

Hocheffiziente Fassaden- und Dachbegrünung mit Photovoltaik- Kombination

Optimale Lösung für die Energieeffizienz
in gesamtökologischer Betrachtung.
GrünPlusSchule@Ballungszentrum

A. Korjenic, D. Tudiwer,
M. S. Penaranda Moren,
J. Hollands, T. Salonen,
M. Mitterböck, U. Pitha,
I. Zluwa, R. Stangl, J. Kräftner,
K. Gump, G. Becker

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

27/2019

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

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

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

Auszugsweise 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/>

Hocheffiziente Fassaden- und Dachbegrünung mit Photovoltaik- Kombination

Optimale Lösung für die Energieeffizienz in gesamtökologischer Betrachtung.

GrünPlusSchule@Ballungszentrum

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Azra Korjenic, Mag. David Tudiwer,
Arch. Dr.techn. Maria Soledad Penaranda Moren,
Dipl.-Ing. Jutta Hollands, Tarja Salonen, Michael Mitterböck
Technische Universität Wien, Institut für Werkstofftechnologie,
Bauphysik und Bauökologie,

Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. Ulrike Pitha, Dipl.-Ing. Irene Zluwa,
Prof. Dipl.-Ing. Dr. Rosemarie Stangl
Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Ingenieurbiologie und
Landschaftsbau

Dipl. Ing. Joachim Kräftner, Dipl. Ing. Karola Gump
Kräftner Landschaftsarchitektur Ingenieurbüro für Landschaftsplanung
und -architektur e. U.

Dipl. Ing. Gernot Becker
ATB-Becker e. U.

Wien, November 2018

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie

Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm Stadt der Zukunft des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT). 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 BMVIT 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 Verkehr, Innovation und Technologie

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	9
Abstract	10
1. Ausgangslage/ Stand der Technik und Motivation sowie Zielsetzung für das Projekt	12
2. Projektinhalt	13
2.1. Planung und Baudokumentation der Begrünungsmaßnahmen.....	13
2.2. Untersuchte Räume und Begrünungsflächen	20
2.3. Methode zum Vergleich der unterschiedlichen Begrünungssysteme	21
2.4. Methode zur Ermittlung hygrothermischer Parameter	22
2.5. Methode zur Ermittlung der Schimmelsporenbelastung aufgrund von Innenraumbegrünung	23
2.6. Methode zur Untersuchung der Auswirkungen von Innenraumbegrünung auf die Staubkonzentration.....	24
2.6.1. Allgemeines	25
2.6.2. Messinstrument	26
2.7. Methode zur Untersuchung der Auswirkungen von Innenraumbegrünung auf die CO ₂ - Konzentration.....	26
2.7.1. Langzeituntersuchungen	27
2.7.2. Sommersversuch.....	27
2.8. Methode zur Ermittlung der akustischen Auswirkungen von Gebäudebegrünung.....	30
2.8.1. Nachhallzeit	30
2.8.2. Äquivalente Schallabsorptionsfläche	30
2.8.3. Schallabsorptionsgrad der grünen Wände.....	31
2.8.4. Messung der Nachhallzeit	31
2.9. Methode zur Ermittlung der thermischen Dämmeigenschaften von fassadengebundener Begrünung im Winter	32
2.9.1. Stand der Forschung.....	32
2.9.2. Wärmedurchgangskoeffizient einer Wand	33
2.9.3. Modellierung der Fassadenbegrünung	33
2.9.4. Messmethoden.....	34
2.9.5. Messgeräte.....	35
2.9.6. Datenanalyse	36
2.9.7. Berechnungsmethode	37

2.10.	Methode zur Ermittlung der Kühlleistung von Fassadenbegrünung	38
2.11.	Methode zur Untersuchung der Kombination von PV und Begrünung	38
2.11.1.	PV plus Grün-Fassade	39
2.11.2.	PV+Gründach.....	41
3.	Ergebnisse.....	42
3.1.	Beschreibung der Begrünungsvarianten und der Optimierungsmaßnahmen sowie Ergebnisse zur Arteneignung.....	42
3.1.1.	Vliessystem mit Umlaufpumpe (B1 + B2) im Eingangsbereich.....	42
3.1.2.	Vliessystem mit Zu- und Ablauf im Klassenraum	44
3.1.3.	Trogssystem im Biologiesaal (B4).....	45
3.1.4.	Topfpflanzen.....	46
3.1.5.	Pflanzbeete im Innenhof	47
3.1.6.	Trogssystem an der Außenfassade:	47
3.1.7.	Wandgebundenes Kassettensystem	50
3.1.8.	Extensives Gründach	51
3.1.9.	Übersicht über die Komplexität der Einzelkomponenten der unterschiedlichen Begrünungssysteme und Einschätzung des Wartungsaufwandes	52
3.2.	Ergebnisse hygrothermischer Parameter.....	54
3.3.	Schimmelsporenbelastung aufgrund von Innenraumbegrünung	56
3.3.1.	Messergebnisse	56
3.3.2.	Bewertung der Schimmelsporenmessungen	58
3.4.	Auswirkungen von Innenraumbegrünung auf die Staubkonzentration.....	60
3.5.	Auswirkungen von Innenraumbegrünung auf die CO ₂ -Konzentration	62
3.5.1.	Langzeituntersuchungen	62
3.5.2.	Sommerversuch.....	64
3.6.	Akustische Auswirkungen von Gebäudebegrünung.....	67
3.6.1.	Schallabsorption durch Grüne Wände	67
3.6.2.	Nachhallzeit	68
3.7.	Thermische Dämmung von Fassadenbegrünung im Winter	71
3.7.1.	U-Werte.....	71
3.7.2.	Thermographie	73
3.8.	Kühlleistung von Fassadenbegrünung.....	75
3.8.1.	Evapotranspiration	75
3.8.2.	Auswirkung auf die Außenoberfläche der Fassade	77
3.8.3.	Auswirkungen auf die Oberflächentemperatur der Wand im Innenraum.....	78

3.9.	Kombination von PV und Begrünung	79
3.9.1.	Konstruktion und Einschätzung der Wartungsfreundlichkeit für die Begrünungspflege 79	
3.9.2.	Einfluss auf die Betriebstemperaturen.....	84
3.9.3.	Einfluss des PV-Dachsystems auf die Substrat-Temperaturen.....	89
3.9.4.	PV-Grün-Fassade - Einfluss auf die Wandtemperaturen.....	90
3.9.5.	Ergebnisse zu den Erträgen der photovoltaischen Stromerzeugung	90
3.9.6.	Einfluss auf den PV-Ertragsunterschied (Fassade)	95
3.9.7.	Auswirkungen auf die Pflanzen	95
3.9.8.	Labormessung PV-Fassade	96
3.9.9.	Eigenverbrauchsabschätzung.....	97
3.10.	Integration in den Schulalltag und Wissensvermittlung an die Schüler und Schülerinnen 98	
3.11.	Ökonomische und ökologische Auswirkungen.....	102
3.11.1.	Ökonomische Auswirkungen.....	103
3.11.2.	Ökologische Auswirkungen	112
3.11.3.	Fazit der ökologischen und ökonomischen Bewertung	116
4.	Schlussfolgerungen.....	120
4.1.	Gewonnene Erkenntnisse.....	120
4.2.	Die nächsten Schritte für das Konsortium.....	121
4.3.	Zielgruppen: Nutzen und Sichtbarkeit.....	122
5.	Ausblick und Empfehlungen	124
6.	Verzeichnisse.....	125
6.1.	Abbildungsverzeichnis.....	125
6.2.	Tabellenverzeichnis	129
6.3.	Literaturverzeichnis.....	129

Kurzfassung

Im vorliegenden Projekt wurden multifunktionale Wand-, Fassaden- und Dachsysteme untersucht. Dafür wurde eine Schule in einem Altbaugebäude im urbanen Umfeld begrünt. An ausgewählten Wänden im Innenraum wurden vertikale Begrünungssysteme angebracht, an den Außenfassaden wurde Fassadenbegrünung und am Flachdach Dachbegrünung installiert. Die Fassaden- und Dachbegrünung wurde an ausgewählten Stellen mit semitransparenten Photovoltaikzellen kombiniert, um sowohl Synergien, als auch Hürden zwischen Begrünung und Photovoltaik zu erforschen. Die Installation der Begrünung erfolgte in einem partizipativen Prozess, gemeinsam mit SchülerInnen und LehrerInnen. Das Monitoring, die Pflege und Wartung sowie das Erforschen der Projektergebnisse wurde vom LehrerInnenteam in den Unterricht eingebaut.

Die installierten Begrünungssysteme wurden hinsichtlich ökologischer und ökonomischer Komponenten untersucht und analysiert. Dabei wurde jeweils der gesamte Lebenszyklus berücksichtigt und Empfehlungen für zukünftigen Forschungsbedarf herausgearbeitet.

Hinsichtlich der System(komponenten)eignung der unterschiedlichen Begrünungsformen für den Schulbetrieb wurden folgende Erkenntnisse gewonnen: Je dicker ein Vegetationsträger (je dicker die Substratstärke) ist, umso resilienter ist das System, da es nicht so schnell austrocknen kann und Temperaturschwankungen besser ausgeglichen werden. Horizontale Systeme haben eine homogenere Wasserverteilung als vertikal angebrachte Vegetationsträger, da die Schwerkraft weniger Auswirkungen hat. Die Zugänglichkeit der Begrünung sowie der Steuerung ist sehr wichtig: nur leicht erreichbare Stellen werden häufig gepflegt, und nur einfach einzusehende Steuerungen werden kontrolliert. Die Hemmung, eine Zeitschaltuhr einzustellen, ist geringer, als einen Bewässerungscomputer zu bedienen. Mechanische Zeitschaltuhren sind am leichtesten zu verstehen, sorgen jedoch für Verwirrung, wenn die Zeit nach einem Stromausfall verstellt ist (digitale Zeitschaltuhren haben im Gegensatz dazu einen Pufferspeicher, der die Einstellungen beibehält). Online überwachbare Anlagen können Fehlermeldungen versenden und sind übersichtlicher zu bedienen. Generell ist die Hemmschwelle in ein System einzugreifen umso höher, je technischer das System ist.

Geeignet zum Arbeiten mit Kindern sind vegetativ vermehrbare Pflanzengattungen wie: Grünstilbe, Bogenhanf, Efeu Tute, Baumfreund Dreimasterblume, Blutstängel.

Die Forschungsergebnisse haben gezeigt, dass die fassadengebundenen Begrünungssysteme den U-Wert einer nicht gedämmten Fassade reduzieren. Die Reduktion ist von den Hinterlüftungsöffnungen und von der Größe der Begrünungsfläche abhängig. An ungedämmten Gebäuden ist eine Verbesserung von ca. 20 % möglich. Die Innenraumbegrünung verbessert die hygrothermische Behaglichkeit. In dem hier untersuchten Fallbeispiel ist es im Winter um 73 % häufiger behaglich, wenn der Raum begrünt ist. Das liegt an der Erhöhung der Luftfeuchtigkeit im Raum. Es konnte festgestellt werden, dass trotz erhöhter Luftfeuchtigkeit die Konzentration von Schimmelsporen gegenüber nicht begrünter Räume und der Außenluft nicht erhöht wird. Die Staubkonzentration wurde hinsichtlich der Feinstaubgrößen PM_{10} , $PM_{2,5}$, PM_4 , PM_{10} untersucht. In begrünter Räumen ist die Konzentration geringer, als in nicht begrünter Räumen. Je nach Partikelgröße variiert die Differenz. Die CO_2 -Konzentration nimmt aufgrund der Pflanzen während der Tageszeit ab, da Pflanzen Photosynthese betreiben. Die Abnahme der CO_2 -Konzentration ist allerdings so gering, dass sie im laufenden Schulbetrieb keine relevanten Auswirkungen hat. Die angebrachte Begrünung

erhöhte die äquivalenten Schallabsorptionsflächen. In weiterer Folge reduziert das die Nachhallzeit. Je nach Begrünungssystem und Schallfrequenz ist die Reduktion der Nachhallzeit unterschiedlich. Die Kombination von Photovoltaik und Begrünung führt zu einer geringen Modultemperatur an besonders heißen ertragreichen Tagen. Die geringere Modultemperatur erhöht wiederum den Wirkungsgrad der Module. Die größte Hürde an der Kombination von Photovoltaik und Begrünung ist die Wartung des Begrünungssystems. Mittels Zu- und Abflussmessungen könnte die Verdampfungsenergie von Fassadenbegrünung an heißen Sommertagen bestimmt werden. Sie beträgt an besonders heißen Tagen südseitig bis zu 2 kWh/m² Grünfläche und Tag.

Abstract

In this project multifunctional façade - and roof constructions were investigated. Therefore, an old school building in an urban surrounding was greened. The building is made out of solid bricks. It was greened on selected parts of the façade and the roof. On some of the greened building parts, also photovoltaic systems were installed. The greening happened in a participatory process together with pupils and teachers. Also the monitoring, the researching and the maintenance were integrated into lessons by the teachers.

The greening systems were investigated concerning their ecological and economical features. The whole life cycle was considered for the investigations. In addition, the suitability of the different components from the greening systems was studied.

The project team found out that the thickness of the vegetation-support affects the resilience of the system. The thicker the vegetation support is, the more resilient is the system. Water shortage and extreme temperatures can be buffered better. Horizontal systems have a more homogeneous distribution of water because gravity has less impact than at vertical systems. The accessibility of the greening and its control units is important. The higher the accessibility, the more often the systems are maintained. It is important that the controlling systems are as simple as possible. The inhibitions to install a timer are lower than to program an irrigation system. Mechanical timers are the most easy to install. Online systems can send error messages and improve the reaction time of emergency maintenance activities. In general, the inhibition level to intervene into the system is higher, the more complex the technical system is. Suitable plants to work together with children are vegetative plant genera and species, such as: spider plant, bowstring hemp, ivy tute, philodendron, Virginia spiderwort and *ludisia discolor*.

Within this project it was found out, that the measured U-value is reduced because of the façade greening. The reduction depends on the ventilation openings and the size of the greening area. On uninsulated buildings an improvement of about 20% is possible. The indoor greening increases the hydrothermal comfortability. In the investigated greened classroom, the hydrothermal conditions were comfortable 73 % more often than in the not greened classroom during the winter because of the increased air humidity. Even though the air humidity was increased, there was no increase of mould spores. In the greened classroom the concentration of the mould spores was below or at the same level of other classrooms or the air outside. The concentration of dust was investigated for the sizes PM₁, PM_{2,5}, PM₄ and PM₁₀. In the greened rooms the concentration of the dust was below the concentration of the not greened rooms. This is true for all the investigated sizes. The CO₂ concentration in the rooms is reduced because of the indoor greening. The reduction is small and has

no relevant effect during the lessons in school. The greening systems increase the sound absorption coefficient of the rooms, which reduces the reverberation time. The reduction of the reverberation time depends on the type of the greening system. The combination of photovoltaics and greening leads to lower temperatures of the photovoltaic modules during hot days. The lower temperature of the modules increase the efficiency of photovoltaic. The biggest obstacle of this technology is the maintenance of the greening system. By measuring inlet and outlet of the amount of water the energy of evapotranspiration was calculated. On hot summer days a greened façade is able to cool its surrounding by up to 2 kWh/m² and day.

1. Ausgangslage/ Stand der Technik und Motivation sowie Zielsetzung für das Projekt

Die weltweiten Prognosen zeigen, dass im Jahr 2050 zwei Drittel aller Menschen in Städten leben werden [1]. Dies führt zwangsläufig zu dichterem Bauweise und somit zur Reduktion grüner Flächen in der Stadt. Das Ersetzen grüner Flächen durch Gebäude führt zur Zunahme der Bevölkerungsdichte, mehr Verkehr und mehr anthropogenen Emissionen. Nicht nur die Emissionen von Wärme, Treibhausgasen und Staub, sondern auch die Lärmemissionen nehmen zu. Zusätzlich führen die versiegelten Flächen zu einer Erwärmung der Stadt und verhindern das Auskühlen während der Nächte. Die Anzahl der Hitzetoten steigt an [2][3][4][5][6]. Es werden mehr Klimaanlage installiert, die jedoch nur bestimmte Bereiche kühlen und die Umgebung zusätzlich aufheizen. Der Strombedarf der Klimaanlage reduziert verfügbare Ressourcen und bestärkt den Treibhauseffekt.

Die Technologieentwicklung für die Gebäudeoptimierung bzw. Gebäudemodernisierung, die im Zuge dieses Projektes untersucht wurde, soll genau diesen Hürden der Stadt der Zukunft entgegenwirken. Schon zu Beginn des Projektes war bekannt, dass Gebäudebegrünung das Mikroklima an heißen Tagen kühlt, die Staubbelastung reduziert, schallabsorbierend wirkt und die Luftqualität erhöht [7]. Diese positiven Auswirkungen wurden jedoch zum damaligen Zeitpunkt weitgehend nicht quantitativ erfasst.

Schulen haben besonders hohe Anforderungen an das Raumklima. SchülerInnen und LehrerInnen verbringen viel Zeit in den Räumen. Es befinden sich viele Personen auf engem Raum und alle sollen die Möglichkeit haben, konzentriert zu arbeiten und zu lernen. Dabei ist die CO₂-Konzentration, die Luftfeuchtigkeit, die Temperatur, die Akustik und die Staubkonzentration zu berücksichtigen. Die CO₂-Konzentration in Klassenräumen steigt bei geschlossenen Fenstern schnell an, geöffnete Fenster verringern (insbesondere im Winter) die Luftfeuchtigkeit und reduzieren somit die 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 Gegenmaßnahmen erforscht werden müssen.

Urbane nachhaltige Stromerzeugung spart Ressourcen, verringert die Auswirkungen auf den Treibhauseffekt und entlastet das Stromnetz, weil der Strom dort produziert wird, wo er auch verbraucht wird. Grünflächen benötigen Gebäudehüllen, da die Verdichtung der Stadt keine weiteren Grünflächen und Parks zulässt. Die Stromerzeugung mittels Photovoltaik ist im urbanen Umfeld ebenfalls auf die Fläche der Gebäude angewiesen. Bisher stellt das eine Konkurrenz der beiden Technologien dar, die beide Platz in der Stadt der Zukunft finden müssen. Im Zuge dieses Projektes wurden deshalb innovative Möglichkeiten untersucht, diese beiden Technologien zu kombinieren. Die Herausforderung ist, die Dach- und Fassadenflächen doppelt nutzen zu können; für die Stromerzeugung mittels Photovoltaik und die Begrünung, um den oben genannten Hürden der Verdichtung entgegenzuwirken. Photovoltaikzellen weisen bei höheren Temperaturen geringere Wirkungsgrade auf. Der Reduktion des Wirkungsgrades der Zellen an heißen Sommertagen kann die Kühlwirkung der Pflanzen entgegenwirken, da die Verdampfungsenthalpie temperaturabhängig ist und mit höheren Temperaturen zunimmt.

Die untersuchten Begrünungsmaßnahmen benötigen (sowohl mit, als auch ohne PV) Wartungsarbeiten, Bewässerung und Belichtung in Innenräumen. Bisher wurde nicht erforscht, wie hoch der Wartungsaufwand oder der Wasser- und Strombedarf dieser Technologien zu bemessen sind. Im Zuge dieses Projektes wurden die Kosten, der Ressourcenbedarf und der Wartungsaufwand für die Herstellung, Installation, die Betriebsphase und die Entsorgung erforscht. So war es erstmals möglich, ökonomische und ökologische Bewertungen (in ersten Ansätzen, die es zu erweitern gilt) für den gesamten Lebenszyklus der Technologien zu erstellen. Es wurden Empfehlungen für HerstellerInnen und NutzerInnen ausgearbeitet, um eine Weiterentwicklung der Begrünungssysteme zu injizieren.

Die Verträglichkeit der neuen Technologien im Schulbetrieb wurde detailliert untersucht. Es wurden Hürden aufgezeigt und Empfehlungen ausgearbeitet, wie die Technologien möglichst nutzerInnengerecht installiert werden können.

2. Projektinhalt

2.1. Planung und Baudokumentation der Begrünungsmaßnahmen

Die Planung und Baudokumentation der Begrünungsmaßnahmen sowie die Installation der Photovoltaikmodule werden in diesem Kapitel dargestellt. Das Gebäude wurde mehrmals mit unterschiedlichen ExpertInnen gesichtet, um die potenziellen Versuchsflächen zu eruieren. Dabei wurden auf die Himmelsrichtung, die Nutzerfreundlichkeit und die Durchführbarkeit Rücksicht genommen.

Das Konsortium ist wie folgt vorgegangen:

- Ermittlung der optimalen Begrünungsflächen (siehe
- *Abbildung 1*). Nach mehrmaligen Besichtigungen, gemeinsam mit Herstellerfirmen und ExperInnen, wurden detaillierte Pläne für die Begrünung erstellt.
- Verhandlungen mit DritteisterInnen, HerstellerInnen, Budgetierung und Produktauswahl, der Begrünungseinheiten.
- Planung und Kalibrierung der Messtechnik (TU Wien)
- Installation und Inbetriebnahme der Messtechnik (Erfassung des Istzustandes)
- Klärung der brandschutztechnischen Anforderungen. Die brandschutztechnischen Anforderungen wurden von Leiterin der Kompetenzstelle Brandschutz – MA 37, Stadt Wien, nach gemeinsamer Sichtung der Schule festgelegt.
- Die Baubewilligung wurde von MA37 erteilt. Die Baubeginnanzeige wurde eingereicht.
- Installation des Vliessystemes im Klassenraum inkl. Pflanz en (siehe
- *Abbildung 2*)
- Installaton des Trogsystems und Einsetzen erster Pflanzen im Biologieraum (siehe *Abbildung 3*).

- Fertigstellung der Baumaßnahmen an der Fassade –Trog- und Kassettensystem (siehe Abbildung 4).
- Workshop mit SchülerInnen zum Einsetzen weiterer Pflanzen im Biologieraum (siehe Abbildung 5).
- Fertigstellung der Dachbegrünung inkl. Photovoltaik (siehe Abbildung 6 und Abbildung 7).
- Fertigstellungsanzeige
- Optimierung der Systeme und der Messtechnik



Abbildung 1: Ermittlung der optimalen Begrünungsflächen und des richtigen Platzes für Photovoltaik (siehe rechten Teil des Bildes)



Abbildung 2: Installation des Vliessystems. Die Kunststoffplatten wurden fertig geliefert (Rechts) und mittels Schienen an die Wand gehängt (Mitte). Das Fertige System ist rechts ersichtlich.



Abbildung 3: Einsetzen und testen der ersten Pflanzen im Trogsystem (Biologieraum)



Abbildung 4: Installation der Schienensysteme (Oben-Links), der Sensoren (Oben-Rechts), der Tröge und Kassetten (Unten-Links, Unten-Mitte), die fertigen Begrünungssysteme mit jungen, kleinen Pflanzen (Unten-Rechts).



Abbildung 5: Gemeinsam mit SchülerInnen wurden die Pflanzen im Trogsystem eingesetzt.





Abbildung 6: Drainageelemente mit Filtervlies und Einblasen des Dachbegrünungssubstrates.



Abbildung 7: Letzte Arbeiten an der Unterkonstruktion für die Photovoltaik-Aufdachanlage.

2.2. Untersuchte Räume und Begrünungsflächen

Im Eingangsbereich, auch als Aula bezeichnet, wurden zwei Begrünungssysteme mit Vliessystem und einer Wassertanklösung installiert. Es gibt hier keinen Abfluss, das Wasser wird aus dem Wassertank nach oben gepumpt und versorgt so die Pflanzen mit Nährstoffen und Feuchtigkeit. Beide begrünten Flächen haben in Summe ca. 8 m² (siehe auch Tabelle 1). Es gibt außerdem eine Mooswand mit totem Moos. Dieses hat eine Fläche von ca. 4,2 m².

In einer Klasse im 3. Stock (nordseitig ausgerichtet) wurde ebenfalls ein Vliessystem angebracht. Die Klasse ist ca. 8,5 m lang und ca. 6,5 m breit und hat eine Fläche von ca. 55 m². Sie ist ca. 3,7 m hoch und weist somit ein Volumen von ca. 202 m³ auf. Das hier installierte Begrünungssystem hat eine Fläche von ca. 6,5 m² (siehe auch Tabelle 1).

Im Biologieraum im 2. Stock (westseitig ausgerichtet) wurde ein Trogssystem installiert. Der Raum ist ca. 10,4 m lang und ca. 6,9 m breit und hat eine Fläche von ca. 72 m². Er ist ca. 3,6 m hoch und hat somit ein Volumen von ca. 261 m³. Das hier installierte Trogssystem hat eine Fläche von ca. 17 m² (siehe auch Tabelle 1).

Die begrünten Klassenräume wurden mit einer nicht begrünten Klasse verglichen. Sie wird im Folgenden auch als Referenzklasse bezeichnet. Als Referenzklasse wurde eine Nachbarklasse gewählt, welche die gleichen Abmessungen, Anzahl der SchülerInnen, Orientierung etc. aufweist.

An der Außenfassade, Richtung Sportplatz wurden das Kassettensystem und das Trogssystem installiert. Sie sind beide südseitig orientiert. Das Kassettensystem hat eine Fläche von 14,4 m² und das Trogssystem hat eine Fläche von 58 m² (siehe auch Tabelle 1).

Auf der Mauer zum angrenzenden Gebäude wurden Pflanztröge aufgestellt.

An der Außenfassade, Richtung Turnsaaldach wurde das Kassettensystem in Kombination mit Photovoltaik installiert. Es hat eine Fläche von 3,6 m² (siehe auch Tabelle 1).

Am Turnsaaldach wurde eine panonische, extensive Dachbegrünung (D) mit Substratstärken von 5-20 cm installiert. Die Dachbegrünungsfläche beträgt insgesamt ca. 184 m² wobei ca. 66 m² davon mit PV überdacht sind.

Die neu installierten Begrünungsflächen wurden mit Pflanzflächen aus dem Bestand des GRG7 (Topfpflanzen (T), Beetflächen (B) und einem Holzgerüst mit Kletterpflanzen (B7)) verglichen.

Tabelle 1: Flächengröße der Begrünungssysteme und der installierten PV-Module

	Größe der begrünten Fläche in m ²	Größe der PV in m ²
Vliessystem Eingang	8	-
Vliessystem Klasse	6.5	-
Trogssystem Klasse	17	-
Mooswand	4.2	-
Kassettensystem außen	14.4	-
Trogssystem außen	58	-
Kassettensystem + PV	3.6	5.13
Dachbegrünung	183.52	-
Dachbegrünung + PV	66.48	15.4

2.3. Methode zum Vergleich der unterschiedlichen Begrünungssysteme

Ermittlung des Deckungsgrades:

Der Deckungsgrad beschreibt die Projektion aller oberirdischen lebenden Pflanzenteile auf den Boden [8]. Im Falle der vorliegenden Untersuchungen der Vertikalbegrünungen wird der Deckungsgrad nicht auf den Boden, sondern auf die vertikale Fläche (z. B. Fassade oder Wand) bezogen.

Im Innenraum wurde der Deckungsgrad mittels photographischer Aufnahme und Zählung der Bildpunkte durchgeführt [9]. Der Deckungsgrad auf dem Dach wurde auf 10% genau geschätzt. Der Deckungsgrad der vertikalen Außenbegrünung wurde aufgrund verzerrter Sichtwinkel nicht dokumentiert.

Erhebung der Arteneignung:

Der Gesundheitszustand der Pflanzen wurde im Innenraum monatlich mit einem Boniturprotokoll aufgenommen. An den Fassaden im Außenraum wurde einmal jährlich eine genaue Aufnahme (gemeinsam mit der Pfl egetätigkeit) durchgeführt [9]. Auf dem Dach wurde die Frequenz der Einzelarten mit dem Frequenzrahmen (4-mal im Versuchszeitraum) aufgenommen. Zusätzlich wurden Beobachtungen im Bedarfsfall schriftlich und fotografisch festgehalten. Nach drei Vegetationsperioden konnten aus diesen Daten Ergebnisse zur Eignung einzelner Arten in den unterschiedlichen Begrünungssystemen abgeleitet werden.

Dokumentation des Wartungsaufwandes:

Schritte der Wartung, technische Probleme mit Komponenten der Systeme sowie Schäden und Ausfälle wurden in einem Excel-Protokoll dokumentiert.

Befragung des Schulpersonals:

Zusätzlich zu den Protokollen wurde während des gesamten Projektzeitraumes enger Kontakt mit den SchulwartInnen und LehrerInnen gehalten, um Akzeptanz und Schwierigkeiten im Umgang mit den Systemen zu erfassen.

Beurteilung der Benutzerfreundlichkeit (Komplexität) und Erstellung einer Systemkomponentenübersicht:

Aus den gesammelten Ergebnissen wurde eine Matrix erstellt, aus welcher die Komplexität der einzelnen Systemkomponenten (Vegetationsträger, Bewässerung, Düngung, Beleuchtung, Steuerung und Zugänglichkeit) entnommen werden kann.

Systemoptimierung und Anpassung: Die Komponenten der Begrünungssysteme wurden laufend nach den neuesten im Projekt gewonnenen Erkenntnissen angepasst, um optimale, dem Schulstandort angepasste Begrünungslösungen zu finden.

2.4. Methode zur Ermittlung hygrothermischer Parameter

Die wesentlichsten Parameter, die das hygrothermische Raumklima beschreiben, sind Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit. In der begrüneten Klasse, dem Biologieraum und der Referenzklasse wurden die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit zeitgleich alle 5-10 Minuten über die ganze Projektlaufzeit gemessen. Dafür wurden Lin Picco A05 sowie RTR 53 A - Datenlogger verwendet (siehe Abbildung 8).

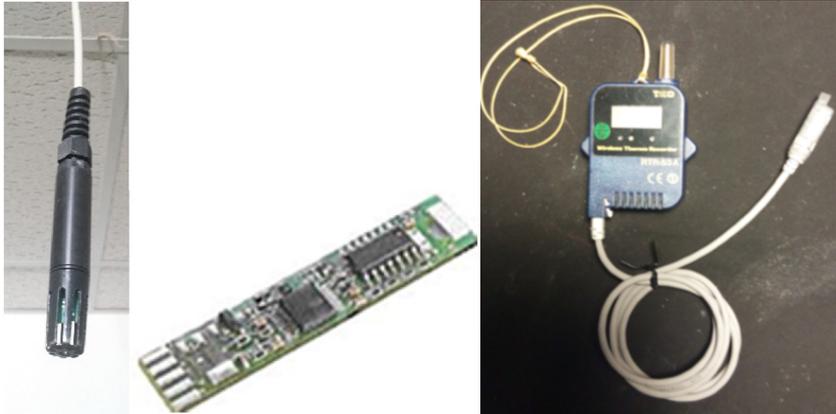


Abbildung 8: Links: Lin Picco A05; Links: mit Schutzhülle. Mitte: ohne Schutzhülle. Rechts: 53 A - Datenlogger

Die Literatur bietet zahlreiche Publikationen, in denen Untersuchungen bezüglich hygrothermischen Behaglichkeit bzw. der Bewertung dieser angestellt wurden [10][11][12][13][14][15][16][17][18][19][20]. W. Frank erläutert in "Raumklima und Thermische Behaglichkeit" ein Behaglichkeitsdiagramm, das für die folgenden Bewertungen verwendet wurde [20]. Abbildung 9 zeigt die hygrothermischen Bereiche, die für die untersuchten Klassenräume als behaglich (innerhalb des roten Bereichs), noch behaglich (innerhalb des grünen Bereichs, aber außerhalb des roten Bereichs) und nicht behaglich (außerhalb des grünen Bereichs) eingestuft werden.

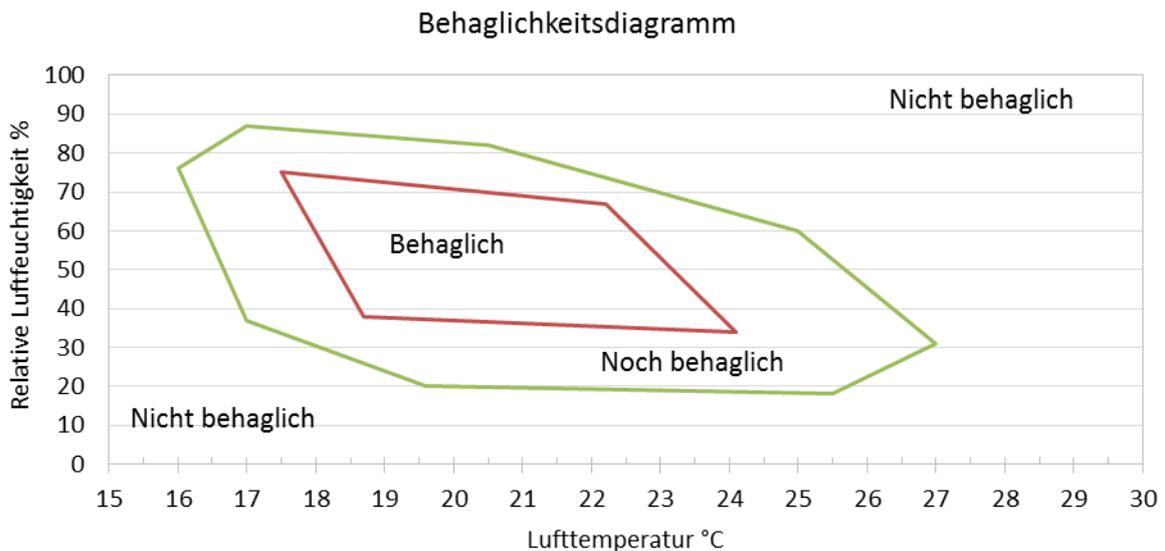


Abbildung 9: Behaglichkeitsdiagramm zur Bewertung der hygrothermischen Behaglichkeit [20]

2.5. Methode zur Ermittlung der Schimmelsporenbelastung aufgrund von Innenraumbegrünung

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde die Firma IBO Innenraumanalytik OG beauftragt, mehrere Schimmelsporenmessungen durchzuführen. Frau DI C. Schmöger hat die Messungen geleitet.

Die Raumluft in der begrünten Klasse, dem begrünten Biologieraum und der Referenzklassen ohne Begrünung wurde auf kultivierbare, vitale Schimmelpilzsporen untersucht. Vor den Probenahmen wurden die untersuchten Räume mindestens acht Stunden verschlossen und nicht gelüftet. Die Probenahmen zur Untersuchung auf Schimmelpilzsporen erfolgte gemäß ÖNORM ISO 16000-18 [21] jeweils in der Raummitte. Als Referenzwert wurden im Schulhof und vor dem Schuleingang Untersuchungen der Außenluft durchgeführt. Die Positionen der Messstellen sind auf den Fotos von Abbildung 10 dargestellt.



Luftkeim-Messstelle Raum 318 (begrünt)



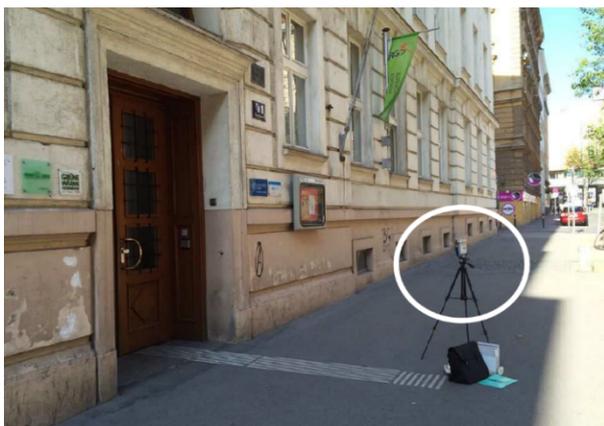
Luftkeim-Messstelle Raum 209 (begrünt)



Luftkeim-Messstelle Raum 319 (Referenz)



Referenzmessstelle für Raum 209



Referenzmessstelle für Räume 318 und 319

Abbildung 10: Schimmelsporenmessung im GRG7.

2.6. Methode zur Untersuchung der Auswirkungen von Innenraumbegrünung auf die Staubkonzentration

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde auch die Auswirkung von Innenraumbegrünung auf die Staubkonzentration in Innenräumen untersucht. Dafür wurde die Staubkonzentration in den begrünten Klassen und den Referenzklassen gemessen. Die Messungen erfolgten über einen längeren Zeitraum mit stabilen Wetterbedingungen.

2.6.1. Allgemeines

Über den Zusammenhang des Grob- und Feinstaubes in Innenräumen und außerhalb von Gebäuden lässt sich allgemein sagen: Die jeweiligen Fraktionen in Innenräumen unterscheiden sich wesentlich von den äquivalenten Fraktionen außerhalb von Gebäuden bezüglich der Stoffzusammensetzung. Außerdem findet ein kontinuierlicher Stoffaustausch zwischen der Innenluft und der Außenluft statt, wobei im Wesentlichen kleinere Teilchen eher und schneller ausgetauscht werden, als größere Teilchen.

In den 1990er Jahren gab es Anstrengungen, den Anteil der PM_{2,5}- und PM₁₀-Konzentrationen aus der Außenluft in der Innenluft analytisch darzustellen. Dazu wurde Formel 1 entwickelt [22]:

$$\frac{C_{in}}{C_{out}} = \frac{P \cdot a}{a + k}$$

C_{in} - Partikelkonzentration innen in µg/m³

C_{out} - Partikelkonzentration außen in µg/m³

P - Penetrationsfaktor (mit 0 ≤ P ≤ 1)

a - Luftwechselzahl in 1/h

k - Depositionsrate in 1/h

Formel 1: Verhältnis zwischen der Partikelkonzentration innen und außen in Abhängigkeit vom Penetrationsfaktor, der Luftwechselzahl und der Depositionsrate [22].

Der Penetrationsfaktor P ist ein Maß für die Fähigkeit eines Gases oder eines Partikels, die Gebäudehülle zu durchdringen. Er liegt im Bereich 0 ≤ P ≤ 1. Für ein nichtreaktives Gas, wie etwa CO, ist der zu erwartende Faktor 1. Die Studie [23] ermittelte den Wert für P für verschiedene Partikelfraktionen. Das Ergebnis lag bei einem Wert P ≈ 1, sowohl für die Fraktion PM_{2,5} als auch für PM₁₀.

Die Depositionsrate k hängt von vielen Faktoren, wie etwa der Turbulenz, Größe, Form, elektrostatische Ladung und Dichte der Partikel ab. Für größere Partikel bestimmt die Absetzung durch Gravitation die Depositionsrate. Für kleinere Partikel kann die Absetzung an vertikalen Oberflächen durch Diffusion auch wichtig sein. Die Depositionsraten von kleinen Partikeln sind nicht im Detail erforscht. Typischerweise muss mit geeigneten Methoden über lange Zeiträume (Wochen und Monate) gemessen werden, um genug Partikel für eine Analyse zu ermitteln [22]. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass Depositionsraten von 0,3-0,5 /h ermittelt wurden.

Die wichtigsten Quellen für Grob- und Feinstaub in Schulklassen sind Staubeinträge über Schuhe und Kleidung, Partikelfreisetzung von Haut und Haaren sowie das Arbeiten im Werkunterricht [24]. Diese Quellen emittieren meist grobkörnigere Fraktionen wie PM₁₀ und PM₄ und weniger feinkörnige Fraktionen. Feinkörnigere Fraktionen kommen fast ausschließlich von der Außenluft. Von entscheidender Bedeutung für die Staubkonzentration sind die Geometrie des Raumes, Oberflächenbeschaffenheit, Möblierung und Gebäudebeschaffenheit. Für die detaillierten Untersuchungen wurden hier zwei Klassenräume gewählt, die diesbezüglich annähernd gleiche Bedingungen aufweisen (siehe Kapitel 2.2).

Eine Senke oder ein Speicher für Grob- und Feinstaub sind die Oberflächen der Pflanzen. Vor allem die Blätter können Staub absorbieren. Sie bieten viel Oberfläche. Da im Gegensatz zur Außenluft

Teilchen im Innenraum nur begrenzt an Wasser agglomerieren können (leicht schwankende Luftfeuchtigkeit), fällt als Senke die mögliche Auswaschung der Teilchen aus der Luft weg.

Weitere Quellen und Senken sind die Diffusion von Teilchen durch Bauteile wie Fenster und Türen in die Umgebung (Außenluft oder andere Innenräume).

Speicher, im Sinne von temporärer Ablagerung des Staubes auf Oberflächen, stellen der Fußboden sowie Tische und Stühle im Raum dar. In vorliegender Untersuchung sind diese Oberflächen hinreichend glatt. Somit wird nach einer Staubablagerung diese durch vorbeiströmende Luft wieder aufgewirbelt. Dies wirkt sich auf kleinere Fraktionen aus, die teilweise über Wochen in Schwebelage bleiben [25].

2.6.2. Messinstrument

Für die Messung der angeführten Fraktionen wurde folgendes Messgerät verwendet: Ein Palas Fidas[®] 200 (in der Folge kurz OPC genannt), mit dem die Fraktionen PM₁₀, PM₄, PM_{2,5} und PM₁ gemessen wurden. Ein Foto der Messeinrichtung wird in Abbildung 11 dargestellt. Diese ermöglicht die kontinuierliche und gleichzeitige Erfassung von PM₁, PM_{2,5}, PM₄, PM₁₀, TSP, den Alveolen gängigen, thorakalen und einatembaren Massefraktionen nach DIN EN 481 [26]. Zusätzlich wird die Partikelanzahlkonzentration sowie die Partikelgrößenverteilung in 32 Größenklassen pro Dekade im Partikelgrößenbereich von 180 nm – 18 µm erfasst.



Abbildung 11: Aufbau Messinstrumente: Links Fidas[®] 200, rechts Kondensationspartikelzähler

Um kleinere Fraktionen erfassen zu können, wurde zusätzlich ein Kondensationspartikelzähler (Modell 3781 WCPC der Firma TSI GmbH) verwendet (in Folge kurz CPC). Dieser ist in der Lage, Partikelkonzentrationen von Partikelgrößen > 6 nm auch in kürzeren Intervallen (Sekundenbereich) zu erfassen und ist daher essentiell für die Kontrolle der Diffusion der Außenluft in den Innenraum.

2.7. Methode zur Untersuchung der Auswirkungen von Innenraumbegrünung auf die CO₂-Konzentration

Es gab zwei Untersuchungsreihen in der begrünten Klasse und der Referenzklasse: Den Sommerversuch und die Langzeitmessung.

2.7.1. Langzeituntersuchungen

Im Biologieraum, der begrünten Klasse und der Referenzklasse wurde vor und nach Einbringen der Innenraumbegrünung (während des gesamten Projektzeitraumes) die CO₂-Konzentration bis 2.000 ppm gemessen. In allen Klassenräumen wurde zeitgleich gemessen. Basierend auf den Langzeituntersuchungen wurde die CO₂-Konzentration in beiden Räumen verglichen. Während des laufenden Betriebs der Schulräume hängt die CO₂-Konzentration von vielen Faktoren ab. Diese sind z.B.:

- Körperliche Aktivitäten der SchülerInnen
- Geöffnete Fenster
- Geöffnete Türe zum Gang (die CO₂-Konzentration am Gang war ebenfalls nicht konstant)
- Wetterverhältnisse

Unterschiedliche CO₂-Konzentrationen im laufenden Betrieb sind deshalb nicht zwangsläufig auf die Begrünung zurückzuführen. Um die begrünte Klasse mit der Referenzklasse zu vergleichen, wurde ein Sommerversuch durchgeführt, der im folgenden Kapitel beschrieben wird.

2.7.2. Sommerversuch

Bei dieser Untersuchung wurde während den Sommerferien in der leerstehenden Schule gezielt CO₂ in die Klassenräume eingebracht und der Abfall der CO₂-Konzentration gemessen und analysiert. Um den Vergleich zu ermöglichen, wurden beide Klassen möglichst gut abgedichtet, um Luftwechsel mit der Umgebungs- und Außenluft zu vermeiden. Beim Abdichten wurde darauf geachtet, dass beide Klassen die gleiche Dichtheit (siehe n₅₀-Wert Formel 2) aufweisen. Gezielt wurde CO₂ in die Klassenräume eingebracht und der Abfall der CO₂-Konzentration auf das Umgebungsniveau miteinander verglichen (siehe Abbildung 14).

Mittels Blower Door-Test wurde die Dichtheit der Räume solange gemessen und miteinander verglichen, bis eine gleiche Dichtheit gemessen wurde. Bei einer Blower Door-Messung wird ein Ventilator im Türstock des zu prüfenden Raumes eingebracht (siehe Abbildung 12). Er erzeugt und hält einen konstanten Über- oder Unterdruck von 50 Pascal. Der durch den Ventilator verursachte Luftstrom wird gemessen. Er entspricht bei konstanten Druckunterschied derselben Menge Luft, die durch Leckagen in den Raum aus-/eintritt. Mittels Rauch konnten zahlreiche Leckagen gefunden und abgedichtet werden (siehe Abbildung 13).



Abbildung 12: Ventilator des Blower Door-Tests im Türstock der begrünten Klasse.



Abbildung 13: Abgeklebte Fugen, Kanten und Öffnungen zur Umgebungs- und Außenluft.

Als Maß für die Luftdichtheit der Klassenräume wurde der n_{50} -Wert gemessen und berechnet. Dieser Wert errechnet sich aus dem Volumenstrom bei 50 Pascal Differenzdruck (V_{50}) bezogen auf das Gebäudeluftvolumen (V), siehe Formel 2.

$$n_{50} = \frac{V_{50}}{V} = \frac{\text{Volumenstrom bei 50Pa Differenzdruck}}{\text{Gebäudeluftvolumen}} \quad [1/h]$$

Formel 2: Ermittlung des n_{50} -Wertes mittels Blower Door Test.

Beide untersuchten Klassenräume wurden auf $n_{50} = 3,0/h$ gebracht, sodass eine Vergleichbarkeit gegeben war.

In den Klassenräumen wurden jeweils mehrere Sensoren (siehe Abbildung 15) zur Messung der CO_2 -Konzentration mit identer Positionierung befestigt. Ein weiterer Sensor war am Gang vor den Klassenzimmern positioniert, um die Konzentration des Außenbereiches als Vergleichswert zu erfassen. Die Datenerfassung der CO_2 -Sensoren erfolgte im Abstand von 10 Sekunden. Mittels CO_2 -Flaschen wurde CO_2 in die Räume eingeführt (siehe Abbildung 14). Die CO_2 -Konzentration in den

Räumen wurde auf über 2.000 ppm erhöht. Dann wurde die Zufuhr gestoppt. Aufgrund der Leckagen fiel die CO₂-Konzentration in den folgenden Stunden. Die Untersuchung der Klassenräume 1c (begrünt) und 3b (unbegrünt) erfolgte zeitgleich. Aufgrund der ähnlichen Raumgegebenheiten (Größe, Stockwerk, Ausrichtung, Form, siehe Kapitel 2.2) bieten diese beiden Räume eine Vergleichsbasis. Sie unterscheiden sich nur durch die Begrünung. Eine unterschiedliche Geschwindigkeit des Abfalls wurde deshalb auf die Pflanzen in der begrünter Wand zurückgeführt.



Abbildung 14: Versuchsaufbau vor den Klassenräumen

In jedem Raum befanden sich Ventilatoren, die für eine gleichmäßige Verteilung der CO₂-Konzentration im Raum sorgten. Der Versuchsaufbau einer begrünter Klasse wird in Abbildung 15 dargestellt.



Abbildung 15: Versuchsaufbau in den Klassen, am Beispiel der Klasse 1c mit Sensoren und Ventilatoren

Die Dauer einer Messung betrug ca. 48 h, danach entsprach die CO₂-Konzentration etwa dem Außenluftniveau. Jede Messung wurden vier Mal wiederholt.

