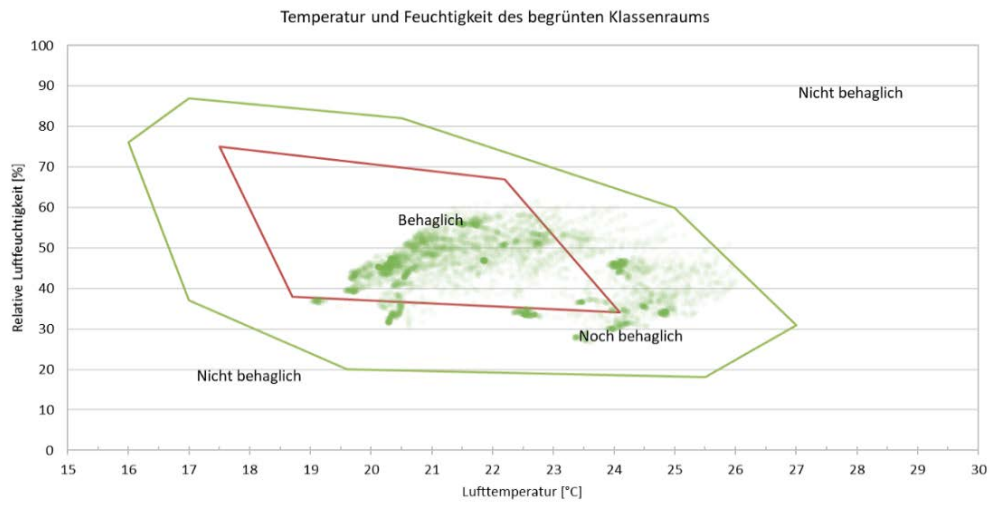
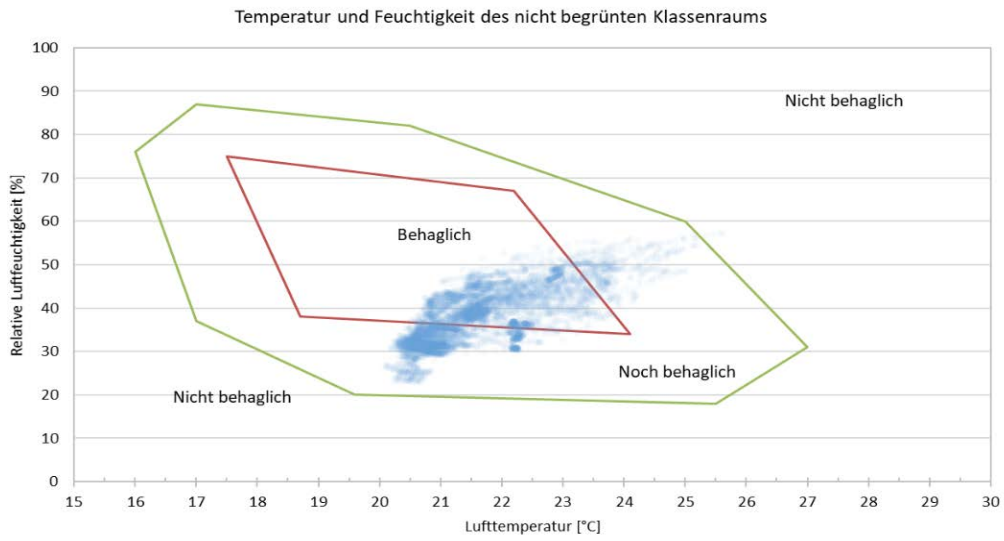


Abbildung 50: Behaglichkeitsfeld hohe rel. Luftfeuchtigkeit, oben Referenzklasse, unten Grünklasse

5.2.1.7 Niedrige relative Luftfeuchtigkeit

Niedrige rel. Luftfeuchtigkeit außen liegt nach der Definition in Kapitel 4.4.1 bei Werten unter 60 % vor. Die nach diesem Kriterium gefilterten Messdaten verteilen sich bzgl. der Bedingungen der hygrothermischen Behaglichkeit über alle drei Bereiche (behaglich, noch behaglich, nicht behaglich). Bei belegten Räumen weist die Grünklasse mit 35% prozentual mehr Werte im behaglichen Bereich auf als die Referenzklasse mit 27%. Auch bei unbelegten Räumen herrschen in der Grünklasse behaglichere Bedingungen vor. Abbildung 52 zeigt, dass die rel. Luftfeuchtigkeit in der Grünklasse höher ist und Werte außerhalb des behaglichen Bereichs tendenziell auf zu hohe Temperaturen zurückzuführen sind.

Tabelle 33: Behaglichkeitswerte niedrige rel. Luftfeuchtigkeit, alle Schuljahre

		Behaglich	Noch behaglich	Nicht behaglich	Noch behaglich oder Nicht behaglich	Unter 27 °C	Über 27 °C
Alle Daten	Nicht	30%	56%	15%	70%	88%	12%
Alle Daten	Begrünt	49%	34%	18%	51%	88%	12%
Besetzt	Nicht	27%	51%	23%	73%	84%	16%
Besetzt	Begrünt	35%	40%	25%	65%	85%	15%
Nicht	Nicht	31%	58%	11%	69%	90%	10%
Nicht	Begrünt	54%	31%	15%	46%	90%	10%

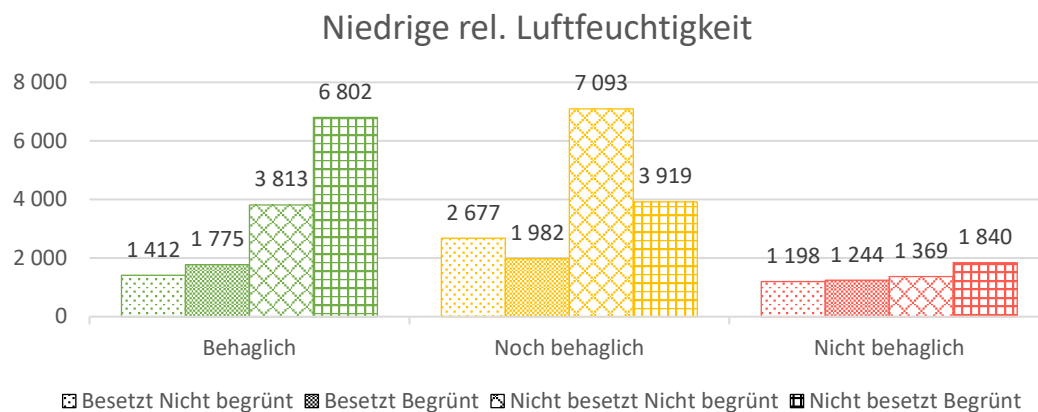


Abbildung 51: Behaglichkeitswerte niedrige rel. Luftfeuchtigkeit, alle Schuljahre

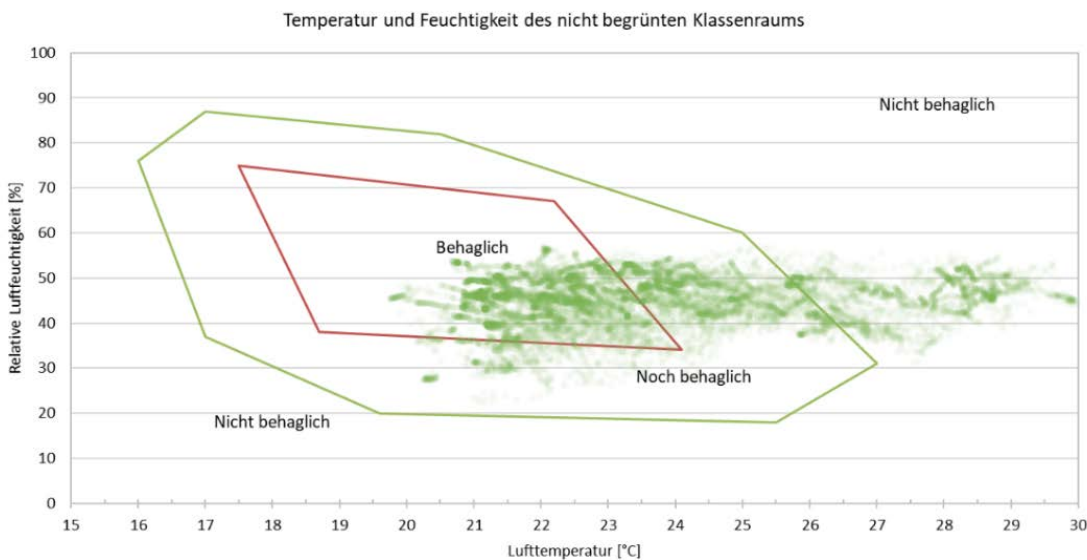
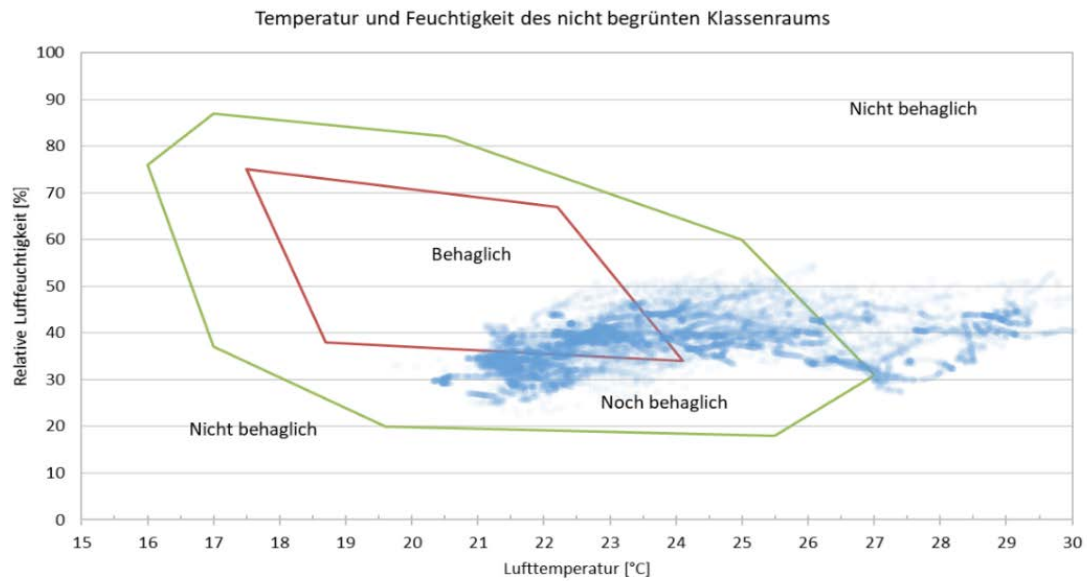


Abbildung 52: Behaglichkeitsfeld niedrige relative Luftfeuchtigkeit, oben Referenzklasse, unten Grünklasse

5.2.1.8 Fazit

Die Auswertungen der erhobenen Messdaten nach Filterung der definierten Kriterien zeigen: Die Behaglichkeit der Innenräume zeigt Unterschiede aufgrund der Innenraumbegrünung und in Abhängigkeit des Wetters. Im Folgenden werden die zentralen Erkenntnisse der Messdatenauswertungen erläutert.

Die meist unbehaglichen Bedingungen sind auf hohe Temperaturen zurückzuführen. Insbesondere Gebäude ohne Wärmedämmung, wie das untersuchte Schulgebäude, sind von diesem Zusammenhang betroffen. Die Feuchteabgabe der Pflanzen führt an Sommertagen zu unbehaglicheren Werten, da die Kombination aus hohen Temperaturen und hoher Luftfeuchtigkeit die hygrothermische Behaglichkeit ungünstig beeinflusst.

An sonnigen Sommertagen sind aufgrund der höheren Strahlung die Raumtemperaturen höher als an bewölkten, wobei vor allem die direkte Sonneneinstrahlung von Bedeutung ist. Bei direktem Vergleich des Raumtemperaturverlaufs lässt sich feststellen, dass beispielsweise im Zeitraum Mai

und Juni 2016 die Temperatur in der begrünten Klasse ca. 77% der Zeit niedriger als in der Referenzklasse war. Wie in Tabelle 27 ersichtlich, ist demnach ein kühlender Effekt der Begrünung im Innenraum zu erkennen.

Im Winter liegen circa 70% der Werte im behaglichen und nur 1% im unbehaglichen Bereich. Im Vergleich bedeutet dies, dass an kalten Wintertagen grundsätzlich behaglichere Bedingungen im Innenraum vorzufinden sind als an sehr warmen Tagen im Sommer. Dabei macht es wenig Unterschied, ob es sonnig oder bewölkt ist. Ein deutlicher Vorteil für ein behagliches Raumklima ist durch die Feuchteabgabe der Pflanzen erkennbar.

Die Filterung der Messdaten nach niedriger relativer Luftfeuchtigkeit außen (< 60%) zeigt hauptsächlich warme Sommertage auf. Aufgrund dieses Zusammenhangs liegen bei Betrachtung dieser Randbedingung auch weniger Messdaten im behaglichen Bereich als bei hoher relativer Luftfeuchtigkeit außen.

5.3 Wandgebundene Außenbegrünung

5.3.1 Ergebnisse zur Ermittlung der Auswirkung von Außenbegrünung auf das Innenraumklima

5.3.1.1 U-Wert Berechnung für den Sommerfall

Der U-Wert gibt an, welche Wärmemenge pro Sekunde durch eine Fläche von einem Quadratmeter eines Bauteils durchströmt, wenn die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Seiten 1 Kelvin beträgt. Um die Wärmemenge, die im Sommer durch die begrünte und nicht begrünte Wand von außen nach innen durchströmt, zu berechnen, wurde hier die gleiche vereinfachte Methode wie beim Winterfall (siehe Endbericht GrünPlusSchule) unter Berücksichtigung der Tagesschwankung und der Speicherfähigkeit gewählt. Die Jahresübergangszeiten wurden hier nicht berücksichtigt.