2.8. Methode zur Ermittlung der akustischen Auswirkungen von Gebäudebegrünung

„Die Hörsamkeit ist ein Oberbegriff, der die Wirkung der akustischen Eigenschaften eines Raumes für Musik und Sprache am Ort des Hörenden beschreiben soll“ [27]. Dieser Begriff beschreibt also unter anderem, wie deutlich Sprache oder wie wohlklingend Musik in einem Raum zu hören ist. Die Hörsamkeit hängt zum Beispiel von der Raumgeometrie, den schallabsorbierenden, -streuenden und -reflektierenden Eigenschaften der Wände, Decken, Böden und der Einrichtung ab. Auch das Verhältnis von Volumen zu Zuhörer und von der Entfernung zur Schallquelle beeinflusst die Hörsamkeit. Der wichtigste Faktor für die Verständlichkeit von Sprache ist neben der Lautstärke auch der Hall. Letzterer wird durch die Nachhallzeit charakterisiert [27]. Eine hohe Nachhallzeit kann bei Konzertsälen positiv wirken, eine kürzere Nachhallzeit ist positiv für Kommunikation und Sprache [28].

Im Zuge des vorliegenden Projektes wurde die Nachhallzeit von Räumen und Außenbereichen gemessen, sowohl ohne, als auch mit Begrünungselementen. So ist es möglich, die Auswirkungen der Begrünung auf die Nachhallzeit und in weiterer Folge auf die akustische Qualität der Räume zu berechnen und zu analysieren.

2.8.1. Nachhallzeit

Die Zeit, in der nach Abschalten einer Schallquelle der Schalldruckpegel um 60 dB absinkt, wird Nachhallzeit genannt. Die Nachhallzeit wird in Sekunden gemessen und kann auch mithilfe der Sabine'schen Nachhallzeitformel mittels Raumvolumen und äquivalenter Schallabsorptionsoberflächen berechnet werden (siehe Formel 3) [27].

$$T = 0,163 * \frac{V}{A}$$

T Nachhallzeit [s]
V Raumvolumen [m³]
A Äquivalente Schallabsorptionsfläche [m²]

Formel 3: Sabine'sche Formel zur Berechnung der Nachhallzeit nach ÖNORM 8115 [29]

Die Nachhallzeit ist sowohl vom Volumen des untersuchten Raumes, als auch von dessen Oberflächengestaltung abhängig. Die äquivalente Schallabsorptionsfläche wird in Kapitel 2.8.2 beschrieben.

Die optimale Nachhallzeit wird in ÖNORM 8115-3 [29] beschrieben. Sie ist abhängig von der jeweiligen Raumnutzung und dem Raumvolumen. In Schulen empfiehlt sich eine möglichst kurze Nachhallzeit, da gesprochene Wörter bei niedrigerer Nachhallzeit besser verstanden werden können. Besonders dann, wenn es Hintergrundgeräusche gibt und Fremdsprachen gelernt werden, ist eine kurze Nachhallzeit von Vorteil.

2.8.2. Äquivalente Schallabsorptionsfläche

Trifft eine Schallwelle im Raum auf eine Wandfläche, so kann sie reflektiert oder absorbiert (in Wärme umgewandelt) werden oder durch Transmission auf die andere Seite der Wand gelangen. Der

größte Teil des Schalls wird gewöhnlich reflektiert. Ein kleiner Teil der auftreffenden Schallleistung dringt in die Wand ein, er wird absorbiert und dadurch dem Schallfeld des untersuchten Raumes entzogen. Das Verhältnis der absorbierten zur auftreffenden Schallleistung wird Schallabsorptionsgrad α genannt. Nimmt dieser den Wert 0 an, bedeutet dies, dass der Schall vollständig reflektiert wird. Ist das Verhältnis 1, wird die gesamte Schallleistung absorbiert. Ein solcher Schallabsorptionsgrad kann für jedes flächenhafte Bauteil angegeben werden. Werden alle Einzelflächen mit ihren Absorptionsgraden addiert, erhält man die äquivalente Schallabsorptionsfläche eines Raumes (siehe Formel 4) [27].

$$A = \sum \alpha_i S_i$$

- A Äquivalente Schallabsorptionsfläche in m²
 α_i Schallabsorptionsgrad der jeweiligen Oberfläche
 S_i Einzelflächen des Raumes in m²

Formel 4: Berechnung der äquivalenten Schallabsorptionsfläche

2.8.3. Schallabsorptionsgrad der grünen Wände

Mittels Formel 3 lässt sich bei gemessener Nachhallzeit und konstantem Raumvolumen die äquivalente Schallabsorptionsfläche des untersuchten Raumes bestimmen. In weiterer Folge kann mit der Differenz der äquivalenten Schallabsorptionsfläche vor und nach der Begrünung der Absorptionsgrad der grünen Wände berechnet werden. Als Eingangswerte zur Berechnung des Absorptionsgrades einer grünen Wand werden alle Flächen im Raum (S_{Raum}) sowie die Fläche der Wandbegrünung (S_{Absorber}) benötigt. Mittels Formel 5 lässt sich dann der Schallabsorptionsgrad berechnen.

$$\alpha_{\text{Absorber}} = \frac{\alpha * S_{\text{Raum}} - (\alpha_{\text{Raum,leer}}(S_{\text{Raum}} - S_{\text{Absorber}}))}{S_{\text{Absorber}}}$$

- α_{Absorber} Schallabsorptionsgrad der Wandbegrünung
 α Schallabsorptionsgrad des Raumes mit Begrünung
 $\alpha_{\text{Raum,leer}}$ Schallabsorptionsgrad des Raumes ohne Begrünung
 S_{Raum} Oberflächen des Raumes [m²]
 S_{Absorber} Begrünungsfläche [m²]

Formel 5: Berechnung des Schallabsorptionsgrad einer begrünten Wand

2.8.4. Messung der Nachhallzeit

Gemessen wurde die Nachhallzeit in den begrüneten Klassen, im Eingangsbereich (Aula) und im Innenhof, bevor die Begrünung installiert wurde, als auch nach der Installation den Grün-Versuchsflächen. Das ermöglicht den Vergleich vor und nach Einbringen der Begrünungselemente. Die Messungen wurden bei verschiedenen Deckungsgraden der begrüneten Flächen öfters wiederholt. In der Aula gab es noch weitere Messungen vor Einbringen einer weiteren grünen Wand (Mooswand) sowie mehrmals nach Einbringen der Mooswand.

Für die Messungen wurden 4 Norsonic Nor140 Schallanalytoren gleichmäßig im Abstand von 2-6 m verteilt. Anschließend wurde ein Luftballon zum Platzen gebracht und die Nachhallzeit gemessen.

Abbildung 16 stellt schematisch den Aufbau einer Nachhallzeitmessung dar. Dabei wurde das Verfahren der integrierten Impulsantwort laut EN ISO 3382-3 [30] angewandt. Es wurden mehrere Messungen durchgeführt und nach jeder Messung wurden die Schallanalysatoren neu positioniert, um anschließend einen authentischen Mittelwert bilden zu können.

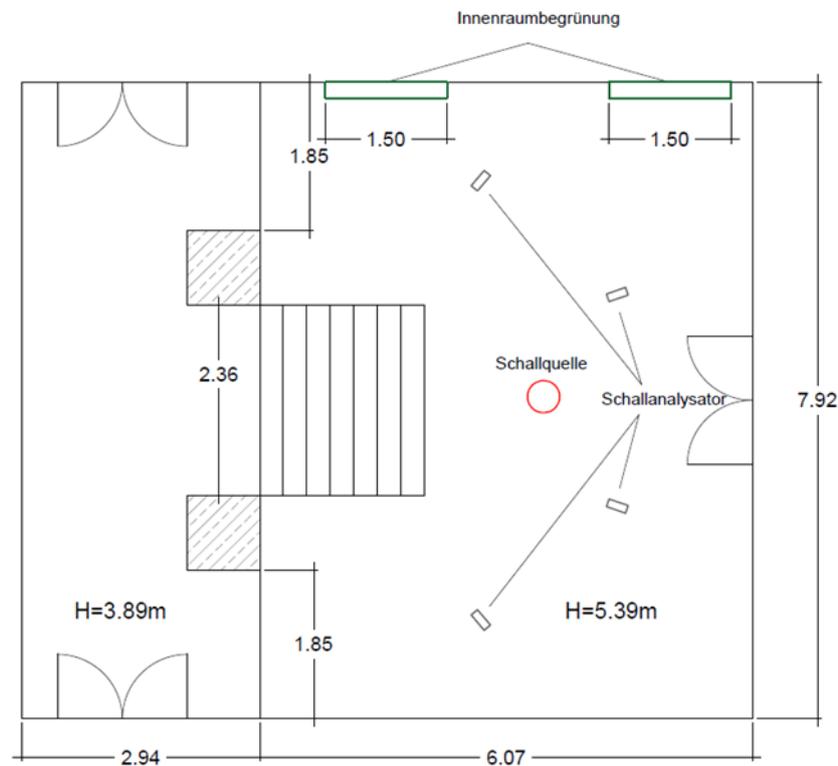


Abbildung 16: Schematische Darstellung einer Nachhallzeit-Messung [31].

2.9. Methode zur Ermittlung der thermischen Dämmeigenschaften von fassadengebundener Begrünung im Winter

In Österreich gibt die OIB-Richtlinie 6 einen Wärmeschutz für Gebäude vor. Dieser kann mit unterschiedlichen Methoden für den Energieausweis berechnet werden. Einen Teil des Wärmeschutzes stellt eine ausreichend gut gedämmte Außenhülle dar, um die Wärmeverluste im Winter gering zu halten. Der Wärmedurchgang eines Bauteils wird durch den U-Wert angegeben (siehe Kapitel 2.9.2).

2.9.1. Stand der Forschung

Die Auswirkung von fassadengebundener Begrünung auf den U-Wert der Konstruktion wurde in diesem Forschungsprojekt erstmals detailliert messtechnisch untersucht. Die wissenschaftlichen Publikationen, die es zu diesem Thema gibt, beschäftigen sich meistens mit Ausschnitten der komplexen Problematik. So wird beispielsweise in [32] die Windgeschwindigkeit hinter einem Begrünungssystem gemessen. Es wurde festgestellt, dass die Luftgeschwindigkeit hinter dem Begrünungssystem nicht schneller ist, als in Innenräumen. Deshalb wurde für den äußeren

Wärmeübergangswiderstand der Wert des inneren Wärmeübergangswiderstands angenommen, was den gesamten Wärmeübergangswiderstand laut [33] um 0,09 m²K/W erhöht.

Simulationen zu diesem Thema wurden in [34] und [35] durchgeführt. Alle Publikationen berichten von einer Verbesserung der thermischen Isolation aufgrund von Fassadenbegrünungssystemen. Das Maß der Verbesserung schwankt je nach Methode. Im diesem Forschungsprojekt wurden erstmals langjährige genaue Messungen gemacht.

2.9.2. Wärmedurchgangskoeffizient einer Wand

Der Wärmedurchgangskoeffizient oder U-Wert ist der „Quotient aus Wärmestrom im stationären Zustand und dem Produkt aus Fläche und Temperaturdifferenz zwischen den Umgebungen auf jeder Seite eines Systems“ [33]. Siehe dazu auch Formel 6.

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

ϕ	[W]	Wärmestrom durch die Wand
T_1 / T_2	[K]	Temperaturen der Umgebungen auf jeder Seite eines Systems (Lufttemperaturen innen und außen)
A	[m ²]	Wandfläche

Formel 6: Berechnung des U-Wertes auf Basis von Wärmestrom und Temperaturdifferenz.

Wesentlich an der Definition ist, dass die Größen in einem stationären, also zeitlich nicht veränderlichen Zustand zu bestimmen sind. Da eine reale Wand ständigen Temperatur- und Einstrahlungsänderungen ausgesetzt ist, verändert sich auch ständig ihr Zustand. Aus den hier durchgeführten In-situ-Messungen kann nur der effektive Wärmedurchgangskoeffizient ermittelt werden. Dieser gibt die thermische Leitfähigkeit einer Wand zu einem bestimmten Zeitpunkt an.

Bei Berechnungen im Zuge der Erstellung eines Energieausweises wird jedoch der stationäre Wärmedurchgangskoeffizient benötigt. Dieser kann näherungsweise bestimmt werden, indem der effektive Wärmedurchgangswiderstand in einem weitgehend stationären Zustand erhoben wird. Darüber hinaus ist es für die messtechnische Ermittlung des U-Wertes erforderlich, dass sowohl der Wärmestrom als auch der Temperaturunterschied einen gewissen Wert nicht unterschreiten, da sich ansonsten Störgrößen, wie Speicherfähigkeit der Mauer nicht vernachlässigen lassen. Daher sind jene Messergebnisse repräsentativ, welche zu einem Zeitpunkt mit anhaltend hohem Temperaturunterschied erhoben werden.

2.9.3. Modellierung der Fassadenbegrünung

Nach [33] 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 weiter außen liegenden Schichten vernachlässigt. Stattdessen wird ein erhöhter Wärmeübergangswiderstand zur Anwendung gebracht: An Stelle eines Widerstandes von $R_{se} = 0,04 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$, der ansonsten an allen außenseitigen Flächen anzuwenden ist, wird $R_{se} = 0,13 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ 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 [33] empfohlenen Wert abweichen. Um die Plausibilität der

Resultate zu prüfen, wurden Berechnungen zum Wärmeübergangswiderstand angestellt. Der Wärmedurchgangswiderstand ist der Kehrwert des U-Wertes aus Formel 6 (siehe Formel 7).

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

Formel 7: Verhältnis zwischen dem Wärmedurchgangswiderstand und dem U-Wert.

R_T berechnet sich aus der Summe der Wärmedurchlasswiderstände (bei mehreren Schichten ist dies die Summe der Wärmedurchlasswiderstände ΣR_i) und den Wärmeübergangswiderständen R_{si} für innen und R_{se} für außen (siehe Formel 8).

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

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 8: Berechnung des Wärmedurchgangswiderstandes durch summieren der Wärmedurchlasswiderstände und der Wärmeübergangswiderstände.

Ziel ist es, den Einfluss der Fassadenbegrünung auf den U-Wert zu ermitteln. Es wurden Teile einer homogenen Fassade, deren ΣR_i und R_{si} an den gewählten Messstellen gleich ist, begrünt. 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 7 den U-Wert. Die U-Werte können danach verglichen werden. Der U-Wert mit begrünter Fassade wird in Abbildung 17 mit „U_g“ und der U-Wert mit nicht begrünter Fassade, wird mit „U_ng“ schematisch dargestellt.

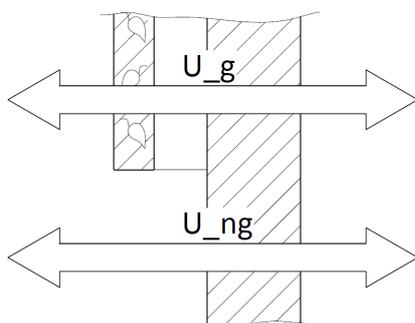


Abbildung 17: Darstellung der U-Werte. U_g (mit Begrünung) und U_ng (ohne Begrünung)

2.9.4. Messmethoden

An Fassadenbereichen mit den zwei installierten Systemen (Trog- und Kassettensystem), sowie an unbegrünter, bestehenden Fassadenbereichen wurden Wärmestrom, Oberflächentemperaturen (innen und außen) sowie Lufttemperaturen (innen und außen) gemessen (siehe Messaufbau in Abbildung 18).

Das Kassettensystem wurde an der Außenfassade vor dem Physikraum angebracht. In dem Raum, der an die Begrünung grenzt (Physikraum) und einem Referenzraum (Chemieraum) wurden Sensoren installiert (siehe Abbildung 18).

Das Trogsystem wurde an der Außenfassade vom Stiegenhaus der Schule installiert. Hier wurden die Innenraummessungen im selben Raum durchgeführt. Da sich die Messstellen für die begrünte Fläche und die Referenzfläche in unterschiedlichen Höhenniveaus befinden, wurden die Oberflächentemperatur und die Lufttemperatur vor der jeweiligen Messstelle separat gemessen.

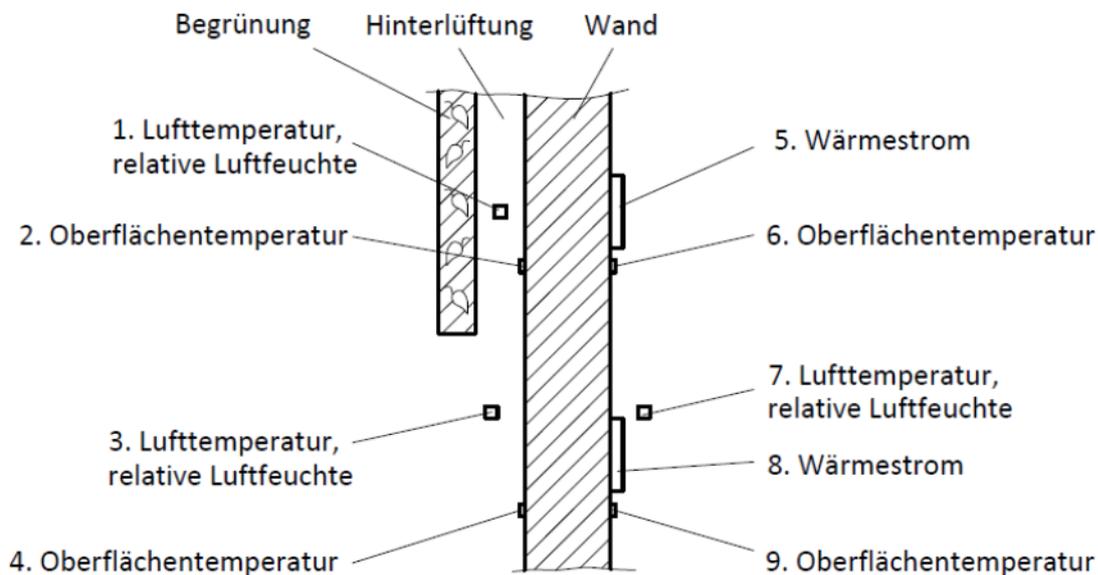


Abbildung 18: Schematische Darstellung des Messaufbaus.

Gemessen wurde über den gesamten Projektzeitraum in 5-10 Minuten Abständen. Aus den gemessenen Wärmeströmen und Temperaturen wurden nach Formel 6 die U-Werte berechnet.

2.9.5. Messgeräte

Die Lufttemperatur im Raum, im Hinterlüftungsspalt und der Außenluft wurde mit Lin Piccos A05 gemessen (siehe Abbildung 8). Zur Messung der Außenluft wurde der Lin Picco A05 in einen Strahlenschutzschirm eingebaut (siehe Abbildung 19 Links). So konnte sichergestellt werden, dass die Lufttemperatur ohne Strahlung, Verdunstungskälte oder Einfluss von Wind gemessen wurde.

Der Wärmestrom wurde mit Wärmestrommessplatten von Phymas gemessen. Es wurden Platten mit einer Fläche von 25 cm x 25 cm für alle Messungen in diesem Projekt ausgewählt (siehe Abbildung 19 Mitte). Dadurch wird eine große Fläche zeitgleich gemessen. Sämtliche Oberflächentemperaturen wurden mit PT 1000 gemessen (siehe Abbildung 19 Rechts).

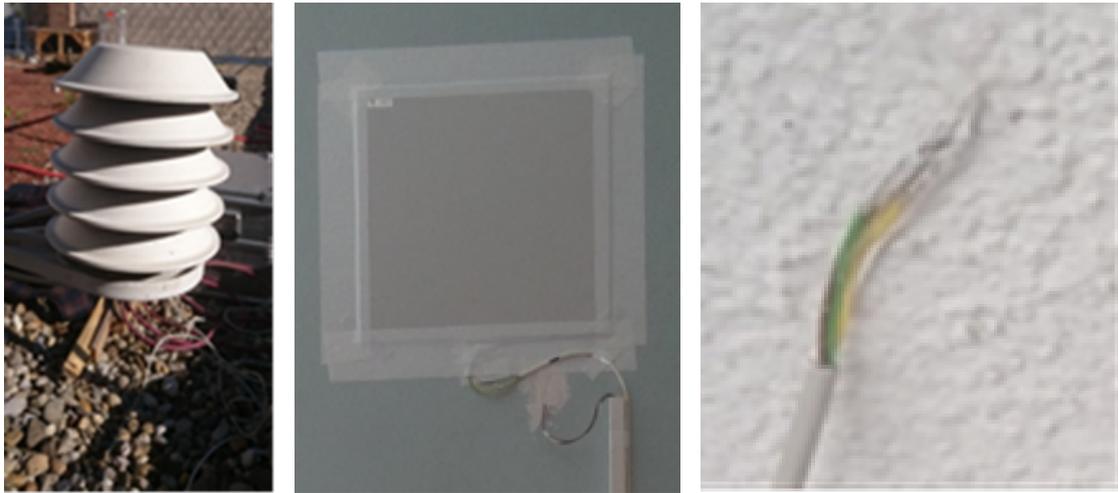


Abbildung 19: Links: Strahlenschutzschirm für die Messung der Außenlufttemperatur. Mitte: Wärmestrommessfolie von Phymas 25 cm x 25 cm zur Messung des Wärmestroms durch die Konstruktion. Rechts: PT 1000 zur Messung der Oberflächentemperaturen innen und außen.

Die Thermographiebilder wurden mit der in Abbildung 20 dargestellten Wärmebildkamera aufgenommen. Es handelt sich dabei um die H2640 von NEC Avio Infrared Technologies Co., Ltd.



Abbildung 20: Wärmebildkamera zur Aufnahme der thermographischen Bilder.

Für das vorliegende Projekt war es wichtig, eine Thermokamera mit weniger als $1,0^\circ\text{mrad}$ geometrischer Auflösung und zumindest 640×480 thermischen Pixeln zu verwenden. Nur so konnten die begrünten, lebenden Fassaden genau untersucht werden. Auf den Bildern werden den erfassten Oberflächentemperaturen Farben zugeordnet. Es ist allgemein üblich den höheren Temperaturen „warme“ Farben und den niedrigeren Temperaturen „kühle“ Farben zuzuordnen.

2.9.6. Datenanalyse

Die gemessenen Werte schwanken und bilden die Temperaturen und Wärmeströme des Schulalltags ab. Die Temperaturen schwanken nach Jahreszeiten, inneren Wärmequellen und Lüftungsverhalten. Die Wärmeströme sind vom Temperaturunterschied zwischen drinnen und draußen abhängig. Dabei ist nicht nur der momentane Temperaturunterschied relevant, sondern auch jener der Vergangenheit. Die Gebäudehülle speichert Wärme. Das führt zu vielen Werten, die bei der Berechnung des U-Wertes nicht berücksichtigt werden dürfen. Beispielsweise kann das Öffnen eines Fensters im Winter dazu führen, dass die Oberflächentemperatur an der Innenseite der Fassade

höher ist, als die Lufttemperatur im Raum. Das führt dazu, dass Wärme im Winter von der Wand an den Raum abgegeben wird.

Um die Fehler bei der Auswertung der U-Werte so gering wie möglich zu halten, müssen die Messwerte gefiltert werden. Nur ein kleiner Teil der Messwerte kann für die Berechnung der U-Werte herangezogen werden. Es werden folgende Filter gesetzt:

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

Die Filter 1-3 stellen sicher, dass nur Messungen an kalten Wintertagen berücksichtigt werden und das Mauerwerk nicht aufgeheizt ist. Die Punkte 4-5 filtern den größten Teil der Werte aus. Sie lassen nur noch Werte zu, die gemessen wurden, wenn in den letzten 24 h weitgehend stationäre Bedingungen (mit weniger als 2 K Schwankung) gegeben waren.

2.9.7. Berechnungsmethode

Es wurden nur Messwerte berücksichtigt, die nach Kapitel 2.9.6 nicht ausgefiltert wurden.

Für das Begrünungssystem wurden zu jedem Messzeitpunkt nach Formel 9 die jeweiligen Wärmedurchgangswiderstände berechnet, sowohl für den begrünnten Teil der Fassade als auch für den nicht begrünnten Teil der Fassade, jeweils zum selben Zeitpunkt.

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

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

Formel 9: Berechnung der Wärmedurchgangswiderstände

Nach Formel 8 und Formel 7 konnten in weiterer Folge die U-Werte berechnet werden. Die U-Werte werden in Kapitel 3.7 verglichen.

2.10. Methode zur Ermittlung der Kühlleistung von Fassadenbegrünung

Durch Sonneneinstrahlung erhitzen sich die Außenoberflächen von Gebäuden. Diese geben die Wärme einerseits an die umströmende Luft ab und andererseits gelangt die Wärme über Wärmeleitung und Konvektion direkt in den Innenraum. Fassadenbegrünung beschattet die opaken Flächen und heizt sich aufgrund von Evapotranspiration nicht auf.

Die Wichtigkeit der Reduzierung der Oberflächentemperatur wird in der Studie [36] mithilfe eines mathematischen Modells gezeigt. Nach der Studie [37] ist die Temperatur des Luftspalts im Sommer niedriger, als bei einer nicht begrünten Wand. Die Untersuchungen im Zuge dieses vorliegenden Projektes gehen weiter. Um den Kühleffekt von Gebäudebegrünungen durch Evapotranspiration zu untersuchen, wurden Zu- und Abfluss des Begrünungssystems gemessen. Der Zufluss ist die Summe von Bewässerung und Niederschlag. Der Abfluss ist die Wassermenge, die durch die Abflussrinne abtransportiert wurde. Die Differenz des täglichen Abflusses und Zuflusses wurde berechnet. Es wurde angenommen, dass die gesamte Differenz von Zu- und Abfluss verdunstet ist. Die Standardverdampfungsenthalpie von Wasser ist 43,990 kJ/mol [38]. Damit kann die gesamte Kühlleistung an die Umgebung berechnet werden. Weiters wurden die Lufttemperatur und die Oberflächentemperatur hinter den Begrünungssystemen und an der unbegrünten Fassade über den gesamten Projektzeitraum gemessen. Ein Vergleich zeigt die Auswirkungen von Verschattung und Verdunstung an den äußeren Fassadenoberflächen. An der Innenseite wurde die Oberflächentemperatur ebenfalls gemessen, um Auswirkungen auf den Innenraum des Gebäudes festzustellen.

Die Auswirkungen der Innenraumbegrünung wurden mittels Messung von Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit in der begrünten Klasse und der Referenzklasse über den gesamten Projektzeitraum untersucht.

2.11. Methode zur Untersuchung der Kombination von PV und Begrünung

Im Projektteil „PV+Grün“ des Forschungsprojektes wurden am Dach und an der Fassade der Schule unterschiedliche PV-Grün-System-Kombinationen (Abbildung 22) getestet und bezüglich ihrer thermischen und energetischen Eigenschaften untersucht (PV-Erträge- und Anlagendetails sind in den Kapiteln 2.11 und 3.9 zu finden).

Photovoltaik und Begrünung sind bekannte Systeme, die als Maßnahmen für die Anpassung an den Klimawandel in Klimastrategien benutzt werden. Beide Systeme ergänzen sich aufgrund ihrer Vorteile, wie der Erhöhung der Photovoltaikerträge durch die adiabate Kühlung der Pflanzen (Pflanzenverdunstung), sowie die weiterhin mögliche Nutzung der Begrünungsvorteile. Somit können auf derselben Gebäudefläche beide Systeme kombiniert werden und es gibt keine Konkurrenz zwischen diesen. Aus diesen Gründen wurden bereits mehrere mögliche Einsatzkombinationen – nebeneinander und untereinander – dieser Systeme am Gebäude getestet [39].

Bisherige Forschungsarbeiten haben sich auf die Untersuchungen möglichst großer PV-Erträge, Verbesserung der Leistung und Betriebstemperaturen konzentriert. Die im Projektteil PV+Grün getesteten Kombinationen fokussieren, wie das Projektteil: „Multifunktionale Systemlösung: Gebäudebegrünung und Photovoltaik“ (MFS) [40][41][42], die Untersuchung ganzheitlicher multifunktionaler Lösungen, die sowohl die gleichzeitige Nutzung der energetischen, als auch der

bauphysikalischen Vorteile erforscht. Diese multifunktionalen Systeme sollen eine nachhaltige Lösung sowohl für die Sanierung des Gebäudebestandes als auch für den Neubau darstellen, um gleichzeitig Energie zu gewinnen, Heiz- und Kühlenergie zu sparen, Staub zu binden, Luftqualität zu erhöhen und Lärm zu mindern.

Die Auswahl der Komponenten für die Varianten der installierten Systeme und des Zubehörs, sowohl an der Fassade als auch auf dem Dach, erfolgte unter Berücksichtigung minimaler Wartungsanforderungen und niedriger Kosten, um ein Gleichgewicht zwischen Technik, Kosten und Zugänglichkeit zu erreichen.

Details über die verwendeten Vegetationsarten für die Kombinationen mit PV-Anlagen auf der Fassade (Fassadengebundene Systeme) und dem Dach (extensive Dachbegrünung) finden sich in Kapitel 3.1 und 3.9 beschrieben.

Ziel der Untersuchung war die Ermittlung der Einflüsse der unterschiedlichen Abstände zwischen der Begrünung und den Photovoltaikmodulen auf die Systemkomponenten, die schon bekannten bauphysikalischen Synergien und Vorteile [43], die PV-Erträge und Betriebstemperaturen [40][41] sowie die Entwicklung der Vegetation.

Die Versuchsfläche (das Turnsaaldach sowie die Fassade des Physiksaals) liegt etwas tiefer als die umliegenden Dächer, daher herrscht eine höhere Verschattung, was sich negativ auf die Erträge der Photovoltaikanlage auswirkte. Daher ist eine exakte Standortaufnahme unerlässlich, um die beste Position der Versuchsanlage zu definieren. Aus diesem Grund wurden an mehreren Punkten Sonnenwegdiagramme vermessen, damit die optimalen schattenfreien Bereiche ermittelt werden konnten.

Sowohl für die PV-Dachanlage als auch die PV-Fassadenanlage wurden Simulationen und Prognosen für die PV-Erträge erstellt. Die aus den Sonnenwegdiagrammen bekannte Abschattung wird in der Simulation mit PVsol berücksichtigt und die monatliche Verteilung der PV-Erträge ermittelt. Dies ist auch die Grundlage für die weiteren Untersuchungen hinsichtlich der Ertragsmessungen durch das Monitoring und auch Basis für die wissenschaftlichen Fragen des Pflanzenwachstums unter den PV-Flächen mit 30 % Restlichtdurchlässigkeit. Durch die Simulationen, Prognosen und Erträge können die für die Zukunft nutzbaren Pflanzmonate analysiert werden. Zudem sind die Prognosen die Grundlage für die Berechnungen der Eigenverbrauchsquote, die außerhalb des Projektes in einer ersten Annäherung untersucht werden.

2.11.1. PV plus Grün-Fassade

Zwei identische Kombinationen aus PV und Begrünung, die Testfelder F1 und F2 (Abbildung 21), wurden an der Fassade montiert. Um die Einflüsse unterschiedlicher Abstände zwischen dem Photovoltaikmodul und der Begrünung zu untersuchen, wurden die PV-Module mit einem Abstand zu der Begrünung von 44 cm bei F1 und 25 cm bei F2 montiert.

TESTFELD	F1	F2	F3
Begrünung	x	x	-
Abstand PV-Modul zur Begrünung	44 cm	25 cm	18 cm (PV zur Wand)
Abstand Begrünung zur Wand	6 cm	6 cm	

Sensoren-Liste

- Oberflächentemperatur PV
- ☆ Lufttemperatur/Luftfeucht Pufferraum
- ⊗ Oberflächentemperatur an der Wand
- Temperatur im Substrat

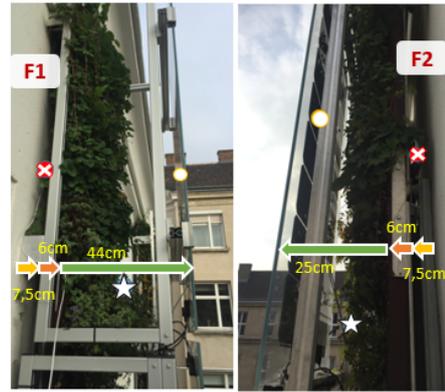
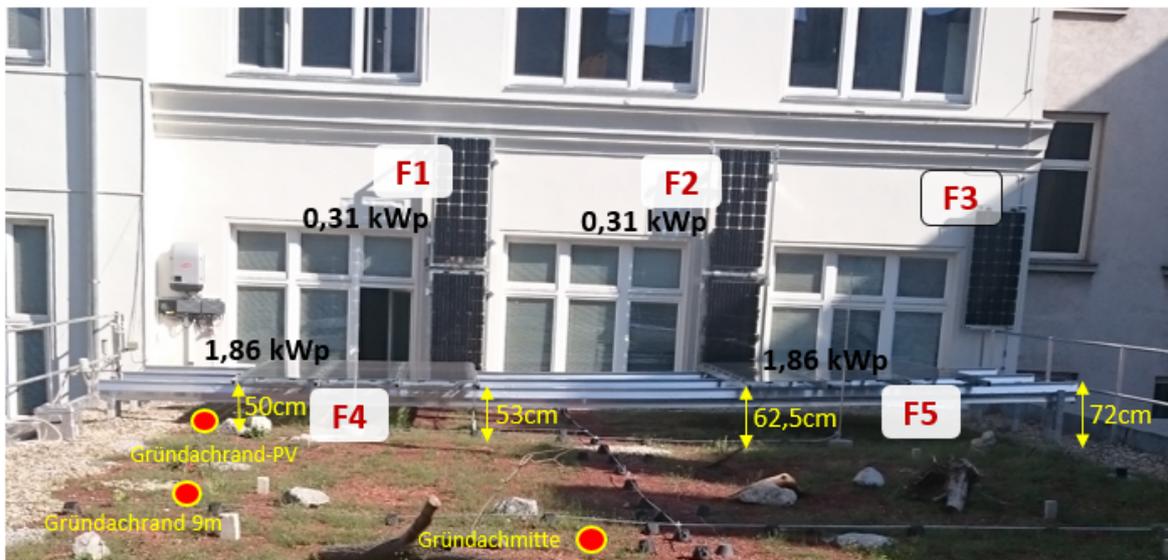


Abbildung 21: Sensoren-Lage: PV-Fassade- und PV-Dach-Anlage. Abmessungen, Varianten PV-Fassaden-Anlage.

2.11.2. PV+Gründach



TEMPERATURSENSOR

Maxim Integrated DS18B20
Eindrahtige Digitalthermometer
Mess Temperaturen von -55°C bis 125°C
Genauigkeit +/-0,5°C von -10°C bis +85°C

● Lage Sensoren im Substrat		Tiefe
Gründachrand-9m	9 m entfernt von PV	6 cm
Gründachrand-PV	neben PV	5 cm
Gründachmitte	mitte-Substrat Dachbegrünung	8 cm
F4-Substrat	mitte-unten PV-Gruppe	7 cm
F5-Substrat	mitte-unten PV-Gruppe	10 cm

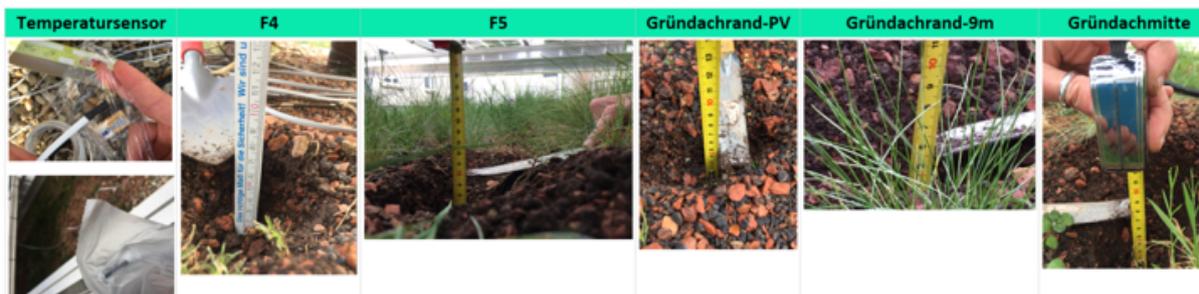
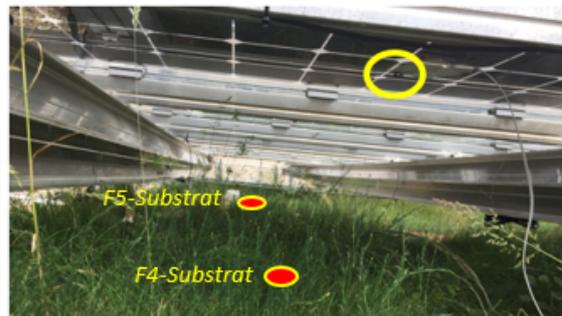


Abbildung 22: „PV+Grün“-Kombinationen. Untersuchte Fassaden- und Dachsystem-Varianten. Abmessungen PV-Dach Anlage. Lage der Sensoren im Dachsubstrat (Bildquelle:[43]).

Auf dem Dach des Turnsaals der Schule wurden zwei bis auf den Abstand identische Kombinationen, F4 und F5, der Variante PV+Grün (PV+Gründach) montiert, um die Einflüsse unterschiedlicher Abstände (Abbildung 22) zwischen den Photovoltaikmodulen (PV) und der Dachbegrünung (Gründach) zu untersuchen. Hier wurden die Temperaturen der Photovoltaikmodule und die Temperatur an der Schnittstelle zwischen der Dachabdichtung und dem Substrat an mehreren Stellen einer extensiven Dachbegrünung ohne PV und unter der Kombination PV+Gründach untersucht. Der Abstand von F4 betrug im Durchschnitt 54,5 cm und 67 cm bei F5.

Für die Verbrauchswerte wurde bei ATB-Becker e.U. eine eigene Messeinrichtung entwickelt, die am Ort des Verbrauchs die ¼-Stundenwerte ermittelte und via Internet an ATB-Becker übermittelte.

Alternativ können die Verbrauchsdaten auch mit dem SOLARWATT Energy Manager ermittelt und ausgewertet werden. Dies ist jedoch bei verteilten Verbrauchern nur mit zusätzlicher Verdrahtung möglich.

3. Ergebnisse

3.1. Beschreibung der Begrünungsvarianten und der Optimierungsmaßnahmen sowie Ergebnisse zur Arteneignung

In diesem Abschnitt wird auf den technischen Aufbau der Begrünungssysteme, die Pflanzenauswahl sowie an den Systemen vorgenommene Anpassungen eingegangen. Die Adaptionen sind als Teil des Untersuchungsprozesses anzusehen, sie entstanden in einem Lernprozess in der unmittelbaren realen Anwendung im Schulbereich, um die Begrünungsmaßnahmen für den Standort Schule zu optimieren.

3.1.1. Vliessystem mit Umlaufpumpe (B1 + B2) im Eingangsbereich



Abbildung 23: Die beiden Elemente des Vliessystems in der Aula [9].

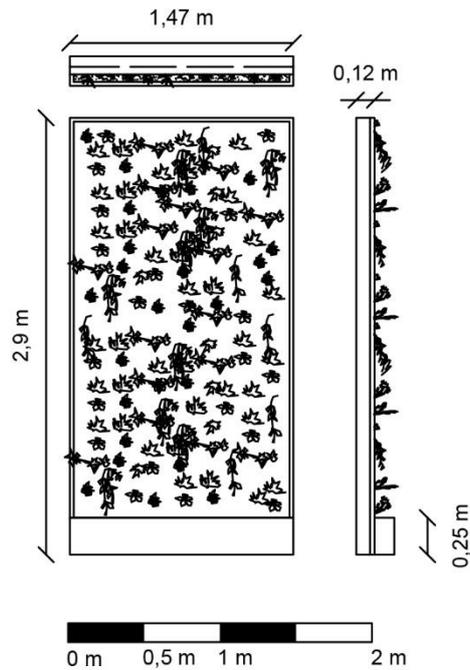


Abbildung 24: Schematische Darstellung eines Begrünungselementes [9]

Im Eingangsbereich befindet sich ein wandgebundenes Begrünungssystem aus Vlies mit zwei Teilen, welche jeweils 2,90 m hoch und 1,47 m breit sind (Gesamtfläche 7,46 m²). Die Unterkante des Systems beginnt bei 1,50 m. Die Höhe des Wassertanks beträgt 24,50 cm. Die Fläche einer Begrünungsfläche beträgt ohne den Metallrahmen 3,73 m² (Gesamtfläche: 6,7 m²).

Der Wasserzufluss und die Steuereinheit befinden sich in der Portierloge, von hier werden die den Teilflächen zugeordneten Wassertanks (Füllvolumen: ca. 38 l) befüllt. Die Wassertanks speisen die Begrünungsfläche mittels Umlaufpumpe und Tropfschlauch.

Beleuchtet werden die Begrünungselemente mit 4 LED-Strahlern von 6:00 bis 20:00 Uhr. Die zur Steuerung verwendete Zeitschaltuhr befindet sich ebenfalls in der Portierloge.

Durch die Gesamthöhe von über 5 Metern ist eine Pflege des Systems durch das Schulpersonal kaum möglich. Auch die Überprüfung der oben angeordneten Tropfschläuche ist kaum durchführbar.

Durch die Umlaufpumpe ist der Wasserverbrauch niedrig, der Wartungsaufwand steigt allerdings. Der Tank muss mehrmals im Jahr ausgelassen und gereinigt werden. Ein Düngemittel muss regelmäßig dosiert und dem Wasser in den Tanks beigefügt werden. Durch die vielen zusätzlichen Bauteile steigt auch die Anzahl an Verschleißteilen.

Geeignete Pflanzenarten sind: *Asplenium antiquum* (Schmalblättriger Nestfarn), *Asplenium nidus* (Nestfarn), *Peperomia clusiifolia* (Zwergenpeffer), *Peperomia obtusifolia* (Magnolienblättriger Zwergpeffer), *Philodendron brasil* (Philodendron), *Philodendron scandens* (Philodendron), *Tradescantia spathacea* (Dreimasterblume).

Monstera deliciosa 'Borsigiana' (Fensterblatt) ist aufgrund der schlechten Vitalitätswerte im Vegetationsmonitoring für das System weniger geeignet.

3.1.2. Vliessystem mit Zu- und Ablauf im Klassenraum



Abbildung 25: Vliessystem im Klassenraum [9]

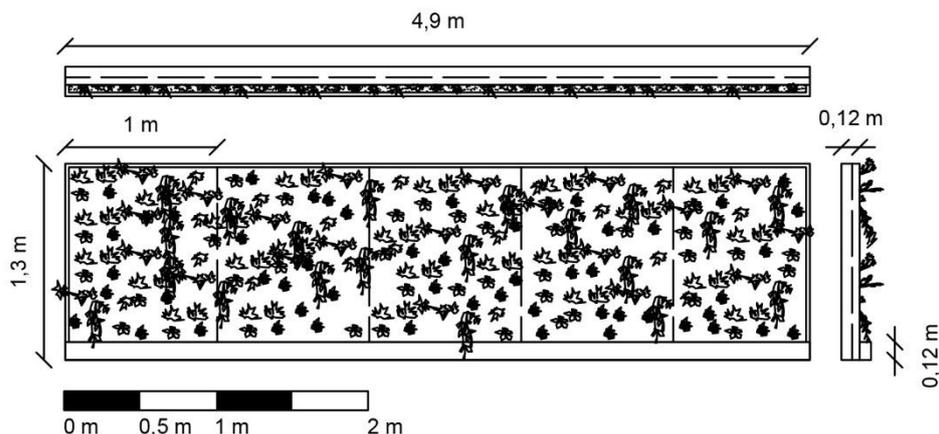


Abbildung 26: Schematische Darstellung des Vliessystems im Klassenraum [9]

In der begrünter Klasse im 3. Stock des Schulgebäudes befindet sich in einem Klassenraum ein weiteres Vliessystem mit einer Größe von 5,60 m². In dieser Variante werden die Pflanzen wurzelnackt eingebracht, als Vegetationsträger dienen mehrere Lagen Geotextil.

Da in dieser Systemvariante keine Umlaufpumpe zum Einsatz kommt und jeden Tag mehrmals bewässert werden muss, ist der Wasserverbrauch sehr hoch. Eine reine Düngung auf Blattdüngemittelbasis ist für eine gesunde Pflanzenentwicklung über mehrere Jahre nicht ausreichend. Aufgrund dieser Erkenntnis wurde das System zu Projektende nachgerüstet.

Neupflanzungen in diesem System gestalten sich als schwierig, weil die Vliestaschen erst geöffnet, die Pflanzen wurzelnackt eingebracht und die Taschen wieder geschlossen werden müssen.

Mechanische Zeitschaltuhren sind zwar leicht zu bedienen, bleiben aber bei Stromausfall stehen und werden schnell kaputt. Die ursprünglich vorhandenen mechanischen Zeitschaltuhren wurden nach Problemen und Ausfällen im Klassenraum ersetzt.

In den Ferien wurde das Klassenzimmer als Schlafraum für ein Basketballteam genutzt. Hier wurden das Pumpengeräusch und die Beleuchtung als störend empfunden und der Stecker zur Technikbox gezogen. Das System war dadurch mehrere Tage unterversorgt und wurde durch einen aufmerksamen Lehrer wieder in Betrieb genommen. Der dünne Vegetationsträger kann wenig Wasser speichern, dadurch ist das System sehr anfällig gegen Störungen.

Für das System sehr geeignete Pflanzenarten sind: *Anthurium crystallinum* (Kristall-Schweifblume), *Dracaena deremensis* (Drachenbaum), *Dracaena fragrans* (Duftender Drachenbaum), *Ludisia discolor* (Blutständel), *Peperomia clusiifolia* (Zwergpfeffer), *Peperomia obtusifolia* (Magnolienblättriger Zwergpfeffer) und *Tradescantia spathacea* (Dreimasterblume)

Für das System geeignete Arten sind: *Asplenium antiquum* (Schmalblättriger Nestfarn), *Asplenium nidus* (Nestfarn), *Chlorophytum comosum* (Grünlilie), *Epipremnum aureum* (Efeutute), *Philodendron brasil* (Philodendron), *Philodendron scandens* (Philodendron), *Scindapsus pictus* (Silbrig gefleckte Efeutute) und *Spathiphyllum wallisii* (Einblatt).

Tendenziell nicht geeignete Arten sind: *Calathea lancifolia* (Korbmarante) und *Ctenanthe burle-marxii* ‚Amagris‘ (Korbmarante)

Für diese Systemvariante nicht geeignet sind: *Chamaedorea elegans* (Bergpalme), *Schefflera arboricola* (Strahlenaralie), *Syngonium podophyllum* (Purpurtute). Die Arten haben sich über den Zeitraum des Vegetationsmonitorings schlecht entwickelt und sind größtenteils ausgefallen.

3.1.3. Trogsystem im Biologiesaal (B4)



Abbildung 27: Das Trogsystem im Biologiesaal.

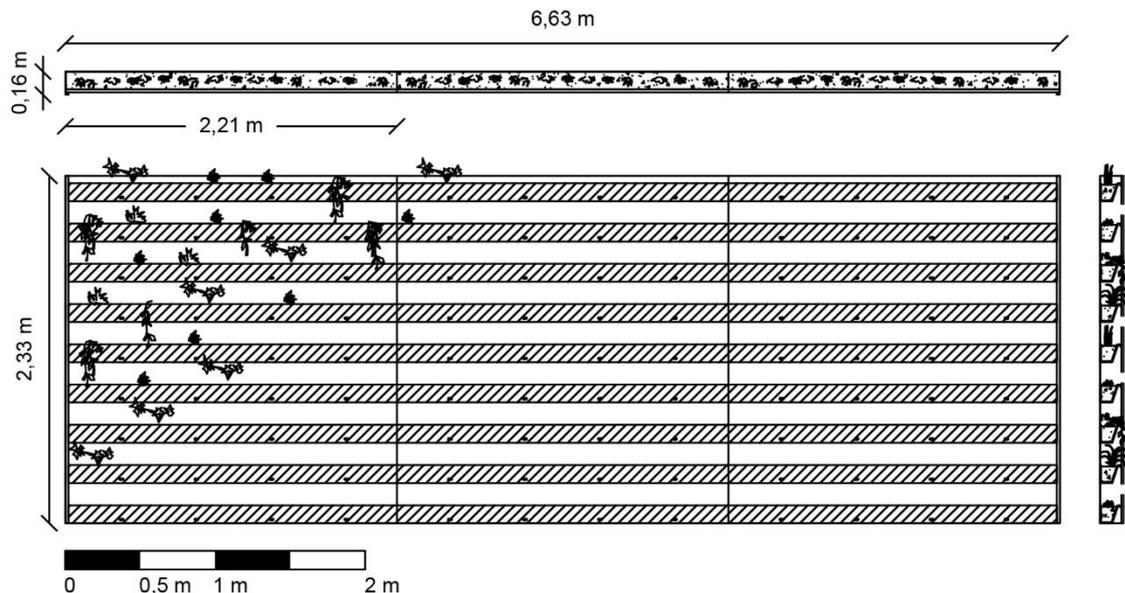


Abbildung 28: Schematische Darstellung des Trogsystems im Biologiesaal [9].