Die für die gemäß Kapitel 4.5.1.3 durchgeführte U-Wert Berechnungen verwendeten Wärmedurchgangs- und Wärmeübergangswiderstände sind für die Altbauwand mit Trogsystem-Begrünung (Tabelle 34) und die Zubauwand mit Begrünung mit Kassettensystem (Tabelle 35) zusammengefasst. Die aus diesen Widerständen berechneten U-Werte sind in Abbildung 53 dargestellt.

Tabelle 34: Wärmedurchgangs- und Wärmeübergangswiderstände für die Altbauwand mit Trogsystem

BEZEICHNUNG	[M ² K/W]
R _{WAND}	1,39
BEGRÜNT: R _{SE}	1,93
BEGRÜNT: R _T = R _{WAND} + R _{SI} + R _{SE}	3,45
NICHT BEGRÜNT: R _{SE}	1,04
NICHT BEGRÜNT: R _T = R _{WAND} + R _{SI} + R _{SE}	2,56

Tabelle 35: Wärmedurchgangs- und Wärmeübergangswiderstände für die Zubauwand mit Kassettensystem

BEZEICHNUNG	[M ² K/W]
R _{WAND}	2,48
BEGRÜNT: R _{SE}	1,40
BEGRÜNT: R _T = R _{WAND} + R _{SI} + R _{SE}	4,01
NICHT BEGRÜNT: R _{SE}	0,67
NICHT BEGRÜNT: R _T = R _{WAND} + R _{SI} + R _{SE}	3,28

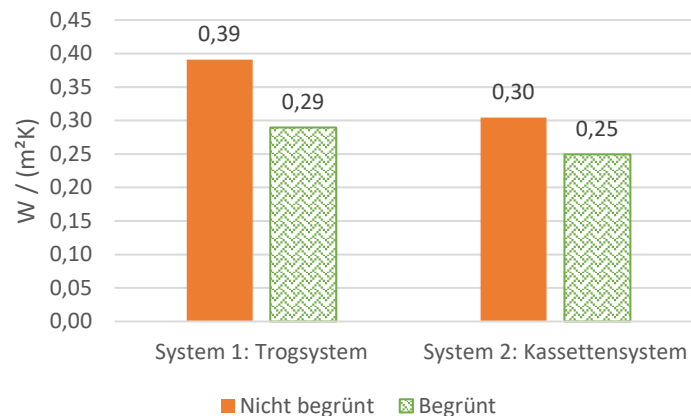


Abbildung 53: Berechnete Sommer U-Werte der begrünt und nicht begrünt Wandelemente

5.3.1.2 Simulation

Die durchgeführten Simulationen erfolgten gemäß der in Kapitel 4.5.1.5 erläuterten Vorgehensweise.

5.3.1.2.1 Variation der Stärke der Hinterlüftungsebene

Um die in Bezug auf die innere Oberflächentemperatur optimale Stärke der Hinterlüftungsebene bestimmen zu können, wurde der Wandaufbau mit dem Kassettensystem mit Luftschichtdicken von 2, 4, 6, 8 und 10 cm simuliert. Als Optimum wird die geringste Oberflächentemperatur an der Innenseite der Wand im Sommer definiert. Um diese Stärke der Hinterlüftungsebene in weiterer Folge als Empfehlung weiterer Begrünungen angeben zu können, muss dieselbe Untersuchung auch für den Winterfall erfolgen, um eventuelle negative Effekte ausschließen zu können.

In Abbildung 54 ist der Vergleich der fünf simulierten Varianten zu sehen.

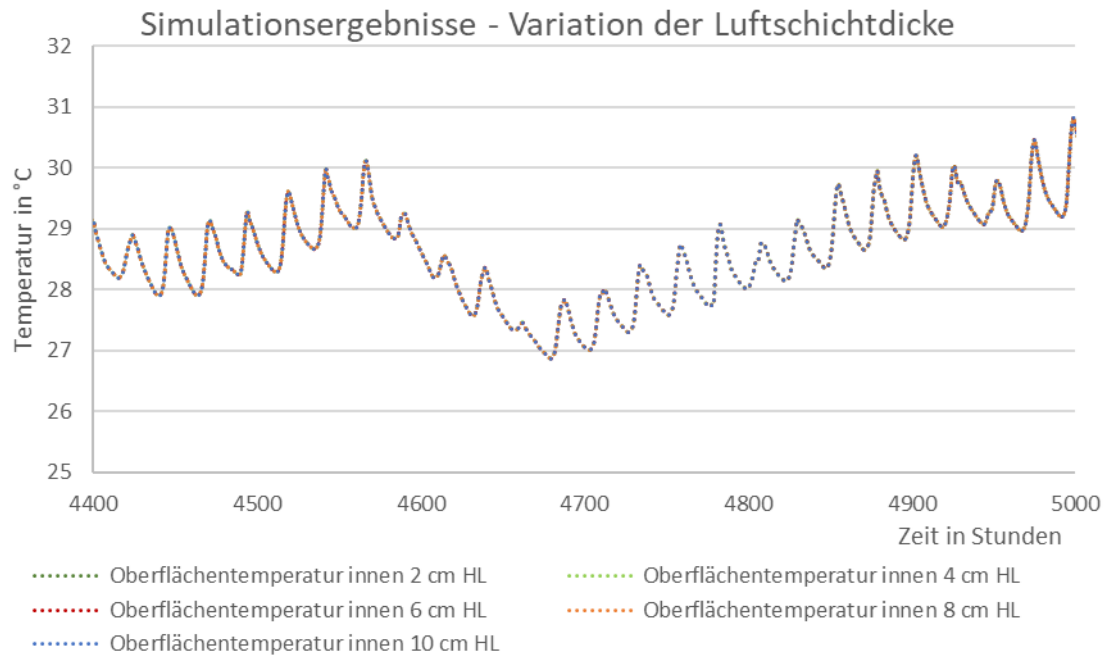


Abbildung 54: Ergebnisse der Simulationen mit Variation der Luftschichtdicke

Die Verläufe der Oberflächentemperaturen an der Wandinnenseite sind deckungsgleich und unterscheiden sich bei genauerer Betrachtung der Ergebnisse nur im Hundertstelbereich. Durch die nahezu identischen Ergebnisse wurde die Frage nach der Ursache dieser gestellt. Eine mögliche Erklärung ist es, dass der Wärmedurchgang durch die Wand von außen durch die verhältnismäßig große Masse und geringe Wärmeleitfähigkeit des Hochlochziegels im Innenraum keine Rolle spielt und die innere Oberflächentemperatur im Sommer hauptsächlich vom Innenraumklima und somit den solaren und inneren Lasten abhängig ist.

Um den Einfluss des Hochlochziegels auf das Verhalten der Wand sowie die Simulationsergebnisse auf Plausibilität zu untersuchen, wurden zwei weitere Simulationen durchgeführt. Bei diesen Simulationen wurde die Wärmeleitfähigkeit des Hochlochziegels von 0,39 W/mK fiktiv auf 10,0 W/mK erhöht. Durch diese Maßnahme wurde die Geometrie der Wand nicht verändert, der Widerstand des Ziegels gegen den Wärmestrom von außen nach innen aber deutlich vermindert. Die beiden Simulationen wurden für 2 cm und 10 cm Luftschichtdicke durchgeführt.

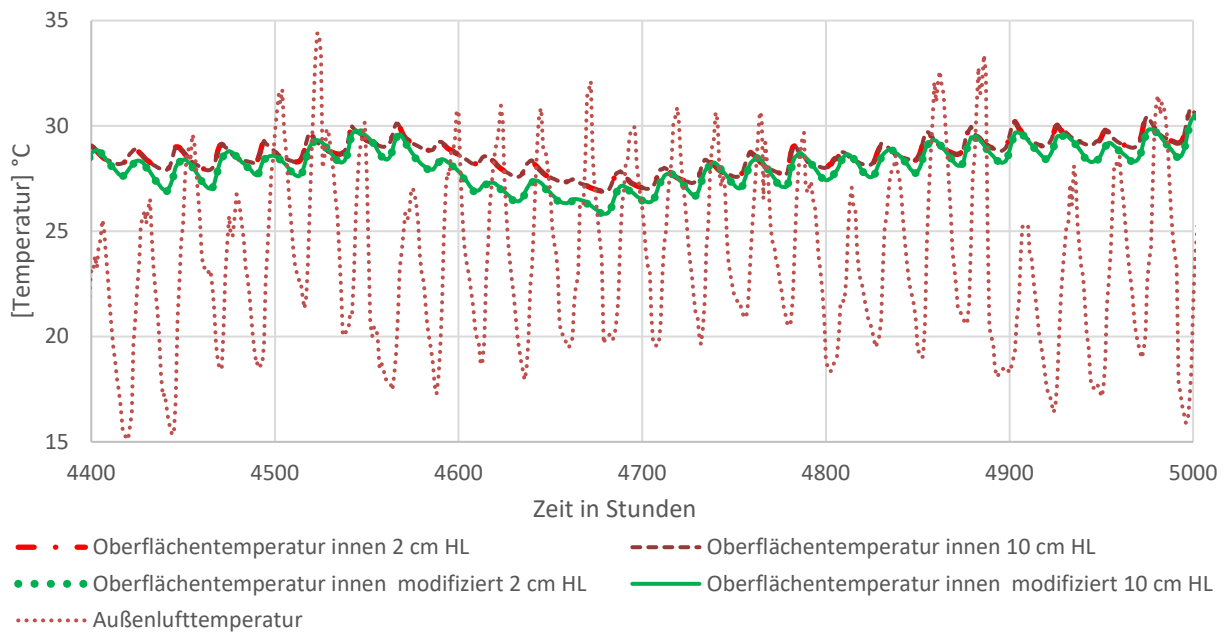


Abbildung 55: Vergleich der Simulationsergebnisse der modifizierten mit den originalen Bauteilen

In Abbildung 55 sind die Ergebnisse dieser Simulationen im Vergleich mit den Ergebnissen der ursprünglichen Simulation (nicht modifiziert) dargestellt. Bei den dargestellten Oberflächentemperaturen an der modifizierten Wand ist der Einfluss des Außenklimas ebenfalls nur marginal und hauptsächlich im Bereich von Stunde 4.570 – 4.700 erkennbar. An den Ergebnissen der modifizierten Wand ist aber die stärkere Abkühlung der Oberflächentemperatur an der Innenseite zu erkennen.

Aus diesen Ergebnissen kann darauf geschlossen werden, dass die Dämmwirkung des hier verbauten Standard-Hochlochziegel ausreicht, um den Wärmeeintrag durch die Wand von außen nach innen im Sommer so zu minimieren, dass das Außenklima keinen Einfluss auf die Oberflächentemperatur im Innenraum hat. Dies konnte auch beim Trogsystem mit Vollziegelmauerwerk bestätigt werden. Da dies bereits auf die beiden untersuchten Wandaufbauten aus ungedämmtem Mauerwerk zutrifft, kann dies auch auf andere gängige Wandaufbauten (gedämmt oder ungedämmt), bei Vernachlässigung von Wärmebrücken etc. geltend gemacht werden.

Mit Hilfe der Simulationen konnte gezeigt werden, dass die Kühlwirkung von begrünten Fassaden nicht nur aus dem Effekt der Verschattung der dahinterliegenden Wand, sondern aus einer Kombination von Verschattung, Evapotranspiration und Wärmedämmung resultiert [41]. Je schlechter die grundsätzlichen Dämmeigenschaften des Wandaufbaus sind, desto höher ist die Wirkung der Begrünung auf das Innenklima und die Innen-Oberflächentemperatur.

5.3.1.2.2 Zusammenfassung der Simulationsergebnisse

Eine der Realität entsprechende und vollständige Abbildung der Fassadenbegrünung in (hygro-) thermischen Simulationen ist sehr komplex. Im Gegensatz zu anderen vorgehängten, hinterlüfteten Fassaden wirkt die Fassadenbegrünung - als lebende Konstruktion - nicht nur als Verschattung der dahinterliegenden Ebene, sondern verbessert zudem nachweislich die Wärmedämmung der Wand und kühlt das Mikroklima und die Umgebung der Begrünung. Durch die Kombination dieser drei Effekte kann bei schlecht gedämmten Objekten das Innenraumklima positiv beeinflusst werden. Sowohl die Innen-Oberflächentemperatur als auch die Raumlufttemperatur ist in Bereichen mit

außenseitig angebrachter Fassadenbegrünung nahezu immer geringer als in Bereichen ohne Fassadenbegrünung.

Aus demselben Grund - der Wirkung aus einer Kombination mehrerer Effekte - hat die Ausführung der Hinterlüftungsebene (Variation der Stärke, verblendet oder nicht, etc.) keinen nennenswerten Einfluss auf den Innenraum im Sommer. Die Hinterlüftungsebene muss aber den normativen Vorgaben an hinterlüftete Fassaden, wie einer ausreichenden Belüftung und mindestens freizuhaltende Lüftungsquerschnitte entsprechen.

5.3.1.3 Sommerliche Überwärmung

Um die Ergebnisse der Simulationen mit den Messwerten vergleichen zu können, wurden in einem ersten Schritt die Tagesmittelwerte der gemessenen Außentemperaturen ermittelt. Die Auswertung dieser Werte zeigte, dass am 12.09.2016 der Tagesmittelwert der Außenlufttemperatur gemessen am Turnsaaldach 24,25 °C betrug. Die Tagesmitteltemperatur nach OIB NAT-T13 [31] beträgt 24,2 °C. Somit wurde dieser Tag für die Vergleiche der Berechnungsergebnisse herangezogen.