Diese Systemvariante besteht aus in Reihen übereinander montierten Aluminiumtrögen. Im Biologiesaal besteht die Begrünung aus neun Trogreihen mit je 2,21 m. Die Wannen haben an der Vorderseite im Abstand von jeweils 50 cm kleine Ausnehmungen, durch die das überschüssige Wasser in die darunterliegenden Tröge abfließen kann. Die Gesamtfläche der Begrünung beträgt 17,92 m². Die Tröge sind mit einem Vlies ausgelegt, das der Belüftung und Wasserverteilung dient und mit Substrat befüllt ist. Es kamen unterschiedliche Substratvarianten (Ziegelsplitt, Blähton, Blähtongranulat und Dachbegrünungssubstrat) zur Anwendung. Das Fassungsvermögen der Tröge beträgt 132 cm³ pro Laufmeter.

Um- und Neupflanzungen sind in diesem System eher unkompliziert möglich. Pflege und Düngung sind leicht (auch von Laien) durchführbar. Trotz der automatischen Bewässerung waren vor allem zu Beginn Nachjustierungen der Bewässerungszeiten notwendig. Das System ist oben trockener als unten. Dies kann man durch gezielte Pflanzenverwendung ausgleichen.

Zusätzlich wurde ein Schalter zum Deaktivieren der Beleuchtung installiert, da im laufenden Unterricht sehr bald bemerkt wurde, dass die starken LED-Scheinwerfer stören, wenn der Raum abgedunkelt wird, um den Beamer zu betreiben.

3.1.4. Topfpflanzen

Die Innenräume der Schule sind vielfältig mit unterschiedlichen Topfpflanzen bestückt. Diese werden vorwiegend von den Schulwarten gegossen und gepflegt. Es findet sich ein breites Spektrum an gängigen Zimmerpflanzen, von denen (mit Ausnahme von *Ficus benjamini* und *Chamaedorea elegans*) alle aufgrund ihrer Robustheit bestens für die Verwendung in Schulgebäuden geeignet sind.

Durch die Aufstellung der Pflanzen in Fensternähe ist keine künstliche Beleuchtung notwendig.

Bei der Aufstellung der Pflanzen wurde darauf geachtet, dass sie sich nicht in Fluchtwegen befinden. Große Pflanzen wurden gesichert, damit sie nicht umfallen können.

Trotz der großen Menge an Pflanzen (über 100 Pflanzgefäße) werden die Pflanzen von den Schulwarten gegossen und einmal im Jahr gedüngt. Alle Pflanzen befinden sich in gutem Zustand, so dass sie teilweise zu üppig für ihre Gefäße sind und umgetopft werden sollten.

3.1.5. Pflanzbeete im Innenhof

Die Pflanzbeete im Innenhof wurden durch das Engagement einer mittlerweile pensionierten Lehrerin angelegt, das genaue Datum ihrer Entstehung kann nicht ermittelt werden. Die Beete sind aus alten Bahnschwellen gefertigt und mit einer Mischung aus Gehölzen und mehrjährigen Stauden bepflanzt. In einer Beetfläche befindet sich ein kleiner Gartenteich, in einer anderen ein Weidenversteck. Die gärtnerische Planung und Umgestaltung der Pflanzbeete im Innenhof erfolgte während eines mehrtägigen Praxis-Workshops gemeinsam mit Schülerinnen und Schülern im Rahmen des „Talente regional“- FFG-Projekts „Mikroschulklima“ durch die fachliche Begleitung von Dipl.-Ing. Ralf Dopheide e.U. gemeinsam mit dem Büro für nachhaltige Kompetenz B-NK GmbH und dem Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau der BOKU. Die Ränder der Beete in der Mitte des Hofes sind als Sitzbänke ausgestaltet. Der Vorteil dieser Art der Bepflanzung ergibt sich aus der guten Erreich- und somit Manipulierbarkeit. Es ist keine automatische Bewässerung vorgesehen, die Beete werden bei Bedarf mit dem Gartenschlauch gegossen. Rückschnitt und Pflege der Beete werden von den Schulwarten durchgeführt. Die nebenliegende Sportfläche ist durch ein Ballfangnetz abgegrenzt.

3.1.6. Trogsystem an der Außenfassade:



Abbildung 29: Trogsystem im Innenhof.

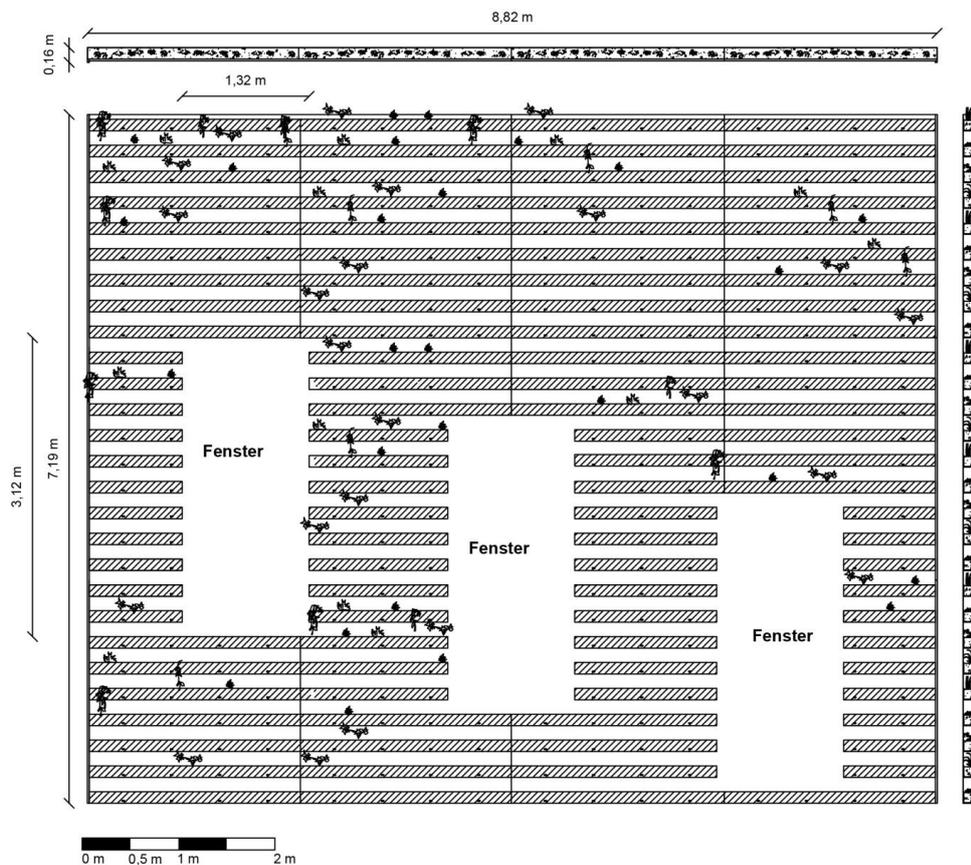


Abbildung 30: Schematische Darstellung Trogsystem.

Die Maße dieser Begrünungsfläche betragen 8,28 m in der Breite und 7,19 in der Höhe, die Tröge beginnen ab dem 2. Stock. Aufgrund der Höhe muss für den Pflegegang im Frühjahr ein Hubsteiger verwendet werden.

Das System besteht aus 27 Reihen Aluminiumtrögen, die mit einem Substrat aus einer Mischung aus Ziegelsplitt und Kompost befüllt sind. Es ist mit einer Mischung unterschiedlicher (teilweise wintergrüner) Staudenarten bepflanzt. Die Stauden wurden als Ballenware gesetzt, bei den Pflegegängen wurde noch zusätzlich angesät.

Die Bepflanzung bietet ein abwechslungsreiches Bild über das ganze Jahr: Nach dem Rückschnitt im Frühling fängt das Pink der Bergenienblüte den Blick, im Frühsommer blühen Schafgarbe und Löwenmaul. Im Herbst färben sich die Blätter der Bergenie rot und die Blühstände der Hohen Fetthenne treten hervor.

Die Bewässerung erfolgt über Tropfschläuche in zwei Kreisläufen (links und rechts). Die Steuerung der Magnetventile erfolgt mittels Bewässerungscomputer. An Tagen unter +5 °C wird die Bewässerung durch einen Frostwächter unterbunden.

Im Winter 2016/17 kam es durch eine Schadstelle an der Bewässerung im linken Kreislauf zu großen Ausfällen auf dieser Seite. Mit den Reparaturarbeiten musste abgewartet werden, bis der Hubsteiger für den Pflegegang im Frühjahr veranschlagt war.

Als Ersatzpflanzungen wurden unter anderem Stecklinge von Sedum-Arten verwendet und Saatgut eingebracht. Das Saatgut hat sich gut in der Fassade etabliert und somit kann gesagt werden, dass

Ansaat eine kostengünstige, einfache Lösung zum Lückenschluss im Aluminiumtrogsystem darstellt. Auch die Sedumstecklinge sind einwandfrei angewachsen.

Flugsamen können sich in den Trögen gut etablieren. Wenn das etwas „struppigere“ Erscheinungsbild im Herbst nicht gewünscht ist, müssen zwei Pflegegänge im Jahr veranschlagt werden.

Im Aluminiumtrogsystem rinnt das Wasser von oben nach unten durch die Überlauföffnungen. Das System ist also unten feuchter als oben. Dies wurde mit Pflanzenarten, die unterschiedliche Ansprüche haben, ausgeglichen (Sedum in den oberen Reihen, Bergenien in den unteren).

Für das System geeignete Pflanzenarten sind: *Achillea millefolium* (Schafgarbe), *Allium schoenoprasum* (Schnittlauch), *Antirrhinum majus* (Löwenmaul), *Anthemis tinctoria* (Färberkamille), *Bergenia cordifolia* (Bergenie), *Calamintha nepeta* 'Triumphator' (Bergminze), *Cymbalaria muralis* (Zymbelkraut), *Eruca sativa* (Rucola), *Geranium cantabrigiense* 'Biokova' (Cambridge Storchschnabel), *Geranium makrorrhizum* (Balkan Storchschnabel), *Lysimachia nummularia* (Pfennigkraut), *Sanguisorba minor* (Wiesenknopf), *Salvia officinalis* (Salbei), *Sedum floriferum* 'Weihenstephaner Gold' (Gold Fetthenne), *Sedum reflexum* (Tripmadam), *Sedum spurium* (Kaukasus-Fetthenne), *Sedum telephium* (Hohe Fetthenne), *Teucrium chamaedris* (Gamander).

Für das System wenig geeignete Pflanzen sind: *Dianthus plumarius* 'Greystone' (Feder-Nelke), *Origanum vulgare* (Oregano), *Phlox subulata* (Polster Phlox), *Salvia argentea* (Silber Salbei), *Stachys byzantina* 'Silver Carpet' (Woll-Ziest). Die Ausfälle dieser Arten wurden vor allem nach dem Winter festgestellt.

3.1.7. Wandgebundenes Kassettensystem

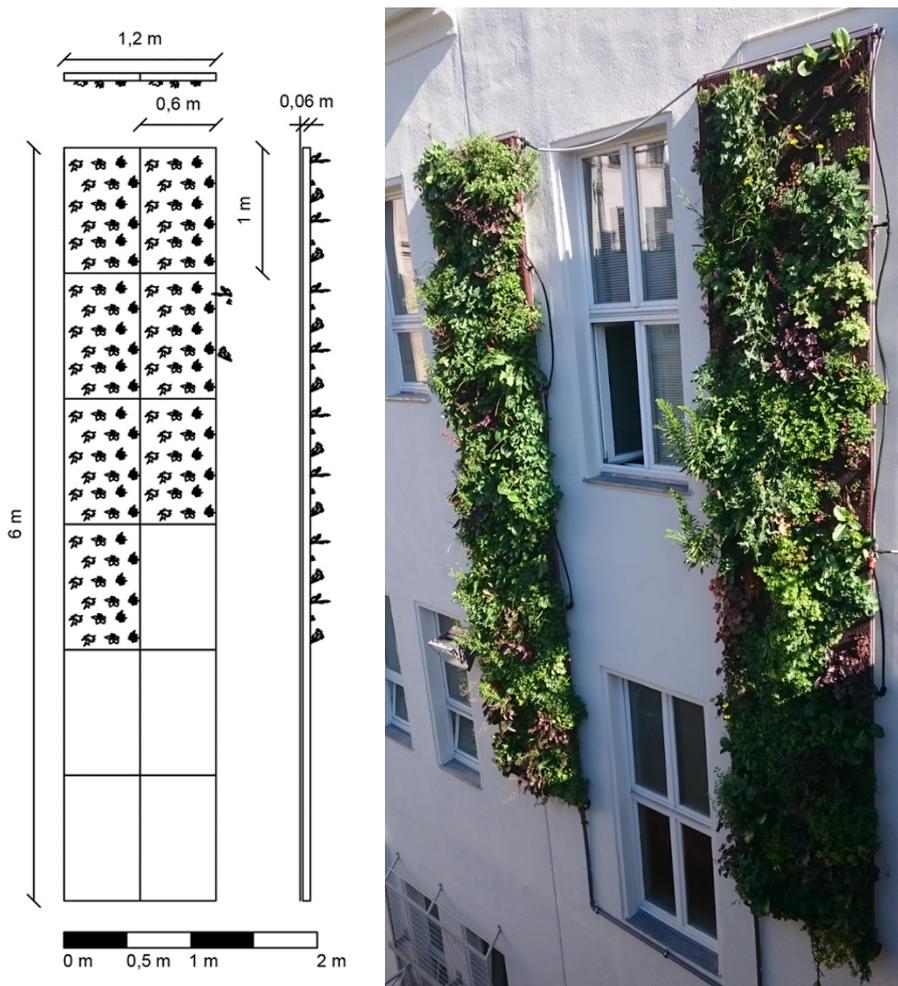


Abbildung 31: Links: Schematische Darstellung; Rechts: Foto Kassettensystem

Diese Begrünungsform besteht aus in einem substratgefüllten, aus Aluminium bestehenden Pflanzkorb, der mit einem Hinterlüftungsspalt von 4 cm an der Fassade befestigt ist. Ein Element hat die Abmessungen 1 m x 0,6 m x 0,06 m und bietet Platz für 18 Pflanzen in eigens dafür vorgesehenen Ausnehmungen. Die beiden Teilflächen mit einer Gesamtfläche von 14,40 m² befinden sich an der Südseite des Innenhofes.

Da das System an der Fassade in der Höhe des zweiten Stockwerks angebracht ist, ist dieses nicht direkt zugänglich. Jegliche Pflege- und Wartungsarbeiten müssen mithilfe eines Hubsteigers durchgeführt werden.

Die Bewässerung erfolgt über ein automatisches Tropfbewässerungssystem, das mit einem Bewässerungscomputer gesteuert ist. Ein Frostsensoren unterbricht die Bewässerung bei weniger als +5°C. Die Düngung mit Flüssigdünger erfolgt automatisch über das Bewässerungssystem. Die Steuerung ist bodennah im Innenhof erreichbar, Einstellungen der Bewässerungsintervalle können über eine App durchgeführt werden, wenn eine Internetverbindung vorhanden ist.

An der Außenfassade, Richtung Turnsaaldach wurde das Kassettensystem in Kombination mit Photovoltaik installiert. Es hat eine Fläche von 3,6 m² (siehe auch Tabelle 1).

Im Projektzeitraum kamen zwei unterschiedliche Bewässerungscomputer zum Einsatz: Ein batteriebetriebenes Gerät, welches immer wieder zu Problemen führte, und ab Juni 2018 ein Bewässerungscomputer mit W-lan Verbindung, der über eine App kontrolliert und gesteuert werden kann. Dieser Computer ist mit der Wetterstation des Flughafens Wiens verbunden und reguliert die Wassergaben nach den jeweiligen Wetterverhältnissen. Das neue System bietet auch die Möglichkeit, Fehlermeldungen per SMS oder Email zu versenden.

Aufgrund der oftmaligen Bewässerungsausfälle hat sich das Pflanzenspektrum im Projektzeitraum stark verändert. Pflanzen mit hoher Stresstoleranz sind *Sedum*-Arten, *Bergenia cordifolia*, *Heuchera*-Arten und *Geranium*.

3.1.8. Extensives Gründach

Das Turnsaaldach auf dem GRG 7 hat die Abmessungen 22 m x 12 m. Im Zuge der Sanierung der Dachabdichtung wurde ein extensives Gründach angelegt. Die Begrünungsfläche beträgt insgesamt ca. 184 m² wobei ca. 66 m² davon mit PV überdacht sind.

Der Aufbau der Vegetationsfläche besteht aus 2,5 cm Festkörperdrainage mit aufkaschiertem Filtervlies und einer Substratschicht aus leichtem, extensiven Dachsubstrat in Stärken von 5 bis 20 cm. Als Vegetationsform wurde eine pannonische Trockenrasenflora ausgewählt. Zusätzlich zu den unterschiedlichen Substratstärken wurde Strukturelemente aus Holz und Steinen eingebracht und Kalkschotter und Sandlinsen angelegt, um die Biodiversität zu fördern. Rund um die Vegetationsfläche befindet sich ein Brandschutzstreifen aus Kies mit 1 m Breite.

Ganz der pannonischen Flora entsprechend, verändert sich das Gründach über das Jahr. Im Frühling ist es frisch und grün und trocknet bei Hitze im Sommer. Im Herbst, wenn die Stressperiode vorbei ist, treiben die Pflanzen wieder neu aus.

Je höher das Substrat, umso mehr Wasser wird für Trockenperioden gespeichert. Im Schatten trocknen die Fläche weniger schnell aus. Auch die eingebrachten Strukturen erzeugen diesen Effekt.

Bewässerte und beschattete Stellen dienen als „Breeding Spots“ von denen die Wiederverbreitung der Pflanzen ausgehen kann.

Von den ausgebrachten Arten haben sich folgende etabliert: *Alyssum alyssoides* (Kelch-Steinkraut), *Alyssum montanum* (Berg Steinkraut), *Anthoxanthum odoratum* (Gewöhnliches Ruchgras), *Carex caryophylla* (Frühlings-Segge), *Cerastium glutinosum* (Kleb-Hornkraut), *Cerastium pumilum* (Eigentliches Niedrighornkraut), *Draba verna* (Hungerblümchen), *Festuca ovina* (Echter Schaf-Schwingel), *Festuca valesiaca* (Walliser Schafschwingel), *Genista pilosa* (Behaarter Ginster), *Heinaria glabra* (Kahles Bruchkraut), *Hieracium pilosella* (Kleines Habichtskraut), *Iris pumila* (Zwerg-Schwertlilie), *Petrorhagia saxifraga* (Steinbrech-Felsennelke), *Potentilla argentea* (Silber-Fingerkraut), *Salvia nemorosa* (Steppen-Salbei), *Sedum acre* (Scharfer Mauerpfeffer), *Sedum album* (Weiße Fetthenne), *Sedum lydium* (Türkischer Mauerpfeffer), *Sedum reflexum* (Tripmadam), *Sedum sexangulare* (Milder Mauerpfeffer), *Silene vulgaris* (Leimkraut), *Veronica praecox* (Früher Ehrenpreis).

3.1.9. Übersicht über die Komplexität der Einzelkomponenten der unterschiedlichen Begrünungssysteme und Einschätzung des Wartungsaufwandes

Tabelle 2 fasst die unterschiedlichen Einzelkomponenten und deren Wartungsaufwand zusammen. Generell gilt, umso weiter rechts das System in der Tabelle angeführt ist, desto wartungsaufwändiger ist es. So ist die Gießkanne für die Bewässerung das einfachste Wartungswerkzeug und der Tropfschlauch mit Umlaufpumpe am aufwändigsten zu warten. In der 1. Zeile trifft das nicht zu. Es werden zuerst Wand- und Fassaden-Systeme beschrieben. Hier ist bei Blumentöpfen und am Boden stehenden Trögen die Wartung am einfachsten. Das wandgebundene Vliessystem ist am aufwändigsten. Rechts vom wandgebundenen Vliessystem werden die installierten Systeme am Turnsaaldach beschrieben. Die Vegetationsträger „extensives Gründach“ (ebenfalls 1. Zeile) sind einfach in der Wartung. Wenn die Grünelemente in Verbindung mit Photovoltaik stehen (rechts davon), ist die Wartung aufwändig.

Tabelle 2: Zusammenfassung, Vergleich und Übersicht zur Bedienbarkeit der Begrünungselemente und deren Systemkomponenten

Vegetationsträger:	Blumentöpfe/am Boden stehende Tröge <ul style="list-style-type: none"> • Einfaches Ein- und Umpflanzen der Pflanzen • Vertrautes System 	Wandgebundenes Trogsystem <ul style="list-style-type: none"> • Ein- und Umpflanzungen relativ einfach • System ähnlich wie Blumenkistels • Umpositionierung des Systemes aufwändig 	Wandgebundenes Kassettensystem <ul style="list-style-type: none"> • Ein- und Umpflanzungen aufwändiger • Pflanzen 90° zur Wand gedreht • Umpositionierung des Systemes aufwändig 	Wandgebundenes Vliesssystem <ul style="list-style-type: none"> • Ein- und Umpflanzungen aufwändiger • Umpositionierung des Systemes aufwändig • Kaum Resilienz aufgrund des dünnen Vegetationsträgers 	extensives Gründach <ul style="list-style-type: none"> • Einfaches Einbringen der Pflanzen, Ansatz möglich • Pflege 1x im Jahr (Entfernen von Gehölzkeimlingen) ggf. Mahd • Nur temporäres Betreten möglich, kein Aufenthaltsraum 	Grünelemente in Verbindung mit Photovoltaik (PV) <ul style="list-style-type: none"> • Unbedingt Verschattung durch Pflanzenteile verhindern • Pflege aufwändig, da schlechte Erreichbarkeit der Flächen unter/ hinter der PV
Bewässerung:	Gießkanne <ul style="list-style-type: none"> • Einfache Handhabung • Zeitaufwändig 	Gartenschlauch <ul style="list-style-type: none"> • Einfache Handhabung • Zeitaufwändig 	Tropfschlauch mit Zu und Abfluss <ul style="list-style-type: none"> • Regelmäßige Kontrolle der Tropfschläuche erforderlich 	Tropfschlauch mit Umlaufpumpe <ul style="list-style-type: none"> • Regelmäßige Kontrolle der Tropfschläuche erforderlich • Regelmäßige Kontrolle der Umlaufpumpe erforderlich • Reinigung des Wassertanks und der Pumpenfilter bei Verschmutzung notwendig. 		
Düngung:	Depotdünger <ul style="list-style-type: none"> • Manuelles Ausstreuen 1-2 mal pro Jahr 	Flüssigdünger mit Gießkanne <ul style="list-style-type: none"> • Alle 2 Monate oder mit jedem Gießvorgang • Zeitaufwändig 	Flüssigdünger mit automatischem Düngemischer <ul style="list-style-type: none"> • Kontrolle des Systems • Wechsel des Düngemittel tanks 	Dünger über Wassertank <ul style="list-style-type: none"> • Komplexe Dosierung (Feinwaage erforderlich) • Düngemittelbeigabe immer wenn Wassertank leer 		
Beleuchtung:	natürliches Licht <ul style="list-style-type: none"> • Positionierung der Pflanzen in der Nähe von Fensterflächen notwendig 	Leuchtkörper mit konventioneller Lampenfassung <ul style="list-style-type: none"> • unkomplizierter Austausch von Leuchtmitteln 	LED-Leiste oder Led-Scheinwerfer <ul style="list-style-type: none"> • ganzer Leuchtkörper muss bei Fehlfunktion ausgetauscht oder repariert werden 			
Steuerung:	manuell <ul style="list-style-type: none"> • Personen müssen vor Ort sein • Erkennen von Handlungsbedarf notwendig 	mechanische Zeitschaltuhren <ul style="list-style-type: none"> • Leichte Handhabung • Häufige Nachjustierung notwendig (v.a. nach Stromunterbrechung) • gehen schnell kaputt 	digitale Zeitschaltuhren <ul style="list-style-type: none"> • Komplexität der Handhabung modellabgänglich • Pufferspeicher bei Stromunterbrechung • Minderwertige Haltbarkeit je nach Modell 	Bewässerungscomputer <ul style="list-style-type: none"> • Komplexität der Handhabung modellabgänglich • Pufferspeicher bei Stromunterbrechung 	Bewässerungscomputer mit App <ul style="list-style-type: none"> • Übersichtliches Interface auf Computer oder Mobiltelefon zur Überwachung und Einstellungen • Fehlermeldungen werden angezeigt • Wetterdaten in die Steuerung integrierbar 	
Zugänglichkeit:	ohne Hilfsmittel erreichbar <ul style="list-style-type: none"> • Erreichbarkeit immer gegeben • auch Kinder können mithelfen 	Haushaltsleiter <ul style="list-style-type: none"> • Erreichbarkeit immer gegeben 	hohe Leiter <ul style="list-style-type: none"> • Erreichbarkeit immer gegeben • höherer Aufwand und 2 Personen erforderlich 	Hebebühne <ul style="list-style-type: none"> • Hebebühne muss Verfügbar sein • Absperren der Standflächen notwendig • Zufahrtsmöglichkeit muss gegeben sein 		

3.2. Ergebnisse hygrothermischer Parameter

Die Auswertung der Messungen hat gezeigt, dass die Luftfeuchtigkeit aufgrund der Innenraumbegrünung erhöht wird. Abbildung 32 und Abbildung 33 zeigen die Verteilung der Messwerte im Behaglichkeitsdiagramm von der begrünten Klasse und der Referenzklasse. Der häufigste Grund für nicht behagliches Raumklima ist die Raumüberhitzung. Im begrünten Klassenraum sind 10 % aller Messwerte über 27°C, in der Referenzklasse 12 %. Es konnte keine Kühlung aufgrund von Innenraumbegrünung festgestellt werden.

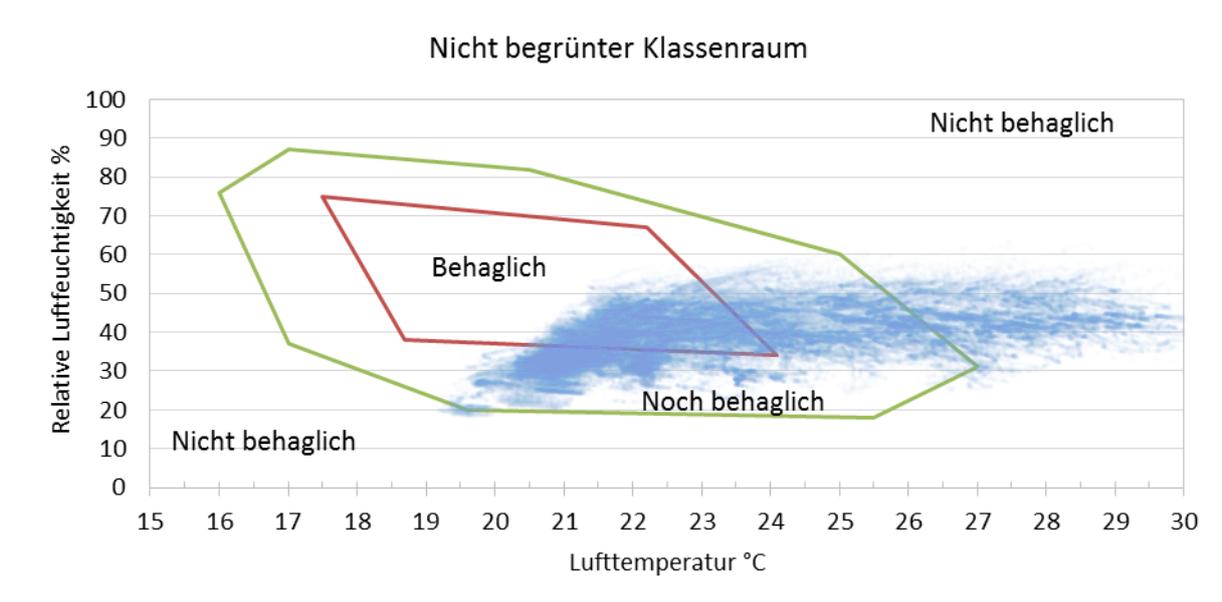


Abbildung 32: Verteilung der Messwerte im nicht begrünten Klassenraum, zwischen 2. Feb. 2016 und 28. Jun. 2018.

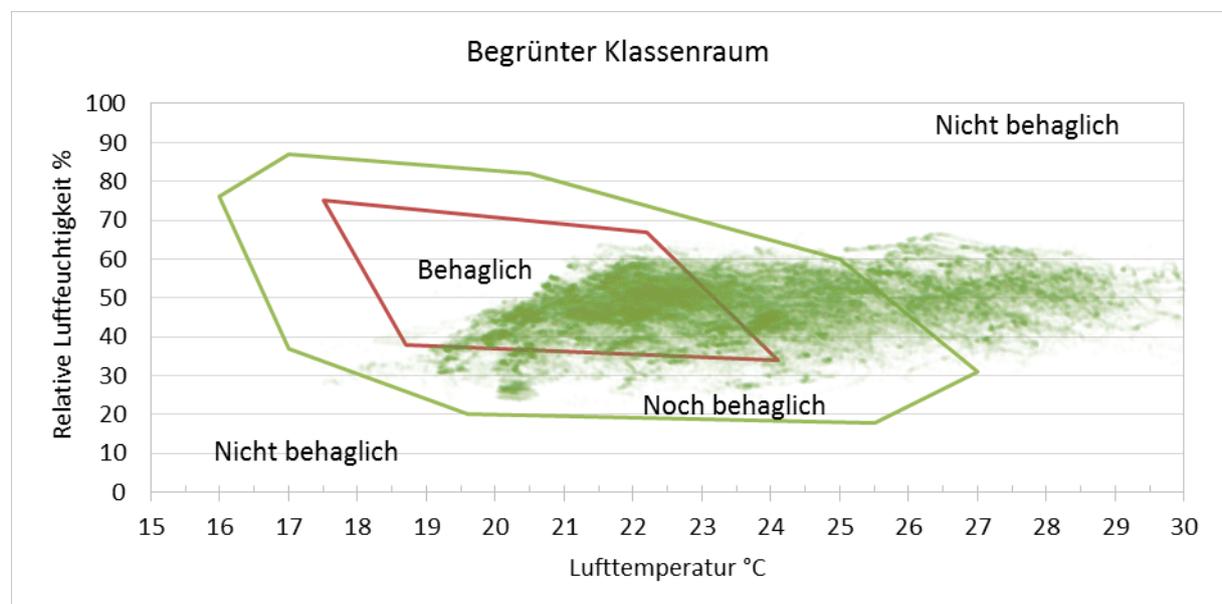


Abbildung 33: Verteilung der Messwerte im begrünten Klassenraum, zwischen 2. Feb. 2016 und 28. Jun. 2018.

Während der kalten Jahreszeit 1. Oktober bis 31. März ist der häufigste Grund für nicht behagliches Raumklima zu niedrige relative Luftfeuchtigkeit (siehe Abbildung 34 und Abbildung 35). Die erhöhte relative Luftfeuchtigkeit aufgrund der Innenraumbegrünung führt zu behaglicheren Raumklima.

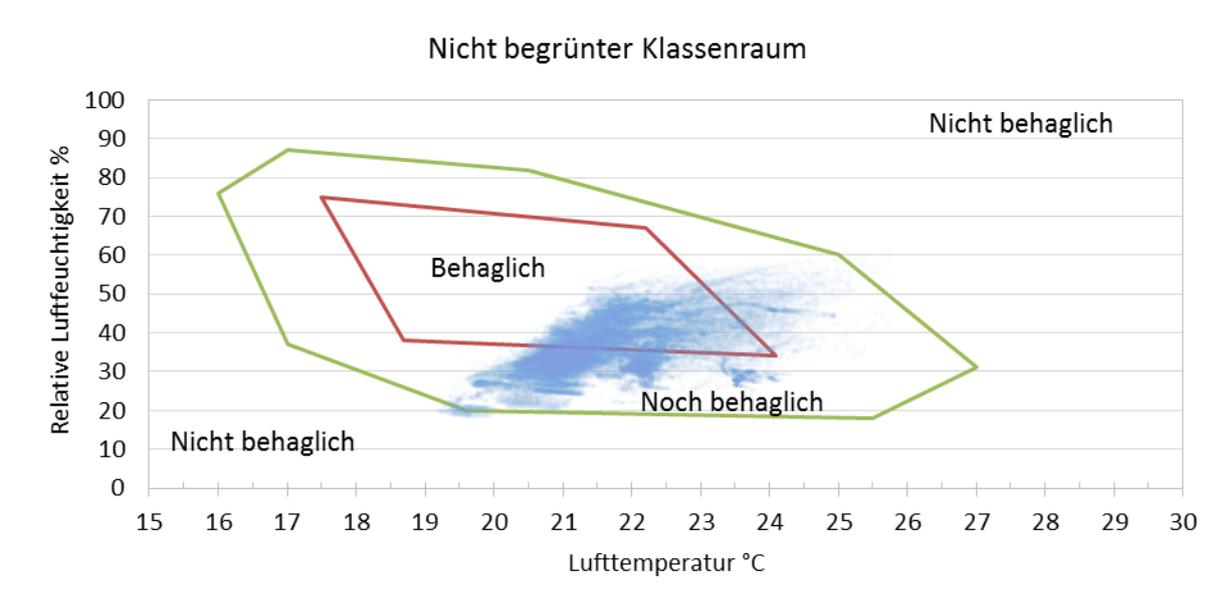


Abbildung 34: Verteilung der Messwerte im nicht begrünten Klassenraum zwischen 1. Oktober und 31. März in den Jahren 2016, 2017 und 2018.

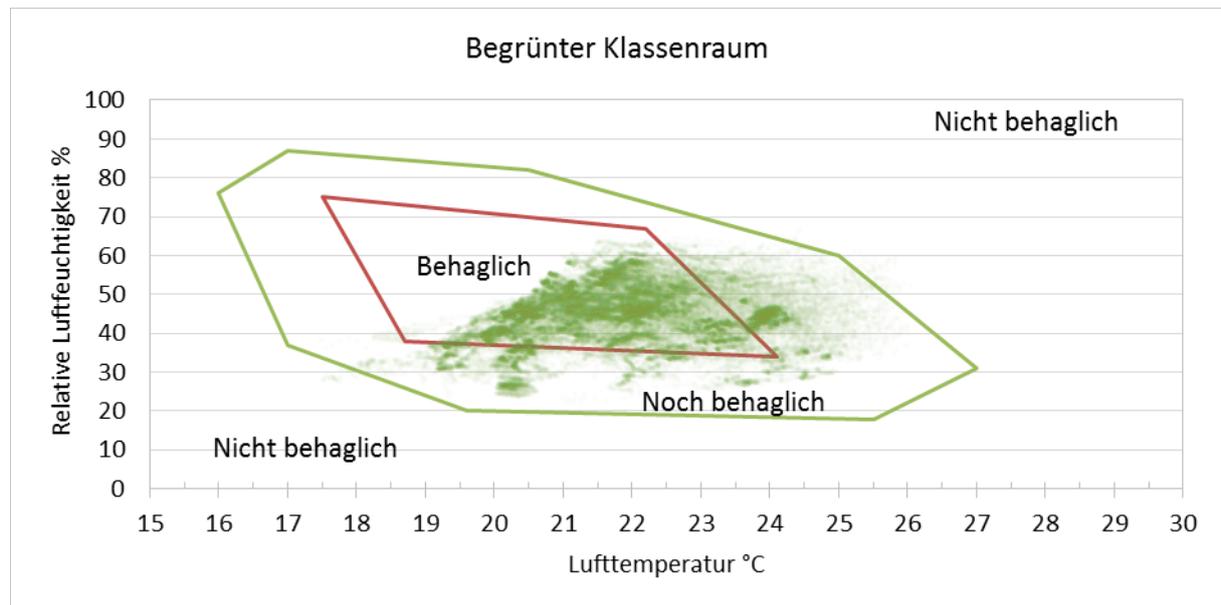


Abbildung 35: Verteilung der Messwerte im begrünten Klassenraum zwischen 1. Oktober und 31. März in den Jahren 2016, 2017 und 2018.

Die Häufigkeit der gemessenen Werte je Behaglichkeitsbereich wird in Abbildung 36 für die kalte Jahreszeit dargestellt. Es ist ersichtlich, dass im nicht begrünten Klassenraum das hygrothermische Raumklima für 42 % der Zeit behaglich war. Mehr als die Hälfte (58 %) der Zeit waren die hygrothermischen Verhältnisse nicht im optimalen Bereich. Der Grund dafür ist meistens die zu trockene Luft. Gerade im Winter sind die Schleimhäute bei trockener Luft besonders angreifbar und das Risiko zu erkranken steigt [44]. Die Innenraumbegrünung entschärft diese Situation. Im begrünten Klassenraum ist in 71 % des Messzeitraums das hygrothermische Raumklima behaglich.

Das ergibt eine Erhöhung der Behaglichkeitsdauer im selben Zeitraum um über 69 % (berechnet mit 71 % zu 42 %).

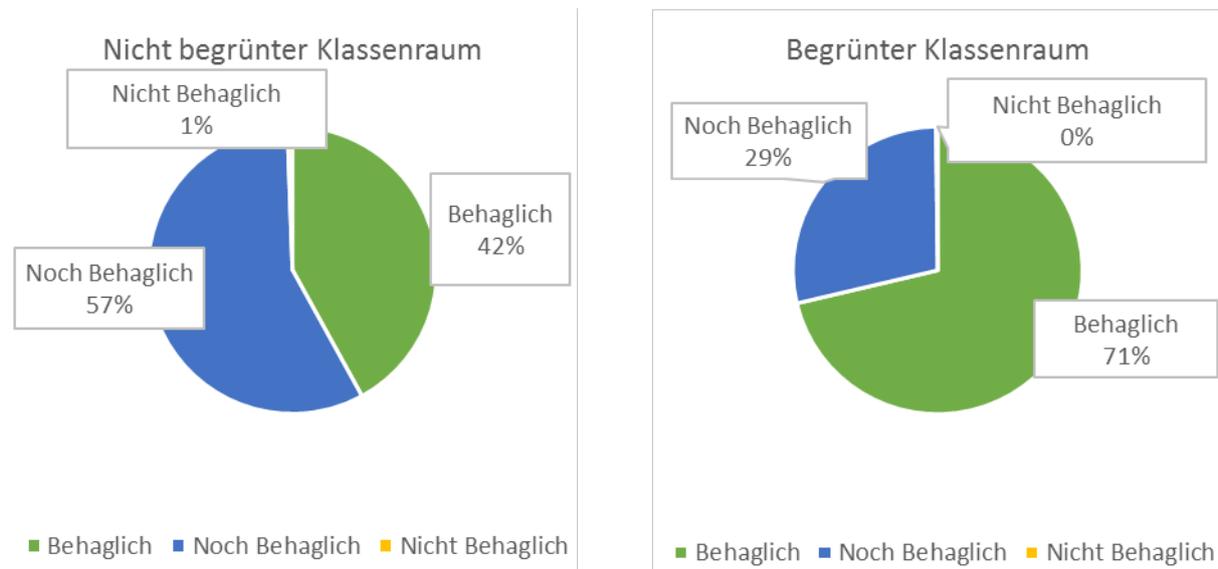


Abbildung 36: Häufigkeiten der unterschiedlichen Behaglichkeitsstufen im nicht begrünter Klassenraum (links) und im begrünter Klassenraum (rechts), zwischen 1. Oktober und 31. März in den Jahren 2016, 2017 und 2018.

Die gemessenen Werte im Biologieraum lassen sich nicht direkt mit einer Referenzklasse vergleichen. Es gibt in dem Gebäude keine Klasse mit derselben Größe und Ausrichtung und der Raum wird von der ganzen Schule benutzt. Die hygrothermische Behaglichkeit des Biologieraumes wurde auch detailliert untersucht und ausgewertet. Für denselben Zeitraum (wie für Abbildung 36 angegeben) sind 73 % der gemessenen Werte im behaglichen Bereich. Keiner der Messwerte ist dem nicht behaglichen Bereich zuzuordnen.

3.3. Schimmelsporenbelastung aufgrund von Innenraumbegrünung

3.3.1. Messergebnisse

In Tabelle 3, und Tabelle 5 sind die Ergebnisse repräsentativer Messungen dargestellt. Die Konzentrationen mesophiler bzw. thermophiler Pilze werden in der Einheit KBE/m³ (koloniebildende Einheiten pro Kubikmeter) angegeben.

Tabelle 3: Raumdatenklimadaten und Sporenkonzentration während den Messungen im Juni 2016

	Luft-Temperatur [°C]	Relative Luftfeuchte [%]	Konzentration mesophiler Pilze [KBE/m ³]	Konzentration thermophiler Pilze [KBE/m ³]	Identifizierung des Pilzartenspektrums (mesophile Pilze)
Raum 318 (begrünt)	24,9	51	160	50 ^a	Penicillium spp. ca. 55% Cladosporium spp. ca. 30% Sonstige ^b ca. 15%
Raum 319 (Referenz)	25,0	38	150	100	Cladosporium spp. ca. 45% Penicillium spp. ca. 40% Aspergillus versicolor ca. 5% Wallemia sebi ca. 10%
Außenluft Straße	20,4	45	1000	50 ^a	Cladosporium spp. ca. 75% Penicillium spp. ca. 20% Sonstige ^b ca. 5%
Raum 209 (begrünt)	25,1	50	150	n.b.	Penicillium spp. ca. 60% Cladosporium spp. ca. 25% Aspergillus versicolor ca. 5% Hefen ca. 5% Sonstige ^b ca. 5%
Außenluft Schulhof	21,1	37	1100	110	Cladosporium spp. ca. 55% Penicillium spp. ca. 35% Aspergillus ochraceus, Aspergillus niger und Alternaria spp. zusammen ca. 5% Sonstige ^b ca. 5%

^a Konzentrationsangabe semiquantitativ

^b Mit der angewandten Methodik werden bei einigen Pilzarten nur Pilzkolonien ohne Sporen (Mycelia sterilia) erfasst. Eine Art- oder Gattungsbestimmung wäre mit einem unverhältnismäßig hohen Aufwand verbunden.

n.b. Konzentration unterhalb der Bestimmungsgrenze

Tabelle 4: Raumdaten Klimadaten und Sporenkonzentration während den Messungen am 6. Feb. 2017

Raum / Messstelle	Luft-Temperatur [°C]	Relative Luftfeuchte [%]	Konzentration mesophiler Pilze [KBE/m ³]	Konzentration thermophiler Pilze [KBE/m ³]	Identifizierung des Pilzartenspektrums (mesophile Pilze)
Raum 318 (begrünt)	20,1	39	210	n.b.	Penicillium spp. ca. 95% Cladosporium spp. ca. 5%
Raum 219 (Referenz)	20,8	32	50	n.b.	Penicillium spp. ca. 50% Aspergillus niger ca. 15% Aspergillus versicolor ca. 15% Sonstige ca. 20%
Außenluft Straße	5,3	88	150	90	Cladosporium spp. ca. 55% Rhizopus sp. ca. 10% Penicillium spp. ca. 10% Aspergillus niger ca. 5% Sonstige ca. 20%

Tabelle 5: Raumdaten Klimadaten und Sporenkonzentration während den Messungen am 15. Feb. 2017

Raum / Messstelle	Luft-Temperatur [°C]	Relative Luftfeuchte [%]	Konzentration mesophiler Pilze [KBE/m ³]	Konzentration thermophiler Pilze [KBE/m ³]	Identifizierung des Pilzartenspektrums (mesophile Pilze)
Raum 209 (begrünt)	20,5	44	40	n.b.	Heterogen und unauffällig
Außenluft Schulhof	5,6	82	560	60	Cladosporium spp. ca. 30% Aspergillus versicolor ca. 10% Penicillium spp. ca. 5% Aspergillus niger und Wallemia sebi zusammen ca. 5% Sonstige ca. 50%

3.3.2. Bewertung der Schimmelsporenmessungen

Zur Beurteilung der Ergebnisse werden die Konzentrationen und Artenzusammensetzungen im Innenraum mit jenen der Außenluft verglichen und bewertet. In Tabelle 6 werden die in [45] definierten Grenzen aufgelistet. Nach Prüfung der einzelnen Werte nach den Grenzwerten in Tabelle 6 kann mit großer Sicherheit festgestellt werden, dass keine Innenraumquelle von Schimmelpilzsporen existiert.

Tabelle 6: Bewertungshilfe für kultivierbare Schimmelpilze, nach [45]

Innenluft-Parameter	Innenraumquelle unwahrscheinlich	Innenraumquelle nicht auszuschließen	Innenraumquelle wahrscheinlich
Cladosporium sowie andere Pilzgattungen, die in der Außenluft erhöhte Konzentrationen erreichen können	Wenn die KBE/m ₃ einer Gattung in der Innenluft unter dem 0,7 (bis 1,0)-fachen der Außenluft liegen	Wenn die KBE/m ₃ einer Gattung in der Innenluft unter dem 1,5 ± 0,5-fachen der Außenluft liegen	Wenn die KBE/m ₃ einer Gattung in der Innenluft über dem 2-fachen der Außenluft liegen
Summe der KBE der untypischen Außenluftarten	Wenn die Differenz zwischen der KBE-Summe Innenraumluft minus Außenluft der untypischen Außenluftarten nicht über 150 KBE/m ₃ liegt	Wenn die Differenz zwischen der KBE-Summe Innenraumluft minus Außenluft der untypischen Außenluftarten nicht über 500 KBE/m ₃ liegt.	Wenn die Differenz zwischen der KBE-Summe Innenraumluft minus Außenluft der untypischen Außenluftarten über 500 KBE/m ₃ liegt.
eine Gattung (Summe der KBE aller zugehörigen Arten) der untypischen Außenluftarten	Wenn die Differenz zwischen der KBE-Summe Innenraumluft minus Außenluft der Gattung nicht über 100 KBE/m ³ liegt	Wenn die Differenz zwischen der KBE-Summe Innenraumluft minus Außenluft der Gattung nicht über 300 KBE/m ₃ liegt	Wenn die Differenz zwischen der KBE-Summe Innenraumluft minus Außenluft der Gattung über 300 KBE/m ₃ liegt
eine Art der untypischen Außenluftarten mit gut flugfähigen Sporen	Wenn die Differenz zwischen Innenraumluft und Außenluft nicht über 50 KBE/ m ³ liegt	Wenn die Differenz zwischen Innenraumluft und Außenluft nicht über 100 KBE/m ₃ liegt	Wenn die Differenz zwischen Innenraumluft und Außenluft über 100 KBE/m ₃ liegt
eine Art der untypischen Außenluftarten mit geringer Sporenfreisetzungsrate	Wenn die Differenz zwischen Innenraumluft und Außenluft nicht über 30 KBE/m ³ liegt	Wenn die Differenz zwischen Innenraumluft und Außenluft nicht über 50 KBE/m ³ liegt	Wenn die Differenz zwischen Innenraumluft und Außenluft über 50 KBE/m ³ liegt

a Indiz für Quellensuche

b Indiz für kurzfristige intensive Quellensuche

A Konzentration in der Außenluft in KBE/m³

I Konzentration in der Innenraumluft in KBE/m³

typ A typische Außenluftarten bzw. -gattungen (wie z.B. *Cladosporium*, sterile Myzelien, ggf. Hefen, ggf. *Alternaria*, ggf. *Botrytis*)

untyp A untypische Außenluftarten bzw. -gattungen (wie z.B. Pilzarten mit hoher Indikation für Feuchteschäden wie *Acremonium* sp., *Aspergillus versicolor*, *A. penicilloides*, *A. restrictus*, *Chaetomium* sp., *Phialophora* sp., *Scopulariopsis brevicaulis*, *S. fusca*, *Stachybotrys*

chartarum, *Tritirachium* (*Engyodontium*) *album*, *Trichoderma* sp.)

∑ untyp A Summe der untypischen Außenluftarten (andere als Typ A)

Euntyp A eine Art, die untypisch ist in der Außenluft und gut flugfähige Sporen besitzt

Euntyp AGS eine Art, die untypisch ist in der Außenluft und Sporen mit geringer Flugfähigkeit besitzt, z.B. *Phialophora* sp., *Stachybotrys chartarum*

Euntyp G eine Gattung, die untypisch ist in der Außenluft

Die gemessenen Konzentrationen in der Raumluft lagen sowohl bei den begrünten Klassen als auch bei der nicht begrünten Klasse unter den Referenzwerten der Außenluft. Weiters wurden keine relevanten Mengen an Sporen thermophiler Pilze nachgewiesen. Abgesehen von den Vergleichen mit der Außenluft wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen begrünten und nicht begrünten Räumen festgestellt. Eine Innenraumquelle für Schimmelsporen ist deshalb nach [45] als

„unwahrscheinlich“ einzustufen. Die relative Luftfeuchtigkeit ist in den begrünten Klassenräumen zwar höher, wurde aber innerhalb von drei Jahren nur selten über 60 % gemessen (siehe Abbildung 33).

3.4. Auswirkungen von Innenraumbegrünung auf die Staubkonzentration

Die Konzentration der unterschiedlichen Feinstaubgrößen wird in Abbildung 37 bis Abbildung 39 gezeigt. Es sind Mittelwerte aus den in Kapitel 2.6 erklärten Untersuchungen.

Es wurden 245 Stunden in der nicht begrünten und 467 Stunden in der begrünten Klasse gemessen. Die Feinstaubgrößen PM₁ bis PM₁₀ wurden erfasst. In den folgenden Abbildungen wird auch die Konzentration von PM₁₀ in der Außenluft für den jeweils selben Zeitraum dargestellt. Sie wurde nicht vom Projektkonsortium gemessen, sondern von der Wiener Umweltschutzabteilung – MA 22 Bereich für Luftreinhaltung. Diese führt Messungen in Wien in der Taborstraße, in der Kendlerstraße und beim AKH durch. Es wurden die Mittelwerte der unterschiedlichen Messstationen berechnet und sie werden für den jeweiligen Zeitraum in den Diagrammen mit angegeben.

Abbildung 37 umfasst eine Messdauer von insgesamt ca. 164 Stunden im begrünten Raum und ca. 280 Stunden im nicht begrünten Raum.

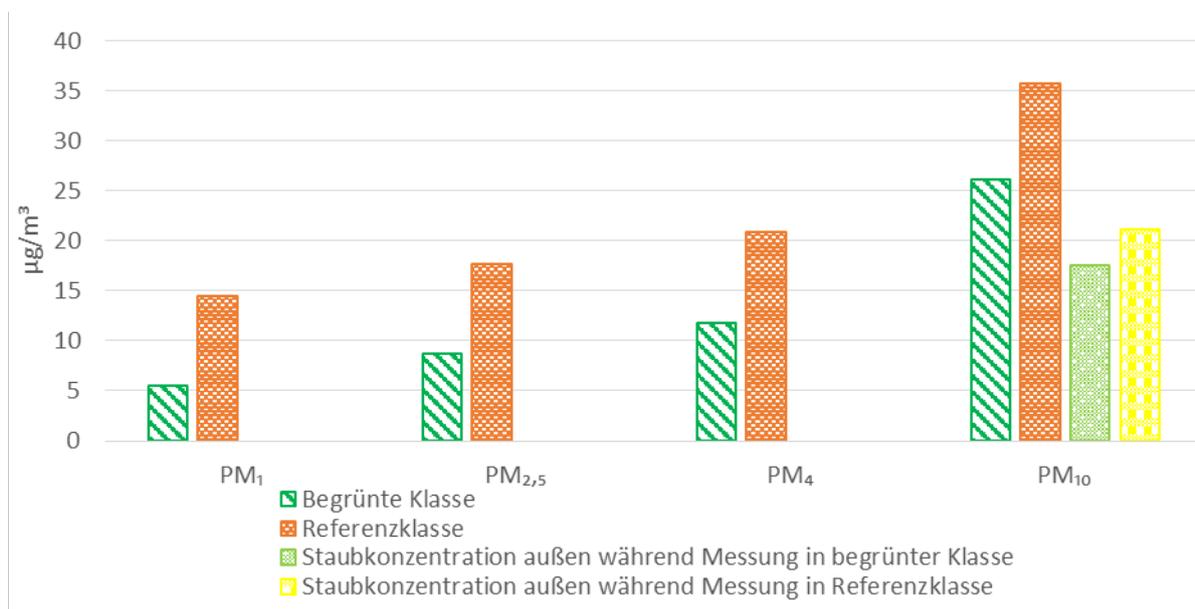


Abbildung 37: Konzentration der unterschiedlichen Feinstaubgrößen im begrünten und im nicht begrünten Klassenraum. Mittelwerte aller Messwerte

In Abbildung 37 wird gezeigt, dass die Konzentrationen aller untersuchten Feinstaubgrößen in der begrünten Klasse während der gesamten Messung geringer waren, als in der nicht begrünten Klasse. Allerdings wurde in der begrünten Klasse zu einem Zeitraum gemessen, in dem auch die Feinstaubkonzentration der Außenluft geringer war. Nur unter der Betrachtung von Abbildung 37 kann nicht gesagt werden, ob die Innenraumbegrünung oder nur die Außenluft für die geringe

Feinstaubkonzentration verantwortlich ist.

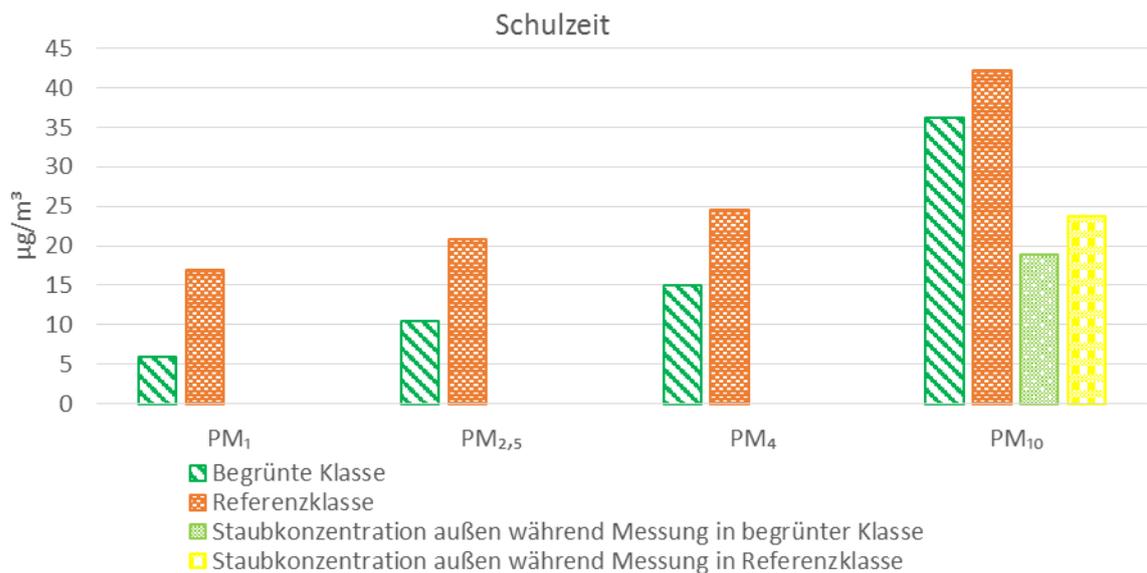


Abbildung 38: Konzentration der unterschiedlichen Feinstaubgrößen im begrüntem und im nicht begrüntem Klassenraum. Mittelwerte der Messwerte während Unterricht oder Pausen in den jeweiligen Räumen war.

Abbildung 38 zeigt die Mittelwerte während der Schulzeit und präsentiert die Mittelwerte von insgesamt ca. 140 Stunden im nicht begrüntem Raum und ca. 184 Stunden im begrüntem Raum. Es wurden nur Unterrichtszeiten und Pausen berücksichtigt. Auch hier ist die Feinstaubkonzentration im begrüntem Klassenraum, aber auch während der Messungen im begrüntem Klassenraum, im Mittel geringer.

Abbildung 39 zeigt die Konzentrationen der unterschiedlichen Feinstaubgrößen ohne Berücksichtigung des Jahres 2015. Es werden ca. 94 Stunden im nicht begrüntem und ca. 280 Stunden im begrüntem Raum berücksichtigt. Während den Messungen im Jahr 2015 gab es noch keine Begrünung. Abbildung 39 zeigt die Mittelwerte der Messungen, die in den Jahren 2016 und 2017 durchgeführt wurden. Es ist ersichtlich, dass die Außenluft eine höhere Feinstaubkonzentration während der Messungen in der begrüntem Klasse aufwies. Dennoch ist die Feinstaubkonzentration in der begrüntem Klasse geringer.

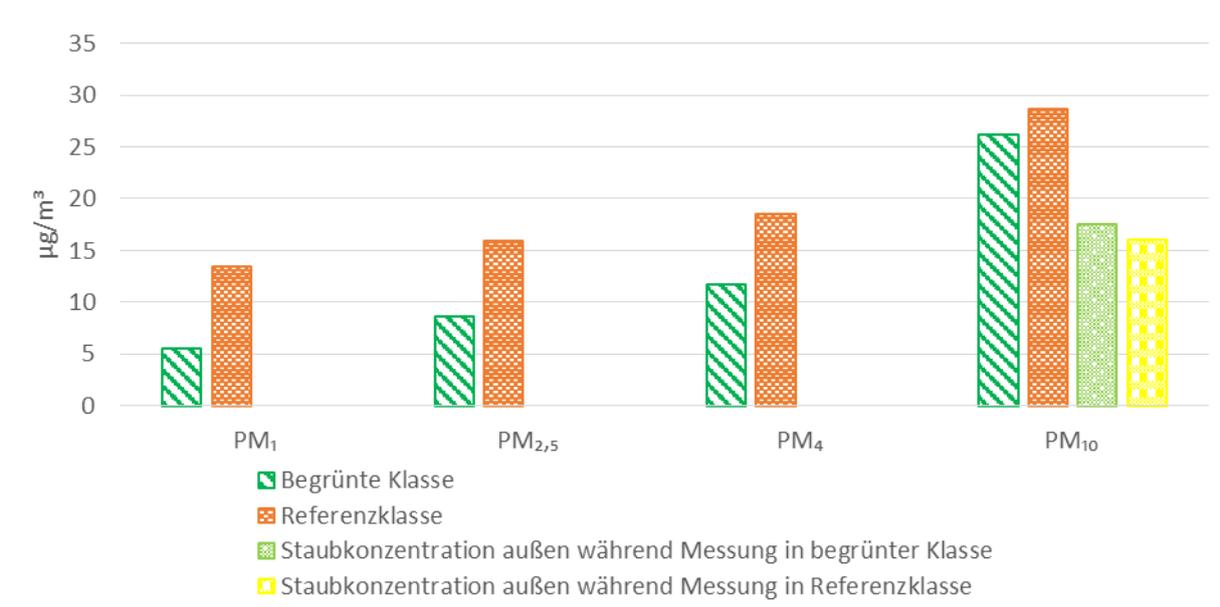


Abbildung 39: Konzentration der unterschiedlichen Feinstaubgrößen im begrünten und im nicht begrünten Klassenraum. Mittelwerte der Messwerte ab dem Jahr 2016.

Da die beiden Klassen ähnlich sind und sich im Wesentlichen nur durch die Begrünung unterscheiden, kann darauf rückgeschlossen werden, dass die Innenraumbegrünung Feinstaub bindet und der Raumluft entzieht. Am größten ist der Unterschied bei den kleinen Partikeln (PM₁). Umso größer die Partikel sind, desto geringer wird der Unterschied zwischen begrünter und nicht begrünter Klasse.

Das Analysieren der Messungen zeigt unter Berücksichtigung aller Partikelgrößen bis PM₁₀ eine Differenz zwischen begrünter Klasse und Referenzklasse von ca. 2,5 µg/m³. Das sind (nach Bezugnahme des Raumvolumens und der Begrünungsfläche) 7,8 x 10⁻⁸ kg/m² Grünfläche ohne Berücksichtigung der höheren Staubkonzentration in der Außenluft. Die Staubkonzentration der Außenluft war während der Messung in der begrünten Klasse um ca. 1,5 µg/m³ höher.

Die Literatur [46] [47] gibt (nach Umrechnungen) für die Reduktion der Feinstaubkonzentration in der Außenluft aufgrund von Außenbegrünung 5,3 x 10⁻⁹ kg/m² Grünfläche an. Die Werte können je nach Pflanzengattung schwanken. Große Oberflächen (z. B. von einer hohen Anzahl von Blättern) führen zu einer höheren Feinstaubabsorption.

3.5. Auswirkungen von Innenraumbegrünung auf die CO₂-Konzentration

3.5.1. Langzeituntersuchungen

Wie in Kapitel 2.7.1 beschrieben, ist ein Vergleich der begrünten und nicht begrünten Klassenräume während des Schulbetriebs nicht zielführend. Die Messungen haben gezeigt, dass die CO₂-Konzentration in allen untersuchten Klassenräumen während den Unterrichtsstunden zu hoch ist. Die hohe CO₂-Konzentration stört die Konzentration der RaumnutzerInnen und führt zur Müdigkeit. Innenraumbegrünung alleine wird zu keiner gewünschten CO₂-Konzentration in Schulkassen führen. Luftwechsel mit der Außenluft ist unbedingt notwendig. Eine Schulkasse erhöht die CO₂-Konzentration des genutzten Raumes innerhalb von weniger als einer Unterrichtsstunde über 2.000 ppm. Abbildung 40 zeigt beispielhaft die CO₂-Konzentration in einer untersuchten Klasse

während eines Schultages. In der Früh steigt die CO₂-Konzentration an und erreicht um 9:30 bereits 2.000 ppm. Werte darüber konnten von dem eingesetzten Messgerät nicht erfasst werden und sind für die Bewertung unwichtig, da diese Werte über jedem Norm-/Richtlinien-Wert liegen. Nach Ende der Schulzeit fällt die CO₂-Konzentration wieder unter 2.000 ppm. Abbildung 41 zeigt die CO₂-Konzentration an einem anderen Tag im selben Raum. Nach dem Vormittagsunterricht fällt die CO₂-Konzentration unter 2.000 ppm, bleibt auf hohem Niveau und steigt während des Nachmittagsunterrichts wieder über 2.000 ppm.

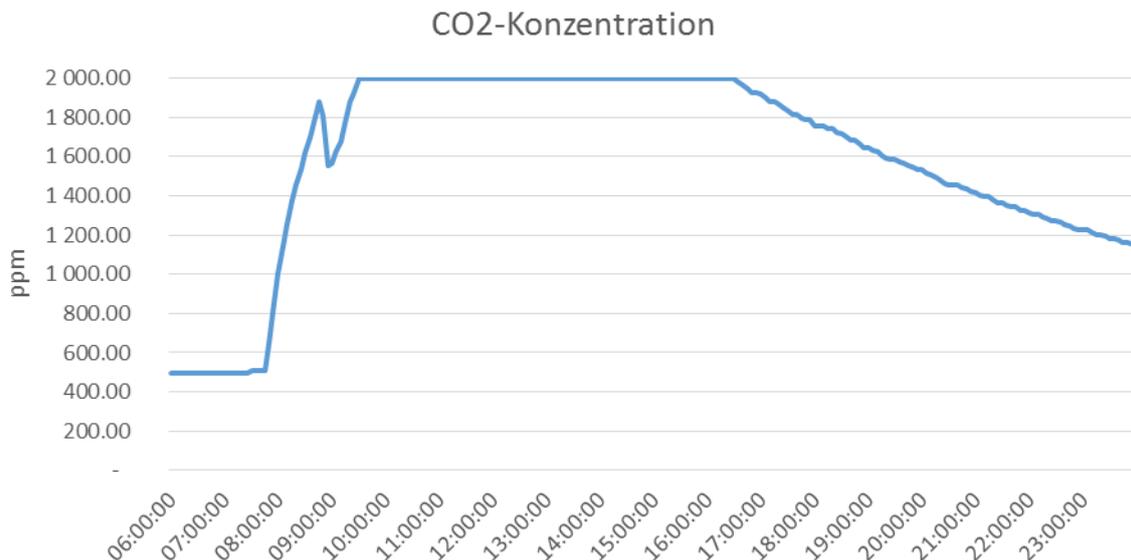


Abbildung 40: CO₂ Konzentration in einer untersuchten Schulkasse an einem Schultag. (Messgrenze des Sensors ist 2.000 ppm, darüber liegende Werte werden als 2.000 ppm dargestellt.)

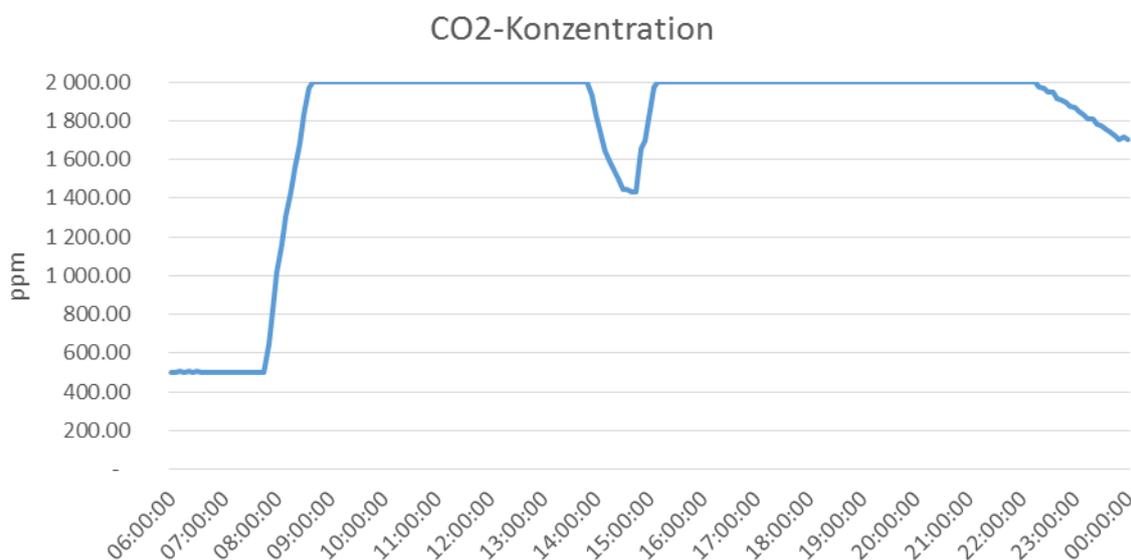


Abbildung 41: CO₂ Konzentration in einer untersuchten Schulkasse an einem Schultag. (Messgrenze des Sensors ist 2.000 ppm, darüber liegende Werte werden als 2.000 ppm dargestellt.)

3.5.2. Sommerversuch

Sowohl von der begrünten als auch von der nicht begrünten Klasse wurde die durchschnittliche CO₂-Reduktion pro Stunde sowie der Unterschied zwischen diesen zwei Klassen detailliert untersucht. Da die beiden Räume nicht luftdicht sind, fällt das CO₂ bei hoher CO₂-Konzentration stärker ab, als bei niedriger. Das gilt für beide Räume. Auch der Luftwechsel mit der Außenluft wirkt sich stärker aus, je höher der Unterschied der CO₂-Konzentration zwischen innen und außen ist. Bei der Senkung der CO₂-Konzentration flachen die Kurven ab und nähern sich der Außenluftkonzentration an (das Abflachen bei niedrigerer Konzentration ist in Abbildung 42 bis Abbildung 44 sichtbar. Zu diesem Zeitpunkt haben die beiden Räume dieselbe CO₂-Konzentration. Der Unterschied aufgrund der CO₂-Senke wird immer weniger sichtbar, je geringer der Unterschied zur Außenluft ist. Aus diesem Grund wurde die CO₂-Reduktion jeweils für die ersten 8 Stunden (gestartet bei 1.900 ppm) berücksichtigt.

Die Ergebnisse vier dieser Messungen werden in Tabelle 7 dargestellt.

Die Prozentangaben des Mehrabfalles wurden mithilfe der Formel 10 errechnet und stellen dar, um wie viel sich die Reduktion der CO₂-Konzentration verändert hat.

$$\Delta = \frac{1C - 3B}{3B} [\%]$$

Δ = Mehrabfall

1C = Durchschnittlicher CO₂-Abfall/h in Klasse 1C (begrünt)

3B = Durchschnittlicher CO₂-Abfall/h in Klasse 3B (nicht begrünt)

Formel 10: Berechnung des Mehrabfalls (Δ) für Tabelle 7

Eine schnellere CO₂-Reduktion in der begrünten Klasse im Vergleich zur Referenzklasse wird beim Mehrabfall als Plus dargestellt, andererseits wäre der Mehrabfall mit einem Minus dargestellt. Wie in Tabelle 7 ersichtlich, ist der Mehrabfall immer positiv.

Tabelle 7: CO₂-Reduktion pro Stunde und Mehrabfall

	Ø CO ₂ -Abfall/h begrünt [ppm]	Ø CO ₂ -Abfall/h nicht begrünt [ppm]	Mehrabfall (Δ) [%]
Messung 1	91,4	88,1	3,7
Messung 2	88,0	86,3	2,0
Messung 3	68,3	64,0	6,8
Messung 4	60,5	59,7	1,5

Abbildung 42 zeigt zu jeder dieser vier Messungen die Messwerte der Sensoren. Es ist sichtbar, dass sich die CO₂-Konzentration in der begrünten Klasse schneller verringert, als in der nicht begrünten Klasse. Es werden zwei Sensoren pro Klassenraum dargestellt. Die beiden Sensoren in der begrünten Klasse sind annähernd gleich und zeigen eine schnellere Reduktion, als die beiden Sensoren in der nicht begrünten Klasse.

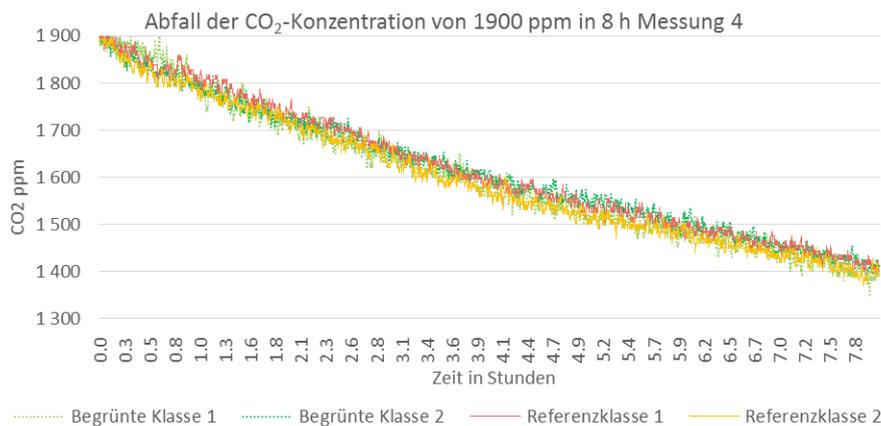
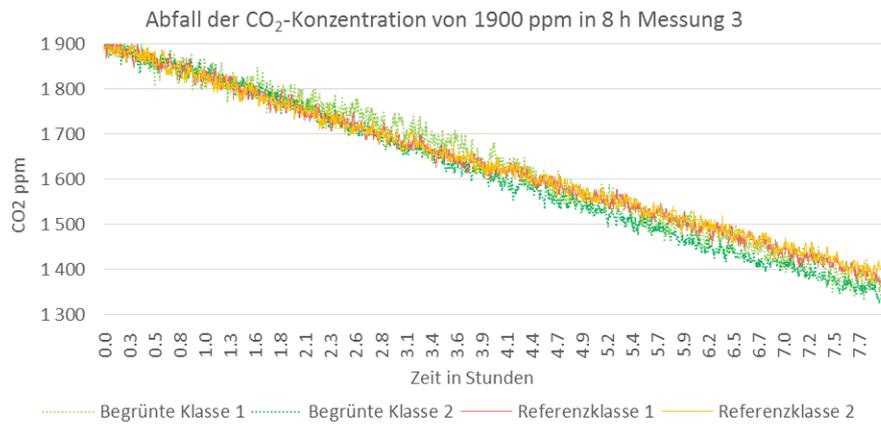
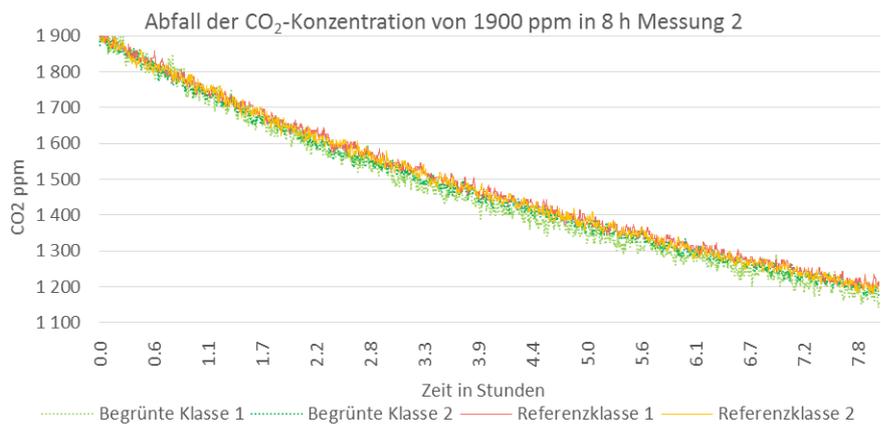
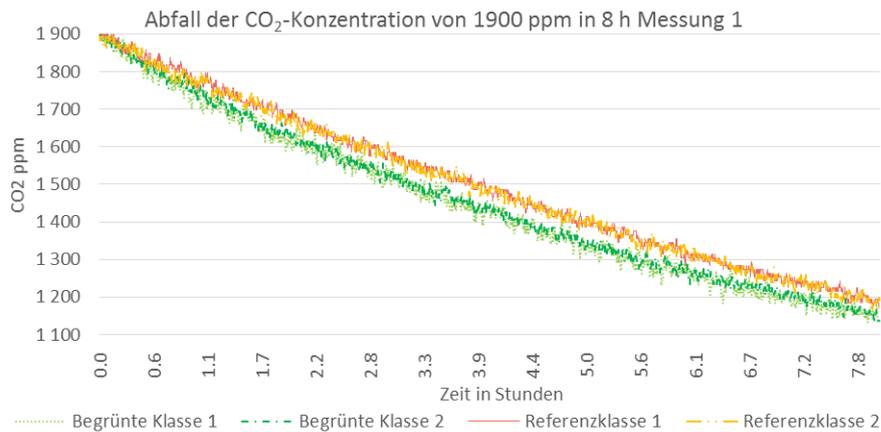


Abbildung 42: Abfall der CO₂-Konzentration in den ersten 8 Stunden. Messung 1 bis Messung 4.

In den folgenden Abbildungen (Abbildung 43 und Abbildung 44) werden auf der y-Achse die Mittelwerte der CO₂-Sensoren angezeigt.

Abbildung 43 zeigt die Reduktion der CO₂-Konzentration während der Nachtstunden. Es ist ersichtlich, dass die Pflanzen während der Nacht kein CO₂ aufnehmen, die beiden Klassenräume über ihre Leckagen aber gleich viel CO₂ an die Umgebung verlieren.

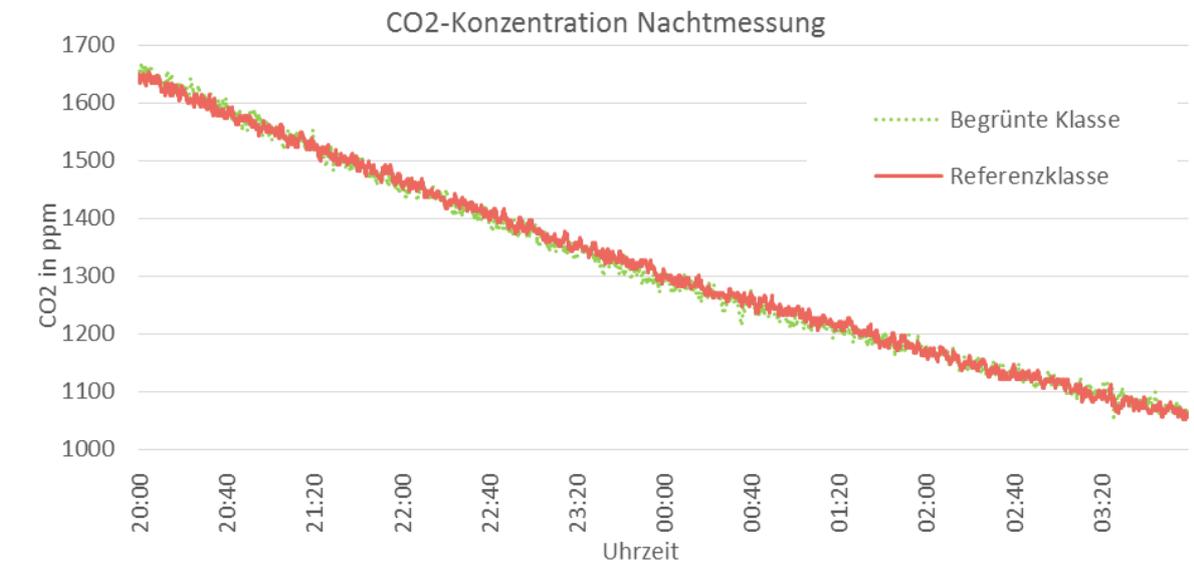


Abbildung 43: Abfall der CO₂-Konzentration während der Nachtstunden in der begrünten und der nicht begrünten Klasse

Abbildung 44 zeigt die Reduktion der CO₂-Konzentration während des Tages. Der Mehrabfall des begrünten Klassenraumes aufgrund der Pflanzen ist deutlich zur erkennen.

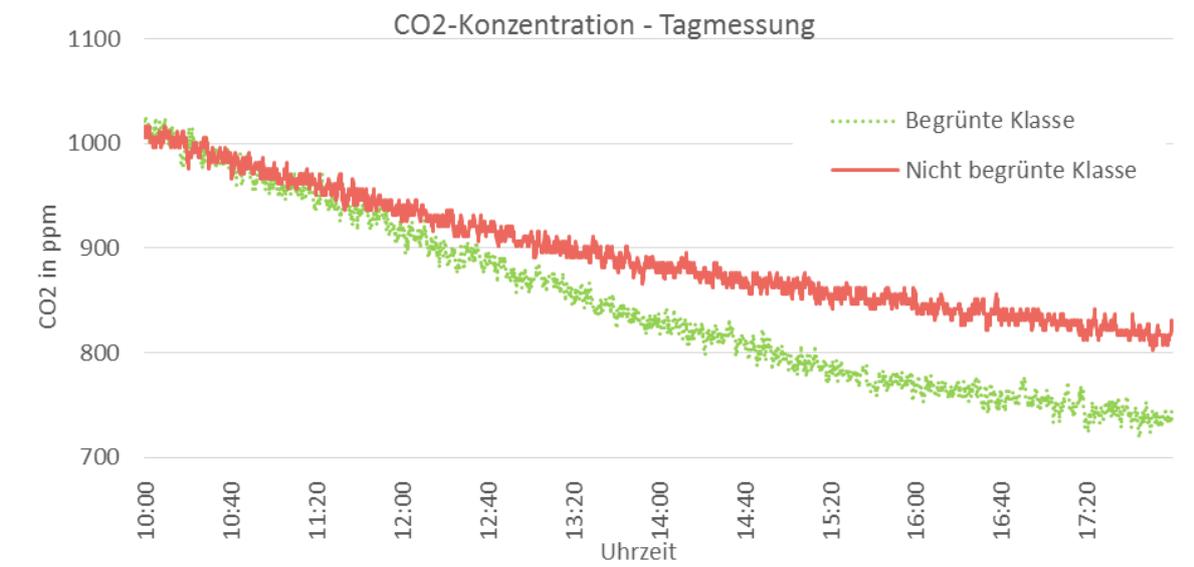


Abbildung 44: Abfall der CO₂-Konzentration während des Tages der begrünten und der nicht begrünten Klasse

Die Innenraumbegrünung reduziert während des Tages die CO₂-Konzentration. Die Reduktion ist jedoch gering, sodass sie während einer Raumnutzung durch eine Schulklasse keine bedeutende Wirkung zeigt und die Belüftung nicht ersetzen kann.

3.6. Akustische Auswirkungen von Gebäudebegrünung

3.6.1. Schallabsorption durch Grüne Wände

Wandbegrünungen verhalten sich durch ihren Aufbau und die Bepflanzung ähnlich wie poröse Absorber. Die Schallabsorption durch poröse Stoffe basiert auf der Umwandlung von Schall- in Wärmeenergie. Dabei geben die schwingenden Luftteilchen in den Poren der Absorber ihre Energie als Wärmeenergie ab [27]. Es werden besonders die hohen und mittleren Frequenzen gedämpft. Auch die Pflanzen selbst leisten durch ihre Blattflächen einen Beitrag zur Umwandlung der Schallenergie. Allerdings beschränkt sich dieser Beitrag auf hohe Frequenzen [48].

Der Schallabsorptionsgrad gibt an, welcher Anteil der ankommenden Schallenergie wieder reflektiert wird. Ein Schallabsorptionsgrad von 0 bedeutet, dass die gesamte Schallenergie wieder in den Raum zurückgegeben wird. Ein Schallabsorptionsgrad von 1 bedeutet, dass kein Anteil der Schallenergie in den Raum reflektiert wird. Die gesamte Schallenergie wird absorbiert.

Abbildung 45 zeigt die berechneten Schallabsorptionsgrade der unterschiedlichen untersuchten Innenraum-Begrünungssysteme. Werte, die größer als 1 sind, bedeuten, dass mehr als 100 % der eintreffenden Schallenergie absorbiert werden kann. Das ist theoretisch unmöglich, kommt in der Praxis allerdings häufig vor. Gelangt Schall an eine stark absorbierende Probe, wird nur sehr wenig reflektiert. Die Diskontinuität im Wellenfeld an der Kante der Probe erzeugt einen Beugungseffekt, der das Schallfeld verzieht. Für den Schall wird dadurch die Probe um ein Viertel einer Wellenlänge größer [49]. Die Fläche nimmt zu und absorbiert pro Wandfläche mehr Schallenergie, als an der Wand angekommen wäre. Die höchsten Schallabsorptionsgrade weist das Trogsystem auf. Insbesondere im gut hörbaren Bereich (um 1.000 Hz) ist der Schallabsorptionsgrad hoch. Die geringste Absorption findet in den tieferen Frequenzbereichen statt. Tiefe Frequenzbänder wechselwirken nur mit schwereren Bauteilen, während höhere Frequenzen auch mit leichteren (wie etwas Pflanzen oder Blättern) in Interaktion treten [48].

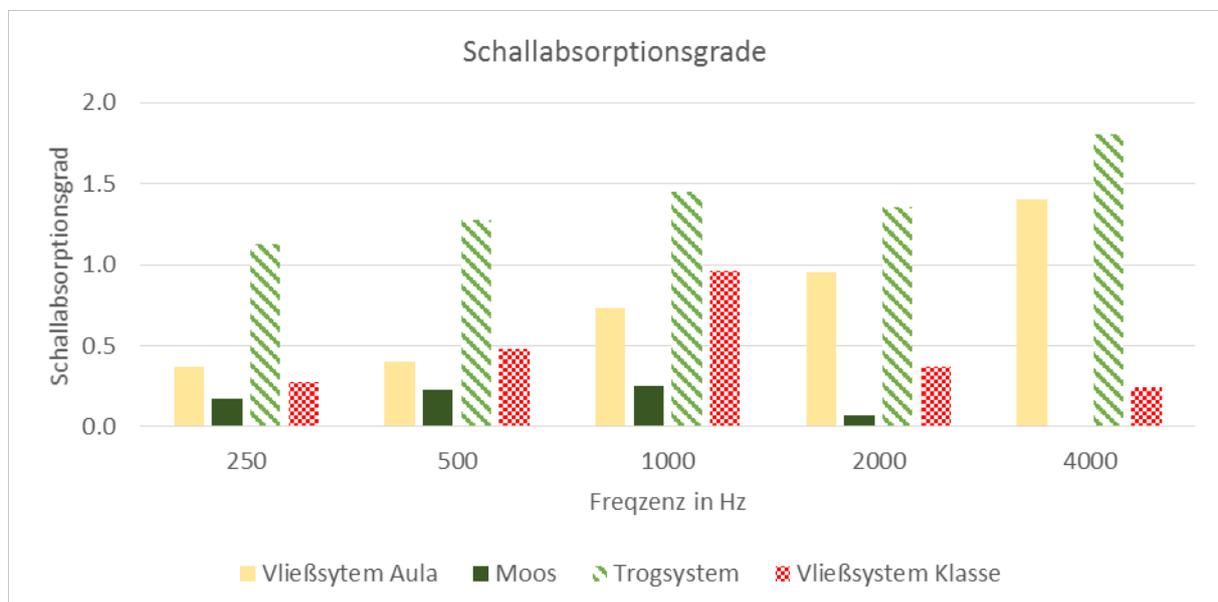


Abbildung 45: Schallabsorptionsgrade der grünen Wände, berechnet auf Basis der Nachhallzeitmessungen.

Verglichen mit üblichen technischen Absorbern wie Plattenschwingern oder porösen Absorbern sind grüne Wände als sehr hochwertig einzustufen.

3.6.2. Nachhaltigkeit

In den nachfolgenden Abbildungen werden jeweils die Nachhaltigkeit-Werte der Räume vor der Installation des Begrünungssystems und im begrüntem Zustand gegenübergestellt. Dazu wurden gemäß ÖNORM 8115-3 [29] die Oktavbänder der Mittenfrequenzen 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz und 4000 Hz verwendet.

Abbildung 46 und Abbildung 47 zeigen die gemessenen Nachhaltigkeiten in der Aula. Die Begrünung mit dem Vliessystem führte in allen Frequenzen zu einer Reduktion der Nachhaltigkeit.

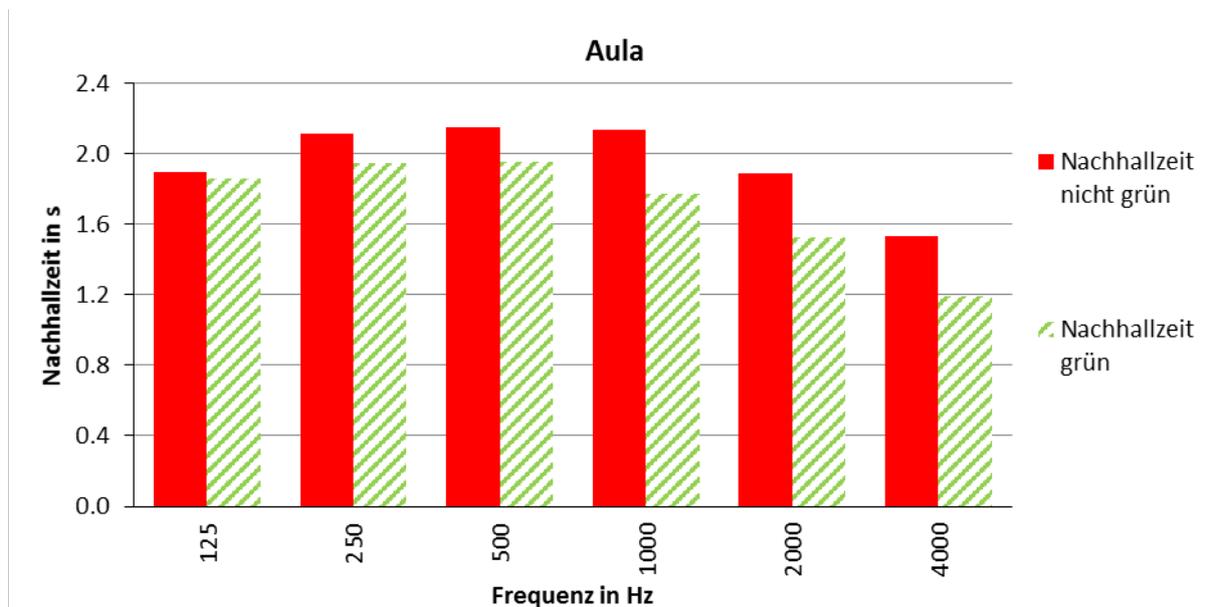


Abbildung 46: Messung ohne Begrünung in der Aula sowie mit Begrünung.

Die Mooswand wirkt sich weniger stark auf die Reduktion der Nachhaltigkeit aus, als das Begrünungssystem. Abbildung 47 zeigt die Messung vor Montage der Mooswand und danach. Die Mooswand reduziert die Nachhaltigkeit gegenüber dem Zustand direkt davor.

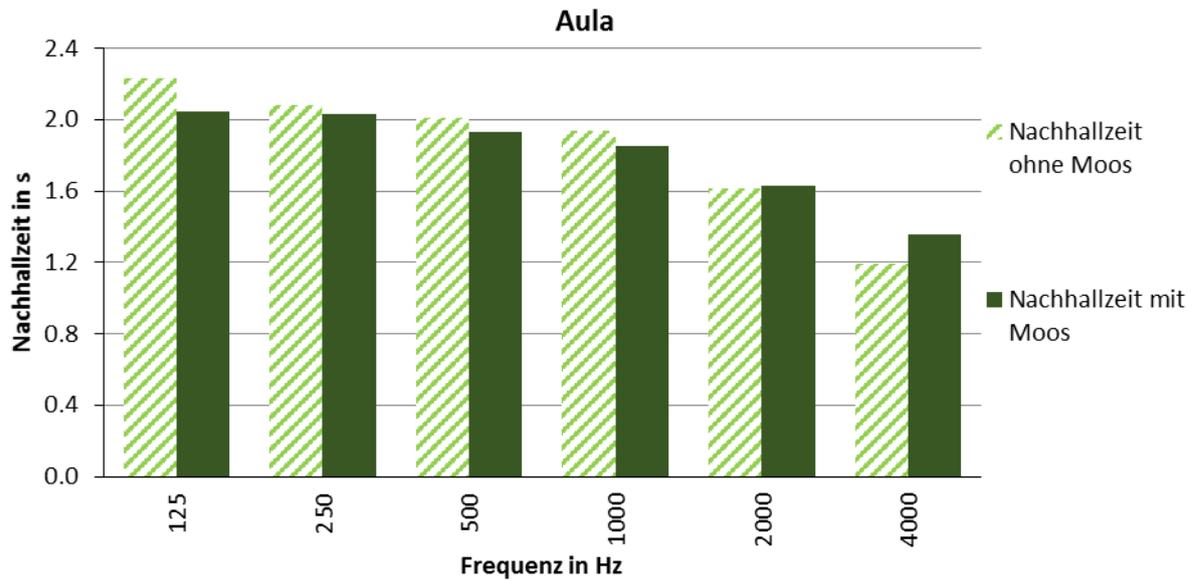


Abbildung 47: Messung mit Begrünung, ohne Mooswand und Messung mit Mooswand in der Aula.

Im Biologieraum (siehe Abbildung 48) wurde vor Begrünung der Innenwand und regelmäßig nach der Begrünung gemessen. Die begrünte Fläche ist größer, als in der Aula oder im Klassenraum (siehe Abbildung 49). Deshalb ist hier der Unterschied der Nachhallzeit besonders deutlich sichtbar.

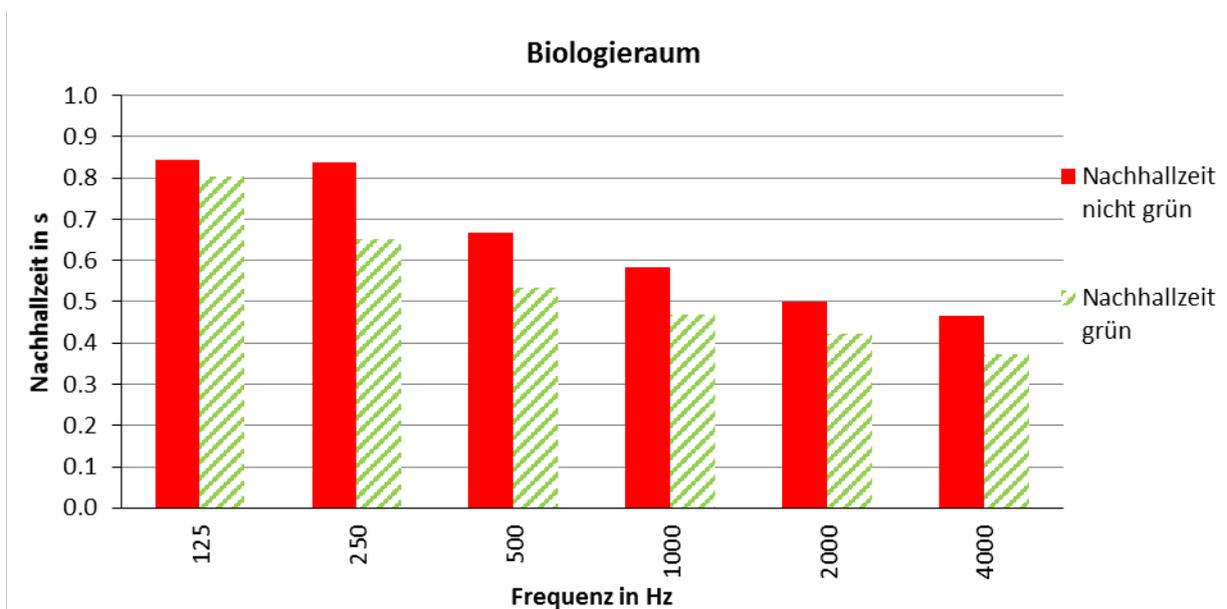


Abbildung 48: Messung des Biologieraumes ohne Begrünung und mit Begrünung.

Im begrünten Klassenraum ist die begrünte Fläche verhältnismäßig klein. Außerdem ist das System sehr dünn und viel leichter als das Trogsystem. Die Auswirkungen auf die Nachhallzeit fallen deshalb geringer aus (siehe Abbildung 49).