5.3.1.3.1 Nicht begrünte Außenwand - Referenzklasse

Die Tagesverläufe der gemessenen Temperaturen am 12.09.16 (Begrünungssystem 2 – Kassettensystem) sind in Abbildung 56 dargestellt. Für den Vergleich der Messwerte wurde die maßgebende operative Temperatur im Innenraum dargestellt. Die Schwankungen der operativen Temperaturen im Tagesverlauf sind an diesem Tag nur sehr gering. Die operative Temperatur im Klassenzimmer mit der begrünten Fassade liegt jedoch den ganzen Tag unter jener in der Referenzklasse.

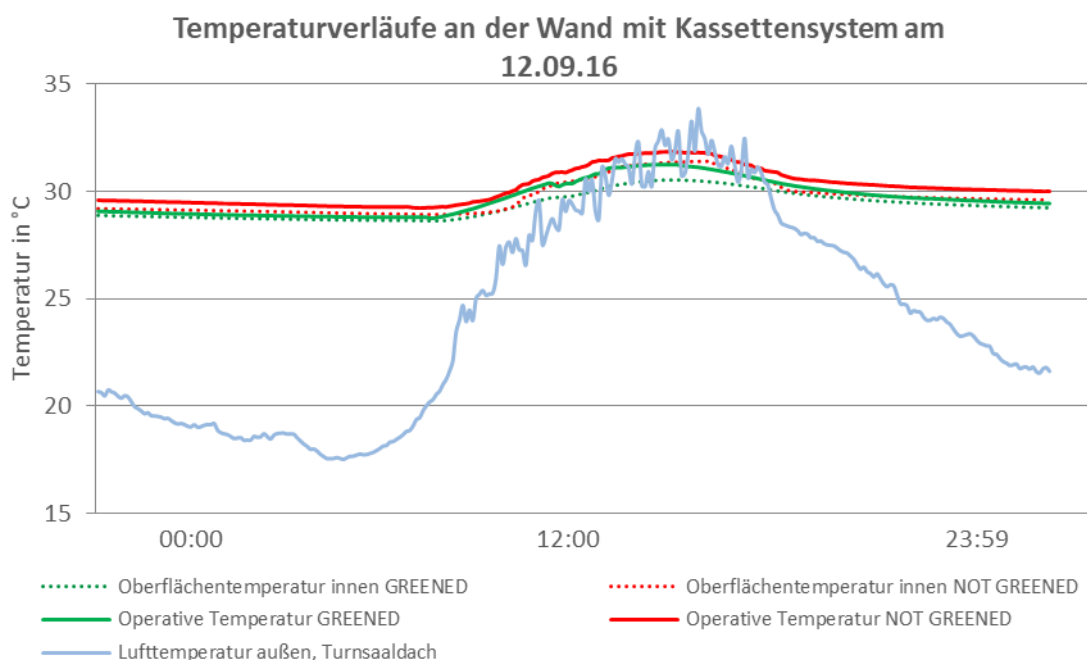


Abbildung 56: operative Temperatur und Oberflächentemperaturen an der Innenseite am 12.09.16

Abbildung 57 zeigt die Auswertung der sommerlichen Überwärmung für ein Klassenzimmer ohne Berücksichtigung der Begrünung an einem Schultag. Die inneren Lasten mit 25 Personen/Klasse sind somit bekannt.

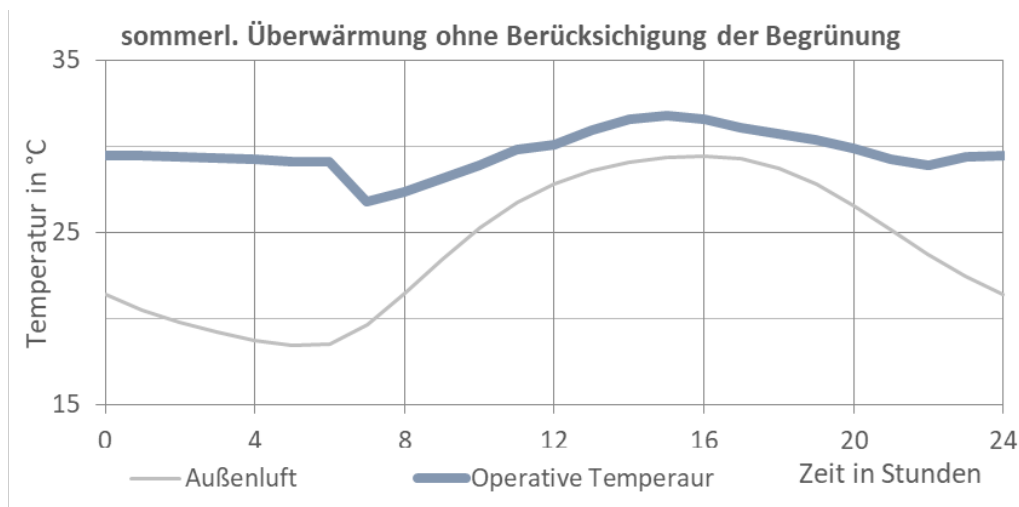


Abbildung 57: Berechnungsergebnis der sommerlichen Überwärmung am 12.09.16 ohne Berücksichtigung der Begrünung

Die minimale operative Temperatur aus den Messwerten für das nicht begrünte Wandelement beträgt 29,3 °C und die maximale operative Temperatur beträgt 31,8 °C. Aus der Berechnung ergibt sich eine maximale operative Temperatur von 31,8 °C während des Tages. Der in der Berechnung abgebildete Klassenraum kann aufgrund dieser Ergebnisse sehr gut mit den Messwerten verglichen werden. In der Berechnung wird während des Tages Fensterlüftung berücksichtigt, wenn die Außentemperatur unter einem von der Innentemperatur abhängigen Grenzwert liegt. Die Senkung der operativen Temperatur um 7:00 Uhr ist auf ein geöffnetes Fenster zurückzuführen. Dadurch liegt die Minimaltemperatur der Berechnung mit 26,8 °C etwas unter den Messwerten. Die Ergebnisse der Berechnung können somit als realistisch betrachtet werden und bestätigen die getroffenen Annahmen.

5.3.1.3.2 Reduktion des Tagesmittelwerts der Außentemperatur

Die Messwerte zeigen eine deutlich geringere Oberflächentemperatur und operative Temperatur im Innenraum bei der begrünten Außenwand. In den bisherigen Berechnungen der sommerlichen Überwärmung in AT kann dieses Verhalten (Fassadenbegrünung) nicht abgebildet werden. Eine weitere Möglichkeit ist es, die in der Berechnung angesetzte Normaußentemperatur abzumindern. Dies ist eine theoretische Methode, die Evapotranspiration und Verschattung der Außenwand durch die Begrünung in der Berechnung zu berücksichtigen. Die solare Einstrahlung ist nur vom Standort, der Orientierung (Himmelsrichtung) und der Neigung des Bauteils abhängig und wird daher durch die Anpassung der Außentemperatur nicht beeinflusst. Die Messwerte weisen eine maximale operative Temperatur bei der begrünten Wand von 31,2 °C auf.

Berechnungen mit verschiedenen Abminderungen der Normaußentemperatur haben gezeigt, dass bereits sehr geringe Veränderungen einen gewünschten Effekt erzielen. Bei der Berechnung nach Variante 1 – den Wandaufbauten ohne Berücksichtigung der Begrünung – erreicht die maximale operative Temperatur im Innenraum mit einer Reduktion der Normaußentemperatur um 0,6 °C den Wert der Messung, siehe Abbildung 58. Bei Berechnung nach Variante 2 – mit Berücksichtigung der

Begrünung in den Wandaufbauten – ist eine Reduktion der Normaußentemperatur um 0,7 °C notwendig.

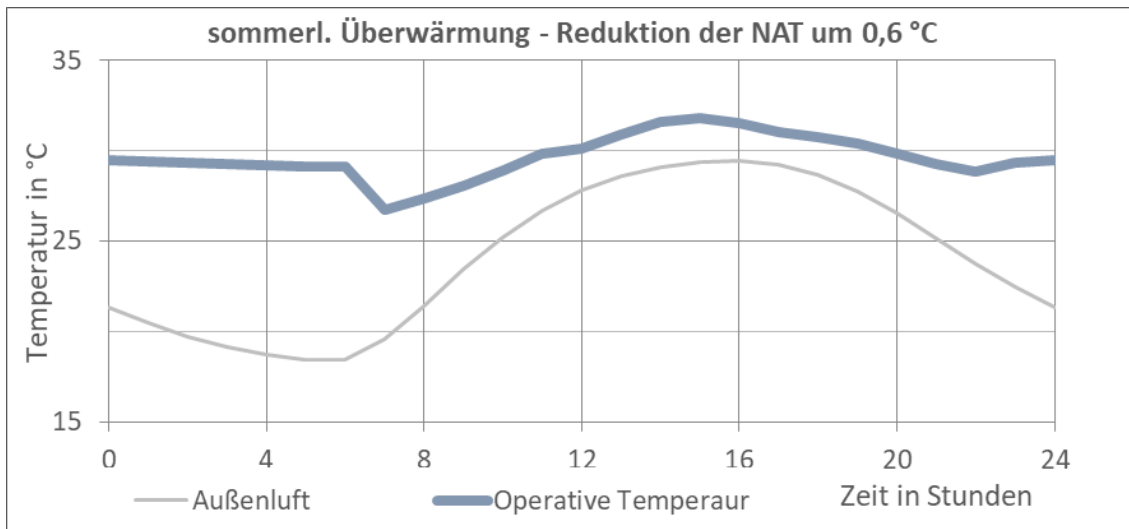


Abbildung 58: Berechnungsergebnis der sommerlichen Überwärmung am 12.09.16 ohne Berücksichtigung der Begrünung, mit Reduktion der NAT um 0,6 °C

5.3.1.3.3 Kontrolle der gewonnenen Ergebnisse durch Anwendung auf das begrünte Stiegenhaus

Beim Stiegenhaus ist die Begrünung großflächig über dessen gesamte Breite und über 8,8 m Höhe angebracht. Im Bereich der Begrünung befinden sich drei Fenster mit jeweils 1,3 x 3,1 m (B x H). Durch die großflächige Begrünung liegen die Tagesmaxima der operativen Temperaturen für den begrünten bzw. nicht begrünten Fall hier sehr nahe beieinander. Für die Berechnung der inneren Lasten wurde die folgende Annahme getroffen: 100 Personen befinden sich für eine Stunde am Tag im Raum. Tatsächlich werden sich in den Pausen kurzzeitig alle SchülerInnen im Stiegenhaus befinden und während der Schulstunde niemand. Diese 100 Personen wurden auf die 8 Stunden, in denen die Schule geöffnet ist, aufgeteilt. Daraus ergibt sich, dass 12 Personen durchgehend anwesend sind.

Die Verläufe der gemessenen Temperaturen an der Stiegenhauswand sind in Abbildung 62 abgebildet.

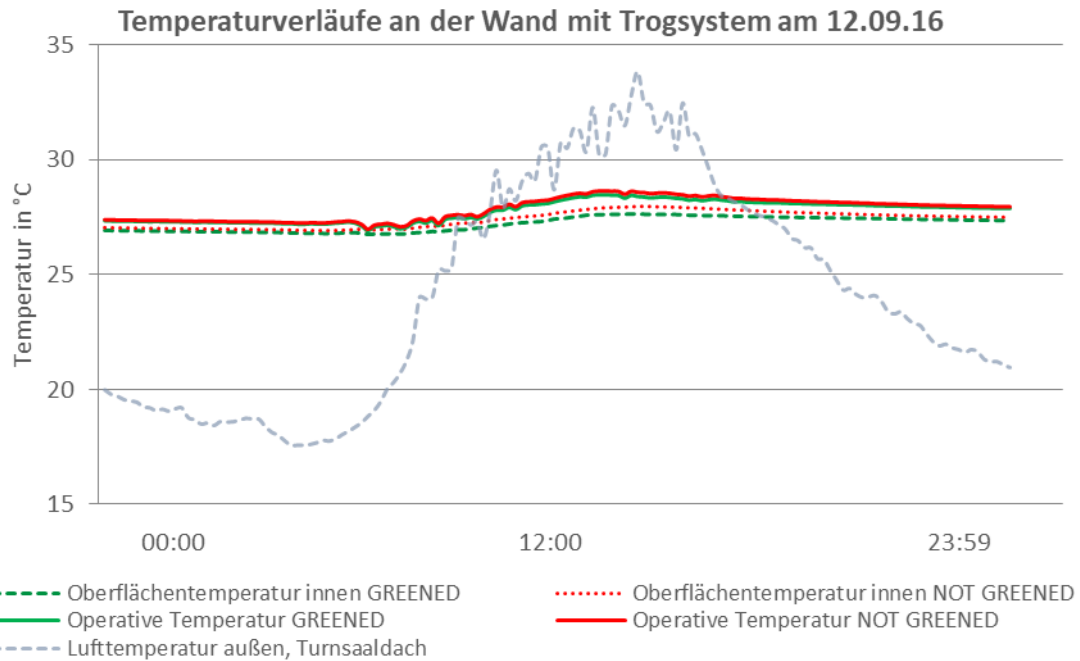


Abbildung 59: operative Temperatur und Oberflächentemperaturen an der Innenseite der Stiegenhauswand

In Tabelle 36 sind die gemessenen Maximalwerte der operativen Temperaturen sowie die Ergebnisse der Berechnungen dargestellt. Da hier die Werte für die begrünte und nicht begrünte Wand im selben Raum (Stiegenhaus) gemessen wurden, ist die Raumlufttemperatur für die begrünte und nicht begrünte Wand dieselbe.