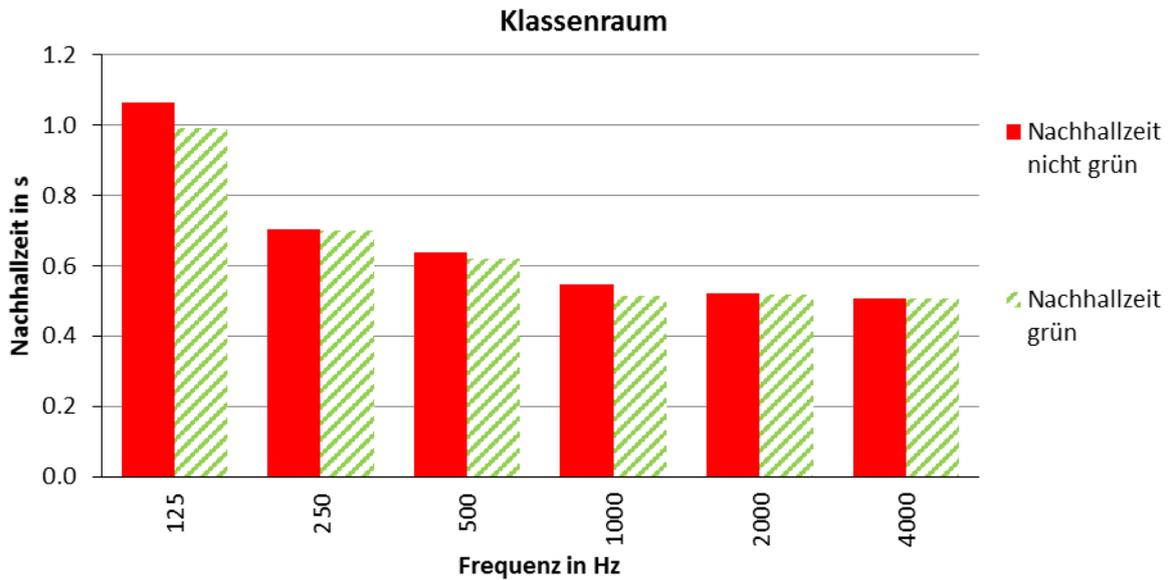


Abbildung 49: Die Messung des Klassenraumes ohne Begrünung und mit Begrünung.

Abbildung 50 zeigt die veränderte Nachhallzeit vor und nach der Installation der Begrünung im Hof. Da es im Schulhof auch andere Pflanzenbeete unabhängig vom Forschungsprojekt gibt, ist die veränderte Nachhallzeit nicht nur auf die installierten Begrünungssysteme zurückzuführen. Es sind einige Faktoren, die hier Einfluss auf die Nachhallzeit haben. Diese sind z.B. Wachstum bzw. Schnitt an anderen Pflanzen im Schulhof, Wetterlage, Jahreszeit, Windverhältnisse u.v.m.

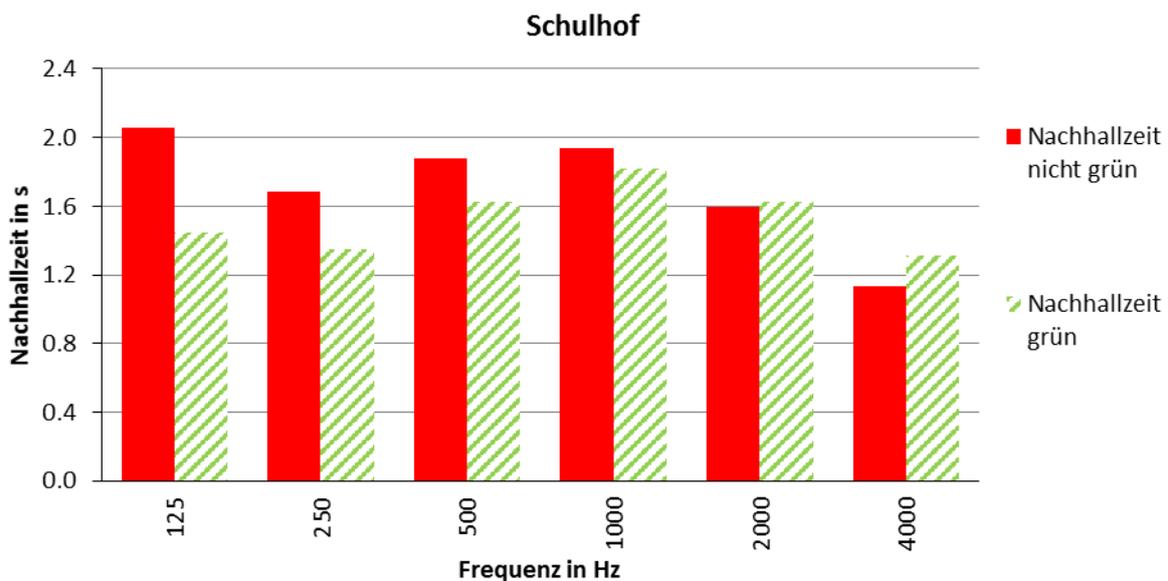


Abbildung 50: Nachhallzeit Schulhof am 16. Juli 2015 vor Installation der fassadengebundene Begrünung und am 27. Oktober 2017 mit Begrünung.

Durch die Messungen konnte die schallabsorbierende Wirkung der Begrünungssysteme gezeigt werden. Die Messwerte zeigen, dass in den drei detailliert untersuchten Räumen mit Begrünungssystemen ein besserer raumakustischer Zustand erreicht wird. Das Trogsystem wirkt sich am stärksten aus, die Vliesysteme etwas geringer. Die Mooswand hat den kleinsten Einfluss auf die Nachhallzeit. Die reduzierte Nachhallzeit führt zur besseren Verständlichkeit bei gleicher Lautstärke.

3.7. Thermische Dämmung von Fassadenbegrünung im Winter

3.7.1. U-Werte

Die Zwischenergebnisse des Forschungsprojektes bezüglich des Einflusses der fassadengebundenen Begrünung auf den U-Wert wurden in [50] publiziert. In den hier dargestellten Ergebnissen wurde der gesamte Messzeitraum von drei Jahren berücksichtigt. Die Wärmedurchlasswiderstände ΣR_i sind an beiden Fassadenteilen (begrünt/nicht begrünt) gleich und wurden deshalb gemittelt. Für R_{si} wurde der Wärmeübergangswiderstand aus der Norm [33] entnommen. R_{se} wurde wie in Kapitel 2.9.7 beschrieben berechnet.

Die Recherche, Analyse und Berechnung der U-Werte hat gezeigt, dass bei Begrünungssystemen mit kleineren Hinterlüftungsöffnungen die thermische Dämmung der Fassade stärker zunimmt, als bei Begrünungssystemen mit größeren Hinterlüftungsöffnungen. Verblendungen an den Seiten und andere Maßnahmen, die das Durchströmen von Außenluft reduzieren, erhöhen die Dämmwirkung. Außerdem ist es von Vorteil, wenn das Begrünungssystem großflächig ist und möglichst wenige Unterbrechungen (Grenzflächen zur Außenluft) hat. Die Dicke und Bauweise des Begrünungssystems hat dabei eine kleinere Bedeutung. Deshalb werden in diesem Kapitel die Begrünungssysteme nicht nach „Trogssystem“ und „Kassettensystem“ unterteilt, sondern nach „großflächigen Begrünungssystem mit Verblendung“ und „kleinflächigen Begrünungssystem ohne Verblendung“.

Für das kleinflächige Begrünungssystem ohne Verblendung ergaben sich Wärmedurchgangswiderstände, die in Abbildung 51 angegeben werden.

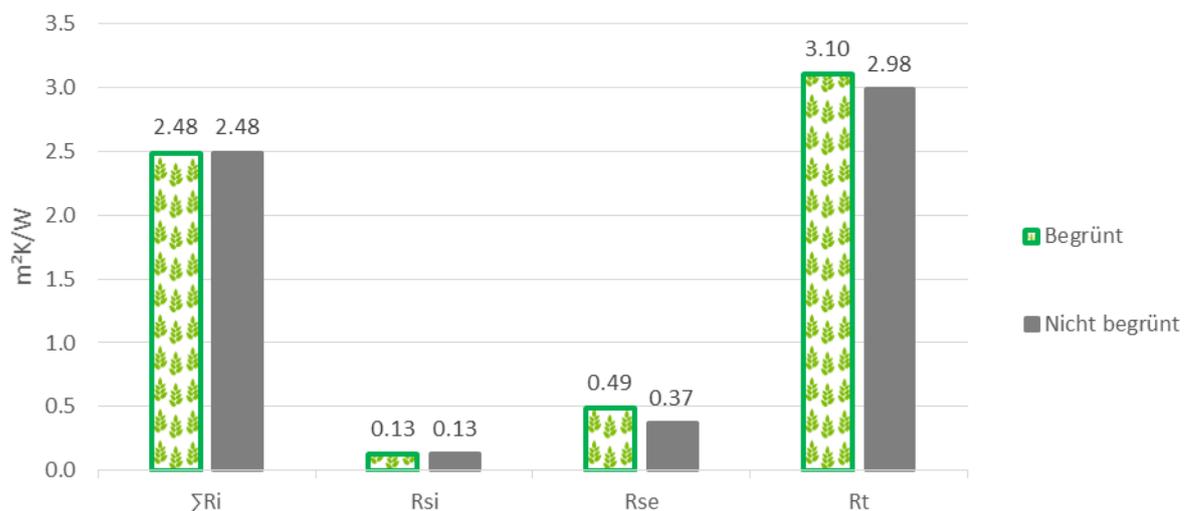


Abbildung 51: Wärmedurchgangswiderstände der nicht begrüntes und der begrüntes Fassade mit kleinflächigen Begrünungssystem ohne Verblendung.

Die Wärmedurchgangswiderstände des großflächigen Begrünungssystem mit Verblendung (siehe Abbildung 52) wurden nach der in Kapitel 2.9.7 beschriebenen Methode berechnet.

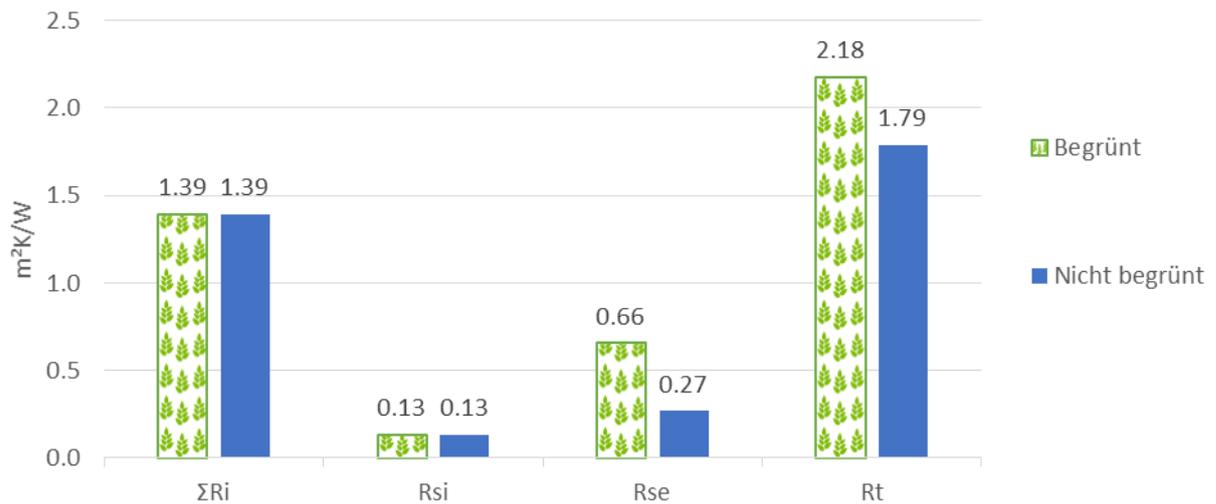


Abbildung 52: Wärmedurchgangswiderstände der nicht begrünter und der begrünter Fassade mit großflächigen Begrünungssystemen mit Verblendung.

Daraus lassen sich folgende U-Werte berechnen, dargestellt in Abbildung 53.

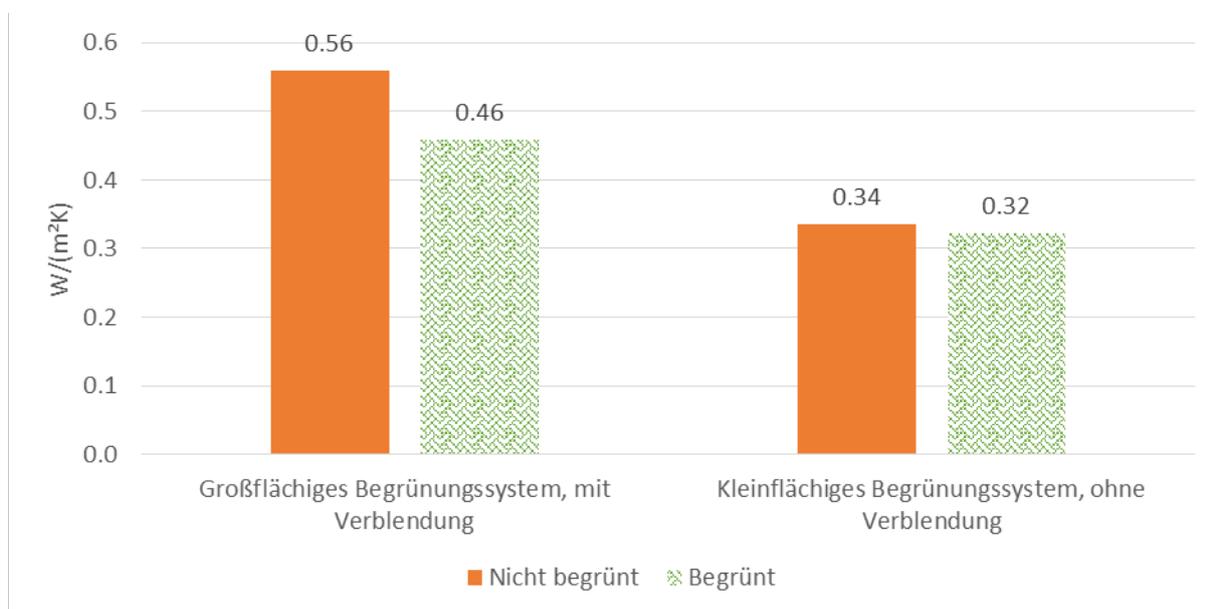


Abbildung 53: U-Werte der begrünter und der nicht begrünter Fassade des großflächigen Begrünungssystems mit Verblendung und des kleinflächigen Begrünungssystems ohne Verblendung.

Die Fassaden, an denen die Begrünungssysteme montiert sind, weisen unterschiedliche Dämmqualitäten auf. Das großflächige Begrünungssystem mit Verblendung ist an einem Teil der Fassade montiert, der aus Vollziegeln besteht. Das kleinflächige Begrünungssystem ohne Verblendung ist an einer Fassade mit Hochlochziegeln montiert. Dementsprechend unterscheiden sich die U-Werte der nicht begrünter Fassaden. Entscheidend, um die Auswirkungen der Fassadenbegrünung zu erkennen, ist der jeweilige Vergleich zwischen der begrünter und der nicht begrünter Fläche. Der zusätzliche Wärmedurchlasswiderstand aufgrund der Begrünung liegt beim kleinflächigen Begrünungssystem ohne Blende bei 0,12 m²K/W und beim großflächigen Begrünungssystem mit Blende bei 0,39 m²K/W. Das großflächige Begrünungssystem mit Verblendung weist auf der Altbaumauer eine Verbesserung von etwa 18 % auf, das kleinflächige ohne Verblendung eine Verbesserung von 4 % der besser gedämmten Mauer.

Entscheidend für die thermische Dämmung ist das Reduzieren der Hinterlüftungsöffnungen und Erhöhen der durchgängigen Begrünungsfläche. An ungedämmten Fassaden ist eine Verbesserung des U-Wertes von ca. 20 % möglich.

3.7.2. Thermographie

Ergänzend zu den Berechnungen wurden regelmäßig thermographische Bilder aufgenommen. Diese Bilder wurden vor Sonnenaufgang aufgenommen, damit die globale Strahlung so gering wie möglich ist.

Abbildung 54 zeigt die Aufnahme des Turnsaaldachs in einer kalten Winternacht. Es ist ersichtlich, dass die Oberflächentemperatur unter den PV-Modulen deutlich höher ist, als am ungeschützten Dach. Die Dachoberfläche wird durch die PV Module geschützt und kühlt langsamer aus.

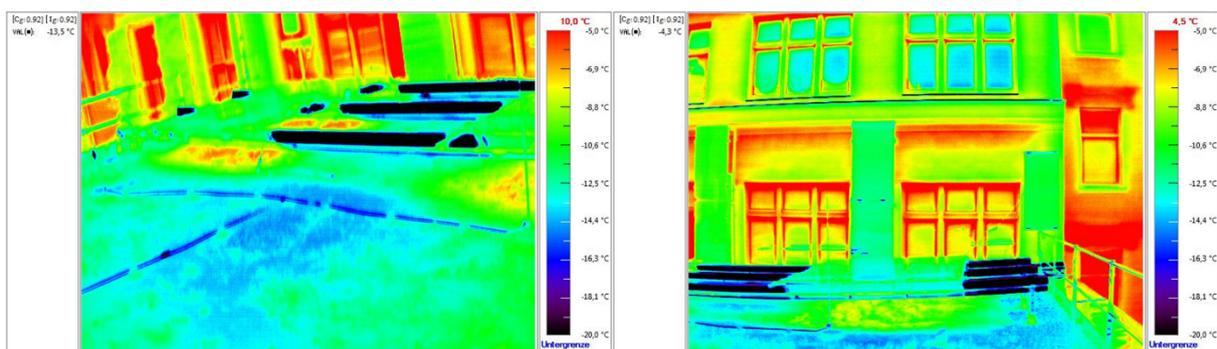


Abbildung 54: Turnsaaldach der Schule.

Das entsprechende Foto zur Thermographie in Abbildung 54 wird in Abbildung 55 gezeigt.



Abbildung 55: Fotos zu Abbildung 54

Die Kombination von PV und Begrünung an der Fassade wird in Abbildung 56 dargestellt. Auch hier ist die Oberflächentemperatur hinter der Begrünung deutlich höher, als daneben. Auch oberhalb der Begrünung ist die Fassade wärmer. Hier wird die Fassade von Photovoltaikmodulen abgeschirmt (siehe Abbildung 57). Der Grund dafür ist die abgeschirmte Sicht zum Himmel.

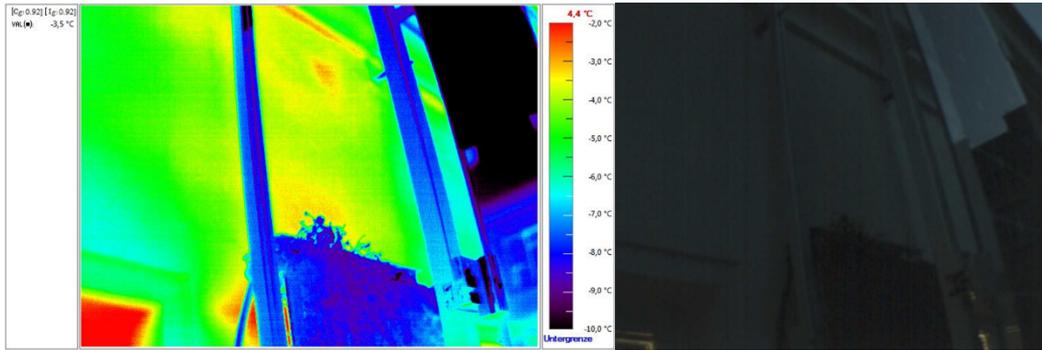


Abbildung 56: Kombination Begrünung und Photovoltaik an der Fassade. Links: thermographische Aufnahme, Rechts: Foto.

Die Kombination von Photovoltaik und Begrünung wurde laufend optimiert und die Begrünungsfläche dahinter variiert. Abbildung 57 zeigt die Situation zur Zeit der Thermographieaufnahmen in Abbildung 54 und Abbildung 56.

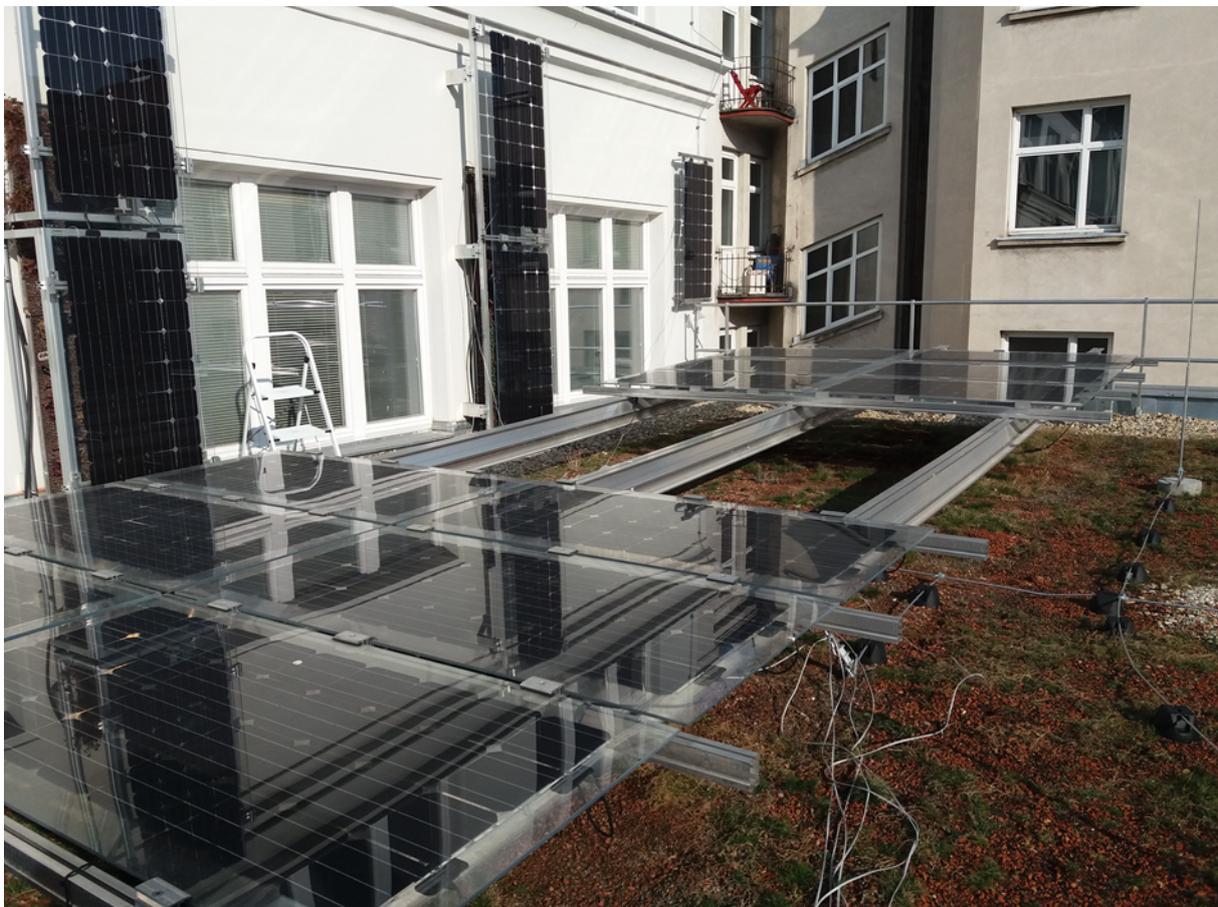


Abbildung 57: Kombination von Photovoltaik und Begrünung am Turnsaaldach und an der Fassade zur Zeit der Thermographieaufnahmen in Abbildung 54 und Abbildung 56.

Die Begrünung ohne Photovoltaik schützt die Fassade ebenfalls. Abbildung 58 zeigt die höhere Oberflächentemperatur der Fassade hinter der Begrünung. Die Fassadenoberfläche ist hinter der kleinflächigen Begrünung ohne Verblendung um etwa 1 K wärmer als die umgebende Fassade.

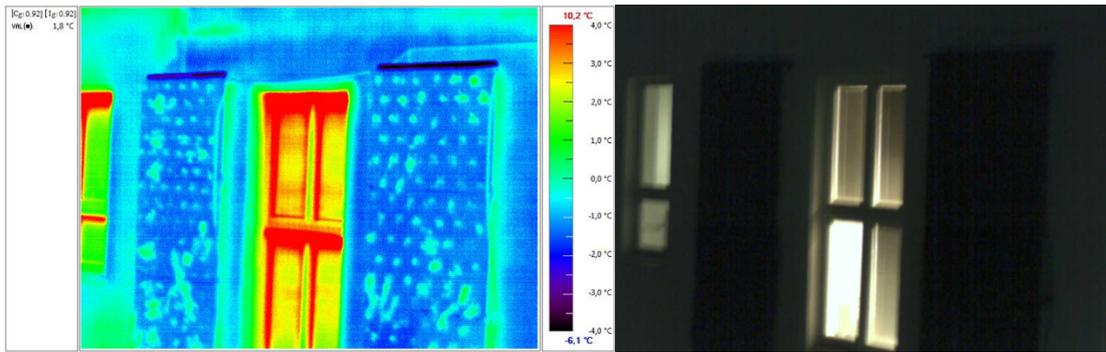


Abbildung 58: Thermographische Aufnahme eines begrünten Fassadenabschnitts (links). Foto zur thermographischen Abbildung (rechts).

Abbildung 59 (links) zeigt einen Wandabschnitt der außen begrünten Fassade in einer Thermographieaufnahme vom Innenraum. Die Temperaturverteilung ist abgesehen von inneren Wärmequellen homogen. Links unten ist ein Heizkörper und darüber befindet sich ein Bild. Es sind keine Wärmebrücken durch die Befestigung der Begrünung sichtbar, die sich auf die Oberflächentemperatur im Innenraum auswirken könnten.

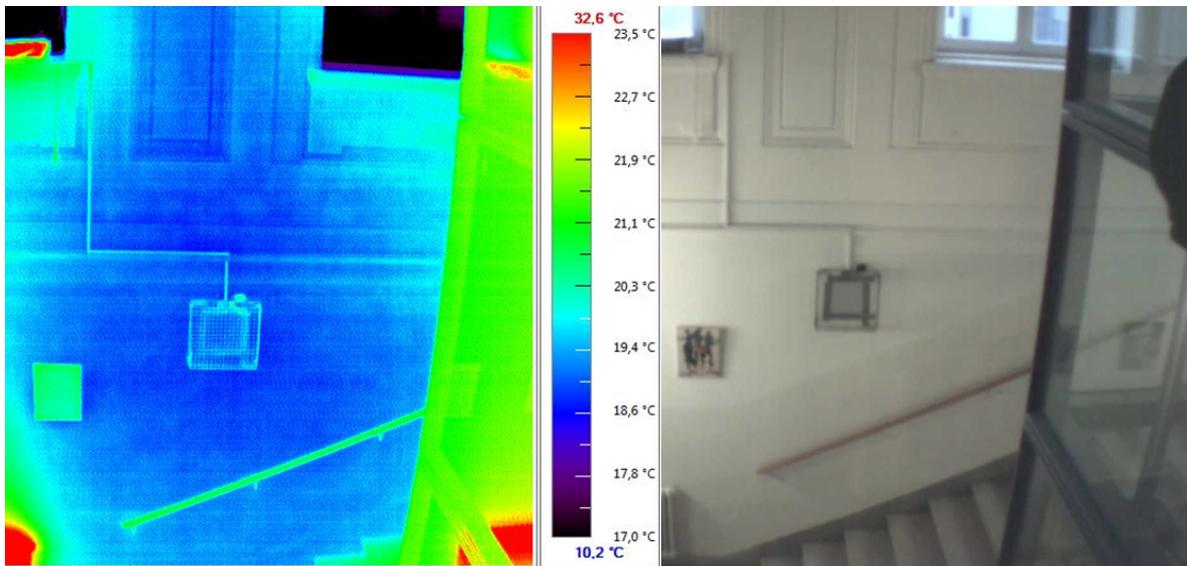


Abbildung 59: Aufnahmen von der Innenseite der Fassade auf die außen begrünte Fassade. Links: Thermographie, Rechts: Foto.

3.8. Kühlleistung von Fassadenbegrünung

3.8.1. Evapotranspiration

Um die Kühlleistung der Evapotranspiration zu ermitteln, wurde der Zeitraum von Anfang August 2017 bis Ende September 2017 genau betrachtet. Der durchschnittliche Tageswert der Verdampfungsenergie liegt bei 69,06 kWh pro Tag. Der maximale Tageswert liegt bei 131,78 kWh pro Tag. Das ist die gesamte Wärmeenergie, die der Umgebung entzogen wird. Es ist die Kühlleistung, die dem Urban Heat Island Effekt entgegenwirkt. Die jeweiligen Tageswerte der Verdampfungsenergie werden in Abbildung 60 dargestellt.

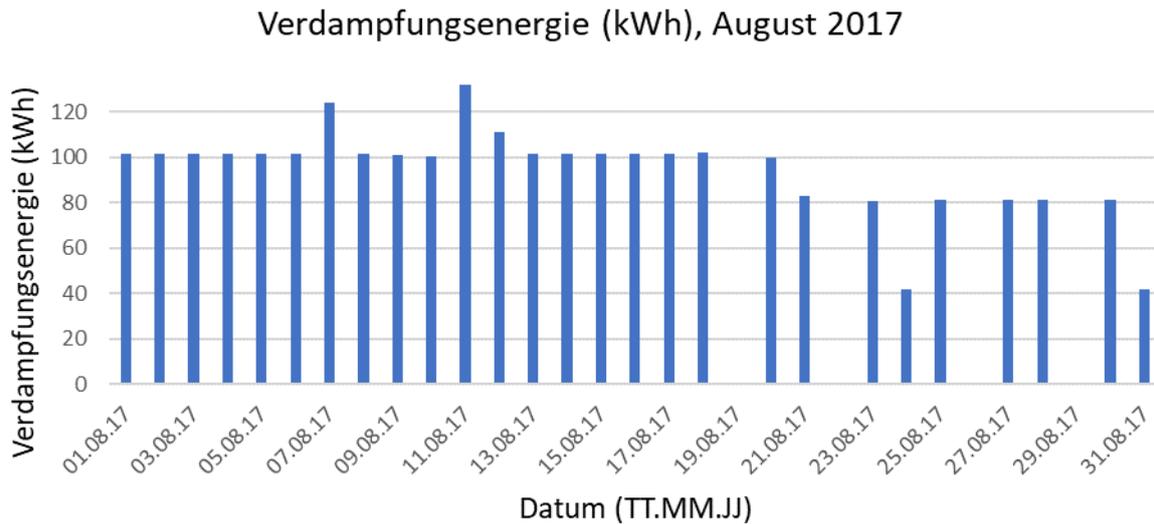


Abbildung 60: Verdampfungsenergie pro Tag für August 2017

Je nachdem wie exponiert die begrünte Fläche gegenüber Sonne und Wind ist, verdunstet das Wasser an verschiedenen Flächenabschnitten unterschiedlich schnell. Die gesamte Verdampfungsenergie wurde durch die Gesamtfläche der Begrünung dividiert, um einen durchschnittlichen Wert für die gesamte Grünfläche zu ermitteln. Abbildung 61 zeigt die Verdampfungsenergie pro Tag und Quadratmeter.

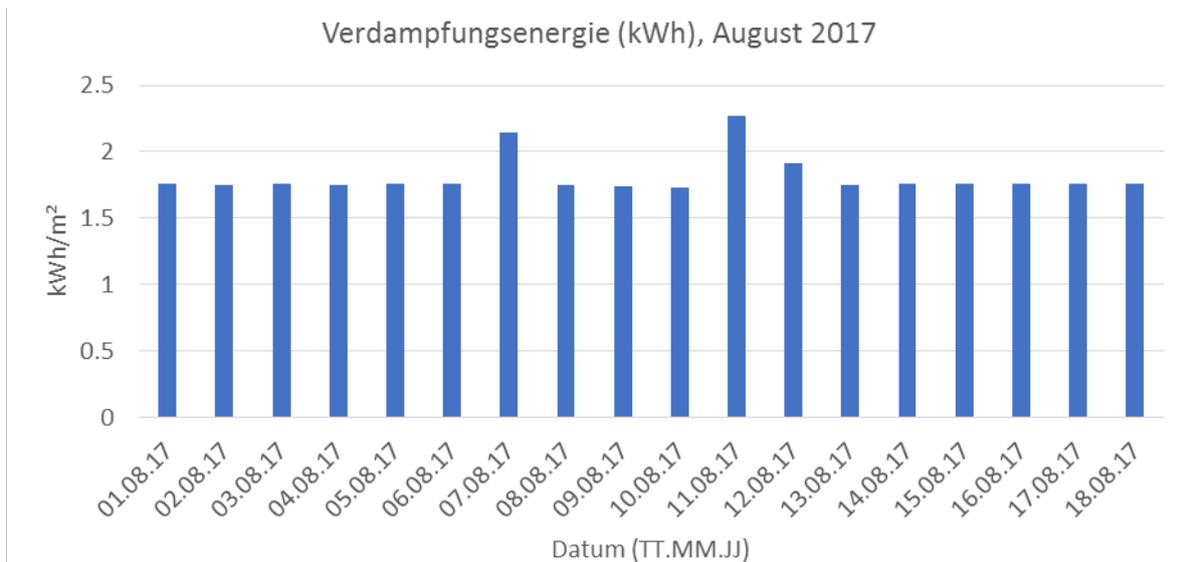


Abbildung 61: Verdampfungsenergie pro Tag, und Quadratmeter 1. bis 18. August 2017

In Abbildung 60 und Abbildung 61 werden jeweils die Tageswerte der Verdampfungsenergie eines Monats dargestellt. Das Diagramm zeigt, an welchen Tagen welche Menge an Verdampfungsenergie durch Evapotranspiration freigesetzt wird. Je nach Wetterlage schwankt die Verdampfungsenergie. In den ersten beiden Augustwochen ist das Wetter konstant und die Verdampfungsenergie pro Tag beträgt ca. 100 kWh. Auch die Menge des zugeführten Wassers beeinflusst die Verdampfungsenergie. Wird weniger gegossen, sodass die Pflanzen zwar noch überleben, das Substrat aber trockener ist, reduziert sich die Verdampfungsenergie. Am höchsten ist sie bei mehrmaligem Gießen an einem heißen, sonnigen Tag.

3.8.2. Auswirkung auf die Außenoberfläche der Fassade

Auf die Oberflächentemperatur der Außenfassade wirkt zusätzlich (zur Evapotranspiration in Kapitel 3.8.1) die Beschattung durch das Begrünungssystem. Im Folgenden werden die Außenoberflächentemperaturen der Fassaden dargestellt und begrünte Bereiche mit nicht begrünten verglichen. Dafür werden in Abbildung 62 und Abbildung 63 die gemessenen Oberflächentemperaturen an den Fassaden dargestellt.

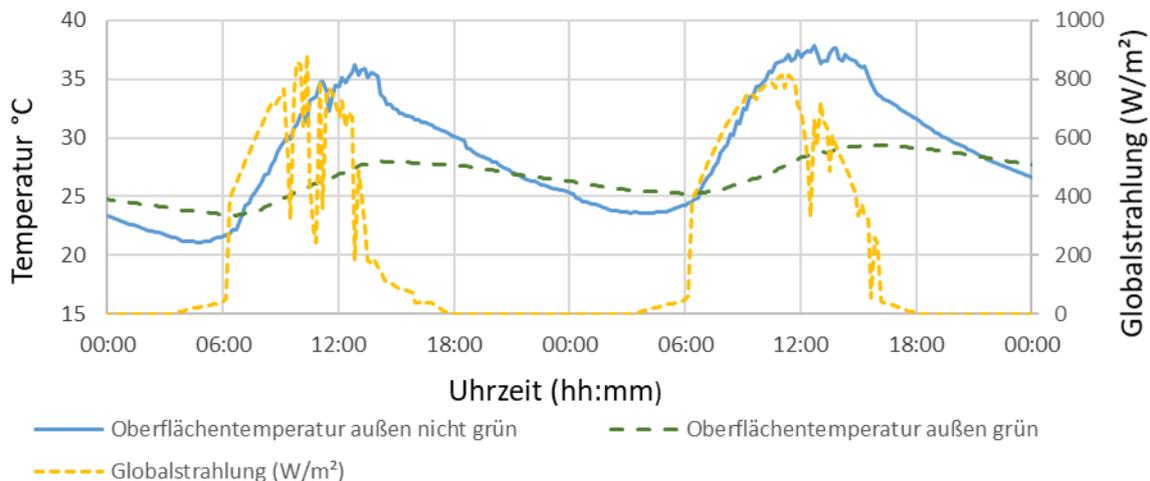


Abbildung 62: Oberflächentemperatur der Fassade außen. Ohne Begrünung und mit Begrünung mittels Trogssystem.

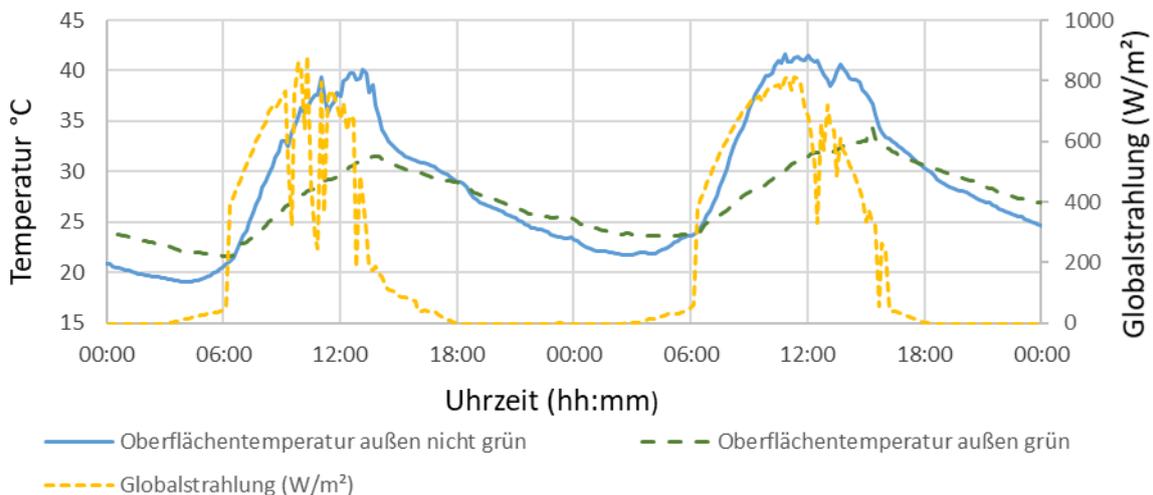


Abbildung 63: Oberflächentemperatur der Fassade außen. Ohne Begrünung und mit Begrünung mittels Kassettensystem.

Es ist ersichtlich, dass die äußere Oberflächentemperatur am nicht begrünten Teil der Fassade steiler ansteigt, als beim begrünten Teil der Fassade. Grund dafür ist die Verschattung durch das Begrünungssystem und die Evapotranspiration, die verhindert, dass sich die vorgehängte Konstruktion in der Sonne aufheizt. Wie stark sich eine unbegrünte Fassade aufheizt, hängt von der Farbe, Fassadenbauweise, der Exposition und den Witterungsbedingungen ab [51]. Die hier untersuchte Fassade wurde im Jahr 2015 weiß gestrichen und ist nicht gedämmt. Bei der Montage des Trogsystems besteht das Mauerwerk aus ca. 60 cm Vollziegel, beim Kassettensystem aus einem Hochlochziegel mit einer Stärke von ca. 35 cm. Auch südseitig werden Oberflächentemperaturen von unter 45°C gemessen. Bei dunklen oder verschmutzten Fassaden ist die Auswirkung von Fassadenbegrünung auf die äußerer Oberflächentemperatur höher [51].

In der Nacht kühlt die begrünte Fassade weniger stark ab, als die unbegrünte. Grund dafür ist die fehlende Sicht zum Himmel. Die geringeren Schwankungen der äußeren Oberflächentemperaturen und der UV-Schutz erhöhen die Lebenserwartung der Fassade.

3.8.3. Auswirkungen auf die Oberflächentemperatur der Wand im Innenraum

Im Innenraum wirkt sich die Außenbeschattung und Evapotranspiration wesentlich geringer aus. Die Raumbeschaffenheit und der Wärmeeintrag durch nicht opake Flächen beeinflussen die Innenlufttemperatur wesentlich stärker [51] [52]. Der Effekt ist nur an der Innenoberflächentemperatur der Wand zu sehen. Hier wurde im Zuge der Untersuchungen der Unterschied der Oberflächentemperaturen gemessen. Die Tagesmittelwerte der Innenoberflächentemperatur zwischen begrünter und nicht begrünter Außenfassade werden in Abbildung 64 dargestellt.

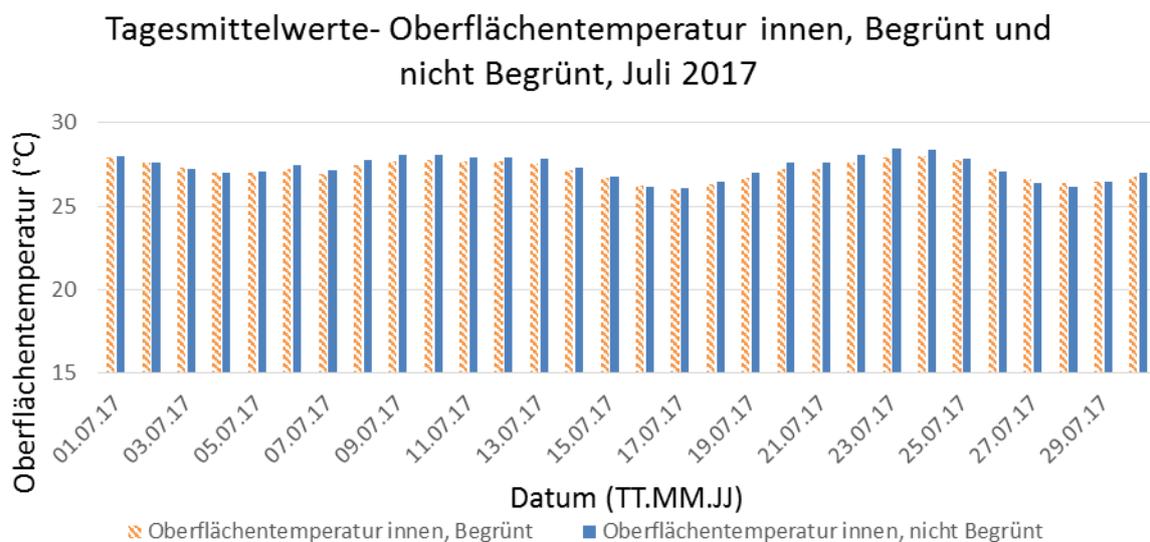


Abbildung 64: Tagesmitteltemperatur der Oberflächentemperatur an der Innenseite der Außenwand.

Der Temperaturunterschied an der Innenseite der Fassade ist sehr gering. Im Mittelwert über einen gesamten Sommermonat ist die innere Oberflächentemperatur der außen begrünten Wand auch im Innenraum geringer. Die Unterschiede sind aber minimal.

Die Verdampfungsenergie im Außenraum wirkt sich auf eine größere Umgebung aus, abhängig von Wetter und Wind. Es ist nicht möglich, den genauen Einfluss auf die Innenraumtemperatur der Luft zu ermitteln, denn bei geöffneten Fenstern strömt bei begrünter Umgebung kühlere Luft in die Innenräume. Das führt zur zusätzlichen Abkühlung im Innenraum. Dieser Effekt wurde in den oben beschriebenen Ergebnissen nicht berücksichtigt.

Innenraumbegrünung reduziert die Lufttemperatur an heißen Tagen, erhöht aber gleichzeitig die Luftfeuchtigkeit. Die gefühlte Temperatur ist im Mittel unverändert.

3.9. Kombination von PV und Begrünung

Im folgenden Kapitel werden die Aufbauten der unterschiedlichen Kombinationen von Gebäudebegrünung und Photovoltaik und ihre Wechselwirkungen aufeinander beschrieben.

3.9.1. Konstruktion und Einschätzung der Wartungsfreundlichkeit für die Begrünungspflege

Gründach und Photovoltaikanlage

Eine Fläche von 66 m² des Gründaches ist mit PV in Form einer aufgeständerten Aufdachanlage mit 12 Modulen überdacht. Es wurden lichtdurchlässige PV-Module (Restdurchlässigkeit 32%, Typ 36M XL glass, 155 Wp) mit einer Modulleistung von 155 Wp verwendet. Wie in der folgenden Abbildung 65 ersichtlich ist, werden 12 Module in Serie geschaltet.

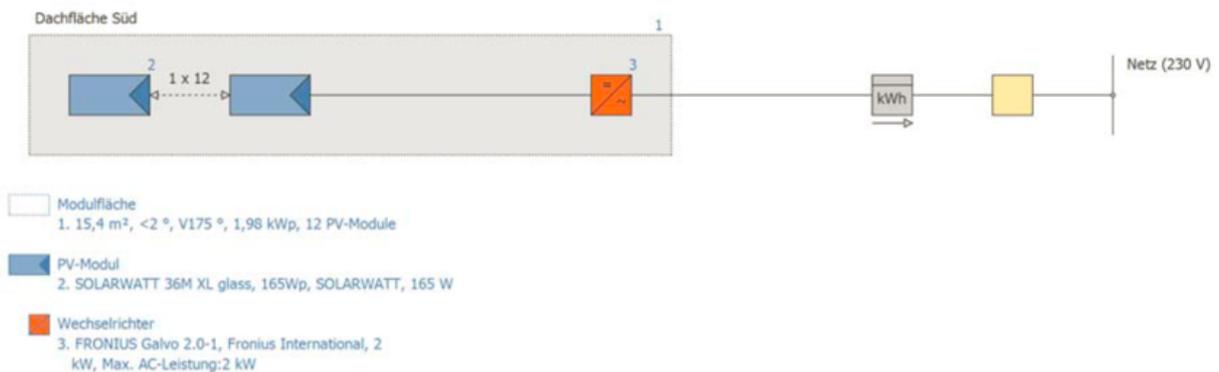


Abbildung 65: Komponenten und Verschaltung Auf Dach

In der folgenden Tabelle 8 ist der Aufbau der Anlage zusammengefasst.

Tabelle 8: Aufbau der Dach-Anlage

Modulfläche	
PV-Module	12 x Solarwatt 36M XL glass, 155 Wp
Neigung	2 °
Ausrichtung	Westen (265°)
Einbausituation	Dachparallel – gut hinterlüftet
PV-Generatorfläche	15,4 m ²
Wechselrichter	
Wechselrichter	1 x FRONIUS Galvo 2.0-1
Hersteller	Fronius International
Verschaltung	MPP 1: 1 x 12
AC-Netz	
Anzahl Phasen	3
Netzspannung (einphasig)	230 V

Der Wechselrichter loggt den PV-Ertrag der Anlage und überträgt diesen via Internet direkt an das Fronius solarweb. Diese Daten können in Form von Tages-, Monats-, oder Jahreswerten abgerufen werden.

Das Flachdach der Turnhalle durfte statisch nicht mehr belastet werden, als durch die bestehende Kieseindeckung. Damit konnte nur die vorhandene Kieseindeckung durch eine gleichwertige Belastung ersetzt werden. Das Substrat für die Dachbegrünung und die neue, verstärkte Isolation entsprachen dieser Vorgabe.

Die zusätzliche Photovoltaik-Anlage konnte die Lasten nur in die tragenden Wände ableiten und durfte über die gesamte Deckenspannweite keine weiteren Stützpunkte haben. Die Konstruktion sollte leicht transportierbar sein, da die Lasten im Innenhof des BRG 7 nicht mit einem Schwerlastkran auf das Flachdach gehoben werden konnten.

Die Abbildung 66 bis Abbildung 69 zeigen die Unterkonstruktion der Aufdachanlage. Drei Auflager im westlichen Bereich der Unterkonstruktion und drei Auflager im östlichen Bereich halten die Träger, auf denen die Schienen befestigt werden, von denen aus wiederum die Module gehalten werden.