Tabelle 36: Zusammenfassung der operativen Temperaturen im Stiegenhaus

	MAX. OPERATIVE TEMPERATUR	
	nicht begrünt	begrünt
MESSWERTE	28,6 °C	28,5 °C
BERECHNUNG	29,0 °C	28,4 °C

Die Ergebnisse zeigen ebenfalls bei diesem Begrünungssystem, dass durch die Reduktion der Normaußentemperatur um 0,6 °C die Ergebnisse der Berechnung den Messwerten sehr nahekommen lässt. Bei der nicht begrünten Wand sind die Ergebnisse etwas höher als die Messwerte. Durch das offene Stiegenhaus können die Oberflächentemperaturen auch bei der nicht begrünten Wand durch die Begrünung beeinflusst werden.

Das Ziel, die Wirkung der Begrünung in der Berechnung abzubilden, wurde erreicht.

5.3.2 Ergebnisse Mikroklimasimulation

Ein Vergleich der gemessenen Daten der Luft- und Oberflächentemperaturen mit den Simulationsergebnissen zeigt eine gute Übereinstimmung. In Bezug auf die Lufttemperatur im Bereich der Fassadenbegrünung ist die Abweichung zwischen Messdaten und Simulationsergebnissen insbesondere in den Nachmittags- und Abendstunden gering. Der absolute Fehler zwischen Messdaten und Simulationsergebnissen liegt für den Validierungsfall zwischen +2,8 K (morgens) und -1,5 K (nachmittags) (siehe Abbildung 60). Die größte Abweichung tritt in den

Morgenstunden zwischen 6 und 9 Uhr auf. Der Grund dafür ist die homogene Initialisierung der Gebäudetemperaturen und die übermäßige Vereinfachung der Evapotranspirationsvorgänge.

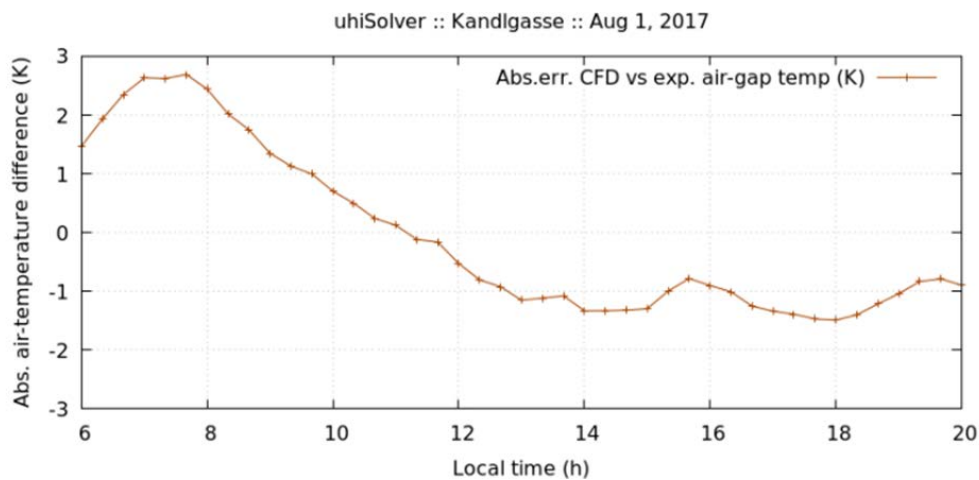


Abbildung 60: Absoluter Fehler zwischen Simulation und Messung

Die Auswertung der Simulationsergebnisse zeigt deutlich, dass die gefühlte Temperatur [32] im begrünten Innenhof mit jener der angrenzenden Straßen vergleichbar und teilweise sogar höher ist (siehe Abbildung 61). Die Lufttemperatur, gemessen im Schatten und ohne Einfluss der Strahlung, liegt jedoch 2 °C unter der der Umgebungstemperatur (siehe Abbildung 62), was auf die Kühlleistung der Pflanzen und die untere Albedo zurückzuführen ist. Die Gründe dafür sind:

- geringere Luftgeschwindigkeiten im Innenhof (wenig Wind und damit kaum Entfeuchtung, siehe Abbildung 63),
- höhere rel. Luftfeuchtigkeit im Innenhof im Vergleich zu den umliegenden Straßen aufgrund der Evapotranspiration der Pflanzen (siehe Abbildung 64)
- „Zwickel“ im Innenhof mit direkter Strahlung und zusätzlich reflektierter Sekundärstrahlung der Wände (siehe Abbildung 65).

Repräsentative Momentaufnahmen wurden an der Spitze der städtischen Hitze nachmittags (um 14:00 Uhr MESZ) ausgewählt. Zum besseren Verständnis werden die folgenden Abbildungen (Abbildung 61 bis Abbildung 65) gleichzeitig als 2D-Schnitt und 3D-Rendering dargestellt.

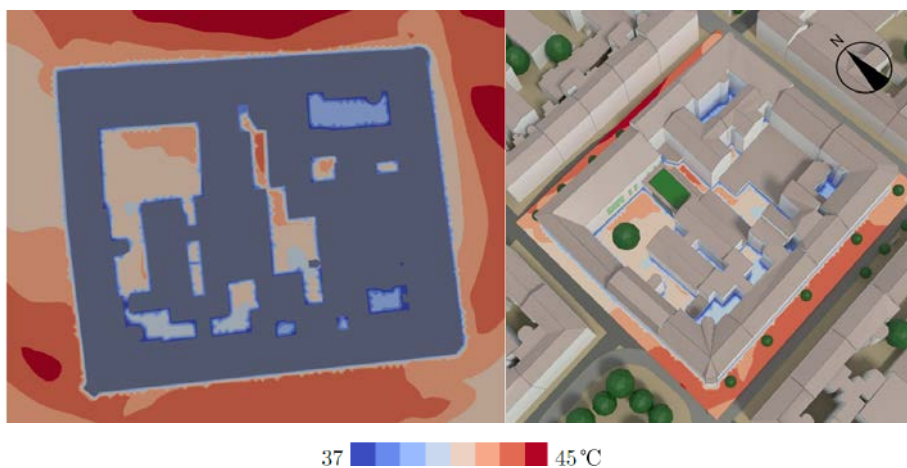
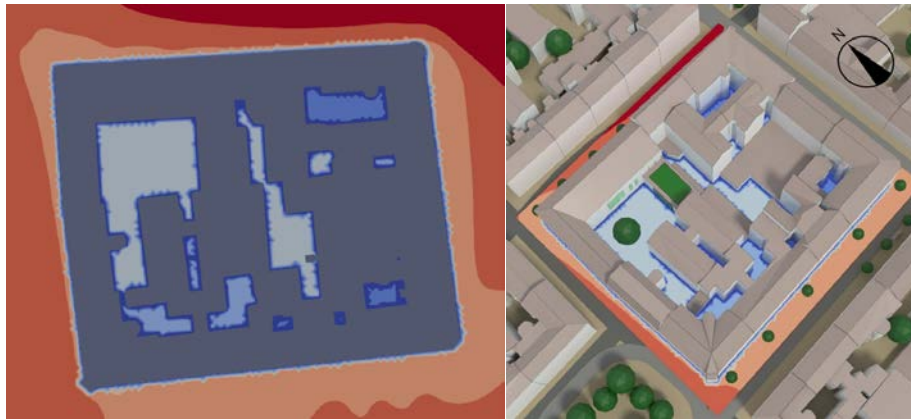
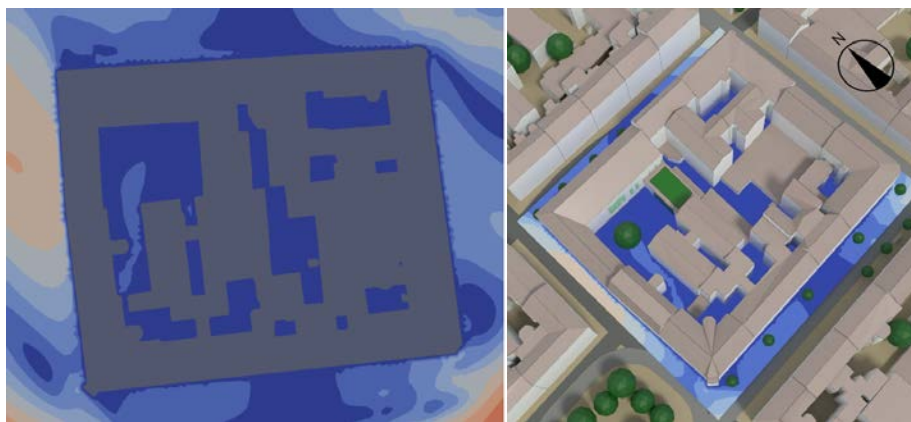


Abbildung 61: gefühlte Temperatur [32], 1,5 m über dem Grund um 14:00 CEST



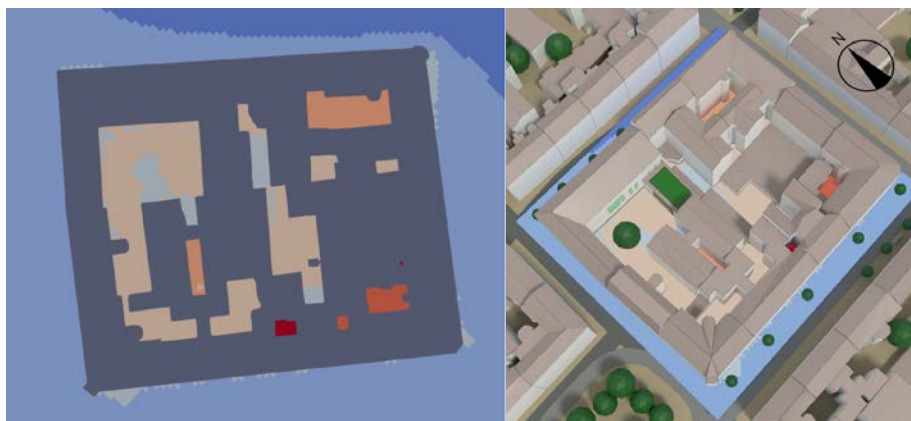
28 36°C

Abbildung 62: Lufttemperatur (Trockentemperatur), 1,5 m Höhe um 14:00 CEST



0 2 m/s

Abbildung 63: Luftgeschwindigkeit, 1,5 m über dem Grund um 14:00 CEST



20 40(%)

Abbildung 64: rel. Luftfeuchtigkeit, 1,5 m über dem Grund um 14:00 CEST

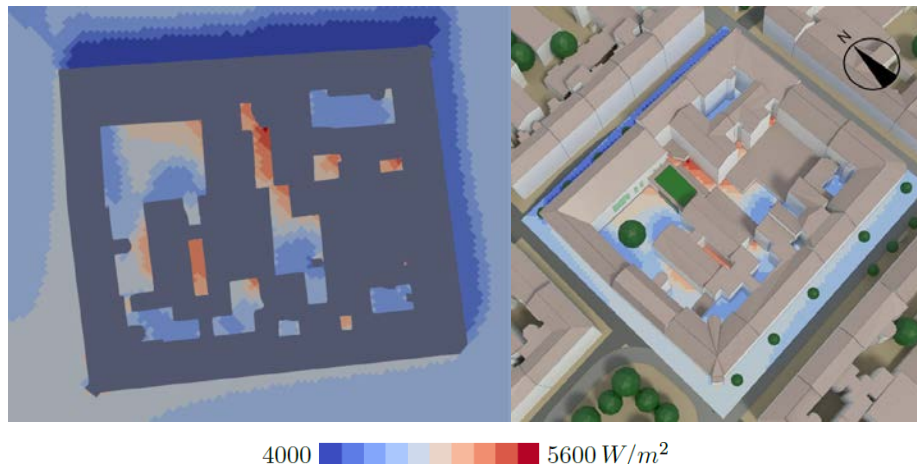


Abbildung 65: Strahlungsdichte, 1,5 m über dem Grund um 14:00 CEST, als sphärisches Integral über alle Raumrichtungen dargestellt

Die auf die Oberflächen einfallende Strahlung (W/m^2) ist in Abbildung 66 als Schwarzkörper-Farbschema dargestellt, um die heißen „Zwickel“ mit IR-Reflexionen zu veranschaulichen. Auffällig ist, dass in den Ecken des Innenhofes die höchsten Strahlungsintensitäten auftreten. Dies sind auch genau die Bereiche, in denen die Maximalwerte der gefühlten Temperatur zu erwarten sind.

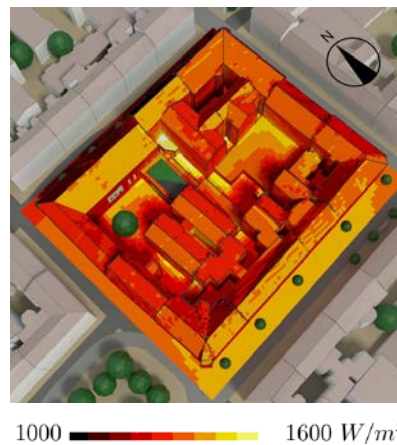


Abbildung 66: einfallende Oberflächenstrahlung (W/m^2) um 14:00 CEST

5.3.3 Ergebnisse zur Ermittlung der Wechselwirkung von wandgebundenen Außenbegrünung und Photovoltaik

Abbildung 67 zeigt die Temperaturen im Monat August 2018 - dem heißesten Monat des Jahres - über den Tag gemittelt. Es ist deutlich erkennbar, dass die Temperatur am Referenzmodul F3 (ohne Begrünung) höher ist als an den Modulen F1 und F2, was zeigt, dass die Begrünung die Temperatur der Module senkt. Der Unterschied zwischen den Durchschnittstemperaturen von F1 und F3 liegt am 20. August bei mehr als $2^{\circ}C$.

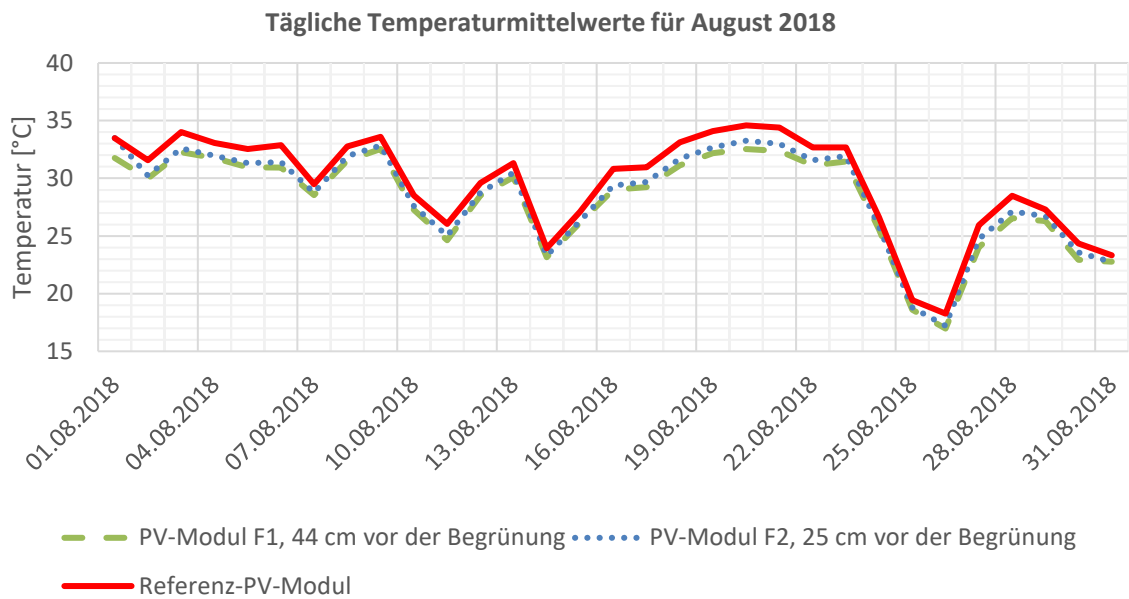


Abbildung 67: Tägliche Temperaturmittelwerte PV-Module August 2018

Abbildung 68 zeigt die Temperaturen an den PV-Modulen an den heißesten Tagen des Jahres 2018, von 06.08 - 12.08.2018, während Abbildung 69 die Temperaturen am 08.08.2018 darstellt. Die Spitzen aller Temperaturen sind während der Mittagsstunden zu sehen. Am 8. August um 14 Uhr liegen die Temperaturen an den Modulen vor der Begrünung bei 52,26°C (F2) und bei 47,71°C (F1), während das Referenzmodul (F3) eine Temperatur von 55,23°C aufweist. Die Differenz zwischen Modul F1 und Modul F3 liegt bei 7,52°C, was einen signifikanten Unterschied darstellt.

Es ist ersichtlich, dass die Werte des Referenzmoduls sowohl tagsüber als auch nachts höhere Spitzen-Werte aufweisen. Es wurde festgestellt, dass durch das Verringern des Abstands zur Photovoltaikanlage kein größerer Kühleffekt der Begrünung erzielt werden kann. Dies ist darauf zurückzuführen, dass daraus resultierend die Hinterlüftung des Moduls verringert wird.

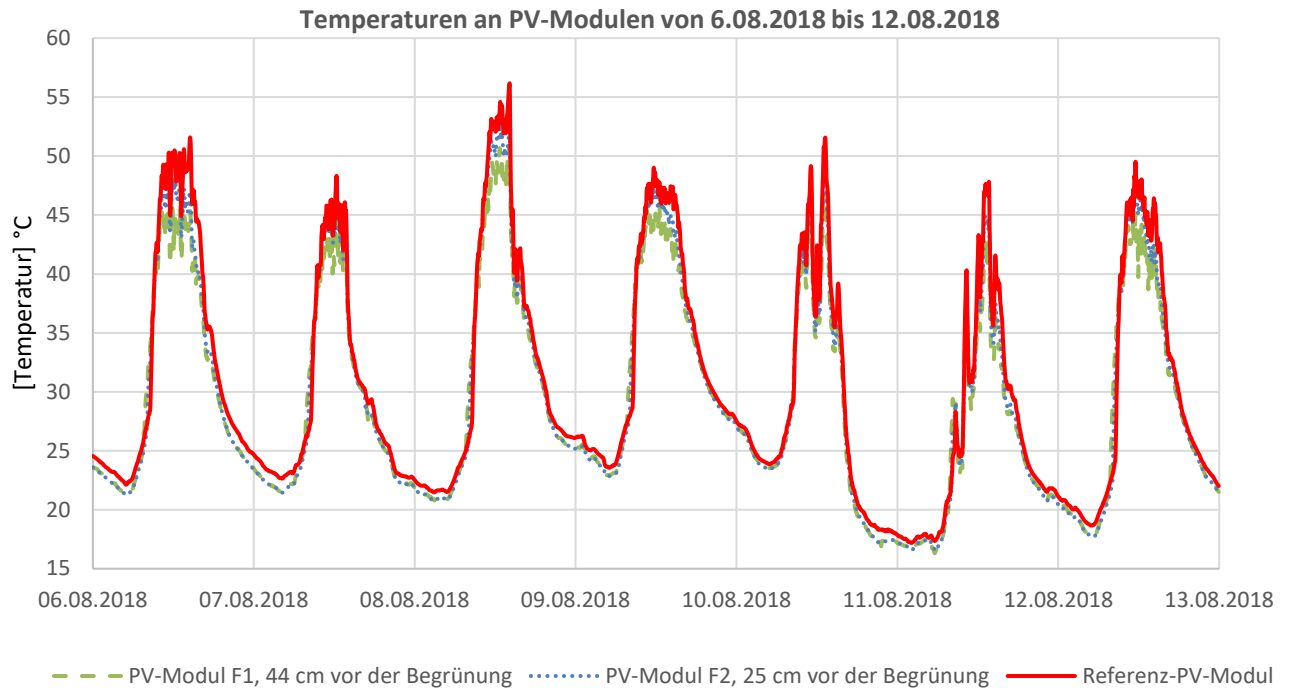


Abbildung 68: Temperatur PV-Module 06.08.-12.08.2018

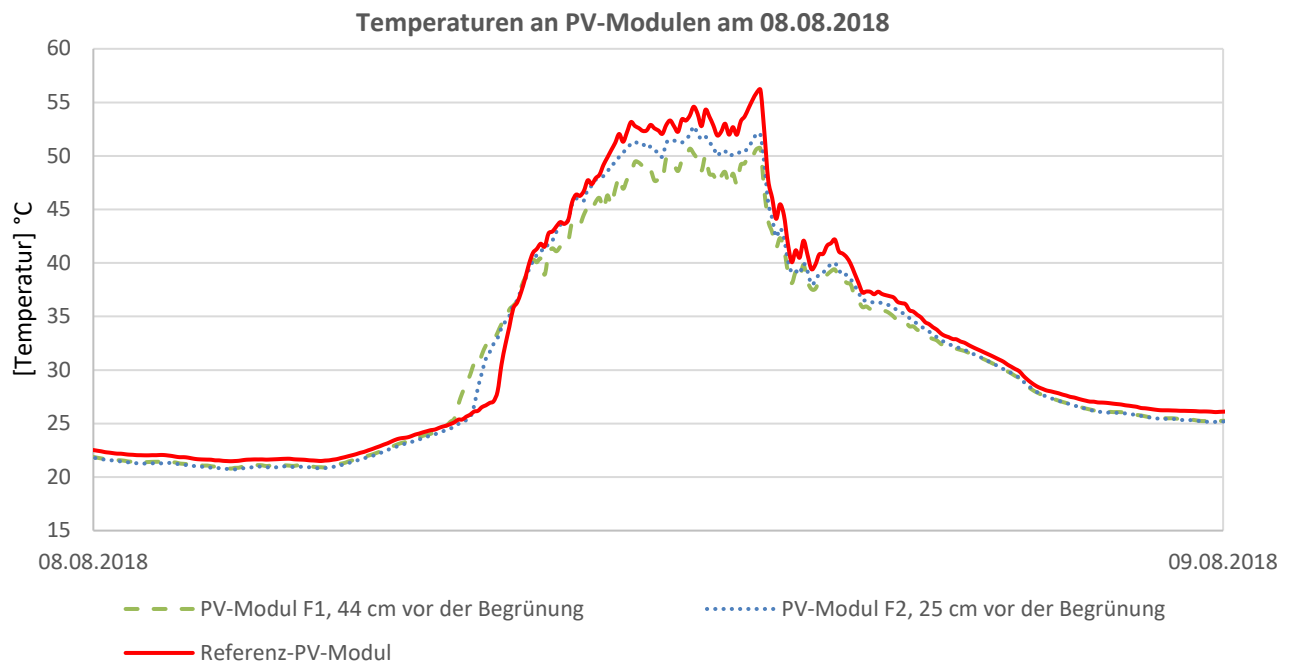


Abbildung 69: Temperatur PV-Module 08.08.2018

6 Schlussfolgerungen

Anhand der in diesem Projekt gewonnenen Ergebnissen können bezüglich der Auswirkungen von Begrünungssystemen folgende Kernaussagen formuliert werden:

6.1 Innenbegrünung

- Die hygrothermische Behaglichkeit im begrünten Innenraum mit Vliessystem zeigt deutliche Unterschiede in Abhängigkeit des Wetters (außen). Durch die Feuchteabgabe der Pflanzen ist an sonnigen Sommertagen ein kühlender Effekt der Begrünung im Innenraum zu erkennen. Da die Kombination aus hohen Temperaturen und hoher Luftfeuchtigkeit für die hygrothermische Behaglichkeit ungünstig ist, führt dies gleichzeitig teilweise zu unbehaglicheren Werten.
- Insgesamt sind an Wintertagen im begrünten Raum behaglichere Bedingungen im Innenraum vorzufinden als an sehr warmen Tagen im Sommer. Dabei macht es wenig Unterschied, ob es sonnig oder bewölkt ist. Im Winter trägt die Begrünung durch die Feuchteabgabe zu einem sichtbar behaglicheren Raumklima bei, welches ansonsten durch Heizen eher trocken und unbehaglich ausfällt.
- Die mit den SchülerInnen errichteten Selbstbauwände stellen eine vergleichsweise günstige Alternative zu kommerziellen Begrünungssystemen dar. Aufgrund der Einfachheit und dem modularen Charakter der Konstruktion sowie der guten Verfügbarkeit der notwendigen Materialien können diese somit von Schulen leicht angepasst und im Zuge des Unterrichts errichtet werden.
- Durch messtechnische Untersuchungen konnte ein Effekt auf das Mikroklima und die Luftqualität durch die Selbstbauwände bestimmt werden. Als Basis diente dazu der Vergleich mit einem Referenz-Messgerät, in dessen unmittelbarer Nähe keine Bepflanzung vorhanden war. Für den Vergleich der einzelnen Pflanzenarten (Efeutute, Schwertfarn, Grünstilbe, Gemischte Bepflanzung) zueinander wurde eine Bewertungsmatrix erstellt. Anhand dieser konnte gezeigt werden, dass Efeutute gefolgt von Schwertfarn insgesamt den höchsten positiven Einfluss auf die untersuchten Parameter hatten. Im Detail betrachtet liefert Efeutute bei allen Parametern Verbesserungen; Schwertfarn hat hingegen bei Feinstaub und CO₂ schlechter abgeschnitten. Gemischt hat nur bei Feinstaub und CO₂ gut abgeschnitten und Grünstilbe liefert zwar bei der hygrothermischen Behaglichkeit bessere Werte als Gemischt, ist aber insgesamt, vor allem durch die fehlenden Auswirkungen auf die Nachhallzeit, CO₂ und Feinstaub (PM_{2.5}) schlechter zu bewerten. Darüber hinaus haben sich die Pflanzen der Varianten Efeutute, Schwertfarn und Gemischt als besonders robust und geeignet für den Schulalltag erwiesen. Pflanzen der Art Grünstilbe waren hingegen empfindlicher und haben dadurch einen höheren Bedarf bei der Pflege gezeigt.
- Die erbauten Selbstbauwände (egal mit welcher Pflanzenart begrünt) hatten keinen negativen Einfluss auf die Schimmelsporenkonzentration und es kam bei keiner Pflanzenart zu einem wesentlichen Einfluss auf die Gesamtsporenzahl in der Luft. Die gemessenen Konzentrationen haben außerdem die gewählten Richtwerte des Umweltbundesamt Deutschland unterschritten, wodurch bestätigt wird, dass es durch die Selbstbauwände zu keiner Anreicherung von Schimmelsporen gekommen ist.

6.2 Außenbegrünung

- Durch die Auswertung der Temperatur-, Luftfeuchtigkeit und Wärmestrom-Messwerte der zwei unterschiedlichen Begrünungssysteme an der Innenhoffassade konnten als Vorteile der Außenbegrünung die Verbesserung des Wärmeschutzes der Außenwände, sowie positive Auswirkungen auf das Mikroklima dargestellt werden.
- Die positive Wirkung der Fassadenbegrünung auf den Innenraum kann aus der Kombination von Wärmedämmung, Verschattung und Evapotranspiration definiert werden. Diese drei Effekte können in der Berechnung der sommerlichen Überwärmung nur in aufwändigen Simulationen kombiniert berücksichtigt werden. Anhand der über mehrere Jahre aufgezeichneten Messwerte konnte der langfristige positive Effekt der Fassadenbegrünung auf den Innenraum gezeigt werden.
- Die Ausführung der Hinterlüftungsebene (Variation der Stärke, verblendet oder nicht, etc.) hat im betrachteten Zeitraum im Sommer keinen nennenswerten Einfluss auf den Innenraum. Die Hinterlüftungsebene muss aber den normativen Vorgaben an hinterlüftete Fassaden, wie einer ausreichenden Belüftung und mindestens freizuhaltende Lüftungsquerschnitte entsprechen.
- Die dynamischen 3D-Simulationen des Innenhofes haben gezeigt, dass die gefühlte Temperatur im begrünten Innenhof der Schule trotz der niedrigeren Lufttemperatur manchmal höher ist als in den angrenzenden Straßen. Gründe dafür sind die höhere Strahlungsdichte aufgrund der gegenseitigen Bestrahlung der Innenhoffassaden, die geringeren Luftgeschwindigkeiten und die höhere Luftfeuchtigkeit. Weitere Fassadenbegrünung im Innenhof könnte diesem Effekt entgegenwirken.