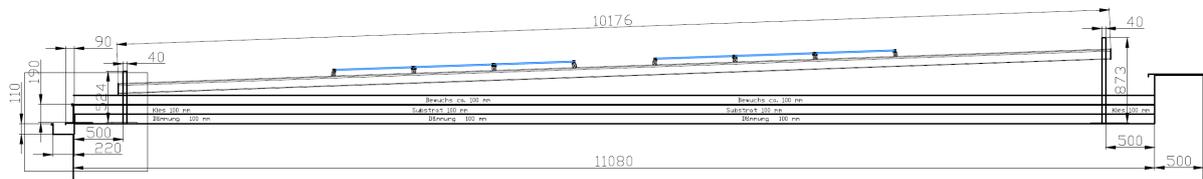


Abbildung 66: Südansicht der Unterkonstruktion

Als Hauptträger fungieren 2 Modulträger (Abbildung 67), die übereinander liegen und miteinander verschraubt wurden. So konnte eine Spannweite von 10,1 m ohne eine nennenswerte Durchbiegung realisiert werden.



Abbildung 67: 2 Modulträger als „Twinni“ übereinander im Doppelpack]

Im Westen ist das Auflager etwas höher, um unterschiedliche Abstände zum Boden zu erhalten und so unterschiedliche Auswirkungen des Abstandes der PV auf die Pflanzen und umgekehrt zu untersuchen.



Abbildung 68: Variante 2 - Untersicht Träger



Abbildung 69: Variante 2 - Seitenansicht Aufdachanlage

Photovoltaik und Grün an der Fassade

An der Südfassade des Gebäudes wurden zwei PV-Anlagen mit je zwei Modulen über sechs wandgebundenen Pflanzkassetten (dasselbe System wie in Punkt 3.1.8 beschrieben) errichtet. Es wurden jeweils zwei Module je Anlage übereinander an der Wand montiert, beide Anlagen liegen an derselben Wand, eine Anlage jedoch etwas östlicher, die andere etwas westlicher. Die beiden Fassadenanlagen unterscheiden sich nicht nur durch den Standort, sondern auch durch die Unterkonstruktion: Eine Variante hat einen Abstand von 25 cm zu den Pflanzkassetten, die zweite Variante hat einen Abstand von 44 cm und verfügt zusätzlich über einen Kippmechanismus, mit dem das PV-Modul bewegt werden kann, um Pflegemaßnahmen besser durchführen zu können.

Es werden lichtdurchlässige (32% Restdurchlässigkeit) PV-Module (Typ 36M XL Glass, 155 Wp) mit einer Modulleistung von 165 Wp verwendet. Wie in Abbildung 70 ersichtlich ist, werden 2 Module in Serie geschaltet.

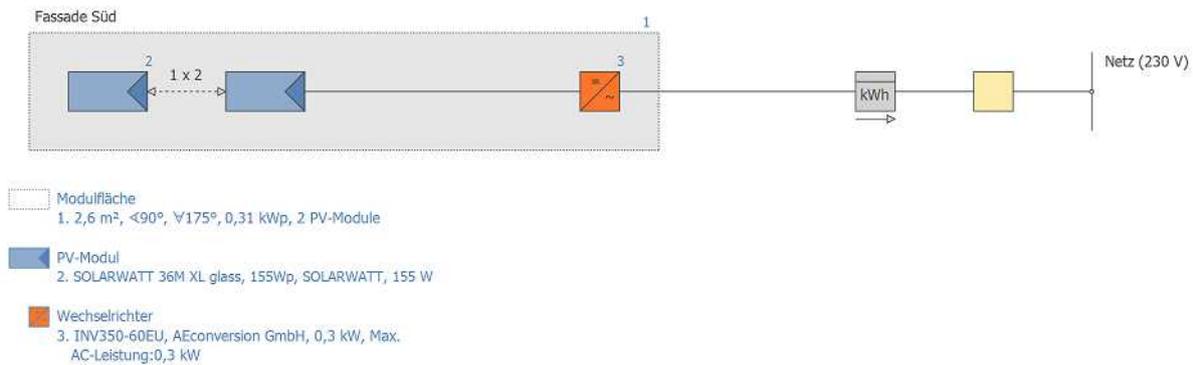


Abbildung 70: Komponenten und Verschaltung Fassade

In Tabelle 9 ist der Aufbau der Fassaden-Anlage zusammengefasst. Die Anlage Ost und West sind bezüglich ihres Aufbaus ident.

Tabelle 9: Aufbau der Anlage Ost bzw. West

Modulfläche	
PV-Module	2 x Solarwatt 36M XL glass, 155 Wp (jeweils Ost und West)
Neigung	90°
Ausrichtung	Süden (175°)
Einbausituation	Dachparallel – gut hinterlüftet
Wechselrichter	
Wechselrichter	1 x INV350-60EU (jeweils einer pro Anlage)
Hersteller	AEconversion GmbH
Verschaltung	MPP 1: 1 x 2
AC-Netz	
Anzahl Phasen	3
Netzspannung (einphasig)	230 V

Der PV-Ertrag für die Wechselrichter der Firma AEconversion wird zwischengelogggt und direkt vom Wechselrichter via Internet an das Datenportal bei ATB-Becker übermittelt, um ein Monitoring zu ermöglichen.

In Abbildung 71 sind die unterschiedlichen Varianten der Unterkonstruktion, sowie die Abstände und Maße dargestellt.

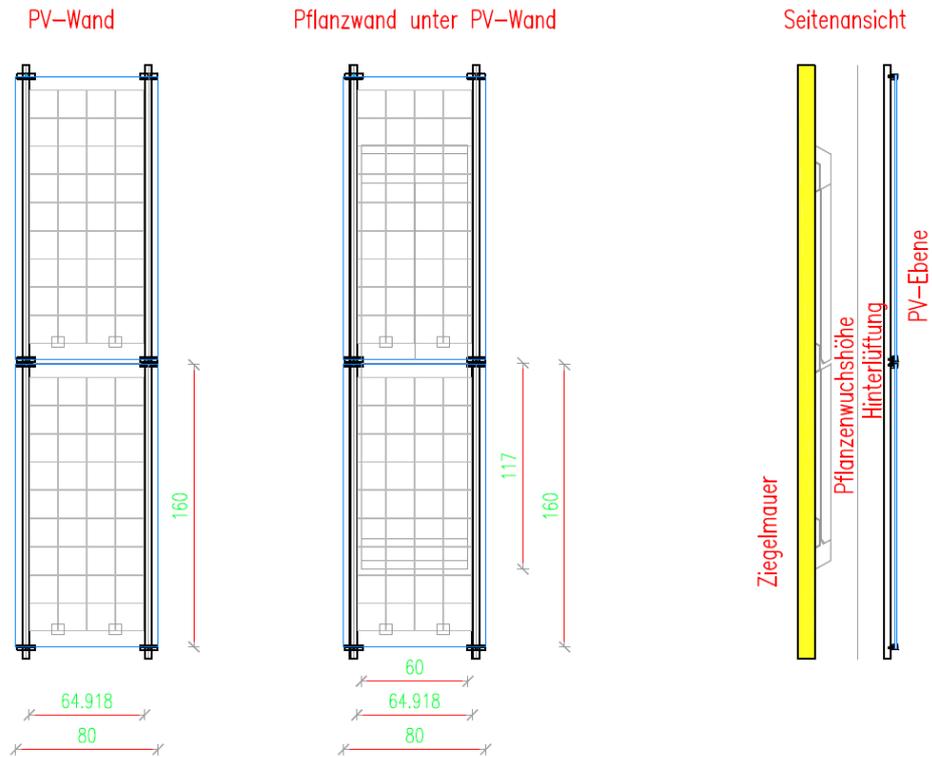


Abbildung 71: Abstände und Maße für die Fassadenkonstruktion

Die Abbildung 72 zeigt die Unterkonstruktionen der klappbaren und der fixen Variante nach der Montage.



Abbildung 72: Links: Klappbare Unterkonstruktion; Rechts: Fixe Unterkonstruktion

Die klappbare Variante weist einen größeren Abstand zur Wand und damit auch zur Begrünung auf, als die fixe Variante.

Bezüglich der Wartungsfreundlichkeit für Pflegearbeiten bei der Bepflanzung konnte festgestellt werden, dass sich das aufklappbare Modul am besten für ungehinderte Bewegungsfreiheit bei

Arbeiten wie Rückschnitt oder Pflanzentausch eignet. Es ist mindestens ein Abstand von 44 cm zwischen Pflanzfläche und Glasmodul notwendig.

Im Sommer 2017, Frühwinter 2017-18 und Sommer 2018 traten Probleme mit dem automatischen Bewässerungs- und Düngungssystem der Pflanzenpaneele (Begrünung) der Fassade auf. Diese Probleme führten zu Vegetationsverlusten, -schäden und der Entwicklung einer kargen Vegetation. Aufgrund der reduzierten Vegetation ist es nicht möglich, Auswirkungen einer gut entwickelten Vegetation auf die Photovoltaik-Produktion zu messen.

3.9.2. Einfluss auf die Betriebstemperaturen

PV+Gründach

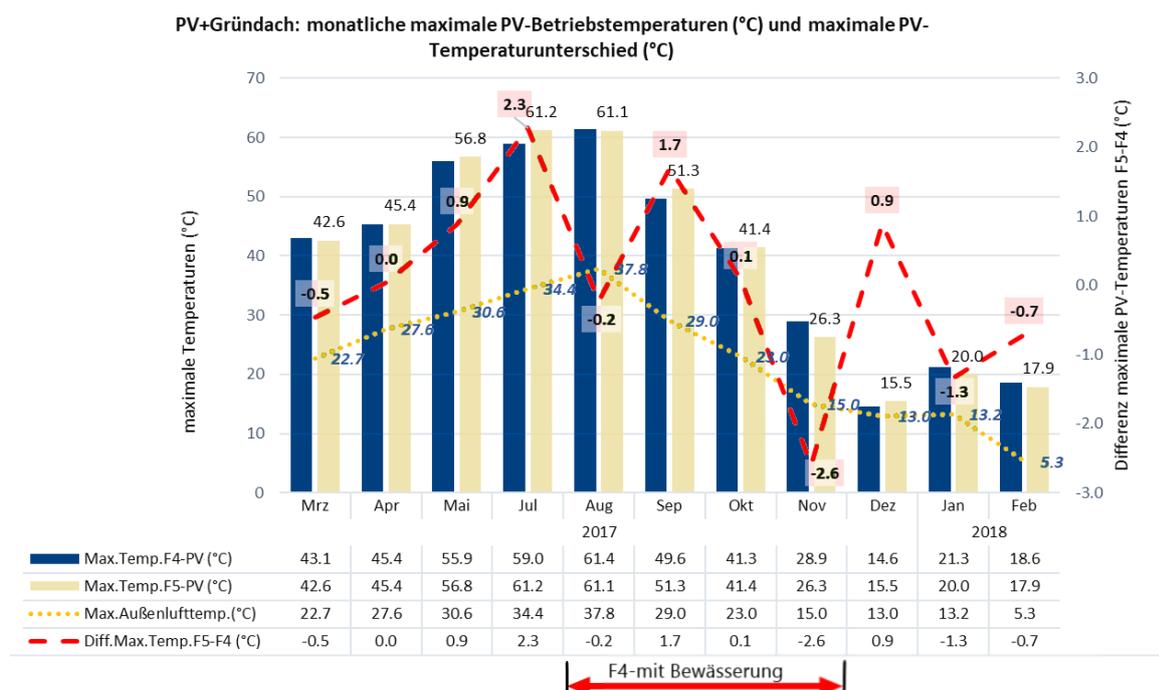


Abbildung 73: PV+Gründach - monatliche maximale Betriebstemperaturen der PV-Module (Max. Temp. F4-PV jeweils die linke Säule, Max Temp. F5-PV jeweils die rechte Säule) und der maximale Temperaturunterschied zwischen F5 vs. F4 (gestrichelte Linie).

Wie bei der Fassadenvariante PV+Grün konnte auch beim PV+Gründach die Kühlwirkung der Begrünung auf die Betriebstemperaturen beobachtet werden, allerdings von geringerer und unterschiedlicher Intensität in beiden Testfeldern. Im Juli und September war F4 um 1,7°C bis 2,3°C kühler als F5, im November und Januar hingegen war F5 um 1,3°C bis 2,6°C kühler als F4. Dies könnte auf ein besseres Verhalten der kühlenden Wirkung der F4-Begrünung während der heißen Monate und der F5-Begrünung während der kalten Monate hinweisen. Durch die Installation des Bewässerungssystems im Testfeld F4 in den Monaten August bis November 2017 sind keine wesentlichen Unterschiede zu erkennen, lediglich im September ist die Temperatur bei F4 geringer als bei F5.

Fassade

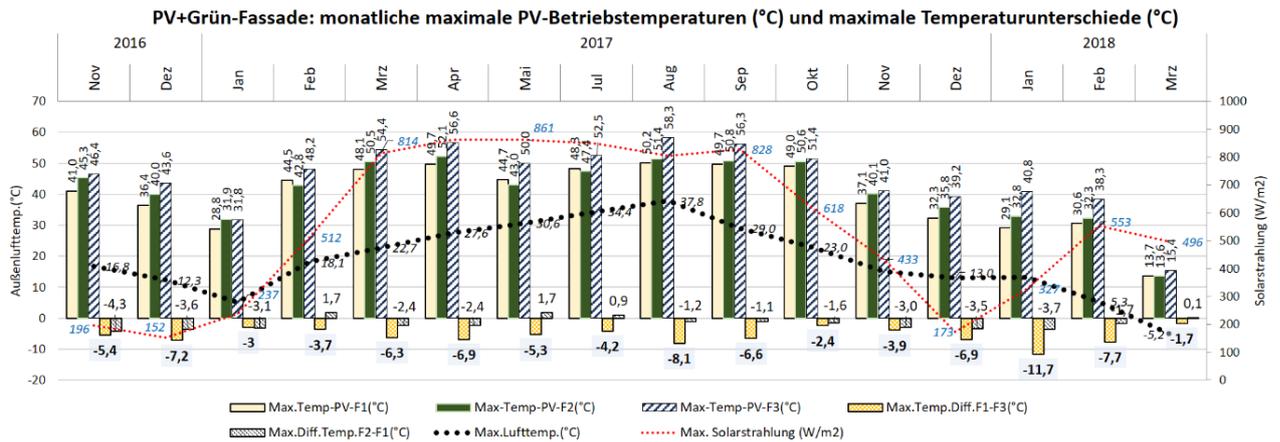


Abbildung 74: monatliche maximale Betriebstemperaturen PV-Module und der maximale Temperaturunterschied zwischen F1 vs. F3 (kariert dargestellt)

Wie beim MFS-Projekt [40] wurde hier in beiden untersuchten Varianten auch der Kühleffekt der Begrünung auf die Betriebstemperaturen der Photovoltaikmodule über das ganze Jahr beobachtet. Die maximalen monatlichen Betriebstemperaturunterschiede (Abbildung 74 und Tabelle 10) zwischen begrünten (F1) und nicht begrünten (F3) PV-Modulen lagen zwischen 3°C und 8°C, mit Peaks von bis zu 11°C.

Da es im Juni zu Ausfällen von Strom- und Internetnetz gekommen ist und auch Kalibrierungen an den Messgeräten durchgeführt wurden, sind zu wenige Daten für eine aussagekräftige Auswertung vorhanden. Deshalb ist der Monat Juni in Abbildung 74, Tabelle 10, Tabelle 11 und Abbildung 73 nicht dargestellt.

Tabelle 10: monatliche maximale Betriebstemperaturen PV-Module und maximale Temperaturdifferenzen zwischen begrünten und nicht begrünten Testfelder (F1 und F3) sowie zwischen beiden begrünten Testfelder (F1 und F2).

Zeitraum	Max.Temp-PV-F1(°C)	Max.Temp-PV-F2(°C)	Max.Temp-PV-F3(°C)	Max.Außen Lufttemp. (°C)	Max. Solarstrahlung (W/m2)	Max. Diff. Temp. F1-F3(°C)	Max.Diff. Temp. PV+Grün F1-F2(°C)
2016							
Nov	41.0	45.3	46.4	16.8	196	-5.4	-4.3
Dez	36.4	40.0	43.6	12.3	152	-7.2	-3.6
2017							
Jan	28.8	31.9	31.8	5.0	237	-3	-3.1
Feb	44.5	42.8	48.2	18.1	512	-3.7	1.7
Mrz	48.1	50.5	54.4	22.7	814	-6.3	-2.4
Apr	49.7	52.1	56.6	27.6	862	-6.9	-2.4
Mai	44.7	43.0	50.0	30.6	861	-5.3	1.7
Jul	48.3	47.4	52.5	34.4	848	-4.2	0.9
Aug	50.2	51.4	58.3	37.8	804	-8.1	-1.2
Sep	49.7	50.8	56.3	29.0	828	-6.6	-1.1
Okt	49.0	50.6	51.4	23.0	618	-2.4	-1.6
Nov	37.1	40.1	41.0	15.0	433	-3.9	-3.0
Dez	32.3	35.8	39.2	13.0	173	-6.9	-3.5
2018							
Jan	29.1	32.8	40.8	13.2	327	-11.7	-3.7
Feb	30.6	32.3	38.3	5.3	553	-7.7	-1.7
Mrz	13.7	13.6	15.4	-5.2	496	-1.7	0.1
Gesamte Periode Max. Temp.	50.2	52.1	58.3	37.8	862	-8.1	-1.9

Mit Ausnahme der Monate Februar, Mai und Juli 2017 hat F1 während der gesamten Messperiode niedrigere Betriebstemperaturen als F2 aufgewiesen. Die Kühlungswirkung der Pflanzen war im Testfeld mit dem größten Abstand (F1 = 44 cm) zwischen der Begrünung und dem Photovoltaikmodul am stärksten. Die maximalen Temperaturunterschiede zwischen beiden begrünten Testfelder (F1 und F2), lagen zwischen 1°C und 3°C mit Peaks von bis zu 4°C, wobei die größten Unterschiede über den Winter beobachtet wurden. Aufgrund der Vegetationsschäden durch die Ausfälle des Bewässerungs- und Düngesystems ist es jedoch nicht möglich, allgemein gültige Aussagen darüber zu treffen. Es ist zu erwarten, dass sich bei optimalen Bedingungen (gut entwickelte Pflanzen) die Auswirkungen noch verbessern.

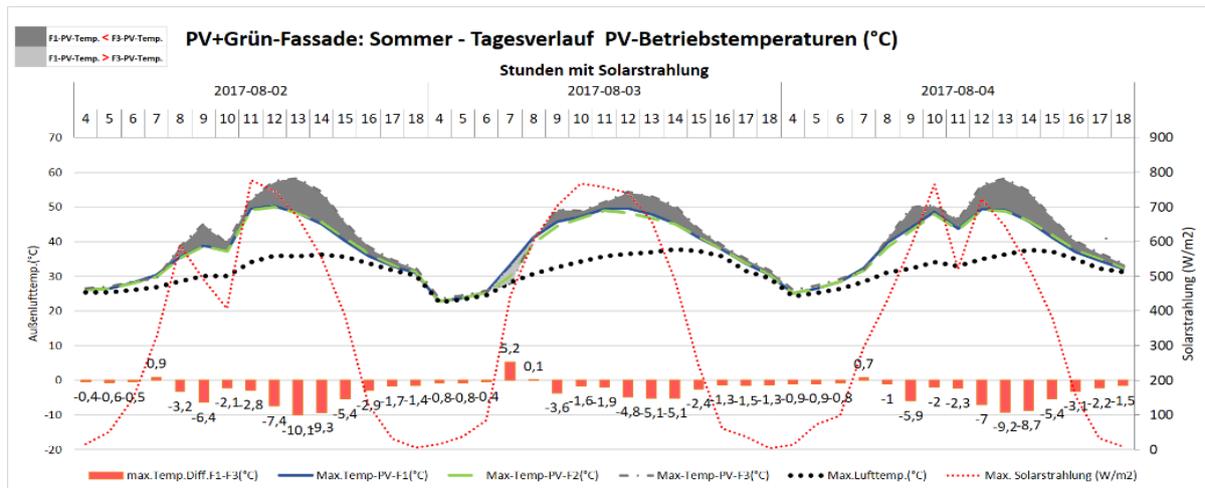
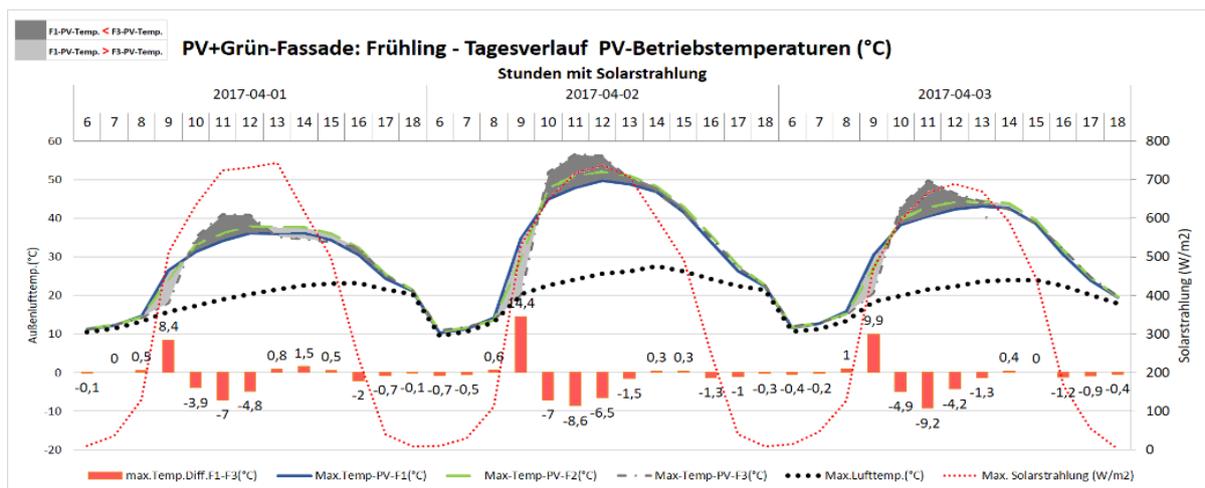
Tagesverlauf der PV-Betriebstemperaturen nach Jahreszeiten

Die Begrünungssysteme agieren als Puffer über das ganze Jahr und schützen die Photovoltaikmodule, in dem sie Großteils vermeiden, dass die Photovoltaikmodule (F1 und F2) die maximale Betriebstemperatur erreichen, die ein normales Photovoltaikmodul ohne Begrünung (F3) erreichen würde. Die Kühlwirkung wird mit einer unterschiedlich ausgeprägten Intensität aufgezeigt, die vor allem von der Jahreszeit (Neigungswinkel der Sonne zum PV-Modul), der Intensität der

Sonneneinstrahlung, der Lufttemperatur und anderen klimatischen Faktoren (Wind, Luftdruck, ...) beeinflusst wird.

Der Kühlungseffekt der Begrünung (dunkelgraue Bereiche in Abbildung 75) tritt während der Maximalwerte von Solarstrahlung und Außenlufttemperatur des Tages, sowie bei abrupten Temperaturschwankungen oder Wetteränderungen auf und zeigt sich am stärksten bei guter Sonneneinstrahlung und hohen Temperaturen über ca. 20°C.

Auf der anderen Seite zeigen die hellgrau markierten Bereiche (Abbildung 75) die Zeiten, in denen das PV-Modul ohne Begrünung (F3) niedrigere Betriebstemperaturen aufwies, als die Module mit Begrünung (F1 und F2). Die niedrigeren Temperaturen von F3 sind auf das Fehlen der Pufferwirkung der Pflanzen zurückzuführen, wie z.B.: bei abrupten Temperaturabsenkungen, Witterungseinflüssen oder das Vorhandensein oder Fehlen von Sonneneinstrahlung.



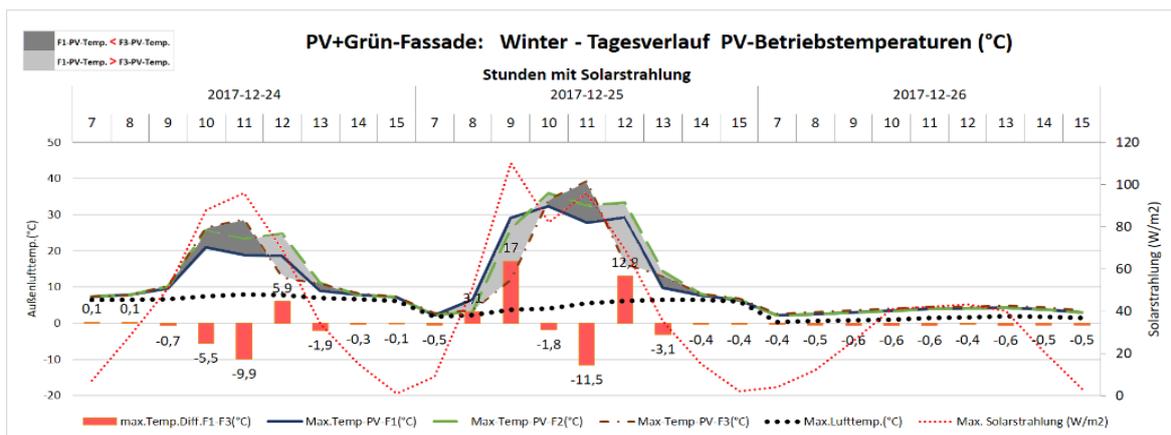
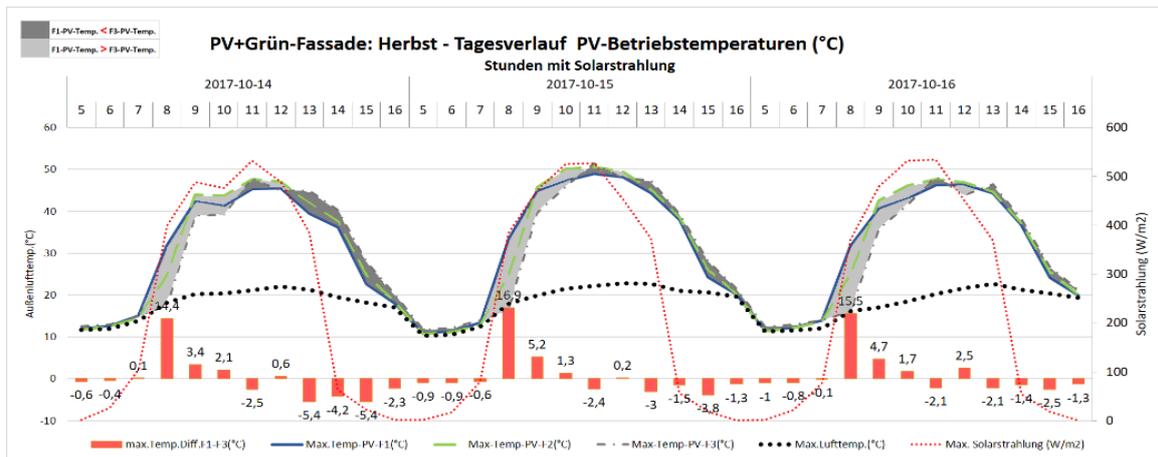


Abbildung 75: Tagesverlauf PV-Betriebstemperaturen für die ausgewählten Tage der unterschiedlichen Jahreszeiten. Die dunkelgrau markierten Bereiche stellen die Kühlwirkung (max. Temp. Diff. F1-F3) der PV+Grün Fassade-Kombination dar und die hellgrau markierten Bereiche zeigen die Zeiten, in denen das PV-Modul ohne Begrünung (F3) niedrigere Betriebstemperaturen, als die Module mit Begrünung (F1 und F2) hatte.

3.9.3. Einfluss des PV-Dachsystems auf die Substrat-Temperaturen

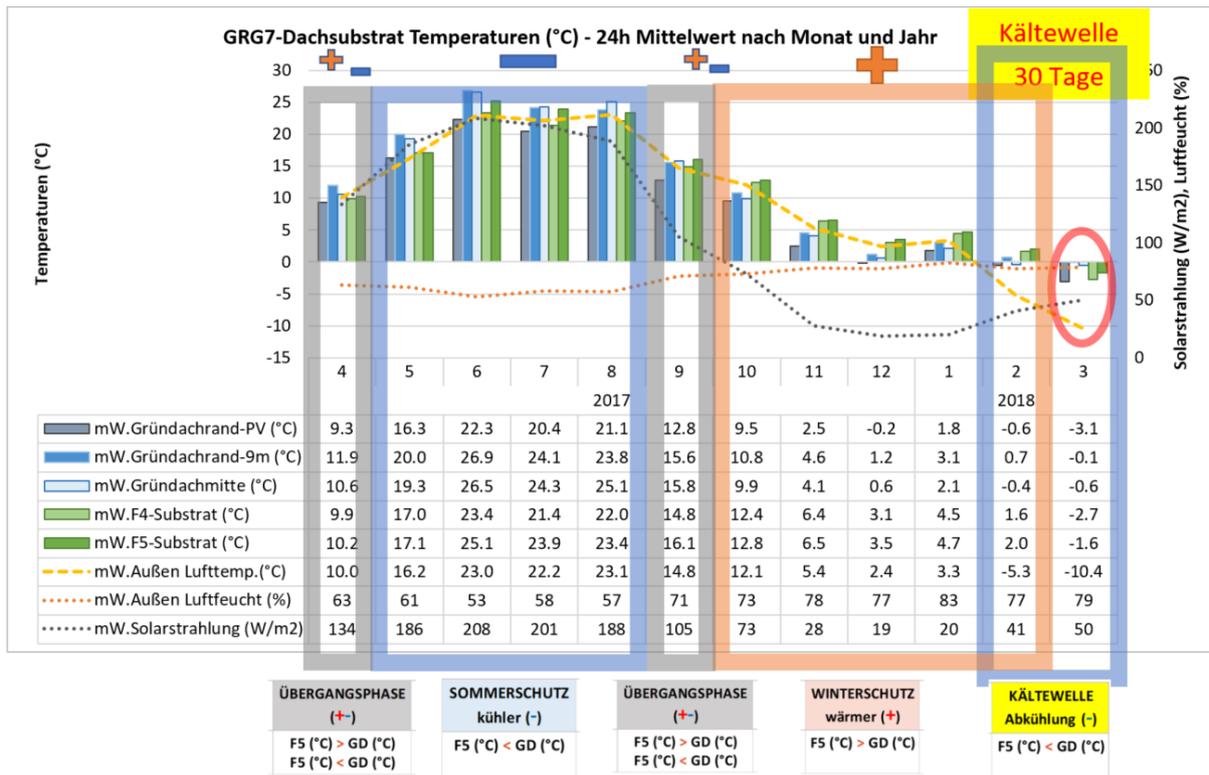


Abbildung 76: PV+Gründach - monatliche Mittelwerte der Substrat-Temperaturen. Phasen der Pufferwirkung [43] Die Reihenfolge der Legende (von oben nach unten) entspricht der Reihenfolge der Säulen (von links nach rechts).

Abbildung 76 zeigt wie das PV+Gründach-System als Wärmepuffer über das ganze Jahr hinweg – als Sommer- und als Winterschutz – funktioniert. Die Pufferwirkung des PV+Gründach passt sich an die klimatischen Bedingungen an und wirkt abhängig von den Außenlufttemperaturen als Schutz gegen Hitze oder gegen Kälte. Während des Winterschutzes hält die Substrattemperatur über dem Gefrierpunkt und verhindert eine weitere Abkühlung des Daches. Dieser Schutz wird gewährt, solange die Außentemperaturen nicht länger als fünf Tage hintereinander unter -10°C fallen. Bei Überschreitung der 5-Tage-Grenze erfolgt eine kontinuierliche Abkühlung des Substrates (Kältewelle), bis die Außentemperaturen wieder über den Gefrierpunkt ansteigen und das Substrat seine Pufferwirkung wieder aufladen kann. Beim Sommerschutz sind die Temperaturen im Substrat zwischen 7°C und 9°C niedriger im Vergleich zu einer extensiven Dachbegrünung ohne PV (Gründach). Während den Übergangsjahreszeiten wechselt sich die Schutzfunktion ab, auf Sommer- oder Winterschutz, abhängig von der Außenlufttemperatur und den klimatischen Bedingungen. Die Temperaturen im Substrat waren während des Tages zwischen 6°C und 9°C kühler und in der Nacht zwischen 2°C und $3,5^{\circ}\text{C}$ wärmer als bei einem Gründach ohne PV. Im Winter war F5 bei maximalen Außentemperaturen im gesamten Tagesverlauf zwischen 2°C und $3,5^{\circ}\text{C}$ wärmer und bei minimalen Außenlufttemperaturen durchgehend 1°C wärmer.

Zwischen den beiden PV+Gründach-Varianten F4 und F5 hat sich F5 als besseres und stabileres System erwiesen, welches einen ausgezeichneten Dämmschutz sowohl für den Sommer, als auch für den Winter bietet.

3.9.4. PV-Grün-Fassade - Einfluss auf die Wandtemperaturen

Wie beim MFS-Projekt [40] wurde auch hier die Pufferwirkung der PV+Grün Fassaden-Kombination auf die Wandtemperaturen in beiden untersuchten Varianten über das ganze Jahr beobachtet (Abbildung 77). Die maximalen und minimalen Wandtemperaturunterschiede zwischen F1 vs. F3 zeigen in den schraffierten Bereichen den zusätzlichen Dämmschutz der PV+Grün Fassaden-Kombination. Im Sommer sind die maximalen Wandtemperaturen hinter der PV+Grün Fassade (F1) um 3°C bis 9°C kühler als bei einer Wand ohne Begrünung (F3) und im Winter sind die Temperaturen bei F1 zwischen 1,4°C bis 3°C wärmer als bei F3. Diese Pufferwirkung wurde auch schon beim Vorgängerprojekt, MFS-Projekt [40] [41], festgestellt, jedoch mit geringerer Intensität. Ebenso passt sich hier die Pufferwirkung an die Wetterbedingungen an und abhängig der Außenlufttemperaturen und klimatischen Bedingungen bietet sie einen Sommer- oder Winterschutz.

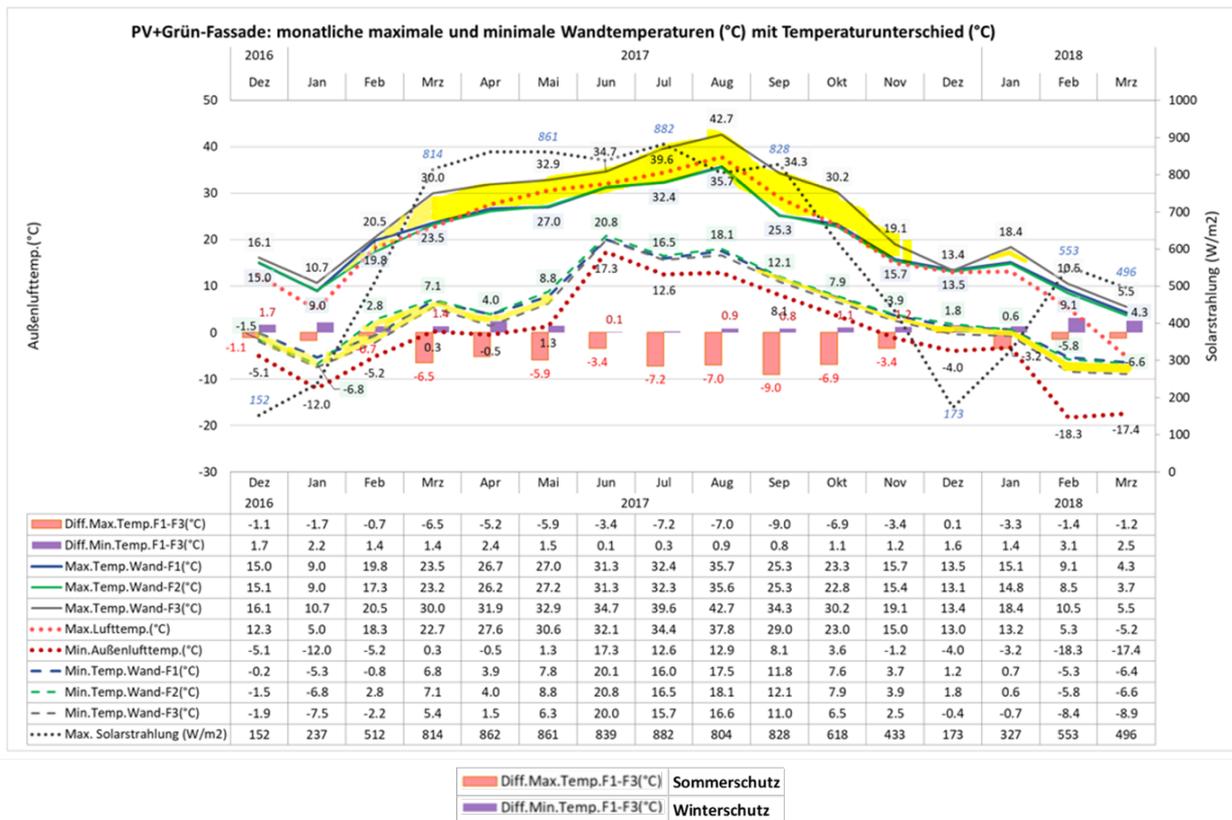


Abbildung 77: Fassade - maximale und minimale monatliche Wandtemperaturen sowie die Wandtemperaturunterschiede zwischen F1 vs. F3. Die eingefärbten Bereiche stellen den Sommer- (Diff. Max. Temp. F1-F3) und Winterschutz (Diff. Min. Temp. F1-F3)

3.9.5. Ergebnisse zu den Erträgen der photovoltaischen Stromerzeugung

Messdatenauswertung PV-Grün Dach

Der PV-Ertrag des PV-Grün-Dach Systems wurden zwischengelogggt und direkt vom Wechselrichter via Internet an das Datenportal von Fronius (Solarweb) übermittelt. Die Daten können tages-, monats- und jahresweise abgerufen werden. Die Daten aus den Simulationen wurden nach einer gewissen Versuchsdauer den Daten der Messergebnisse gegenübergestellt. Die Ergebnisse sind in der folgenden Abbildung ersichtlich.

Vergleich Aufdachanlage 2017

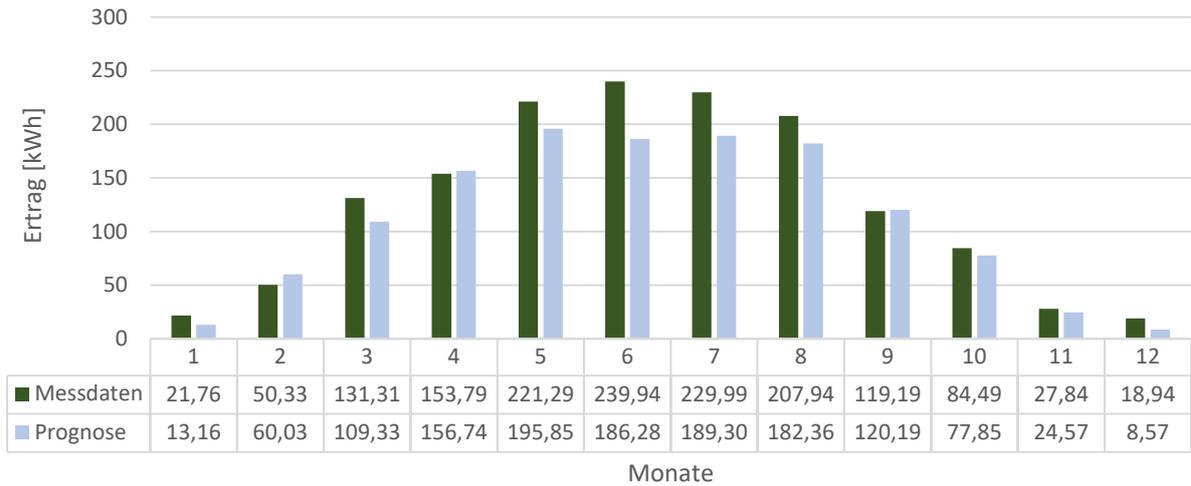


Abbildung 78: Vergleich der Ergebnisse aus Simulation und den Messdaten für die Aufdachanlage. (Messdaten Links, Prognosewerte rechts)

In der Abbildung 78 stellen die hellblauen Balken die Prognose aus der Simulation dar, die dunkelgrünen Balken stellen die Messergebnisse aus dem Jahr 2017 dar. Aus dem Vergleich ist deutlich zu erkennen, dass in den Monaten von März bis August 2017 die Messdaten bis auf April über den prognostizierten Daten liegen. Allein im September, Februar und April liegen die Messwerte gering unter den Werten der Prognose. Die Summe der Messdaten ergibt einen Ertrag von 1.506,81 kWh, die Prognose einen Wert von 1.324,2 kWh.

Abbildung 79 zeigt die Messdaten der Aufdachanlage für das Jahr 2016. Hier sind die monatlich gemessenen Erträge bis auf Oktober deutlich höher, als die prognostizierten Erträge.

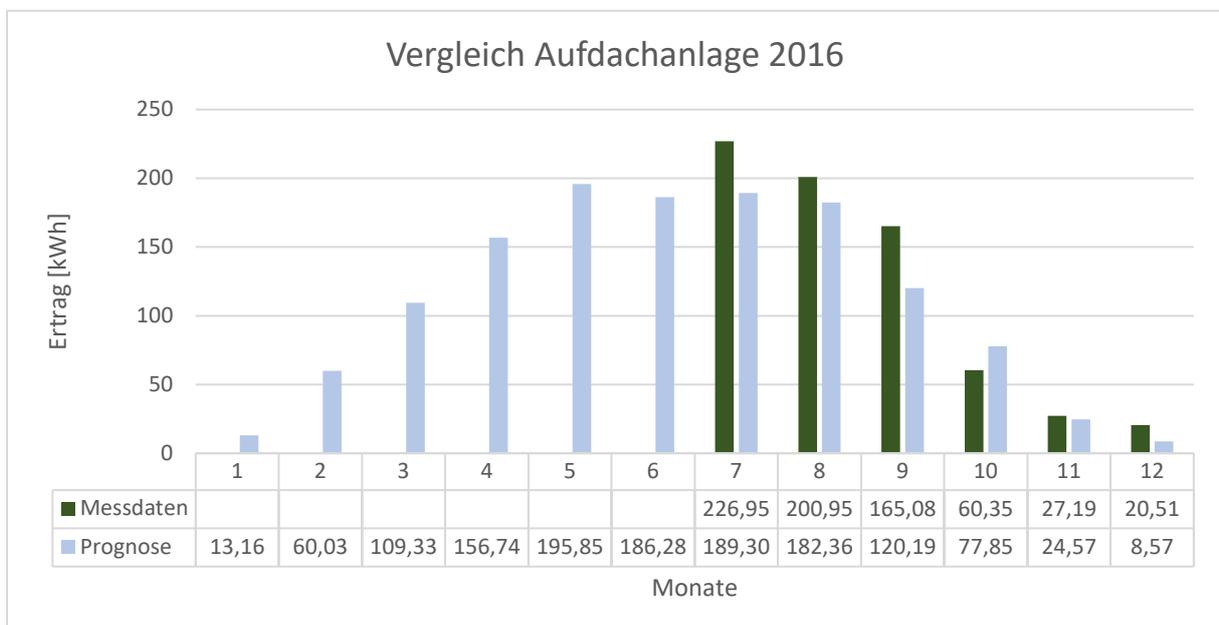


Abbildung 79: Vergleich der Ergebnisse aus Simulation und den Messdaten für die Aufdachanlage (Messdaten Links, Prognosewerte rechts)

Abbildung 80 zeigt die aktuellsten Messdaten der Aufdachanlage. Hierbei ist zu erkennen, dass der gemessene Ertrag im Februar bzw. im März deutlich geringer ausfällt, als jener aus dem Jahr 2017. Dies kann den Wetterverhältnissen (Schnee in Wien) zugeschrieben werden.

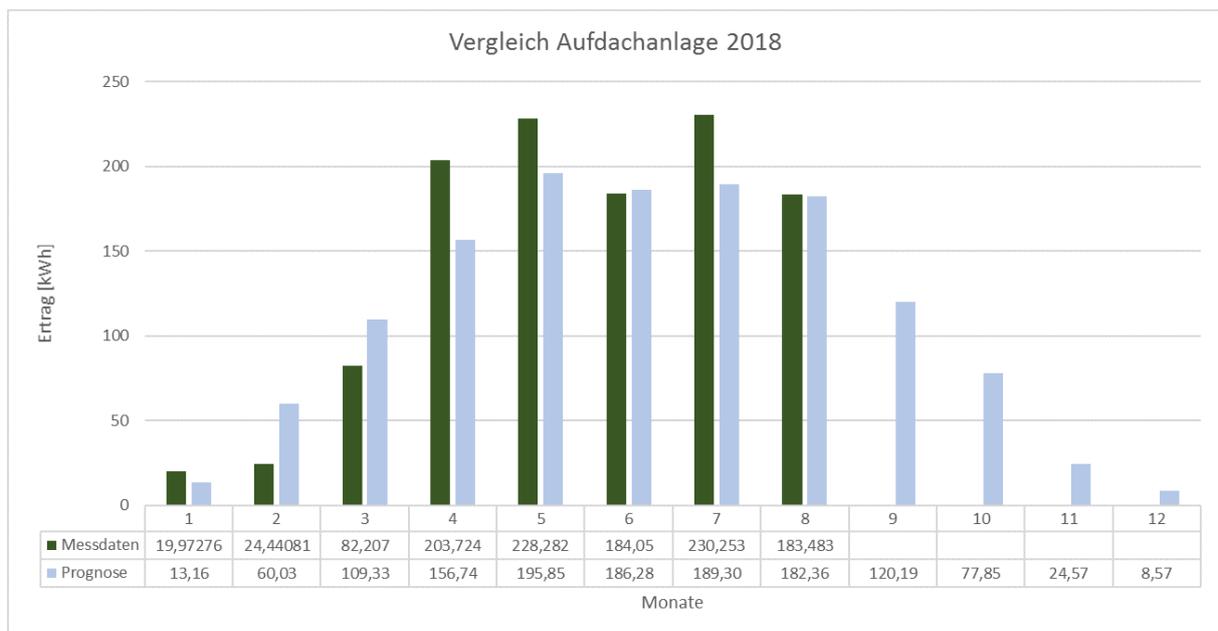


Abbildung 80: Vergleich der Ergebnisse aus Simulation und den Messdaten für die Aufdachanlage (Messdaten Links, Prognosewerte rechts)

Messdatenauswertung PV-Grün Fassade

Die Daten aus den Simulationen wurden ebenfalls den Daten der Messergebnisse aus der realen PV-Grün-Fassaden Anlage gegenübergestellt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 81 ersichtlich.