7 Ausblick und Empfehlungen

Gebäudebegrünung kann sehr individuell und an die unmittelbaren Bedürfnisse der Menschen angepasst ausgeführt werden. Dabei spielen vor allem Kosten, Infrastruktur, statische und konstruktive Machbarkeit sowie Design eine große Rolle. Wie in diesem Projekt gezeigt werden konnte, sind hohe Kosten bei der Anschaffung und Installation im Innenraum keine Garantie für eine gleichzeitig höhere Wirkung auf das Mikroklima und Luftschadstoffe, da Begrünungssysteme im Entwurfsprozess im Regelfall nicht im Hinblick darauf optimiert werden. Somit bietet dieses Feld weiterhin großes Potential für Forschung. In einem nächsten Schritt kann zum Beispiel die Kombination der Begrünung mit Belüftungstechnik, wodurch die Effizienz und Effektivität der Auswirkungen der Pflanzen potenziell erhöht wird, untersucht und unter Umständen als Demonstrationsobjekt bei wandgebundenen Systemen umgesetzt werden.

Günstige Varianten, wie die Selbstbauwand, stellen einen guten, einfachen Einstieg in die Gebäudebegrünung dar. Sie bringen durch die oben genannten Effekte nicht nur kurzfristig Vorteile, sondern machen die Thematik langfristig auch PlanerInnen und EntscheidungsträgerInnen bewusst. Dabei bestehen nicht nur weitere Möglichkeiten zur Optimierung der eingesetzten Rohstoffe, Materialien und Finanzierungsmodelle, wie zum Beispiel im Projekt MehrGrüneSchulen untersucht wird, sondern auch großes Potential bei der weiteren Verbesserung der Effekte auf die Raumluft. Dabei sollte nicht nur die Auswahl der Pflanzen, sondern auch das Substrat und die darin enthaltenen Mikroorganismen, die eine wichtige Rolle bei der Abgabe und Aufnahme von Luftschadstoffen spielen können, untersucht werden.

Fassadenbegrünung stellt bei korrekter Ausführung unabhängig von der Jahreszeit eine wertvolle Erweiterung der Gebäudeaußenhülle dar - unter anderem als (Wärme-)Dämmung bei nicht gedämmten Konstruktionen. Des Weiteren kann Fassadenbegrünung durch den Synergie-Effekt von Pflanzen mit technischen Anlagen wie Photovoltaik direkten, positiven Einfluss auf die Energiebilanz von Gebäuden haben.

Als weiteres Beispiel für einen zu erforschenden, potenziellen Synergie-Effekt ist die Nutzung von Sprühnebel zur Bewässerung von Begrünung im Außenraum zu nennen. Hochauflösende Mikrosimulationen (UhiSolver) haben Hinweise darauf gegeben, dass die Standortwahl für hohe Effizienz und Effektivität der Begrünungsmaßnahmen essenziell ist und somit auch weiter erforscht werden sollte. Dabei ist es wichtig, möglichst viele verschiedene Gebäudetypen und Lagen zu untersuchen, um allgemein gültige Aussagen über die Wechselwirkung von Begrünung mit verschiedenen Konstruktionstypen zu gewinnen und gleichzeitig verschiedene Begrünungssysteme und deren unterschiedliche Montagemethoden zu verallgemeinern, um die Ergebnisse möglichst vielen zukünftigen PlanerInnen und EntscheidungsträgerInnen als in der Praxis anwendbare Basis zur Verfügung stellen zu können. Gleichzeitig kann die Aussagekraft der Mikrosimulationen erhöht werden, indem zwei von der Lage und Architektur vergleichbare Innenhöfe - einmal begrünt und einmal nicht oder unterschiedlich begrünt - direkt verglichen werden.

8 Verzeichnisse

8.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Sensoren mit Strahlenschutzschirm am begrünten Turnsaaldach.....	9
Abbildung 2: Schematische Darstellung der AirSensEUR-Plattform (links) und Darstellung einer Klimabox (rechts) [12]	10
Abbildung 3: 3D-Entwurf der Selbstbauwand (links) und Explosionszeichnung eines Trogs (rechts) ..	11
Abbildung 4: Bau der Selbstbauwände mit SchülerInnen	12
Abbildung 5: Fertige Selbstbauwände inklusive Bepflanzung.....	14
Abbildung 6: Unterschiedliche Pflanzenarten v.l.n.r.: Efeutute, Schwertfarn, Grünsilber und Gemischt	14
Abbildung 7: Schädling in Pflanztrog	15
Abbildung 8: Selbstbauwand (Grünsilber) mit installierter „Klimabox“ (links), „Klimabox“ Referenzmessgerät (rechts)	16
Abbildung 9: Selbstbauwände im Klassenraum 121 (v.l.n.r. Schwertfarn, Efeutute, Einblatt, Gemischt)	16
Abbildung 10: Verlauf der Temperatur und Luftfeuchtigkeit bei der Kalibration	17
Abbildung 11: Referenzmessstelle Taborstraße, Wien	17
Abbildung 12: Korrelation der eingesetzten Feinstaub-Sensoren (OPC) und Referenzmessstelle Taborstraße	18
Abbildung 13: 360°-Aufnahme von Raum 101 mit positionierter Begrünungsmaßnahme und zwei Mikrofonen zur Messung der Nachhallzeit	20
Abbildung 14: Grundriss Raum 101 (links) und Foto von Raum 101 mit installierten Mikrofonen (rechts).....	21
Abbildung 15: Luftkeimsammler im beprobten Raum (links), Bebrüteter Nährboden (rechts)	21
Abbildung 16: Vliesystem im Klassenraum 308.....	22
Abbildung 17: Begrünungssysteme im Innenhof des Gymnasiums. Links im Bild: Trogsystem, rechts im Bild: Kassettensystem	24
Abbildung 18: Schematische Darstellung des Messaufbaus [10]	24
Abbildung 19: 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.	26
Abbildung 20: Beispiel für ein Numerisches Gitter – Wandelement mit Begrünung durch das Kassettensystem.....	28
Abbildung 21: Interne und solare Wärmegevinne unter Berücksichtigung der Anwesenheit im Raum	29
Abbildung 22: Photovoltaikmodule v.l.n.r.: F1 (44 cm Abstand), F2 (25 cm Abstand) und F3 (Referenzmodul) an der Außenfassade (links) & Seitenansicht der Photovoltaikmodule (rechts)	30
Abbildung 23: Sonnendiagramm Fassade West [35].....	31
Abbildung 24: Sonnendiagramm Fassade Ost [35]	31
Abbildung 25: Relative Luftfeuchtigkeit (oben) & Lufttemperatur (unten)	34

Abbildung 26: Absolute Luftfeuchtigkeit von 09.03 bis 10.03.2020	34
Abbildung 27: Verlauf der Feinstaub-Konzentration Fraktion PM10 am 09.03.2020	36
Abbildung 28: Verlauf der Feinstaub-Konzentration Fraktion PM2.5 am 09.03.2020	37
Abbildung 29: Verlauf der Feinstaub-Konzentration Fraktion PM10 am 18.05.2020	37
Abbildung 30: Verlauf der Feinstaub-Konzentration Fraktion PM2.5 am 18.05.2020	38
Abbildung 31: Verlauf der CO ₂ -Konzentration von 03.03. – 04.03.2020	39
Abbildung 32: Ergebnisse der Messungen der Nachhallzeit im Vergleich	42
Abbildung 33: Schallabsorptionsgrad Impulsposition 1	43
Abbildung 34: Schallabsorptionsgrad Impulsposition 2	43
Abbildung 35: Darstellung der Behaglichkeitswerte in Abhängigkeit der Begrünung und Besetzung der Klasse 2015/16	46
Abbildung 36: Darstellung der Behaglichkeitswerte in Abhängigkeit der Begrünung und Besetzung der Klasse 2016/17	46
Abbildung 37: Darstellung der Behaglichkeitswerte in Abhängigkeit der Begrünung und Besetzung der Klasse 2017/18	47
Abbildung 38: Darstellung der Behaglichkeitswerte in Abhängigkeit der Begrünung und Besetzung der Klasse 2018/19	48
Abbildung 39: Kühleffekt der Begrünung im Vergleich zur Referenzklasse (Mai, Juni 2016).....	49
Abbildung 40: Kühleffekt im Detail über zwei Wochen	49
Abbildung 41: Behaglichkeitswerte sonnig an Sommertagen, alle Schuljahre	50
Abbildung 42: Behaglichkeitsfeld sonnig an Sommertagen, oben Referenzklasse, unten Grünklasse.	50
Abbildung 43: Behaglichkeitswerte bewölkt an Sommertagen, alle Schuljahre	51
Abbildung 44: Behaglichkeitsfeld bewölkt an Sommertagen, oben Referenzklasse, unten Grünklasse	52
Abbildung 45: Behaglichkeitswerte sonnig an Wintertagen, alle Schuljahre	53
Abbildung 46: Behaglichkeitsfeld sonnig an Wintertagen, oben Referenzklasse, unten Grünklasse...	54
Abbildung 47: Behaglichkeitswerte bewölkt an Wintertagen, alle Schuljahre	55
Abbildung 48: Behaglichkeitsfeld bewölkt an Wintertagen, oben Referenzklasse, unten Grünklasse.	56
Abbildung 49: Behaglichkeitswerte hohe rel. Luftfeuchtigkeit, alle Schuljahre.....	57
Abbildung 50: Behaglichkeitsfeld hohe rel. Luftfeuchtigkeit, oben Referenzklasse, unten Grünklasse	58
Abbildung 51: Behaglichkeitswerte niedrige rel. Luftfeuchtigkeit, alle Schuljahre	59
Abbildung 52: Behaglichkeitsfeld niedrige relative Luftfeuchtigkeit, oben Referenzklasse, unten Grünklasse	60
Abbildung 53: Berechnete Sommer U-Werte der begrüneten und nicht begrüneten Wandelemente ...	62
Abbildung 54: Ergebnisse der Simulationen mit Variation der Luftschichtdicke	63
Abbildung 55: Vergleich der Simulationsergebnisse der modifizierten mit den originalen Bauteilen .	64
Abbildung 56: operative Temperatur und Oberflächentemperaturen an der Innenseite am 12.09.16	65
Abbildung 57: Berechnungsergebnis der sommerlichen Überwärmung am 12.09.16 ohne Berücksichtigung der Begrünung	66

Abbildung 58: Berechnungsergebnis der sommerlichen Überwärmung am 12.09.16 ohne Berücksichtigung der Begrünung, mit Reduktion der NAT um 0,6 °C	67
Abbildung 59: operative Temperatur und Oberflächentemperaturen an der Innenseite der Stiegenhauswand.....	68
Abbildung 60: Absoluter Fehler zwischen Simulation und Messung	69
Abbildung 61: gefühlte Temperatur [32], 1,5 m über dem Grund um 14:00 CEST	69
Abbildung 62: Lufttemperatur (Trockentemperatur), 1.5 m Höhe um 14:00 CEST.....	70
Abbildung 63: Luftgeschwindigkeit, 1,5 m über dem Grund um 14:00 CEST	70
Abbildung 64: rel. Luftfeuchtigkeit, 1,5 m über dem Grund um 14:00 CEST.....	70
Abbildung 65: Strahlungsdichte, 1,5 m über dem Grund um 14:00 CEST, als sphärisches Integral über alle Raumrichtungen dargestellt	71
Abbildung 66: einfallende Oberflächenstrahlung (W/m ²) um 14:00 CEST.....	71
Abbildung 67: Tägliche Temperaturmittelwerte PV-Module August 2018.....	72
Abbildung 68: Temperatur PV-Module 06.08.-12.08.2018	73
Abbildung 69: Temperatur PV-Module 08.08.2018	73

8.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bestehende wandgebundene Begrünungssysteme aus dem Vorprojekt GrünPlusSchule ...	8
Tabelle 2: Zusammenfassung der aus dem Vorprojekt übernommenen Messtechnik.....	9
Tabelle 3: Verwendete Sensoren der „Klimaboxen“	10
Tabelle 4: Vergleich Selbstbauwand mit handgebundener Innenbegrünung - Kosten und Fläche.....	12
Tabelle 5: Ausgewählte Pflanzen für die Bepflanzung der Selbstbauwände	13
Tabelle 6: Übersicht der Standorte der neuen Begrünungssysteme	16
Tabelle 7: Abmessungen der im vorliegenden Projekt zusätzlich untersuchten Räume.....	16
Tabelle 8: Beispiel der Bewertung der Feinstaub-Ergebnisse	18
Tabelle 9: Ausschnitt Schimmelleitfaden Anhang 8 [23].....	22
Tabelle 10: Filterkriterien der Wetterverhältnisse.....	23
Tabelle 11: Für die Auswertung herangezogene Tage.....	33
Tabelle 12: Bewertungsmatrix für Innenraumluftqualität	33
Tabelle 13: Statistische Auswertung der absoluten Luftfeuchtigkeit.....	35
Tabelle 14: Statistische Auswertung der Luft-Temperatur.....	35
Tabelle 15: Statistische Auswertung der Feinstaub-Fraktionen PM2.5 und PM10	38
Tabelle 16: Statistische Auswertung der CO ₂ -Messwerte	39
Tabelle 17: Literatur zum CO ₂ -Verbrauch diverser Pflanzenarten	40
Tabelle 18: Nachhallzeit Impulsposition 1, Differenz zu Raum ohne Begrünung in Prozent	41
Tabelle 19: Nachhallzeit Impulsposition 2, Differenz zu Raum ohne Begrünung in Prozent	41
Tabelle 20: Berechnete Schallabsorptionsgrade in Abhängigkeit der Frequenz, Pflanzenarten im Vergleich	43
Tabelle 21: Ergebnis Messung 1 - Schimmelsporen	44

Tabelle 22: Ergebnis Messung 2 - Schimmelsporen	44
Tabelle 23: Behaglichkeitswerte Schuljahr 2015/16	45
Tabelle 24: Behaglichkeitswerte Schuljahr 2016/17	46
Tabelle 25: Behaglichkeitswerte Schuljahr 2017/18	47
Tabelle 26: Behaglichkeitswerte Schuljahr 2018/19	47
Tabelle 27: Kühleffekt der Begrünung anhand der Anzahl der aufgezeichneten Messwerte (als Datenpaare) im Zeitraum: Mai, Juni 2016	49
Tabelle 28: Behaglichkeitswerte sonnig an Sommertagen, alle Schuljahre	49
Tabelle 29: Behaglichkeitswerte bewölkt an Sommertagen, alle Schuljahre	51
Tabelle 30: Behaglichkeitswerte sonnig an Wintertagen, alle Schuljahre	53
Tabelle 31: Behaglichkeitswerte bewölkt an Wintertagen, alle Schuljahre	55
Tabelle 32: Behaglichkeitswerte hohe rel. Luftfeuchtigkeit, alle Schuljahre.....	57
Tabelle 33: Behaglichkeitswerte niedrige rel. Luftfeuchtigkeit, alle Schuljahre	59
Tabelle 34: Wärmedurchgangs- und Wärmeübergangswiderstände für die Altbauwand mit Trogsystem	62
Tabelle 35: Wärmedurchgangs- und Wärmeübergangswiderstände für die Zubauwand mit Kassettensystem.....	62
Tabelle 36: Zusammenfassung der operativen Temperaturen im Stiegenhaus	68

8.3 Literaturverzeichnis

- [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] Der Spiegel, "Forscher befürchten mehr Todesopfer," 2018. [Online]. Available: <http://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/hitzewellen-mehr-todesopfer-befuerchtet-a-1152981.html>. [Accessed: 27-Jun-2018].
- [3] Der Standard, "150 bis 1.200 Hitzetote im Jahr – je nach Temperatur und Berechnung," 2018. [Online]. Available: derstandard.at/2000063314371/150-bis-1200-Hitzetote-im-Jahr-je-nach-Temperatur-und- [Accessed: 03-Sep-2018].
- [4] ORF, "Sterberisiko um 13 Prozent höher," 2018. [Online]. Available: https://news1.orf.at/070622-13664/?href=https%3A%2F%2Fnews1.orf.at%2F070622-13664%2F13668txt_story.html. [Accessed: 03-Sep-2018].
- [5] Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik ZAMG, "Hitzewellen: 2015 eines der extremsten Jahre der Messgeschichte," 2018. [Online]. Available: https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/news/hitzewellen-2015-eines-der-extremsten-jahre-der-messgeschichte?utm_source=twitterfeed&utm_medium=twitter. [Accessed: 03-Sep-2018].
- [6] Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik ZAMG, "Klimatologische Kenntage in Wien 1955 bis 2017," 2018. [Online]. Available: <https://www.wien.gv.at/statistik/lebensraum/tabellen/eis-hitze-tage-zr.html>. [Accessed: 03-

Sep-2018].

- [7] D. Tudiwer, F. Teichmann, and A. Korjenic, "Thermal bridges of living wall systems," *Energy Build.*, vol. 205, 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.109522.
- [8] D. Tudiwer, M. Vertal, A. Korjenic, and K. Cakyová, "Abbildung der wärmedämmenden Wirkung eines fassadengebundenen Begrünungssystems in einem," *Bauphysik*, vol. 41, no. 3, pp. 155–161, 2019, doi: 10.1002/bapi.201900009.
- [9] D. Tudiwer and A. Korjenic, "The effect of living wall systems on the thermal resistance of the facade"; *Energy and Buildings*, *Appl. Mech. Mater.*, vol. 861, no. 1662–7482, pp. 343–350, 2016.
- [10] A. Korjenic *et al.*, "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.
- [11] A. Korjenic *et al.*, "GRÜNEzukunftSCHULEN - Grüne Schuloasen im Neubau. Fokus Planungsprozess und Bestandsgebäude," Endbericht; FFG; Wien, 2020.
- [12] "AirSenseEUR User Manual vs 2.0." [Online]. Available: <https://airsenseur.org/website/download/airsenseur-v2-x-user-manual/>. [Accessed: 09-Mar-2021].
- [13] W. Frank, "Raumklima und Thermische Behaglichkeit," *Berichte aus der Bauforsch.*, vol. 104, 1975.
- [14] B. Der Bekämpfung, D. Ausbreitung, and C. Sars-cov-, "Coronavirus SARS-CoV-2 - Ergänzende Empfeh- lungen der gesetzlichen Unfallversicherung für die Gefährdungsbeurteilung in Schulen," no. September, pp. 1–6, 2020.
- [15] U. Weiser, "Eine CO2-Ampel für jedes Zimmer," *Die Presse2*, 2020. [Online]. Available: <https://www.diepresse.com/5859486/eine-co2-ampel-fur-jedes-klassenzimmer>.
- [16] H. W. West, "Wiener HTL entwickelt CO2 Ampel für den Bildungsbereich," 2021. [Online]. Available: <https://3druck.com/coronavirus/wiener-htl-entwickelt-co2-ampel-fuer-den-bildungsbereich-1898067/>.
- [17] M. Riederer, "Frische Luft im Klassenzimmer: Was sind CO2-Ampeln?," *br24*, 2020. [Online]. Available: <https://www.br.de/nachrichten/wissen/frische-luft-im-klassenzimmer-was-sind-co2-ampeln,S9ysgT9>.
- [18] A. Thiel-Sonnen, "CO2-Messgeräte als Corona-Vorsorge an Schulen - und viel lüften," *SWR*, 2020. [Online]. Available: <https://www.swrfernsehen.de/marktcheck/co2-messgeraet-ampel-luftqualitaet-innenraeume-corona-100.html>.
- [19] M. Tafelmeyer, "Das Problem mit den Corona-Ampeln in Schulen," *B90 Die Grünen Rosstal*, 2020. [Online]. Available: <https://www.gruenerosstal.de/das-problem-mit-den-corona-ampeln-in-schulen/>.
- [20] N. M. (NMP) im DIN, L. und S. (NALS) im D. I. N. und V. D. I. N. B. (NABau) im D. I. N. Normenausschuss Akustik, and ©, "DIN EN ISO 3382-3:2012-05 Nationales," 2012.
- [21] DIN ISO 16000-18, *Innenraumluftverunreinigungen – Teil 18: Nachweis und Zählung von Schimmelpilzen –Probenahme durch Impaktion*. Germany, 2012.

- [22] D. Norm, "Innenraumluftverunreinigungen - Teil 17: Nachweis und Zählung von Schimmelpilzen - Kultivierungsverfahren (ISO 16000-17:2008)," 2010.
- [23] U. Dessau, "Leitfaden zur Vorbeugung , Erfassung und Sanierung von Schimmelbefall in Gebäuden," 2016.
- [24] H. F. Wagner, "Welt der Physik - Strahlungsenergie der Sonne," 2017. [Online]. Available: <https://www.weltderphysik.de/gebiet/technik/energie/solarenergie/sonnenenergie/#:~:text=Die jahreszeitlich gemittelte Strahlung der,etwa 340 Watt pro Quadratmeter.> [Accessed: 09-Feb-2021].
- [25] Magistrat der Stadt Wien -- MA 23 -Wirtschaft Arbeit und Statistik, "No Title," *Heitere und trübe Tage, Feuchtigkeit Jänner 2018 bis Jänner 2020*. [Online]. Available: <https://www.wien.gv.at/statistik/lebensraum/tabellen/heitertrueb.html>. [Accessed: 29-Feb-2020].
- [26] DIN EN ISO 6946; Autor: DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau) ©, *Bauteile – Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren; DIN EN ISO 6946*. Deutschland, 2018.
- [27] WUFI, "No Title," *Willkommen bei WUFI. WUFI Hilfe*. [Online]. Available: https://wufi.de/download/WUFI41_Hilfe_d.pdf. [Accessed: 27-Jun-2020].
- [28] F. I. für B. I. WUFI, "No Title," *Was ist WUFI?* [Online]. Available: <https://wufi.de/de/software/was-ist-wufi/>. [Accessed: 27-Jun-2020].
- [29] D. K. S. Hauswirth, "Hinterlüftung bi Holzfassaden," *Holzbautag Biel*, Biel, 2010.
- [30] Passivhaus Institut GmbH, "Passipedia - Die Wissensdatenbank." [Online]. Available: <https://passipedia.de/planung/luftdichtheit/grundprinzipien>. [Accessed: 06-Jul-2020].
- [31] OIB, "NAT-T13, Excel-Tool zur Berechnung der Außentemperatur mit einer durchschnittlichen Überschreitungshäufigkeit von 13 Tagen," *Richtlinie 6*, 2009.
- [32] R. G. Steadman, "Norms of apparent temperature in Australia," *Aust. Met. Mag.* 43, pp. 1–16, 1994.
- [33] R. GmbH, "UHI Blackbox," 2020. [Online]. Available: https://rheologic.net/sites/default/files/pdf/feasibility_endbericht_AppID_24364901_2020062601.pdf. [Accessed: 09-Mar-2021].
- [34] "ÖNROM EN ISO 13786: Wärmetechnisches Verhalten von Bauteilen - Dynamisch-thermische Kenngrößen - Berechnungsverfahren (ISO13786:1999)," *Österreichisches Normungsinstitut*, Berlin, Mar-2018.
- [35] A. Korjenic *et al.*, "Hocheffiziente Fassaden- und Dachbegrünung mit Photovoltaik-Kombination." [Online]. Available: https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/sdz_pdf/schriftenreihe_2019-27-gruenplusschule.pdf. [Accessed: 09-Feb-2021].
- [36] M. M. Suhaimi *et al.*, "Effectiveness of Indoor Plant to Reduce CO₂ in Indoor Environment," *ISCEE 2016*, vol. 05004, pp. 1–9, 2017.
- [37] H. Sevik, M. Cetin, K. Guney, and N. Belkayali, "The influence of house plants on indoor CO₂," *Polish J. Environ. Stud.*, vol. 26, no. 4, pp. 1643–1651, 2017, doi: 10.15244/pjoes/68875.

- [38] ÖNORM B 8115-3, "Schallschutz und Raumakustik im Hochbau - Teil 3: Raumakustik." Austrian Standards Institute, 2005.
- [39] UdK Berlin, "Absorptionsgrad größer 1 - Blatt 1," 2005. [Online]. Available: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKEwjKhPTWpoPdAhXiHJoKHepZD14QFjAAegQIAhAC&url=http%3A%2F%2Fwww.sengpielaudio.com%2F%2FAbsorptionsgradGroesserEins.pdf&usg=AOvVaw1igOrY_hQqsRdYr2Z7lwJi. [Accessed: 09-Mar-2021].
- [40] T. Van Renterghem and D. Botteldooren, "Numerical evaluation of sound propagating over green roofs," *J. Sound Vib.*, vol. 317, no. 3–5, pp. 781–799, 2008, doi: 10.1016/j.jsv.2008.03.025.
- [41] M. T. Hoelscher, T. Nehls, B. Jänicke, and G. Wessolek, "Quantifying cooling effects of facade greening: Shading, transpiration and insulation," *Energy Build.*, vol. 114, pp. 283–290, 2016.

8.4 Abkürzungsverzeichnis

Abk.	Abkürzung
KBE	Koloniebildende Einheiten
TMW	Tagesmittelwert
MW	Mittelwert

9 Anhang

9.1 Datenblätter

MIXC LED-Pflanzenleuchte mit 24-Stunden-Zyklustimer

Ideal für die Sonneneinstrahlung von Zimmerpflanzen, Sukkulenten und Sämlingen. Besonders geeignet für den Einsatz im Winter, bei Nässe oder schwachem Licht. Wie funktioniert das LED-Pflanzenlicht?

Rote LEDs: 56 rote LEDs mit einer Wellenlänge von 630-680 nm. Dies ist für das frühe Leben einer Pflanze für die Keimung der Samen, das Wurzelwachstum und die Zwiebelentwicklung von entscheidender Bedeutung. Es bringt die Pflanze auch dazu, bessere Ergebnisse beim Blühen zu erzielen.

Gelbe LEDs: 28 rote LEDs mit einer Wellenlänge von 460 nm sind für Chlorophyll, für die Photosynthese am besten geeignet, um den Stiel und das Blatt zu fördern.

Hauptmerkmale:

- 1) LED-Pflanzenlicht mit 5 dimmbaren Modi: 20%, 40%, 60%, 80% und 100% Helligkeit.
- 2) LED-Pflanzenlicht mit Timing-Funktion: 2 Sätze Zykluszeit können je nach Bedarf eingestellt werden. Tägliches automatisches Ein- und Ausschalten.
- LED-Pflanzenleuchte mit Verlängerungskabeln: Mit drei Verlängerungskabeln können Sie den Abstand zwischen zwei Wachstumsleuchten auf 1,80 m (3,2 ft) verlängern.
- 4) LED-Pflanzenleuchte mit FÜNF Installationsmethoden: Dank MAGNETISCHER INSTALLATION und flexiblem Zubehör ist sie überall einfach zu verwenden.