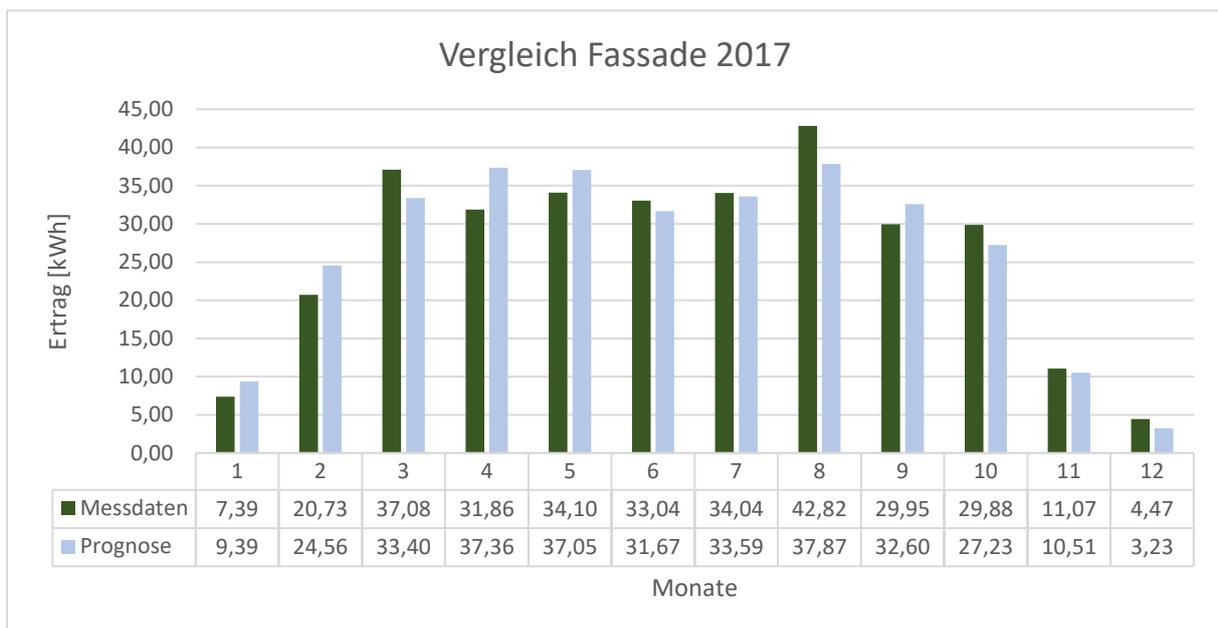


Abbildung 81: Vergleich der Ergebnisse aus Simulation und den Messdaten für die Fassadenanlage. (Messdaten Links, Prognosewerte rechts)

In der Abbildung 81 stellen die hellblauen Balken die Prognose aus der Simulation dar, die dunkelgrünen Balken stellen die Messergebnisse dar. Während in den Monaten Jänner, Februar, April, Mai und September die prognostizierten Daten höher liegen, liegen in den Monaten März, Juni,

Juli, August, Oktober, November und Dezember die realen Daten der Anlage höher. Diese Abweichungen sind auf die Verschattung am Standort zurückzuführen. Es wurden zwar an den beiden Stellen (Ost und West) unterschiedliche Sonnenkurven aufgenommen, dennoch sind hier aufgrund der Genauigkeit Abweichungen vorhanden. Allein im Jänner und im September liegen die Messwerte gering unter den Werten der Prognose. Die Summe der Messdaten des Jahres 2017 ergibt einen Ertrag von 316,434 kWh, die der Prognose bei einem Wert von 318,45 kWh.

In Abbildung 82 werden die Messergebnisse aus dem Jahr 2016 gezeigt. Hier ist zu erkennen, dass der Monat September im Jahr 2016 erheblich ertragreicher war, als im Jahr 2017, jedoch der Monat Oktober erheblich ertragsärmer war, als im Jahr 2017.

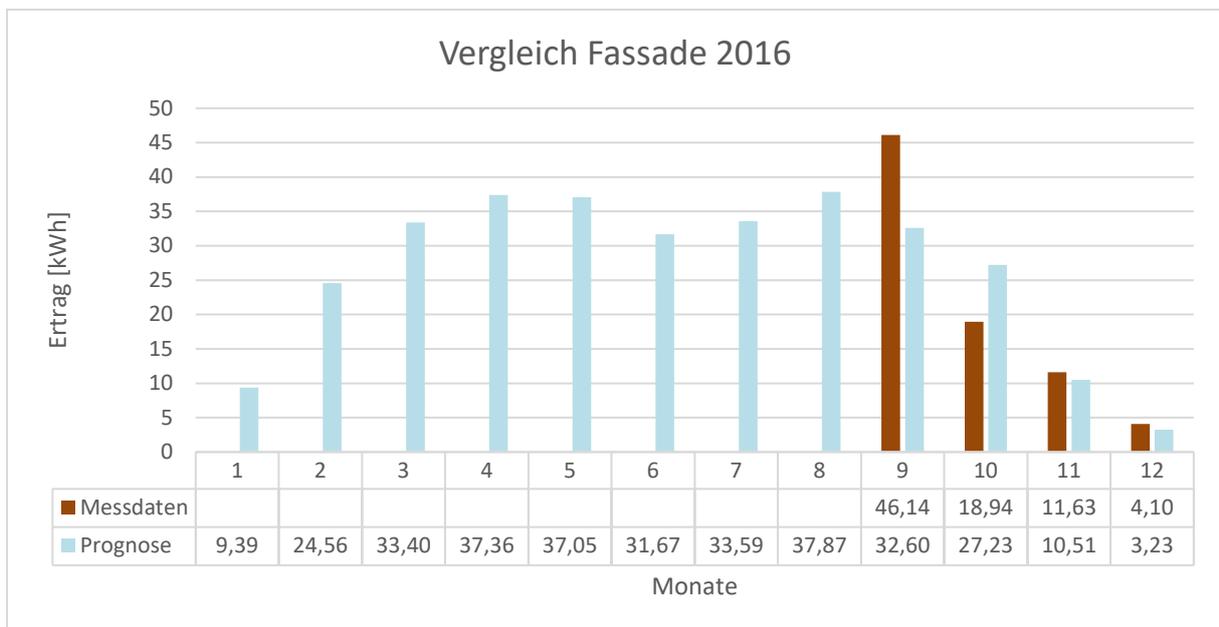


Abbildung 82: Vergleich der Ergebnisse aus Simulation und den Messdaten für die Fassadenanlage. (Messdaten links, Prognosewerte rechts)

In Abbildung 83 werden die aktuellsten Messdaten des Jahres 2018 dargestellt. Auch hier sind die Auswirkungen des Winters zu erkennen. Die gemessenen Erträge sind vor allem im Februar deutlich geringer, als die des Februars des Vorjahres.

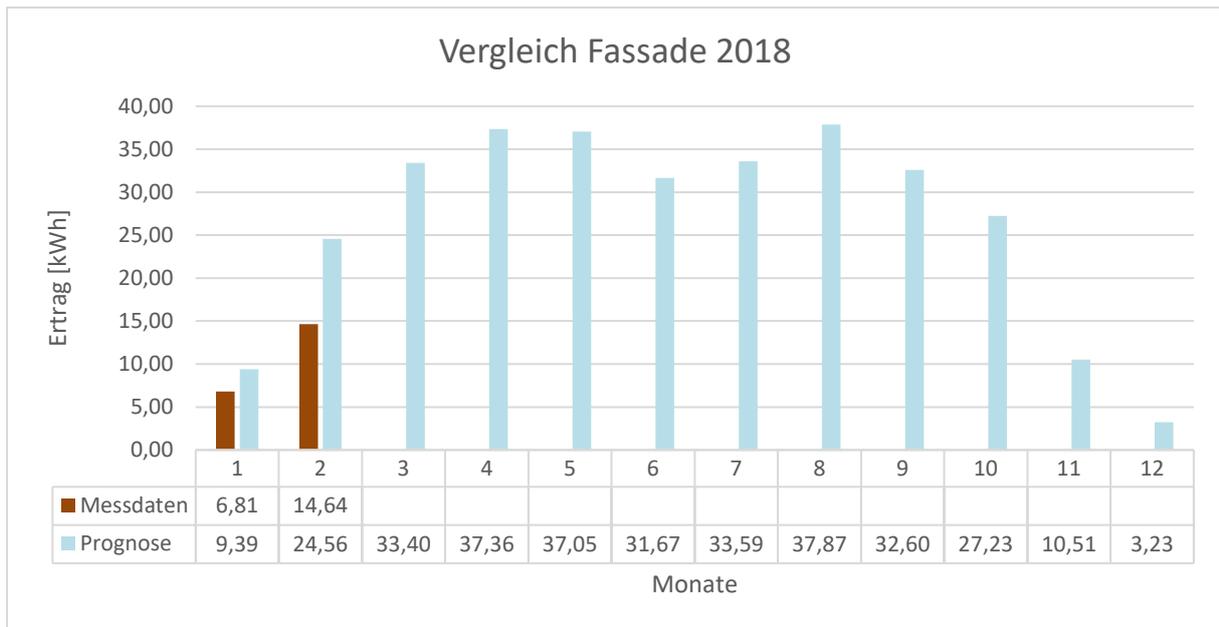


Abbildung 83: Vergleich der Ergebnisse aus Simulation und den Messdaten für die Fassadenanlage. (Messdaten Links, Prognosewerte rechts)

In der folgenden Abbildung 84 werden die beiden Anlagen Ost und West getrennt voneinander betrachtet, um die Unterschiede aufzeigen zu können.

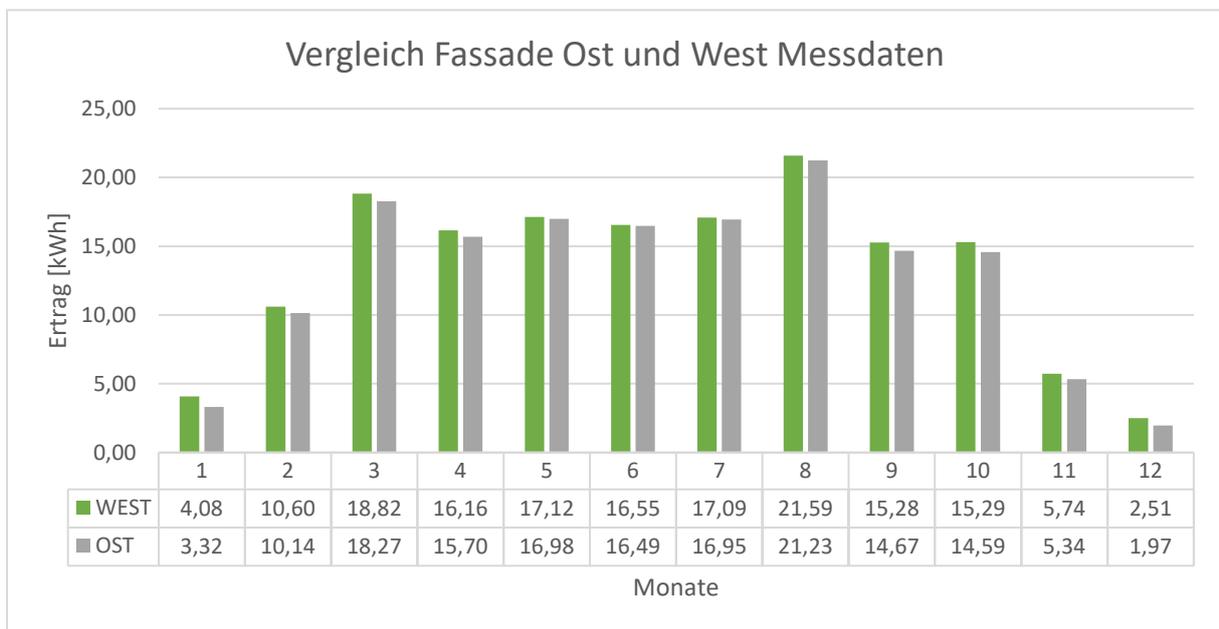


Abbildung 84: Vergleich der Fassadenanlage im östlichen und im westlichen Bereich aus den Messdaten. (Messdaten Links, Prognosewerte rechts)

Im Gegensatz zu den Prognosedaten zeigen die Messdaten der realen Anlage genau umgekehrte Werte. In allen Monaten ist der PV-Ertrag der westlichen Fassadenanlage größer, als jener Ertrag der östlichen Anlage. Über ein gesamtes Jahr gesehen, erreicht die westliche Anlage einen Ertrag von gesamt 163,78 kWh, die östliche erreicht einen Ertrag von 158,086 kWh.

3.9.6. Einfluss auf den PV-Ertragsunterschied (Fassade)

Um die Einflüsse der unterschiedlichen Abstände der Testfelder (F1 = 44 cm und F2 = 25 cm) zu überprüfen, wurden die Photovoltaikerträge der Testfelder F1 und F2 verglichen (Tabelle 11). Für die Analyse wurde das Zeitintervall zwischen 10 und 14 Uhr ausgewählt, um mögliche Einflussfaktoren wie Schatten bei allen Jahreszeiten zu vermeiden. Der Vergleich zeigt unterschiedliche Ergebnisse, abwechselnde höhere Erträge zwischen F1 und F2 und eine Endbilanz mit 0,4 % besserer Erträge für das Testfeld mit größerem Abstand (F1).

Tabelle 11: Photovoltaikerträge Vergleich der begrünten Testfelder (F1-F2) für das Zeitintervall von 10:00 bis 14:00 Uhr.

Photovoltaikerträge Vergleich								
Testfelder: PV+Grün-Kombination (F1 und F2)								
Zeitintervall 10-14 Uhr								
Zeitraum	Max.Temp-PV-F1(°C)	Max.Temp-PV-F2(°C)	Temp.Diff. F1-F2 (°C)	Max.Luft temp.(°C)	Max. Solarstrahlung (W/m2)	F1-Ertrag (Wh)	F2-Ertrag (Wh)	Ertragsunterschied (%)
2016								
Okt	18.5	18.9	-0.4	10.4	-	7999	7838	2.0%
Nov	41.0	45.3	-4.3	16.8	196	4079	4376	-7.3%
Dez	36.4	40.0	-3.6	12.3	152	1439	1450	-0.8%
2017								
Jan	28.8	31.9	-3.1	5.0	237	2819	2885	-2.3%
Feb	44.5	42.8	1.7	18.3	512	7814	8063	-3.2%
Mrz	48.1	50.5	-2.4	22.7	814	13641	13655	-0.1%
Apr	49.7	52.1	-2.4	27.6	862	11702	11697	0.0%
Mai	44.7	43.0	1.7	30.6	861	11334	11367	-0.3%
Jul	48.3	47.4	0.9	34.4	848	12309	12336	-0.2%
Aug	50.2	51.4	-1.2	37.8	804	15489	15527	-0.2%
Sep	49.7	50.8	-1.1	29.0	828	11942	11716	1.9%
Okt	49.0	50.6	-1.6	23.0	618	12816	12247	4.4%
Nov	37.1	40.1	-3.0	15.0	433	4754	4847	-2.0%
Dez	32.3	35.8	-3.5	13.0	173	1910	1854	2.9%
2018								
Jan	29.1	32.8	-3.7	13.2	327	3210	3000	6.5%
Feb	30.6	32.3	-1.7	5.3	553	6519	6405	1.7%
Mrz	13.7	13.6	0.1	-5.2	496	1181	1157	2.0%
Gesamt_ergebnis	50.2	52.1	-1.9	37.8	862	130957	130420	0.4%

Aufgrund der teilweise schlechten Pflanzenentwicklung durch Probleme mit dem automatischen Bewässerungs- und Düngemittelsystem und unter Berücksichtigung der Analyseergebnisse, ist es nicht möglich, für diesen Auswertungszeitraum allgemein gültige Aussagen zu treffen.

3.9.7. Auswirkungen auf die Pflanzen

Ein Freihalten der PV-Flächen vor Verschattung durch Vegetation ist unbedingt notwendig, weshalb die Pflege bei der Kombination von PV und Grün extrem wichtig ist. Bei zu geringen Abstand zwischen PV- und Begrünungssystem wird die Pflege allerdings schwierig. Zusätzlich heizt sich der Luftraum bei geringem Abstand hinter den Modulen stärker auf und es sind mehr Ausfälle an der Bepflanzung sichtbar. Ein Minimum von 45 cm Abstand von PV und Begrünung sind erforderlich, um

sowohl gute Zugänglichkeit zur Pflege als auch eine ausreichende Hinterlüftung der PV zu gewährleisten.

Am Gründach halten die Photovoltaik-Module Strahlung von der Vegetationsoberfläche ab, weswegen das Substrat weniger schnell austrocknet. Im Gegensatz dazu kann natürlicher Niederschlag die Flächen unter der PV bei der gewählten Konstruktionsart kaum erreichen. Eine künstliche Bewässerung oder eine entsprechend dicke Vegetationstragschicht (min 15 cm) sind daher erforderlich.

Grundsätzlich bleiben die durch die PV-Aufdachanlage beschatteten Flächen länger grün und können so als „Breeding Spots“ für die Wiederbesiedelung des Gründaches nach Stressperioden dienen.

3.9.8. Labormessung PV-Fassade

Die Labormessungen wurden verwendet, um vergleichbare und vor allem reproduzierbare Ergebnisse unter Laborbedingungen zu bekommen. Bei dieser Messung wird eine Versuchskonstruktion mit einem Sonnensimulator mit einer durchschnittlichen Leistung von 521 W/m² bestrahlt.

Für einen Vergleich wird die Versuchskonstruktion einmal mit einer bepflanztten Fassade und einmal mit einer normalen Reibputzfassade vermessen. Die Messung selbst sollte Aufschluss über die unterschiedlichen Temperaturen hinter dem PV-Paneel geben. Die Temperaturen wurden im Zwischenraum über die Fläche mit einer Hitzkugelsonde gemessen. Zusätzlich wurden PT-100 Sensoren oben und unten 5 cm hinter dem PV-Paneel angebracht.

In der ersten Darstellung (Abbildung 85) sind die Temperaturen über die Fläche von 1 m² aufgetragen. Die Messungen erfolgten zwischen Fassade bzw. Pflanzen und PV-Paneel mit etwa 5 cm Abstand zum PV-Paneel. Für die Veranschaulichung wurde die Tabelle farblich hinterlegt, wobei rot die höheren und grün die niedrigeren Temperaturen darstellt.

Referenz Temperature (°C)	width	25 cm	37,5 cm	50 cm	62,5 cm	75 cm
	high					
	25 cm	37,13	37,32	37,50	37,60	37,70
	50 cm	33,87	33,73	33,77	33,77	33,80
	75 cm	31,80	31,73	31,67	31,47	31,27
Pflanzen Temperature (°C)	width	25 cm	37,5 cm	50 cm	62,5 cm	75 cm
	high					
	25 cm	35,50	35,20	34,90	35,05	35,20
	50 cm	32,60	31,87	31,83	31,80	31,93
	75 cm	30,90	30,87	30,83	30,22	29,60

Abbildung 85: Temperaturen über die Fläche

Die Ergebnisse zeigen einen deutlichen Temperaturanstieg beim Luftaustritt. Es ist gut zu erkennen, dass bei der bepflanztten Variante die Temperatur weniger stark ansteigt. Dadurch lässt sich der positive Effekt der Kühlung durch die Pflanzen bestätigen.

In weiterer Folge wurden auch die Temperaturen unten, oben sowie direkt an einem der Wafer gemessen:

Referenz				
Messungen	Aufzeichnungsbeginn	Lufttemperatur Eintritt [°C]	Lufttemperatur Austritt [°C]	Wafertemperatur [°C]
Messung 1	29.03.17/ 14:30	28	41	50
Messung 2	30.03.17/ 13:15	26,5	39	49
Messung 3	30.03.17/ 15:30	26,6	40,2	49,8
Mittelwert		27,03	40,07	49,60
Pflanzen				
Messungen	Aufzeichnungsbeginn	Lufttemperatur Eintritt [°C]	Lufttemperatur Austritt [°C]	Wafertemperatur [°C]
Messung 1	31.03.17/ 14:15	26,1	37	45,5
Messung 2	03.04.17/ 13:20	27	37,1	45,3
Messung 3	03.04.17/ 15:00	27,8	38,8	46,1
Mittelwert		26,97	37,63	45,63

Abbildung 86: Temperaturen Labormessung PT100

Um Streuungen zu vermeiden, wurde jede Messung dreimal durchgeführt und der Mittelwert berechnet. Wenn die in Abbildung 86 in Gelb hinterlegte Eintrittstemperatur am unteren Punkt des PV-Panels verglichen wird, sind die Eintrittstemperaturen der Anordnungen mit und ohne Pflanzen annähernd gleich. Die Temperaturen am Austritt bzw. am oberen Punkt des Panels (in Rot hinterlegt) weisen einen Temperaturunterschied von etwa 2,5 K auf. Die Auswirkung der Pflanzen lässt sich jedoch am besten direkt auf den Wafern zeigen. Hierzu wurde ein PT-100 eigens in das PV-Panel bereits bei der Herstellung des Moduls einlaminiert. Die Temperaturen an der Zelle (in grün hinterlegt) zeigen einen Temperaturunterschied von etwa 4 K der Anordnung PV ohne Pflanzen gegenüber der Variante PV mit Pflanzen.

Damit kann unter labortechnischen Bedingungen der Vorteil von PV mit dahinterliegender Bepflanzung nachgewiesen werden. Dies bedeutet, dass ein m² Fassade doppelt genutzt werden kann und Pflanzen und Photovoltaik unter der Bedingung, dass 32% Restlicht gewährleistet wird, miteinander kombiniert werden können.

3.9.9. Eigenverbrauchsabschätzung

Die Eigenverbrauchsabschätzung ist nicht Teil des Projektes, sie ist jedoch interessant für die ganzheitliche Betrachtung der Nutzung von erneuerbaren Energien. Aus Verbrauchsangaben der Bewässerung, der Pumpen, der Beleuchtung und der Steuerungen wurde der elektrische Verbrauch, der für die Pflanzen innen und außen notwendigen Infrastruktur ermittelt. Zudem wurden im Monitoring die Ertragswerte der Photovoltaiksysteme am Dach und in der Fassade gemessen. Verbrauch und Erzeugung wurden gegenübergestellt, um den Autonomiegrad zu ermitteln. Die Verbrauchswerte sind in Tabelle 12 zusammenfasst.

Tabelle 12: Verbrauchswerte der Begrünungssysteme

Verbrauch	Vliessystem Eingang	Vliessystem Klasse	Trogsystem Innen
kWh/Tag	0,74	0,74	2,55
kWh/Jahr	270,1	270,1	928,93
kWh/m2/Jahr	33,76	41,55	54,64

Die Verbrauchswerte werden den PV-Erträgen gegenübergestellt. Die Pumpen für die Bewässerung lassen sich zeitlich steuern und dadurch kann eine Korrelation mit dem Ertrag geschaffen werden. Rein bilanziell decken die Erträge der PV-Anlage den kompletten Verbrauch, wie in Abbildung 87 ersichtlich.

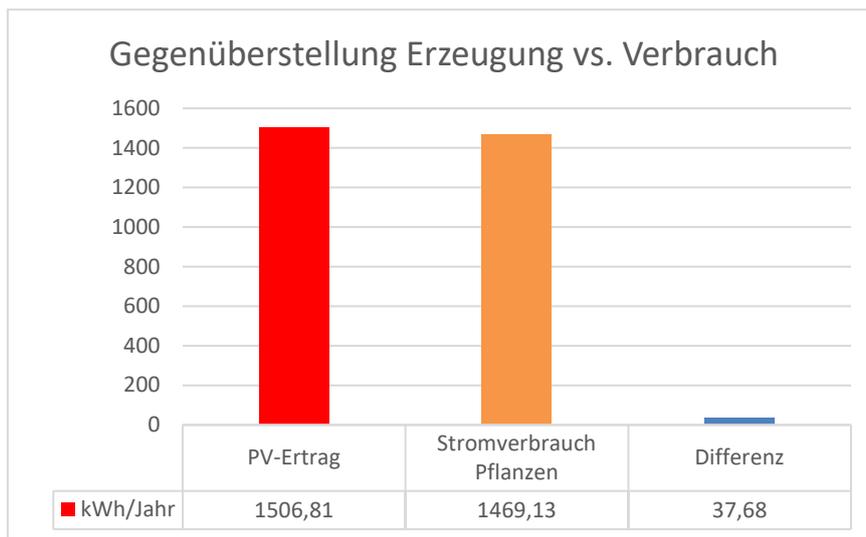


Abbildung 87: Gegenüberstellung Erzeugung vs. Verbrauch

Es ist keine Batterie notwendig, da Überschussenergie im Schulgebäude verbraucht wird. Im Mai 2018 wurden ein Zähler und ein Datenlogger im Schaltschrank des Physiksaales des BRG7 installiert, um das Lastprofil aufzunehmen. Die gemessenen Verbrauchswerte bestätigen die getroffene Aussage.

3.10. Integration in den Schulalltag und Wissensvermittlung an die Schüler und Schülerinnen

Durch aktive Mitarbeit der Schule (SchülerInnen, Lehrkörper, Direktion) wurde in den Unterrichtseinheiten der unterschiedlichen Fächer ein Gefühl für Themen wie Energieeffizienz, Umweltschutz, erneuerbare Energie etc. vermittelt (Bewusstseinsbildung).

Gerade im laufenden Schulbetrieb hat sich gezeigt, dass hierdurch eine hohe Akzeptanz für die Begrünungsmaßnahmen geschaffen wurde, und so auch etwaige Schäden durch Vandalismus vermieden werden konnten.

Durch die laufende Präsenz des Forschungsteams im Schulgebäude sowie eine direkte, unmittelbare Kommunikation zu Direktion und Lehrkörper konnten auch Entscheidungen schnell und unbürokratisch herbeigeführt und erforderliche Informationen auf kurzem Wege ausgetauscht

werden.

Das aktive Mitarbeiten der SchülerInnen etwa bei der Herstellung der Innenraumbegrünung in Workshopatmosphäre hat einen hohen Lerneffekt und fördert die soziale Kompetenz der Jugendlichen.

Die Einbindung des Wissens zu Gebäudebegrünung und deren Auswirkungen wurde über folgende Kanäle an die Schülerinnen und Schüler weitergegeben:

- **Gespräche und Workshops mit den Lehrern und Lehrerinnen und anderem Schulpersonal um Projektinhalte, Erfahrungen mit den Begrünungssystemen und Messergebnisse auszutauschen.**

Am Anfang, in der Mitte und am Ende des Projektes wurden Gesprächsrunden durchgeführt, um Informationen und Erfahrungen auszutauschen.

- Einbindung der Thematik im Unterricht in entsprechend passenden Fächern, Arbeiten mit realen Daten der Messungen im Unterricht und in vorwissenschaftlichen Arbeiten.

In passenden Fächern wie Physik und Chemie können Verknüpfungen der Unterrichtsinhalte zu den Begrünungsmaßnahmen günstig herbeigeführt werden. Im Zuge des Schwerpunktes Stadtökologie wurde beispielsweise die Fauna am Schuldach erforscht, im Physikunterricht wurde die Photovoltaikanlage erklärt und die Daten verarbeitet und im Informatikunterricht mit Daten der Messkampagnen aus dem Projekt gearbeitet.

- **Vorstellung des Projektes bei den Berufsinformationstagen und am Tag der offenen Tür**

Für den Tag der offenen Tür wurden vom Projektteam leicht verständliche Präsentationstafeln erstellt, die die Inhalte des Forschungsprojektes vermitteln sollten.

Im Rahmen von Berufsinformationstagen wurden den Klassen die Berufsfelder der im Projekt involvierten Firmen sowie die Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen vorgestellt.

- **Gemeinsame Bepflanzungsworkshops mit den Schülerinnen und Schülern**

Das Trogsystem wurde in den unteren Reihen von den Schülern und Schülerinnen selbst bepflanzt. Vorbereitend wurde mit den Kindern Lebensraumtypen und Pflanzenarten spielerisch erarbeitet und die Pflanzen unter Anleitung in das System eingebracht.

In den späteren Workshops wurden aus bestehenden Pflanzen in der Wand Ableger gezogen und anhand dessen die vegetative Vermehrung von Pflanzen erklärt. Die selbst gezogenen Pflanzen konnten anschließend wieder in die Grünwand eingepflanzt werden. Durch das „selber Hand anlegen“ ist die Bindung zu einer Begrünung hergestellt.



Abbildung 88: die Schüler und Schülerinnen beim Bepflanzungsworkshop des Wandbegrünungssystems im Biologiesaal

- **Anzeige der Photovoltaik-Leistung in anschaulicher Darstellung**

Zur besseren Sensibilisierung der Schüler für das Thema Photovoltaik wurde beschlossen, zwei Monitore in der Schule zu installieren, die mittels einer aufbereiteten Slideshow vergangene und aktuelle Ertragswerte der Aufdach-Photovoltaikanlage visualisieren. Somit werden sowohl Schüler als auch das Schulpersonal über den von der Photovoltaikanlage produzierten Strom und dessen Nutzungsmöglichkeiten ansprechend informiert und die Daten können im Unterricht genutzt werden.

Da diese Monitore mit einem Steuercomputer erweitert wurden, können die Ertragsdaten und die daraus generierte Slideshow entweder über LAN oder WLAN empfangen werden. Vor allem die Möglichkeit, über WLAN mit dem Monitor zu kommunizieren, bietet eine sehr große Ortsunabhängigkeit und somit eine hohe Flexibilität der Auswahl des Installationsortes an.



Abbildung 89: Möglichkeiten der individuellen Einstellungen der Slideshows [Quelle: Solarfox]

Der Monitor von Solarfox funktioniert mit fast allen gängigen Datenloggern. Der Webserver greift auf diese Daten zu und generiert damit eine Slideshow, welche individuell via Webbrowser konfiguriert wurde. Die Slideshow lässt sich für jeden Monitor beliebig verändern und erweitern (Abbildung 89).

Um so viele Personen wie möglich zu informieren und zu erreichen, wurde ein Monitor direkt in der Eingangshalle installiert. Dadurch wird dieser von jeder Person, welche die Schule betritt, wahrgenommen, was zu einem größeren Verbreitungspotential und damit einer größeren Akzeptanz von erneuerbaren Energien führt.

Der zweite Monitor wurde im Physiksaal installiert. Über den Physiksaal ist die PV-Anlage jederzeit auch im Unterricht sichtbar. Im Physiksaal befindet sich der einzige Zugang zur Anlage. Somit kann der Monitor gemeinsam mit der sichtbaren PV-Anlage bestmöglich in den Unterricht integriert werden.

3.11. Ökonomische und ökologische Auswirkungen

Ausschlaggebend für die Entscheidung, ein Sanierungsprojekt bzw. ein Bauprojekt im Allgemeinen umzusetzen, ist in den meisten Fällen die wirtschaftliche Rentabilität. Bezogen auf Begrünungssysteme wurde diese Betrachtung bisher nicht wissenschaftlich betrachtet. Um diese wirtschaftliche Anreizfunktion in Zukunft auch in Bezug auf Begrünungssysteme darstellen zu können, wurde im Rahmen dieses Projektes eine ganzheitliche Betrachtung der ökologischen sowie ökonomischen Auswirkungen durchgeführt. Diese Betrachtung bezieht sich in der vorliegenden Ausführung speziell auf die in der Kandlgasse 39 umgesetzten Begrünungsmaßnahmen. Die hieraus gewonnenen Erkenntnisse lassen daher nur eingeschränkt Rückschlüsse auf andere Begrünungsprojekte zu. Die Gründe hierfür werden im Schlussteil erläutert. Des Weiteren ist zu erwähnen, dass es sich bei der durchgeführten Betrachtung um eine bestimmte Herangehensweise handelt, deren Eignung bzw. Erweiterungsmöglichkeiten ebenso im Fazit dieses Kapitels erläutert werden.

Zur Beurteilung der ökonomischen Auswirkungen der Gebäudebegrünung wird die Methode der Kosten-Nutzen-Analyse verwendet. Dabei werden die Auswirkungen der Gebäudebegrünung auf die Umwelt nach unterschiedlichen Methoden monetär bewertet. Ein bewusster Einsatz der Methode der Kosten-Nutzen-Analyse ist wichtig, da eine Vergleichbarkeit der Einflussfaktoren sowie der Auswirkungen nicht immer gegeben ist. Ebenso können lediglich die Einflüsse innerhalb bestimmter Systemgrenzen miteinbezogen werden. Diese Methode wurde unter anderem gewählt, um Stärken und Schwächen der derzeitigen Bewertungsmöglichkeiten aufzuzeigen. Die Bewertung der ökologischen Auswirkungen erfolgt anhand einer Lebenszyklusanalyse. Hierbei werden die Umweltauswirkungen der Begrünungsmodelle für deren gesamten Lebenszyklus von der Herstellung über die Nutzung bis zur Entsorgung untersucht. Anhand von vier Indikatoren werden die graue Energie in der Herstellungsphase, die rote Energie in der Phase der Nutzung sowie die CO₂-Bindung untersucht.

Vertikale Begrünung hat Auswirkungen auf das Gebäude selbst und seine Umwelt. Zu beachten ist allerdings, dass nicht alle Auswirkungen quantitativ bewertbar sind. Tabelle 13 zeigt die bisherigen Bewertungsmöglichkeiten nach dem Vorbild von Perini und Rosasco [53]. Ziel der durchgeführten Untersuchungen war es, eine weitere Wissensbasis durch Untersuchung der verschiedenen Auswirkungen für die Bewertungsmöglichkeiten bieten zu können, doch es bleiben noch zahlreiche Auswirkungen ohne adäquate Bewertungsmöglichkeit. Die Bewertung der ökonomischen und ökologischen Auswirkungen erfolgt für die Rahmenbedingungen des Schulgebäudes in der Kandlgasse GRG7.

Tabelle 13: Bewertungsmöglichkeiten der Nutzen der vertikalen Begrünung [53]

	Auswirkung auf	Quantitative Bewertung	Qualitative Bewertung
GEBÄUDE	Energieeinsparung Heizperiode	x	
	Energieeinsparung Kühlperiode	x	
	Langlebigkeit der Fassade	x	
	Immobilienpreise		x
	Ästhetik des Gebäudes		x
MENSCH	Lärmminderung	x	
	CO ₂ -Reduktion	x	
	NO _x -Reduktion	x	
	Feinstaub-Reduktion	x	
	Menschliche Gesundheit		x
	Menschliches Wohlbefinden		x
STADT & UMWELT	Luftqualität allgemein		x
	Mikroklima		x
	Luftfeuchtigkeit		x
	Städtische Hitzeinseln		x
	Attraktivierung des Stadtbildes		x
	Erhöhte Biodiversität		x
	Regenwasserrückhalt		x
	Subventionen	x	

3.11.1. Ökonomische Auswirkungen

Für die durchgeführte Kosten-Nutzen-Analyse werden sowohl die anfallenden Kosten als auch der entstehende Nutzen (persönlich und sozial) unterteilt, um einerseits die direkten Auswirkungen auf die Schule zu ermitteln und andererseits auch die volkswirtschaftlichen Effekte beurteilen zu können. Um den Wert der Kosten und Nutzen über den betrachteten Lebenszyklus des Systems heute zu bewerten, wird die Kapitalwertmethode herangezogen.

$$K_0(i^*) = \sum_{t=1}^T \frac{Z_t}{(1+i^*)^t}$$

mit $K_0(i^*)$ – Kapitalwert bezogen auf den Zeitpunkt t=0

T – Betrachtungszeitraum

Z_t – Zahlungsstrom in Periode t

i^* – Kalkulationszinssatz

Formel 11: Kapitalwert

Sowohl die Kosten als auch der monetäre Nutzen fallen zu verschiedenen Zeitpunkten während des Betrachtungszeitraums an. Anhand der Kapitalwertmethode werden diese Ein- und Auszahlungen vergleichbar gemacht, da für jede Zahlung der Wert zum Zeitpunkt t=0 bestimmt wird. Gemäß ÖNORM B 1801-2 [54] wird dieser Zeitpunkt, welcher in diesem Fall dem Zeitpunkt der Fertigstellung

entspricht, als Bezugszeitpunkt bezeichnet. Ferner definiert diese Norm die Lebenszykluskosten als *Summe der Barwerte der Objekt-Errichtungskosten gemäß ÖNORM B 1801-1 [55] und der Objekt-Folgekosten*. Der Barwert als Ergebnis der Kapitalwertmethode ist von verschiedenen Faktoren abhängig und wird entscheidend durch den verwendeten Kalkulationszinssatz beeinflusst. Unter diesem Kalkulationszinssatz versteht sich jener Zinssatz, zu dem das Kapital auch außerhalb der betrachteten Investition angelegt werden könnte. Eine sichere Investition stellen risikolose Bundesanleihen dar, diese stellen eine für jeden zugänglichen Investition dar [56]. Um den Kalkulationszinssatz für diese Art der Investition zu bestimmen, wird der Realzinssatz gemäß Formel 12 bestimmt [57]. Die Inflationsrate beträgt nach Angaben der Österreichischen Nationalbank 2 % [58]. Der Basiszinssatz der Österreichischen Nationalbank beträgt seit dem 1. Juli 2016 –0,62 % [56]. Aus diesem Nominalzinssatz i und der Inflationsrate $\pi=2$ % ergibt sich ein Realzinssatz r in einer Höhe von –2,57 % für die Bundesanleihen.

$$r = \frac{1 + i}{1 + \pi} - 1$$

mit r – Realzins

i – Nominalzins

π – Inflationsrate

Formel 12: Realzins

Um eine Vergleichbarkeit der Investition in Begrünung und der Alternativinvestition zu erreichen, ist es besonders wichtig, dass Investitionen, welche das gleiche Risiko aufweisen, miteinander verglichen werden. Erhöhtes Risiko bei einer Investition spiegelt sich direkt in einer höheren Verzinsung wider. Da es sich bei einer Investition in vertikale Begrünung um eine Art der Immobilieninvestition handelt, bietet sich als Kalkulationszinssatz die Immobilienrendite für Wien an. Die EHL-Unternehmensgruppe hat für Wien in Abhängigkeit der Bezirke diese Rendite sowohl für Wohn- als auch für Gewerbe- und Büroimmobilien untersucht. Für den siebten Bezirk liegt sie nach diesen Untersuchungen im Mittel bei 3,0 % [59][60]. Unter Berücksichtigung der Inflation ergibt sich demnach gemäß Formel 11 ein Kalkulationszinssatz von 0,33 %.

Neben diesem Zinssatz wirkt sich auch die angenommene Nutzungsdauer deutlich auf die Lebenszykluskosten aus. Diese werden für das BRG 7 für alle Systeme mit 20 Jahren angesetzt.

Die **persönlichen Kosten** für den gesamten Lebenszyklus setzen sich aus den Kosten für die Errichtung, für die Instandhaltung, Wartung und Pflege sowie schlussendlich für den Abbruch und die Entsorgung zusammen.

Als **Kosten für die Errichtung** werden die tatsächlich angefallenen Kosten herangezogen, wie sie ihm Rahmen des Projekts von den Firmen in Rechnung gestellt wurden.

Die **Kosten für die Instandhaltung, Wartung und Pflege** ergeben sich aus dem tatsächlichen Aufwand der letzten Jahre, welcher auf die Folgejahre übertragen wird. Hierbei ist zu beachten, dass die Pflege der Systeme in der Anfangsphase in der Regel höher ist. Die Kosten für die Pflege gliedern sich in die Grünpflegearbeiten & Wartung der Systeme sowie die Kosten für den Pflanzentausch. In Abhängigkeit des Systems kommen Kosten für die Wartung und die Reinigung des Wassertanks oder auch einen Hubsteiger für die Wartung der beiden Außensysteme hinzu. Die Erneuerung einzelner

Bestandteile wie z.B. der Tropfschläuche für das Bewässerungssystem wird in Abhängigkeit ihrer in den Produktdatenblättern bzw. von Herstellern angegebenen Lebensdauern bestimmt. Bei den Photovoltaikanlagen ist außerdem nach einer Nutzung von 10 Jahren ein Austausch der Wechselrichter notwendig. Diese sind aufgrund des durchgeführten Monitorings (da es sich um ein Forschungsprojekt handelt) anders dimensioniert als in üblichen Systemen in der Praxis. Auch bei der Unterkonstruktion für die PV-Module handelt es sich um eine Sonderanfertigung, die preislich über herkömmlichen Unterkonstruktionen liegt. Dies ist bei der Auswertung zu berücksichtigen. Eine Verallgemeinerung für Objekte außerhalb des Schulgebäudes in der Kandlgasse ist nach jetzigem Stand nicht möglich.

Auch der Wasserbedarf der Systeme ist mit Kosten verbunden: einerseits durch die Instandhaltung des Bewässerungssystems (z.B. Erneuerung der Bewässerungsschläuche) und andererseits durch die Kosten des Wasserverbrauchs, welcher in Tabelle 14 für jedes der verwendeten Systeme dargestellt wird. Der Wasserpreis von Wiener Wasser wird mit 1,86 €/m³ angesetzt [61]. Die Systeme im Innenraum werden beleuchtet. Die hierbei benötigte Energie verursacht Kosten, welche mit dem Verbrauchspreis von 0,074734 €/kWh angesetzt werden [62]. Der Strom- sowie der Wasserverbrauch der beiden verschiedenen Systeme wurden anhand von separaten Zählern erhoben und sind als Mittelwert über den gesamten Projektzeitraum in Tabelle 14 und Tabelle 15 dargestellt.

Tabelle 14: Wasserverbrauch der Begrünungssysteme

Begrünungssystem	Wasserverbrauch <i>in m³/m²/Jahr</i>
Modulares System	1,14
Troggebundenes System außen	0,24
Troggebundenes System innen	0,14
Vliestaschensystem Klasse	8,85
Vliestaschensystem Eingang	0,13

Tabelle 15: Stromverbrauch der Begrünungssysteme innen

Begrünungssystem innen	Stromverbrauch <i>in kWh/Jahr</i>
Trogssystem	54,64
Vliestaschensystem	33,76

Am Ende des Lebenszyklus muss die vertikale Begrünung entfernt und entsorgt werden. Für das modulare Begrünungssystem fallen aufgrund der verschiedenen zusammengehörenden Schichten höhere Entsorgungskosten an. Die Entsorgung von Baurestmassen kostet 200 €/Tonne [63]. Diesen Preis weist auch die Entsorgung von Erdaushub und Bauschutt auf, welcher für die Entsorgung des Substrats und der Bestandteile des troggebundenen Begrünungssystems sowie die Dachbegrünung angenommen wird. Die Entsorgung der Aluminiumtröge ist kostenlos. Nach BKI 2016 [64] werden 16 €/m² Begrünungsfläche für den Abbruch von Fassadenverkleidungen angenommen. Für die Entsorgung der PV-Module wird nach Auskunft eines Entsorgungsunternehmens angenommen, dass diese 350 €/t kostet. Bei einem Gewicht von 12,21 kg/m² ergeben sich daraus Kosten von 4,27 €/m² Modulfläche. Wie sich diese Angaben innerhalb des Betrachtungszeitraums von 20 Jahren ändern, ist nicht bekannt. Die Mooswand weist nach Herstellerangaben ein Gewicht von ca. 4,5 kg/m² auf, woraus sich Entsorgungskosten in der Höhe von 0,90 €/m² ergeben. Die Kosten für den Abbruch und

die Entsorgung ergeben sich demnach aus der begrünten Fläche sowie dem Gewicht der einzelnen Systembestandteile.

Unter sozialen Kosten werden alle volkswirtschaftlichen Kosten verstanden, die durch die vertikale Begrünung entstehen. Die Subventionen in Form von Fördermitteln der Stadt Wien gelten als Ausgaben der Stadt und sind demnach, falls die Zahlung von Fördermitteln erfolgt ist, in gleicher Höhe als soziale Kosten anzusetzen. Für die Begrünung des Schulgebäudes in der Kandlgasse wurde keine Subvention gezahlt, weswegen diese auch nicht als soziale Kosten anfallen.

In den Abbildungen Abbildung 90 bis Abbildung 92 werden Kosten und Nutzen gegenübergestellt.

Dach						
KOSTEN						
ERRICHTUNG	Häufigkeit	Zeitpunkt		Kosten in €/m ²	Kosten diskontiert in €/m ²	Kosten gesamt in €
		von Jahr	bis Jahr			
Begrünung inkl. Substrat & Pflanzen	einmalig	0	0	€ 47,20	€ 47,20	€ 8 662,14
Gesamtkosten Errichtung						€ 8 662,14
INSTANDHALTUNG, WARTUNG & PFLEGE	Häufigkeit	Zeitpunkt		Kosten in €/m ² bzw. €	Kosten diskontiert in €/m ² bzw. €	Kosten gesamt in €
		von Jahr	bis Jahr			
Grünpflege & Sichtkontrolle	jährlich	4	20	€ 257,00	€ 4 200,19	€ 4 200,19
Gesamtkosten Instandhaltung, Wartung & Pflege						€ 4 200,19
ABBRUCH & ENTSORGUNG	Häufigkeit	Zeitpunkt		Kosten in €/m ²	Kosten diskontiert in €/m ²	Kosten gesamt in €
		von Jahr	bis Jahr			
Abbruch	einmalig	20	20	€ 16,00	€ 14,98	€ 995,85
Entsorgung	einmalig	20	20	€ 16,00	€ 14,98	€ 2 749,08
Gesamtkosten Abbruch & Entsorgung						€ 3 744,93
Gesamtkosten						€ 16 607,26
NUTZEN						
	Häufigkeit	Zeitpunkt		Nutzen in €/m ²	Nutzen diskontiert in €/m ²	Nutzen gesamt in €
		von Jahr	bis Jahr			
Langlebigkeit des Dachs	einmalig	20	20	€ 24,00	€ 22,47	€ 4 123,62
Feinstaub-Reduktion	jährlich	1	20	€ 0,000003	€ -	€ -
CO ₂ -Reduktion	jährlich	1	20	€ 0,0043	€ 0,08	€ 15,25
NO _x -Reduktion	jährlich	1	20	€ 1,65	€ 31,97	€ 5 866,55
Gesamtnutzen						€ 10 005,41
Gesamtnutzen						€ 10 005,41

Abbildung 90: Kosten- und Nutzenübersicht für die Dachbegrünung

Vliessystem Klasse						
KOSTEN						
ERRICHTUNG	Häufigkeit	Zeitpunkt		Kosten in €/m ²	Kosten diskontiert in €/m ²	Kosten gesamt in €
		von Jahr	bis Jahr			
Begrünungssystem inkl. Installation & Pflege 3 Jahre	einmalig	0	0	€ 1 264,37	€ 1 264,37	€ 8 218,39
Gesamtkosten Errichtung						€ 8 218,39
INSTANDHALTUNG, WARTUNG & PFLEGE	Häufigkeit	Zeitpunkt		Kosten in €/m ² bzw. €	Kosten diskontiert in €/m ² bzw. €	Kosten gesamt in €
		von Jahr	bis Jahr			
Grünpflege & techn. Wartung inkl. Dünger	jährlich	4	20	€ 1 600,00	€ 26 149,04	€ 26 149,04
Pflanzenmaterial	jährlich	4	20	€ 86,90	€ 1 420,22	€ 9 231,43
Wasserverbrauch	jährlich	1	20	€ 16,46	€ 318,14	€ 2 067,92
Stromverbrauch	jährlich	1	20	€ 44,01	€ 850,42	€ 850,42
Gesamtkosten Instandhaltung, Wartung & Pflege						€ 38 298,80
ABBRUCH & ENTSORGUNG	Häufigkeit	Zeitpunkt		Kosten in €/m ²	Kosten diskontiert in €/m ²	Kosten gesamt in €
		von Jahr	bis Jahr			
Abbruch	einmalig	20	20	€ 16,00	€ 14,98	€ 97,37
Entsorgung	einmalig	20	20	€ 3,70	€ 3,46	€ 64,09
Gesamtkosten Abbruch & Entsorgung						€ 161,45
Gesamtkosten						€ 46 678,65
NUTZEN						
	Häufigkeit	Zeitpunkt		Nutzen in €/m ²	Nutzen diskontiert in €/m ²	Nutzen gesamt in €
		von Jahr	bis Jahr			
CO ₂ -Reduktion	jährlich	1	20	€ 0,0043	€ 0,08	€ 0,54
Feinstaub-Reduktion	jährlich	1	20	€ 0,0011	€ 0,02	€ 0,14
Lärm-Reduktion	einmalig	0	0	€ 60,00	€ 60,00	€ 390,00
Luftfeuchtigkeit innen	alle 3 Jahre	0	20	€ 299,00	-	€ 2 032,25
Gesamtnutzen						€ 2 422,93
Gesamtnutzen						€ 2 422,93

Abbildung 91: Kosten- und Nutzenübersicht für das Vliessystem im Klassenraum

Trogsystem außen						
KOSTEN						
ERRICHTUNG	Häufigkeit	Zeitpunkt		Kosten in €/m ²	Kosten diskontiert in €/m ²	Kosten gesamt in €
		von Jahr	bis Jahr			
Begrünungssystem inkl. Installation	einmalig	0	0	€ 407,10	€ 407,10	€ 23 611,80
Gesamtkosten Errichtung						€ 23 611,80
INSTANDHALTUNG, WARTUNG & PFLEGE	Häufigkeit	Zeitpunkt		Kosten in €/m ² bzw. €	Kosten diskontiert in €/m ² bzw. €	Kosten gesamt in €
		von Jahr	bis Jahr			
Grünpflegearbeiten & Wartung	jährlich	4	20	€ 550,00	€ 8 988,73	€ 8 988,73
Hubarbeitsbühne inkl. Lieferung & Bedienung	jährlich	4	20	€ 900,00	€ 14 708,83	€ 14 708,83
Wartung Bewässerungsanlage & System	jährlich	4	20	€ 250,00	€ 4 085,79	€ 4 085,79
Pflanzentausch	jährlich	4	20	€ 1,20	€ 19,61	€ 1 137,48
Wasserverbrauch	jährlich	1	20	€ 0,45	€ 8,66	€ 502,21
Gesamtkosten Instandhaltung, Wartung & Pflege						€ 29 423,05
ABBRUCH & ENTSORGUNG	Häufigkeit	Zeitpunkt		Kosten in €/m ²	Kosten diskontiert in €/m ²	Kosten gesamt in €
		von Jahr	bis Jahr			
Abbruch	einmalig	20	20	€ 16,00	€ 14,98	€ 868,82
Entsorgung	einmalig	20	20	€ 5,71	€ 5,35	€ 152,63
Gesamtkosten Abbruch & Entsorgung						€ 1 021,45
Gesamtkosten						€ 54 056,30
NUTZEN						
	Häufigkeit	Zeitpunkt		Nutzen in €/m ²	Nutzen diskontiert in €/m ²	Nutzen gesamt in €
		von Jahr	bis Jahr			
Energieeinsparung Heizperiode	jährlich	0	20	€ 0,49	€ 9,98	€ 578,65
Langlebigkeit der Fassade	einmalig	20	20	€ 35,00	€ 32,77	€ 1 900,55
Feinstaub-Reduktion	jährlich	1	20	€ 0,000003	€ -	€ -
NOx-Reduktion	jährlich	1	20	€ 0,83	€ 15,98	€ 926,98
CO ₂ -Reduktion	jährlich	1	20	€ 0,0043	€ 0,08	€ 4,82
Lärm-Reduktion	einmalig	0	0	€ 60,00	€ 60,00	€ 3 480,00
Gesamtnutzen						€ 6 891,01
Gesamtnutzen						€ 6 891,01

Abbildung 92: Kosten- und Nutzenübersicht für das Trogsystem außen

Um den **ökonomischen Nutzen** der Begrünungssysteme zu ermitteln, werden verschiedene Konzepte zur Monetisierung der Auswirkungen angewendet. Es ist möglich, den Nutzen direkt in Geldwert auszudrücken oder einen indirekten Bewertungsansatz anzuwenden. Hierzu zählt zum Beispiel das Willingness-to-pay-Konzept oder die Bewertung anhand der Kosten, die für das Erreichen dieses Zustands auf herkömmlichem Weg angefallen wären.