Technische Daten:

LED Watt: Max 42W

LED-Chips: Rot: Gelb = 56: 28

Farbtemperatur:

Rot: 1168.000

Gelb: 3719k

Betrachtungswinkel: 120°

Lichtstrom: 556,17lm

Lebensdauer: 50000 stunden

Zertifizierung: FCC CE UL RoHS



Fünf Installationsmethoden



Kann an Orten direkt adsorbiert werden mit Eisen



Kleben Sie einen kleinen runden Magneten auf das Panel, um magnetische Verbindungen zu schaffen



Fügen Sie direkt in das glatte Bedienfeld ein mit Klebeband



Mit einem Kabelbinder am Regal befestigt



Kann direkt an das Holz genagelt werden Panel (Schrauben nicht enthalten)

Zeobon®-Substrate



Die Zeobon®-Substrate für die Innenraumbegrünung sind rein-mineralisch zusammengesetzt. Sie enthalten einen hohen Anteil an natürlichen Zeolithen, die in sehr hohem Maße und dauerhaft die Funktion der Nährstoffspeicherung übernehmen.

Ihr Vorteil: Zeolithe machen den Einsatz organischer Substanzen überflüssig. Denn Zeolithe sind natürliche Ionentauscher, also Minerale, die Stoffe aufnehmen und auch wieder abgeben können. Durch die besonders hohe Austauschkapazität erfüllen sie in den Zeobon®-Substraten eine ähnliche Funktion wie sie die Humus- Anteile und Ton-Mineralen in natürlichen Böden übernehmen.

Je höher die Speicherkapazität für Nährstoffe in einem Substrat ist, desto unanfälliger ist das Gesamtsystem „Innenbegrünung“ gegen unsachgemäße Düngung. Bei einer zu hohen Nährstoffversorgung können überschüssige Anteile vom Substrat aufgenommen werden, bei einer Unterversorgung kann das Substrat Nährstoffe nachliefern.

Zeobon®-Substrate weisen Eigenschaften auf, die im Wesentlichen auch nach Jahrzehnten noch erhalten sind. Dies führt zu kontinuierlichen und gleichen Bedingungen für ein Pflanzenwachstum und somit von Anfang an zu einer auf den Standort optimal angepassten Vegetation. Die Substrate können sowohl mit Erd- als auch Hydrokulturpflanzen verwendet werden.

Unsere Innenraumssubstrate Zeostrat® 2/8, Zeostrat® 0/8 und Zeoponic® 2/8 bestehen aus Lava, Bims und Zeolithen. Diese rein mineralischen Bestandteile sind nach DIN 4102 Teil 4 der Baustoffklasse A1 „nicht brennbare Baustoffe“ zuzuordnen, so dass durch das Substrat hohe Sicherheitsstandards erfüllt werden, da eine Brandgefahr nicht gegeben ist.

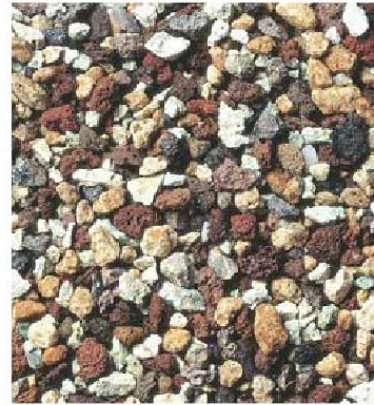
Universalität ist Trumpf: Alle Substrate sind sowohl lose (Kipper-LKW, Silo-LKW ausgeblasen) als auch abgepackt in BigBags oder 25 l-Säcken lieferbar.

Vorteile der Zeobon®-Substrate

- keine Zersetzung von Bestandteilen, Substrat-Parameter entsprechen jahrelang und stabil den Richtwerten
- sackungsfrei nach Einbau und dabei entstehender Verdichtung
- schadstoffarme Substrat-Bestandteile
- stetige Körnungslinie, hohe Entmischungsstabilität
- silikatisches Puffer-System, reguliert den pH-Wert
- hohe Ionen-Austauschkapazität, Substrat speichert Nährstoffe, auch nach Düngung nur geringe Nährstoffauswaschung
- artgerechte Vegetationsentwicklung, daher weniger Pflegeaufwand

Zeostrat® 2/8

Zeostrat® 2/8 ist ein rein-mineralisches Gemisch aus Lava, Bims und Zeolithen. Die offenporige Mischung hat eine ausgezeichnete Strukturstabilität. Hochwertige Zeolithe führen zu einem beträchtlichen Sorptions- und Pufferungsvermögen. Da die Mischung keine organischen Bestandteile enthält, treten keine Sackungen auf und das Material ist darüber hinaus nicht entflammbar. Außerdem sind Spülungen jederzeit problemlos möglich – ein wichtiger Faktor bei der Beseitigung von Verunreinigungen oder bei Düngefehlern in der Pflege. Durch den hohen Gehalt an Eisen- und Manganhaltigen Mineralen in der Lava ist eine ausreichende Versorgung mit diesen für die Pflanze lebensnotwendigen Nährstoffen sichergestellt.



Zeostrat® 0/8

Zeostrat® 0/8 ist wie Zeostrat® 2/8 zusammengesetzt, allerdings nicht gewaschen. Hierdurch erhöhen sich die kapillare Steighöhe und die Wasserspeicherung (ca. 25-30 Vol.-%). Zeostrat® 0/8 wird vor allem bei größeren Pflanzbeeten eingesetzt, wenn das Substrat pneumatisch per Silo-LKW eingebracht wird. Durch den Feinkornanteil ist dieses Material für Gefäßbepflanzungen nicht geeignet, wenn der Wasserstand mit herkömmlichen Wasserstandsanzeigern bestimmt wird. Bei vollständiger Wassersättigung beträgt der Luftporengehalt ca. 40 %, so dass eine ausreichende Sauerstoffversorgung im Wurzelbereich kontinuierlich gesichert ist.

Zeoponic® 2/8

Das Bims-Zeolith-Gemisch Zeoponic® 2/8 weist eine besonders hohe Wasserspeicherkapazität von ca. 40 Vol.-% auf. Diese reduziert den Giesaufwand. Der hohe Bims-Anteil führt zu einer ausgezeichneten Kapillarität. Ebenso wie bei den beiden Zeostrat-Varianten treten nach dem Einbau keine Sackungen auf. Zeoponic® 2/8 ist für alle Arten der Bepflanzung bei der Innenraumbegrünung geeignet.



Substrateigenschaften

	Zeostrat® 2/8	Zeostrat® 0/8	Zeoponic® 2/8
Bestandteile	Lava-Bims-Zeolith	Lava-Bims-Zeolith	Bims-Zeolith
abschlammbare Bestandteile	0,5 Gew.-%	7 Gew.-%	1,5 Gew.-%
Volumengewicht (verdichtet) trocken	ca. 0,92 g/cm ³	ca. 1,0 g/cm ³	ca. 0,70 g/cm ³
Volumengewicht (verdichtet) bei max. Wasserkapazität	ca. 1,13 g/cm ³	ca. 1,25 g/cm ³	ca. 1,10 g/cm ³
maximale Wasserkapazität	21 Vol.-%	27 Vol.-%	40 Vol.-%
Wasserdurchlässigkeit mod. Kf	0,71 cm/s	0,62 cm/s	0,68 cm/s
pH-Wert (CaCl ₂)	7,3	7,6	ca. 6,5
Salzgehalt	0,06 g/l	0,3 g/l	0,1 g/l
Gehalt an organischer Substanz	0,0 Gew.-%	0,0 Gew.-%	0,0 Gew.-%
Adsorptionskapazität	ca. 200 mmol eq/l	ca. 200 mmol eq/l	ca. 200 mmol eq/l

Zeobon GmbH · Linzer Straße 21 · D-53604 Bad Honnef

Tel.: +49 2224 918-316 · Fax: +49 2224 918-308 · E-Mail: info@zeobon.com

9.2 Data Management Plan (DMP)

9.2.1 Datenerstellung und Dokumentation

Während des Projekts wurden zwei Hauptdatentypen generiert: qualitative und quantitative Daten. Anhand dieser Daten wurden Grafiken und Tabellen erstellt.

Die erzeugten Daten liegen in verschiedenen Formaten und Größen von Datensätzen vor. Die erzeugten Dateien wurden entsprechend ihres Inhaltes (Datum, Ort, Gerät, ...) benannt und in leicht erkennbaren (beschrifteten) Ordnern und Unterordnern am Server des Forschungsbereichs Ökologische Bautechnologien abgelegt. Das Format /die Typen der Daten sind:

- 1) Die Datensätze der von RTR-Messgeräten gemessenen Temperaturen und rel. Feuchtigkeiten wurden im txt-Format gespeichert. Die Temperatur wird in Grad Celsius und die rel. Feuchtigkeit in Prozent gemessen. Jede txt-Datei enthält Messungen für einen Monat, das entspricht etwa 4400 Messungen.
- 2) Die vom Agilent Datenlogger gesammelten Werte (Lufttemperaturen, Oberflächentemperaturen, rel. Feuchtigkeiten, Wärmestromdaten, etc.) wurden als csv-Dateien abgespeichert und in xlsx-Dateien weiterbearbeitet.
- 3) Unter Verwendung der AirSensEUR-Geräte mit Temperatur-, Feuchte- und Drucksensoren sowie vier elektrochemischen Sensoren wird eine Reihe von csv-Dateien erzeugt. Die Daten wurden alle 10 Minuten geloggt, dies bedeutet, dass täglich etwa 144 Werte für jeden der Sensoren generiert wurden.
- 4) Während des Projekts wurden außerdem verschiedene Fotoserien angefertigt, dazu gehören Darstellungen des Aufbaus und der Entwicklung der Begrünung, der Messsysteme und der Arbeit mit SchülerInnen. Dies wird als Set mit etwa 200 Fotos im jpeg-Format gespeichert.

Die Daten der RTR-Messgeräte sowie der Agilent-Datenlogger werden regelmäßig vor Ort aus der Software ausgelesen, die Daten des AirSensEUR-Geräts, werden online aufgezeichnet, an InfluxDB gesendet und von Grafana Software ausgelesen und lokal gespeichert.

Im Falle dieses Projektes wurde entschieden, dass zusätzlich eine Readme-Datei erstellt werden soll. Die in dieser Datei aufgeführten und enthaltenen Informationen sind:

- Forschungskontext
- Erstellungsdatum der Messreihen
- Hinweise zur Datenerhebung/-erstellung
- mögliche weitere Hinweise.

9.2.2 Ethische und rechtliche Sicherheitsaspekte

Abgesehen von anonymisierten Umfragen werden Daten nicht direkt von Personen gewonnen. Aufgrund dessen können die erfassten Daten und Auswertungen ohne rechtliche Hindernisse in Berichten und Paper des Instituts publiziert werden.

Während des Projekts wurden auch Fotos erstellt, auf welchen SchülerInnen abgebildet sind. Diese Fotos wurden mit der Einverständniserklärung zur Veröffentlichung der Eltern sowie der LehrerInnen

gemacht. Die Einverständniserklärung beinhaltet Angaben, wo und wofür die Daten verwendet werden.

Alle im Rahmen dieses Projekts erzeugten Daten, einschließlich aller Fotos, Grafiken und Tabellen, die erstellt wurden, sind Eigentum des Forschungsbereichs Ökologische Bautechnologien der TU Wien und somit urheberrechtlich geschützt.

9.2.3 Datenspeicherung und -erhalt

Alle im Rahmen dieses Projekts erzeugten Daten werden langfristig am Server des Forschungsbereiches (inkl. Backup) gespeichert. Die Daten werden im Laufe des Projekts gespeichert und für mindestens 10 Jahre nach Projektende archiviert. Auf den Server des Forschungsbereichs haben alle ForscherInnen, die an diesem Projekt arbeiten, Zugriff. Alle Daten werden in entsprechenden Ordnern und Unterordnern am Server gespeichert und gemäß den vereinbarten Standards beschriftet.

9.2.4 Wiederverwendbarkeit der Daten

Da es sich bei diesem Projekt um die Weiterführung des 2015 gestarteten Projektes GrünPlusSchule handelt und auch auf den damals gesammelten Daten aufbaut, wird eine Veröffentlichung der erhobenen Daten für Dritte nicht angestrebt. Bei dem ursprünglichen Projekt handelte es sich um eine Direktförderung, ein Zugang für Dritte zu den generierten Daten war nicht Gegenstand der Vereinbarungen. Die Daten sind nicht für eine Veröffentlichung verarbeitet und stehen dem Institut nur für Forschungsprojekte zu Verfügung. Die Beschreibungen, Auswertungen, Schlussfolgerungen, Grafiken und Tabellen etc., die auf der Grundlage der Messwerte erstellt werden, werden im Rahmen von Publikationen, von Vorträgen und im Endbericht des Projektes veröffentlicht. Alle Daten werden auf dem Server des Forschungsbereichs ökologische Bautechnologien gespeichert. Auf gespeicherte Daten und Dokumente können autorisierte AutorInnen und NutzerInnen zugreifen und weitere Auswertungen durchführen.

Da die Daten Dritten nicht vollständig zugänglich gemacht werden, musste noch nicht der persistente Identifikator gewählt werden. Der am häufigsten verwendete Identifikator in wissenschaftlichen Forschungen wie dieser ist der DOI (Digital Object Identifier).

**Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)**

Radetzkystraße 2, 1030 Wien

[bmk.gv.at](https://www.bmk.gv.at)