Ebenso wie die Kosten wird auch der Nutzen in persönlichen und sozialen Nutzen unterteilt. Des Weiteren muss zwischen Begrünungen im Innen- sowie dem Außenraum unterschieden werden. Wie in Tabelle 13 aufgezeigt, ist nicht für alle positiven Auswirkungen eine quantitative Bewertung möglich. So wird beispielsweise die wichtige Funktion der Begrünung in der Kühlperiode bezogen auf die Temperatur nicht berücksichtigt. Es ist bereits bekannt, dass der Wert einer Immobilie durch Begrünung steigt, wie zahlreiche Studien und Untersuchungen belegen [65]–[70]. Begrünungen steigern einerseits den monetären Wert von Immobilien und machen diese darüber hinaus auch attraktiver, doch in welchem Ausmaß und von welchen jeweiligen Rahmenbedingungen dies

abhängt, ist bisher nicht eindeutig belegbar. Besonders für ein Schulgebäude ist eine solche Bewertung äußerst schwierig. In diesem Bericht werden lediglich die in den Abbildungen Abbildung 90 bis Abbildung 92 angeführten Auswirkungen anhand ausgewählter Parameter bewertet. Die Auswertung der Erträge der PV-Paneele, welche an der Fassade beim Turnsaaldach und direkt auf dem Flachdach des Turnsaals installiert sind, erfolgt anhand der in Kapitel 3.9 ausgewerteten PV-Erträge. Die fehlende Bewertbarkeit zahlreicher Auswirkungen der Begrünungssysteme stellt **einen zentralen Aspekt für weitere Forschungsüberlegungen** dar, da zu diesem Zeitpunkt keine ganzheitliche Aussage anhand einer Kosten-Nutzen-Analyse möglich ist.

Der monetäre Nutzen durch die Energieeinsparung in der Heizperiode aufgrund der Verbesserung des U-Werts durch die Begrünungssysteme im Außenraum, der in Kapitel 3.7 erläutert wurde, wird vereinfacht mit Hilfe der über die Temperatursummenmethode ermittelten Heizgradtage errechnet. Der Berechnung der Heizgradtage liegt gemäß ÖNORM H 7500-1 [71] die Überlegung zugrunde, dass an Tagen mit einer Tagesmitteltemperatur kleiner als 12°C die Raumtemperatur auf 20°C durch das Einschalten der Heizung erwärmt wird. Die Heizgradtage für den siebten Bezirk, den Standort des Schulgebäudes, wurden durch den Klimadatenrechner des Bundesministeriums für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft ermittelt und betragen 2795,6 Kd [72]. Die Berechnung erfolgte anhand von Formel 13.

$$HGT(d_1, d_2) = \sum_{d_1}^{d_2} 20 - T_{Mittel}$$

für $T_{Mittel} \leq 12,0 \text{ } ^\circ\text{C}$

mit HGT – Heizgradtage in Kd

T_{Mittel} – Tagesmitteltemperatur in °C

$d_{1,2}$ – betrachteter Tag in d

Formel 13: Heizgradtage

Die Energiekosten setzen sich aus dem Grundpreis und einem Arbeitspreis pro kWh zusammen. Da der zu entrichtende Grundpreis der Energieversorgung bestehen bleibt, wird als Energiepreis der Arbeitspreis pro kWh für Wien herangezogen. Der Verbrauchspreis beträgt 7,4734 Cent/kWh für Strom und 3,7524 Cent/kWh für Gas [62]. Die Heiz- und Elektroenergie unterliegen einer zu erwartenden jährlichen Preissteigerung, welche in der Berechnung nicht mitberücksichtigt wurde [73]. Die Einsparung der Heizkosten durch den verbesserten U-Wert der Konstruktion berechnet sich gemäß Formel 14.

$$EK_{\text{Heizung,eingespарт}} = (U_{\text{Bestand}} - U_{\text{begrünt}}) \cdot HGT \cdot 24 \cdot p \cdot 0,001 \cdot A_{\text{grün}}$$

mit $EK_{\text{Heizung,eingespарт}}$ – eingesparte Heizkosten in €/Jahr

U_{Bestand} – Wärmedurchgangskoeffizient der Bestandswand in W/m²K

$U_{\text{begrünt}}$ – Wärmedurchgangskoeffizient der begrünten Wand in W/m²K

HGT – Heizgradtage in Kd

p – Energie-Verbrauchspreis in €/kWh

$A_{\text{grün}}$ – begrünte Wandfläche in m²

Formel 14: eingesparte Heizkosten

Auch in der Kühlungsperiode weist die begrünte Fassade einen Nutzen auf. Die kühlende Wirkung der Fassade kann zum jetzigen Zeitpunkt nicht monetär bewertet werden, da besonders die Auswirkungen auf das Mikroklima eine bedeutende Rolle spielen.

Die Begrünung im Außenbereich verbessert die Langlebigkeit der Fassade. Die Fassade eines Gebäudes ist zu jeder Zeit Witterungseinflüssen und Verschmutzung ausgesetzt. Neben der direkten UV-Einstrahlung auf die Oberfläche beeinflussen auch Wind, Regen und Eis sowie Schadstoffe in der Luft die Lebensdauer der Fassade [74]. Insbesondere wirken sich die großen Temperaturschwankungen im Lauf des Jahres negativ auf die Fassade aus [75]. Die Lebensdauer einer Fassade beträgt zwischen 20 und 30 Jahren [76]. Durch den Schutz, welchen die Begrünung als eine Art Vorhang bietet, kann die Lebensdauer verlängert werden und die Erneuerung der herkömmlichen Fassade im Betrachtungsraum von 20 Jahren für das Schulgebäude einmal entfallen. Die dadurch eingesparten Kosten stellen einen Nutzen der vertikalen Begrünung unabhängig vom gewählten System dar. Die Kosten für die Erneuerung des Außenputzes bestehend aus Ober- und Unterputz werden nach BKI 2016 mit 35 €/m² angenommen [64].

Der soziale Nutzen der Begrünung ist neben dem Entgegenwirken gegen den Klimawandel durch Bindung von Kohlenstoffdioxid auch durch positive Einflüsse auf die menschliche Gesundheit begründet. Diese werden hauptsächlich durch die Verbesserung der Luftqualität, aber auch durch Lärmreduktion hervorgerufen. Die exakten Auswirkungen auf die Schadstoffbindung und die Lärmreduktion hängen besonders von der Pflanzendichte und Pflanzenart ab. Einen Ansatz zur Bewertung der dadurch entstehenden Folgekosten bietet eine HEATCO-Studie der Europäischen Union (Developing Harmonised European Approaches for Transport Costing and Project Assessment). In dieser Studie werden Kostenfaktoren für das Jahr 2002 angegeben, welche für das betreffende Jahr prozentual über das Bruttoinlandsprodukt angepasst werden sollten. Die im Rahmen dieser Studie entwickelten Kostenfaktoren werden teilweise zur Bewertung in diesem Bericht verwendet. Es kann bisher lediglich ein geringer Teil des sozialen Nutzens bewertet werden.

NO_x-Reduktion

Nach dem Ansatz der HEATCO-Studie werden die Folgekosten, welche durch Stickoxid-Emissionen (NO_x) entstehen, untersucht. Der Kostenfaktor beträgt 6.127 €/t nach Anpassung für das Jahr 2016 [77].

Stickoxide entstehen als Nebenprodukt bei der Verbrennung zum Beispiel in Automotoren, wodurch sie besonders im städtischen Raum problematisch sind. Sie haben eine direkte, besonders gesundheitsschädliche Wirkung und begünstigen durch ihre hohe Reaktivität die Bildung von Ozon und Feinstaub [77]. Für die menschliche Gesundheit stellen sie vor allem für die Atemwege eine Gefahr dar und können bis zur Beeinträchtigung des Herz-Kreislauf-Systems führen. Auch die Auswirkungen auf die Umwelt, zum Beispiel durch den Beitrag zur Versauerung des Bodens sind zu nennen [78]. Die in der HEATCO-Studie errechneten Kosten beinhalten eine Abschätzung dieser Folgeschäden.

Durch begrünte Dächer können nach Clark et al. [79] $0,27 \pm 0,44$ kg NO_x/m² pro Jahr aufgenommen werden. Unter der Annahme, dass durch vertikale Flächen ungefähr 50 % dieser Werte erreicht werden, bedeutet dies einen monetären Nutzen von durchschnittlich 0,83 €/m² und Jahr und für Dachflächen demnach 1,65 €/m² und Jahr.

Die CO₂-Bindung wurde im Rahmen dieses Forschungsprojekts für fünf verschiedene an diesem Standort eingesetzte Pflanzenarten untersucht. Bei 30 Pflanzen pro Quadratmeter ergibt sich eine CO₂-Bindung von rund 0,252 kg/m² pro Jahr. Es wird in diesem Zusammenhang von einer Neubildung der Pflanze von 30 % pro Jahr ausgegangen.

Zur Bewertung der CO₂-Reduktion wird der Preis für Zertifikate für Kohlenstoffdioxid-Emissionen angesetzt, welcher im Rahmen des EU-Emissionshandels gilt. Da dieses System des Zertifikathandels jedoch zu einem sehr niedrigen Preis mit lediglich 6 \$/t führt, durch den nicht annähernd die Folgekosten der Emissionen abgedeckt und in keinem Fall die Ziele des Pariser Klimaabkommens erreicht werden können, wird ein Preis von 20 \$/t angenommen [80]. Nach Forschungen des Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change ist dieser Mindestpreis notwendig, um die negativen Auswirkungen der Emissionen zumindest annähernd abzudecken. Um die Ziele des Klimaabkommens von Paris aus dem Jahr 2016 zu erreichen, ist nach Berechnungen der Europäischen Kommission bis zum Jahr 2020 eine Preissteigerung auf 40 – 80 \$/t und bis zum Jahr 2030 auf 50 – 100 \$/t notwendig, welche jedoch hier nicht berücksichtigt wird [81]. Aus der Preisannahme von 20 \$/t, die zumindest die Folgekosten abdeckt, ergibt sich ein Nutzen von 0,0043 €/m².

Die Bewertung der Feinstaub-Reduktion erfolgt anhand der unter Kapitel 3.4 ermittelten Bindung von Feinstaub-Partikeln und dem in der HEATCO-Studie ermittelten Kostenfaktor. Die externen Kosten für Feinstaubemissionen betragen nach dieser Studie 641.250 €/t, woraus sich bei einer gemessenen Feinstaubbindung 1,67 mg/m² eine Einsparung von 0,0011 €/m² ergibt. Für den Außenraum werden Werte nach den Studien von Gorbachevskaya und Herfort [46] und Pugh et al. [82] angenommen, welche bei einer Feinstaubbindung von 5,29 µg/m² liegen. Dieser Wert ergibt sich aus einem Mittelwert der Feinstaubbelastung in Wien im Jahr 2015 von 23 µg/m³ und einer in den genannten Untersuchungen ermittelten Einsparung von 23 % des Feinstaubes.

Die PV-Erträge der in die Begrünung integrierten PV-Paneele am Dach des Turnsaals werden ebenso bei der Bewertung berücksichtigt. Die Funktionsweise der Systeme und die Höhe der Erträge werden in Kapitel 3.9 erläutert. Für die ökonomische Berechnung werden die Erträge aus dem Jahr 2017 (Fassade 316,43 kWh; Dach 1.506,81 kWh) herangezogen. Der finanzielle Nutzen ergibt sich durch die Einsparung der Kosten für Strom in Höhe von 51,56 €/Jahr für die Fassade und 245,52 €/Jahr auf dem Turnsaaldach. Die für diese Ermittlung angesetzten Stromkosten entsprechen den Kosten für den Stromverbrauch durch die Beleuchtung.

Einen weiteren Nutzen stellt der Einfluss der Begrünung auf die **Luftfeuchtigkeit** dar. Eine Möglichkeit, diesen Nutzen der Innenraumbegrünung monetär zu bewerten, ergibt sich aus der Betrachtung der Ersatzinvestition, um das durch die Begrünung erreichte Raumklima durch andere Maßnahmen zu erreichen. Bezogen auf die Luftfeuchtigkeit ist dies durch einen Raumbefeuchter möglich. Die Kosten für ein solches Gerät, das eine ähnliche Leistung aufweist, wie die begrünten Wände, wie in Kapitel 3.2 beschrieben, belaufen sich auf 300 €. Dieses Gerät muss alle drei Jahre ersetzt werden.

Eine bedeutende Auswirkung der Begrünung stellt der Einfluss auf die Nachhallzeit und die damit verbundene Akustik dar. Diesen Vorteil gibt es sowohl bei Begrünungen im Innen- als auch im Außenraum. Eine detaillierte Auswertung erfolgte in Kapitel 3.6. Auch in diesem Fall wird der Nutzen durch die Ersparnis der konventionellen Maßnahme berechnet, um diese durch die Begrünung erreichten akustischen Bedingungen herzustellen. Berechnet wird dies anhand der Kosten für Absorberplatten über die Differenz der Schallabsorption zwischen nicht begrüntem und begrüntem Zustand. Es werden Absorberplatten gewählt, die einen möglichst ähnlichen Schallabsorptionsgrad wie die installierte Begrünung für die verschiedenen Frequenzbereiche aufweisen. Diese liegen inklusive Befestigungsvorrichtungen preislich bei rund 60 €/m². Diese Bewertung betrachtet lediglich die Verbesserung der Nachhallzeit und die daraus resultierende bessere Verständlichkeit der Sprache. Nicht berücksichtigt werden die sich durch die Begrünung ergebenden schalldämmenden Auswirkungen und deren positiver Einfluss auf die Gesundheit.

3.11.2. Ökologische Auswirkungen

Die ökologische Bewertung erfolgt, um die Umweltauswirkungen der Begrünungsmodelle für deren gesamten Lebenszyklus abzubilden. Diese Bewertung wurde für das Projekt im Jahr 2016 durchgeführt. Die ökologische Bilanzierung berücksichtigt dabei sowohl graue Energie (Herstellung, Nutzung/Ersatz und Entsorgung/Recycling der Bauteile bzw. Produkte) und rote Energie (energetischer Aufwand während der Nutzungsphase) als auch die CO₂-Bindung durch die Pflanzen. Um diese Elemente der Lebenszyklusanalyse bewerten zu können, wurden vier Indikatoren zum Vergleich herangezogen. Zwei Indikatoren betreffen die Ressourceninanspruchnahme - Primärenergiebedarf nicht erneuerbar (PEI ne) und Primärenergie erneuerbar (PEI e) - und zwei Indikatoren die Wirkungen auf die globale und lokale Umwelt - Treibhauspotenzial (GWP) und Versauerungspotenzial von Boden und Wasser (AP). Um die aus ökologischer Sicht beste Form der Begrünung zu finden, ist es notwendig, die Umweltauswirkungen der unterschiedlichen Begrünungsmodelle aufzuzeigen. Das troggebundene Begrünungssystem erreicht bezüglich grauer Energie niedrigere Werte, da Materialien mit geringen Umweltauswirkungen gewählt wurden. Im Vergleich dazu sind die Auswirkungen beim modularen Begrünungssystem etwas höher, da dieses Modell insgesamt mehr Masse pro Quadratmeter aufweist. Im Innenraum sind die Werte des

Geotextilsystems in Bezug auf die graue Energie aufgrund seines 1 cm dicken Kunststoffträgers höher, als beim troggebundenen Begrünungssystem.

Für die Ermittlung der ökologischen Auswirkungen und Datensätze stehen diverse Datenbanken zur Verfügung. Es werden unter anderem GEMIS, Ökobau.dat, Baubook und IBO Ökokennzahlen verwendet [83]–[86]. Innerhalb der definierten Systemgrenzen werden unter anderem die Auswirkungen in der Herstellungsphase berücksichtigt. Diese umfassen neben der Rohstoffbereitstellung auch den Transport und die Herstellung. Zudem wird in der Nutzungsphase die aufgewendete graue Energie für den Ersatz einzelner Bestandteile der Systeme aufgrund deren begrenzten Lebensdauern beachtet. Schlussendlich folgt im Lebenszyklus die Entsorgung sowie das nutzbare Wiederverwendungs-, Rückgewinnungs- und Recyclingpotenzial, welches ebenso bei der Analyse berücksichtigt wird. Die erwähnte Lebensdauer der einzelnen Bestandteile ist unter anderem von den Baustoffeigenschaften, aber auch von den Umwelteinflüssen und der Art der Instandhaltung abhängig.

Für die Ökobilanz der Begrünungssysteme ist die Aufteilung jedes Systems in seine einzelnen Bestandteile mit ihren jeweiligen Lebensdauern notwendig. Diese werden in den folgenden Tabellen aufgelistet. Für jeden Bestandteil sind darüber hinaus weitere Informationen wie Abmessungen, Anzahl, Gewicht etc. bekannt, sodass anhand der Materialdaten für die verschiedenen Phasen die Auswirkungen abgebildet durch die vier Indikatoren bestimmt werden können.

Tabelle 16: Bestandteile und deren Lebensdauern – Vliestaschensystem

Bestandteile	Lebensdauer <i>in Jahren</i>
Wandhalterung	30
Trägerplatte	7
Vlies 3-lagig	7
Kieskistchen (weiß geschichtet)	30
Pulverbeschichtung Kieskistchen	30
Kies	30
Wasserauffangwanne	30
Pulverbeschichtung Wasserauffangwanne	30
Aufstandskonstruktion für Kieskistchen in Wasserauffangwanne (weiß geschichtet)	30
Pulverbeschichtung Aufstandskonstruktion	30
Seitliche Abdeckung (weiß geschichtet)	30
Pulverbeschichtung Seitliche Abdeckung	30
Obere Abdeckung	30
Pulverbeschichtung Obere Abdeckung	30
Tropfschlauch	7
Abwasserrohr Ø5 + Anschluss an Modell	7

Tabelle 17: Bestandteile und deren Lebensdauern – Trogsystem

Bestandteile	Lebensdauer <i>in Jahren</i>
Trog	40
Seitenfläche	40
Blende unten Abwasser	40
Seitenblende	40
Schnellbohrschrauben	40
Vlies	40

Bestandteile	Lebensdauer
Substrat 50% Recyclingziegel + 50% Planzenerde*	10
abzüglich Wurzelanteil (25cm ³ pro Pflanze)	
Unterkonstruktion Profile (U-Profil/Halfen Schiene)	40
Gewindestange	40
Mutter (Gewindestange)	40
Beilagscheibe (Gewindestange)	40
Tropfschlauch Trog	10
T-Stücke	10
Winkelstück	10
Endstopfen	10
Schlauch seitlich + unten (Zuleitung Ø16)	10
Abwasserrohr Ø5 + Anschluss an Modell	10

Tabelle 18: Bestandteile und deren Lebensdauern – Kassettensystem

Bestandteile	Lebensdauer <i>in Jahren</i>
Unterkonstruktion	30
Rahmendübel HRD-H 10x80 Stahl	30
Einhängeschiene	30
Einhängekonstruktion für Kassetten	30
gelochte Frontseite*	30
Pulverbeschichtung Frontseite beidseitig +	30
Rückseite	30
Pulverbeschichtung Rückseite	30
Seitenteile	30
Pulverbeschichtung Seitenteile	30
Kapillarsaugvlies	30
Substratschicht	30
Deckschicht (Lava)	30
Pflanzentopf	30
Tropfschläuche	7
T-Stück	7
Winkelstück	7
Endstopfen	7
Entwässerungsrinne	20
Photovoltaikanalage	30

Die Abbildung 93 und die Abbildung 95 zeigen die Ergebnisse der durchgeführten ökologischen Bewertung. Dargestellt sind für jedes der Systeme im Innen- sowie Außenraum die Aufwendungen für die Herstellung, den notwendigen Ersatz sowie für die Entsorgung bzw. das Recycling. Bei diesem Vergleich anhand der vier Indikatoren sind Unterschiede zwischen den Systemen erkennbar. Diese Ergebnisse liefern Erkenntnisse für die zukünftige Systemoptimierung und -entwicklung. Darüber hinaus zeigen Abbildung 94 und Abbildung 96 das jeweilige Gewicht der Begrünungssysteme in kg/m².

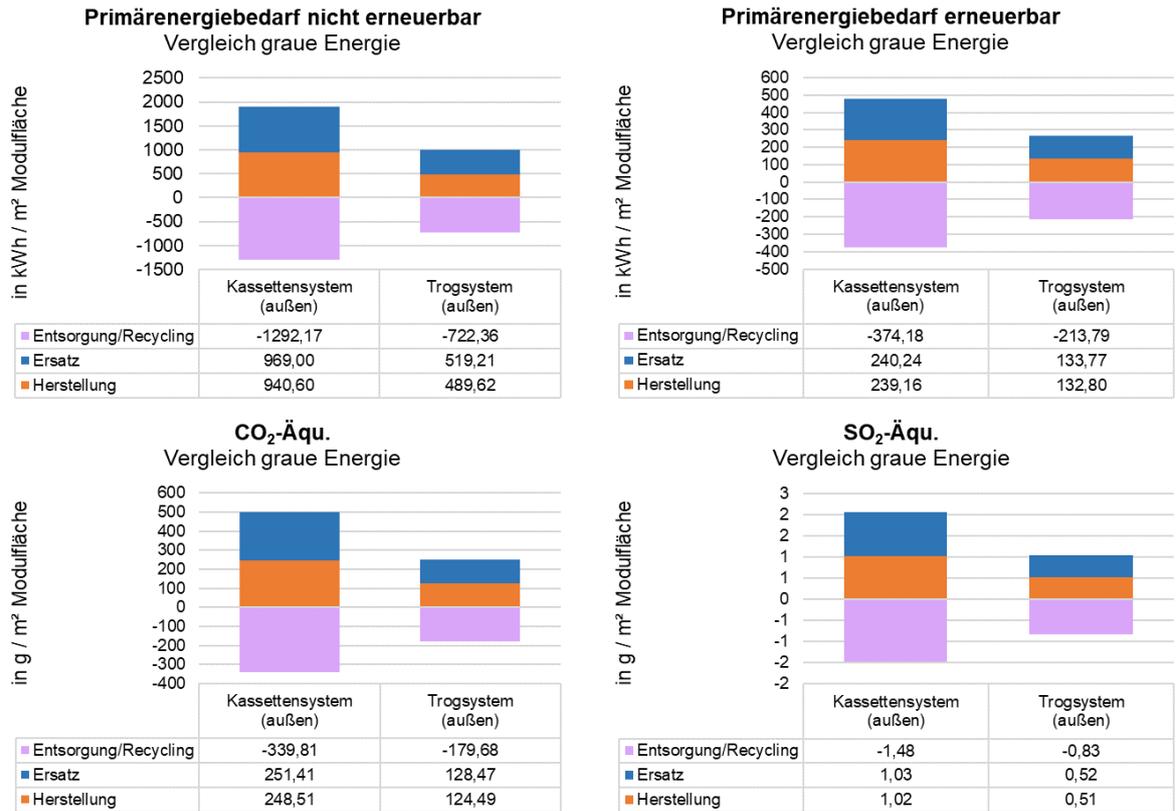


Abbildung 93: ökologische Bewertung der Außenbegrünungssysteme

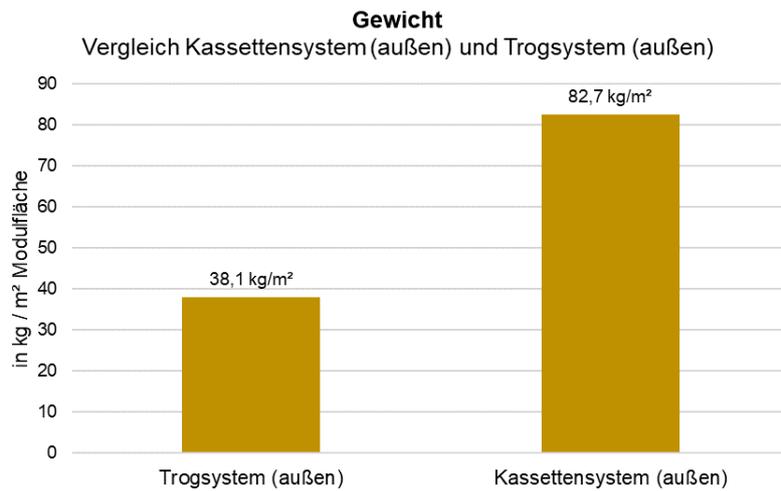


Abbildung 94 Gewicht der Außenbegrünungssysteme

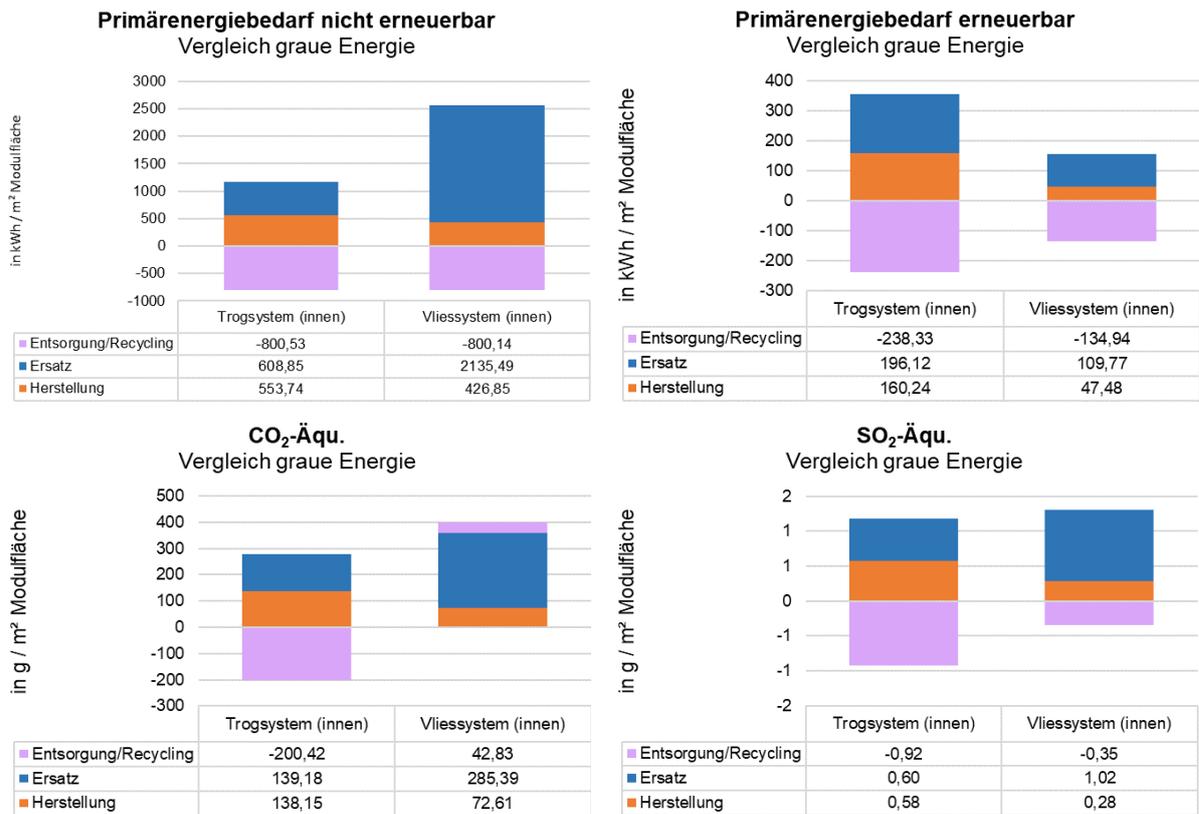


Abbildung 95: Ökologische Bewertung der Innenbegrünungssysteme

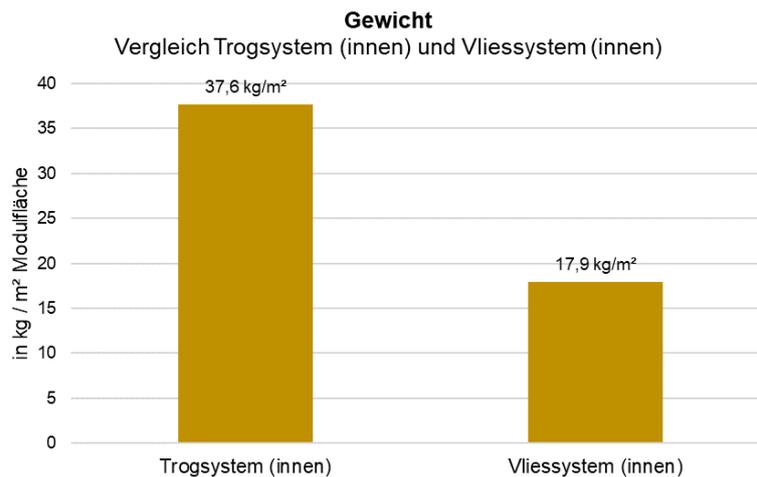


Abbildung 96: Gewicht der Innenbegrünungssysteme

3.11.3. Fazit der ökologischen und ökonomischen Bewertung

Wie zu Beginn dieses Kapitels bereits erwähnt, handelt es sich bei der vorliegenden Bewertung der ökologischen und ökonomischen Auswirkungen lediglich um eine Analyse anhand der Daten, die für die Schule in der Kandlgasse im 7. Wiener Gemeindebezirk vorliegen. Diese Einschränkung wirkt sich beispielsweise darin aus, dass für die PV-Anlagen z.B. nur ein Wechselrichter ausreichend wäre, am Dach der Kandlgasse zur Erfassung der Messdaten jedoch mehrere verbaut sind. Des Weiteren war für die Unterkonstruktion der PV-Module eine Sonderanfertigung notwendig, die deutlich über den Durchschnittskosten für eine solche liegt, was sich im Kosten-Nutzen-Vergleich abbildet. Die im

Eingangsbereich der Schule montierte Mooswand war ein Geschenk, welche mit den Schüler/innen gemeinsam beklebt wurde. Für diese fallen im Normalfall Kosten in Höhe von ca. 550 €/m² für die Errichtung an. Auch die Kosten, die für die Errichtung der Begrünungssysteme angesetzt wurden, entsprechen nicht den Marktpreisen. Auf der Nutzen-Seite ist aufgrund fehlender Bewertbarkeit vieler Auswirkungen keine ganzheitliche Betrachtung möglich.

Das entwickelte Bewertungsmodell ist so aufgebaut, dass diese Werte ohne großen Aufwand zu ändern sind und auch eine Erweiterung des Modells leicht möglich ist, sodass zukünftige, neue Forschungserkenntnisse leicht eingearbeitet werden können. Für die Auswertung der Projektergebnisse für die Begrünungsmaßnahmen in und am Schulgebäude im 7. Bezirk wurde dieses Modell als erste Version entwickelt, die aufzeigt, was bereits möglich ist, was noch fehlt und welche Möglichkeiten der Optimierung es gibt. Dies ist ein wichtiger Schritt zur Realisierung praxisrelevanter Begrünungssysteme. Nach diesem ersten Bewertungsansatz können die verschiedenen Systeme untereinander verglichen und auch einzelne Einflussfaktoren, wie beispielsweise die Größe der begrünten Fläche herausgestellt werden.

Das größte Verbesserungspotential dieser Bewertung stellt der bisher nicht quantifizierbare Nutzen besonders bezogen auf Mensch und Klima dar. Derartige Auswertungen sind sehr komplex und wurden bisher nicht in Bezug auf fassadengebundene Begrünungssysteme analysiert. Auch Untersuchungen und Prognosen, die in der Vergangenheit gemacht wurden, stellen sich als zu konservativ dar. Ein Beispiel hierfür ist eine Schätzung der Entwicklung der Kühlgradtage. Diese könnten zur Bewertung der Energieeinsparung in der Kühlperiode herangezogen werden. Kromp-Kolb et al. [87] untersuchten im Jahr 2007 die Auswirkungen des Klimawandels auf Wien. Hierbei betrachteten sie auch die Entwicklung der Kühlgradtage anhand eines Vergleichs von einer Referenzperiode von 1981–1990 und einer Prognose für den Zeitraum 2041–2050. Das Ergebnis dieses Vergleichs ist ein zu erwartender Anstieg der Kühlgradtage um 117% zwischen diesen beiden Betrachtungsperioden von 202 Kd auf 438 Kd für den Standort Wien. Unter der Annahme, dass dieser Anstieg linear verläuft, kann zum heutigen Zeitpunkt jedoch bereits festgestellt werden, dass die Kühlgradtage noch stärker ansteigen werden. Abbildung 97 stellt zur Verdeutlichung sowohl die lineare Trendlinie der Prognose sowie die berechneten Kühlgradtage der Jahre 2012 bis 2017 dar. Dies zeigt auf, auf welchen Unsicherheiten das Modell beruht und dass nach Prognosen mit stärkerem Nutzen der Begrünung gerechnet werden kann, als derzeit im Modell verankert ist. Dies betrifft nicht nur die kühlende Funktion der Begrünung, sondern auch die Wirkung der Begrünung als Luftfilter.

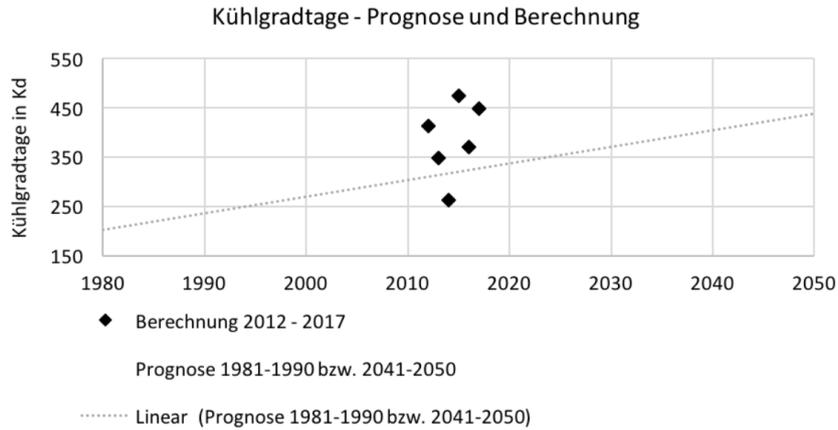


Abbildung 97: Vergleich einer Prognose der Kühlgradtage mit den Referenzen 1981-1990 und 2041-2050 und einer Berechnung für die Jahre 2012-2017

In den Darstellungen wird deutlich, dass Dachbegrünung eine wesentliche bessere Kosten-Nutzen-Effektivität aufweist, als die fassadengebundenen Begrünungssysteme, die sowohl deutlich teurer in der Errichtung als auch in der Pflege sind. Diese Erkenntnis ist jedoch nicht neu und aufgrund der horizontalen Ausrichtung und der besseren Zugänglichkeit der Flächen nachvollziehbar. In Städten stehen nur begrenzt geeignete Dachflächen zur Verfügung, weswegen auch die Fassadenflächen herangezogen werden müssen.

Des Weiteren ist in den Darstellungen der ökonomischen Auswirkungen ein großer Unterschied zwischen den einzelnen Begrünungssystemen erkennbar. So ist das Trogsystem nicht nur in der Errichtung günstiger, sondern weist auch durch die geringe Wartungsintensität und den geringeren Pflanzenausfall niedrigere Wartungs- und Pflegekosten auf. Im Vergleich dazu schneidet das Trogsystem aufgrund der Herstellung der Tröge aus Aluminium in der ökologischen Bewertung schlechter ab. Die Ergebnisse dieses Projektes zeigen die Notwendigkeit der Systemoptimierungen auf.

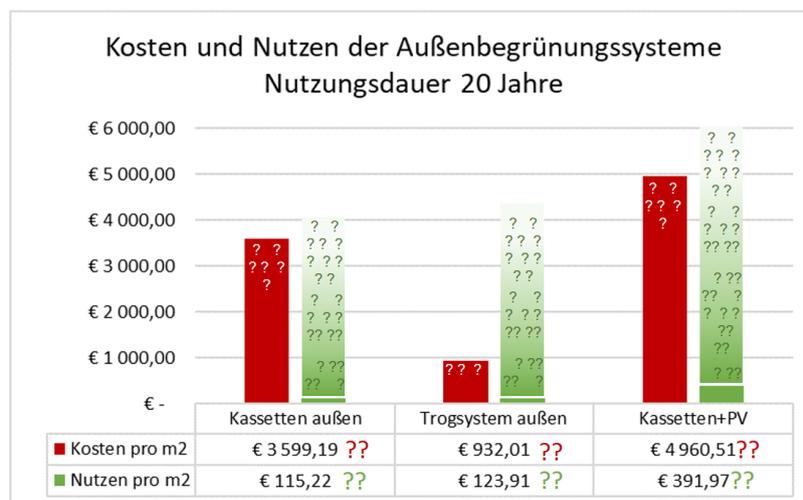


Abbildung 98: Mögliche Entwicklung der Bewertbarkeit der Kosten und Nutzen

Das Ergebnis dieser Untersuchung ist entgegen der in den vorangegangenen Abschnitten dargestellten Werte nicht die wirtschaftliche Unrentabilität der Begrünung. Vielmehr sind die Berechnungsergebnisse stets in Relation zu Tabelle 13 zu sehen, die aufzeigt, in welchem Verhältnis die bisher bewertbaren zu bisher nicht quantifizierbaren Nutzen stehen. Dies ist ebenso in Abbildung 98 schematisch dargestellt: viele Nutzen können bisher nicht bewertet werden, es ist jedoch ersichtlich, dass Begrünung verschiedene positive Auswirkungen mit sich bringt. Es ist noch nicht ausreichend untersucht, inwieweit sich die Kosten entwickeln werden. Diese Darstellung erlaubt eine Art Blick in die Zukunft der Bewertbarkeit der Kosten und Nutzen der Begrünungssysteme. Das Ergebnis der durchgeführten Berechnungen ist vielmehr eine Motivation zu weiterer interdisziplinärer Forschung, die bei den bisher nicht erfassten Nutzen ansetzt und somit einen Beitrag zur Praxisrelevanz von Gebäudebegrünung leistet. Hierbei muss untersucht werden, inwieweit sich die Kosten-Nutzen-Analyse für eine derartige Bewertung eignet und welche anderen Formen und Konzepte der Werterfassung herangezogen werden sollten.

4. Schlussfolgerungen

4.1. Gewonnene Erkenntnisse

Die Innenraumbegrünung erhöht die hygrothermische Behaglichkeit. In dem hier untersuchten Fallbeispiel ist es im Winter um 73 % häufiger behaglich, wenn der Raum begrünt ist. Das liegt an der Erhöhung der Luftfeuchtigkeit. An heißen Sommertagen wirkt sich Innenraumbegrünung weder positiv noch negativ aus. Die Lufttemperatur wird zwar ein bisschen gekühlt, die Luftfeuchtigkeit nimmt aber (wenn auch geringer als im Winter) zu. Gefühlt ist die Temperatur an heißen Tagen in etwa dieselbe. Es konnte festgestellt werden, dass trotz erhöhter Luftfeuchtigkeit die Konzentration von Schimmelsporen gegenüber nicht begrüntem Räumen und der Außenluft nicht erhöht wird.

Die Staubkonzentration wurde hinsichtlich den Feinstaubgrößen $PM_{1,}$ $PM_{2,5}$ PM_4 und PM_{10} untersucht. In begrüntem Räumen ist die Konzentration dieser Feinstaubgrößen geringer, als in nicht begrüntem Räumen. Je nach Partikelgröße variiert die Differenz. Im hier betrachteten Fallbeispiel sind es 2,5-8,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Die CO_2 -Konzentration nimmt aufgrund der Photosynthese der Pflanzen während der Tageszeit ab. Die Abnahme der CO_2 -Konzentration durch eine Grünwand in der Klasse ist allerdings nicht so groß, dass sie im laufenden Schulbetrieb die Lüftung ersetzen kann.

Die angebrachte Begrünung erhöht die äquivalenten Schallabsorptionsflächen und reduziert dadurch die Nachhallzeit. Je nach Begrünungssystem und Schallfrequenz ist die Verkürzung der Nachhallzeit unterschiedlich. Der Schallabsorptionsgrad von Begrünungssystemen ist im hörbaren Frequenzbereich mit hochwertigen Schallabsorbentien vergleichbar.

Die Forschungsergebnisse haben gezeigt, dass fassadengebundene Begrünung den Transmissionswärmeverlust einer ungedämmten Wand reduziert. Die Wirkung ist von der Größe der durchgängigen Grünfläche und der Größe der Hinterlüftungsöffnungen abhängig. Je nachdem, wie das System verblendet ist, bzw. die Grenzfläche zwischen Hinterlüftungsspalt und Außenluft verarbeitet wurde, ist die Auswirkung auf die Veränderung des U-Wertes unterschiedlich groß. Im Zuge dieses Forschungsprojektes wurden großflächige Begrünungssysteme mit Verblendung und kleinflächige Begrünungssysteme ohne Verblendung unterschieden. Außerdem wurden Messungen an einer ungedämmten Altbaufassade (ca. 60 cm Vollziegel) und einer ungedämmten Hochlochziegelmauer (ca. 35 cm Hochlochziegel) durchgeführt. An der ungedämmten Altbaufassade verringert sich der U-Wert an einem verblendeten großflächigen System um ca. 18 %. Die Reduktion kann an anderen Gebäuden, je nach Ausführung der Montage größer oder kleiner ausfallen, als an der hier betrachteten Situation.

Die Kühlleistung von Außenraumbegrünung wirkt dem Urban Heat Island Effekt entgegen. Durch Evapotranspiration werden der Umgebung an heißen Sommertagen ca. 2 kWh/m^2 pro Tag entzogen. An besonders heißen Tagen kann es an südseitigen Fassaden auch mehr sein. Die Oberflächentemperatur der Fassade wird aufgrund der Verschattung und der Evapotranspiration der vorgehängten Begrünung auch reduziert. Insbesondere an Südfassaden ist deshalb die Temperaturschwankung an heißen Tagen wesentlich kleiner, wenn die Fassade begrünt ist. Das erhöht die Lebensdauer der Fassade. Im Innenraum wirkt sich die Außenbegrünung nur gering aus.

Die Kombination von Photovoltaik und Begrünung führt zu einer geringen PV-Modultemperatur an besonders heißen, ertragreichen Tagen und erhöht den Wirkungsgrad der Module. Die größte Herausforderung an der Kombination von Photovoltaik und Gebäudebegrünung ist die Wartung des Begrünungssystems.

Je dicker ein Vegetationsträger (je dicker die Substratstärke) ist, umso resilienter ist das System, da es nicht so schnell austrocknen kann und Temperaturschwankungen besser ausgeglichen werden.

Horizontale Systeme haben eine homogenere Wasserverteilung, da die Schwerkraft weniger Auswirkungen hat.

Die Zugänglichkeit der Begrünung sowie der Steuerung ist sehr wichtig: nur leicht erreichbare Stellen werden häufig gepflegt und nur einfach einzusehende Steuerungen werden kontrolliert.

Die Hemmung, eine Zeitschaltuhr einzustellen, ist geringer als einen Bewässerungscomputer zu bedienen. Mechanische Zeitschaltuhren sind am leichtesten zu verstehen, sorgen jedoch für Verwirrung, wenn die Zeit nach einem Stromausfall verstellt ist (digitale Zeitschaltuhren haben im Gegensatz dazu einen Pufferspeicher, der die Einstellungen beibehält). Online überwachbare Anlagen können Fehlermeldungen versenden und sind übersichtlich zu bedienen.

Generell ist die Hemmschwelle, in ein System einzugreifen, umso höher, je technischer das System ist.

Ideal zum Arbeiten mit Kindern in Vertikalbegrünungen sind vegetativ vermehrbare Pflanzengattungen wie: Grünstilbe (*Chlorophytum*), Bogenhanf (*Sansevieria* ssp.), Efeutute (*Epipremnum*), Baumfreund (*Philodendron*), Dreimasterblume (*Tradescantia*) und Blutstängel (*Ludisia*). Sonstige pflegeleichte Pflanzen sind: *Asplenium antiquum* und *A. nidus*, *Peperomia clusiifolia*. Nicht geeignet zur Begrünung vertikaler Systeme sind: *Chamaedorea elegans*, *Schefflera arboricola*, *Syngonium podophyllum*.

4.2. Die nächsten Schritte für das Konsortium

Die wissenschaftlichen PartnerInnen des Konsortiums haben bereits während der Projektdurchführung ein Folgeprojekt („GrüneZukunftSchulen“ FFG Projekt Nummer 858856) eingereicht und bewilligt bekommen. In diesem werden die Auswirkungen von grünen Wänden in neu gebauten Schulen untersucht. Außerdem wird eine noch nicht fertig gebaute Schule im Planungs- und Bauprozess begleitet, um Begrünungen bereits im Gebäudebau mit einzuplanen. Auch das Forschungsprojekt greening UP! (Nachhaltige Grünpflege, Wartung, Instandhaltung von vertikalen Begrünungen inkl. rechtliche Aspekte - FFG Projekt Nummer 867369) wird auf den Erkenntnissen dieses Projektes aufbauen und beschäftigt sich detailliert mit der Pflege der Begrünung. Das Konsortium wird hier noch erweitert.

Die wissenschaftlichen Erkenntnisse des Projektes „GrünPlusSchule“ fließen in Lehrveranstaltungen ein. Fr. Univ.Prof. Korjenic (Projektleiterin) hat mit einem eigenen Forschungsbereich (ökologische Bautechnologien) an der Fakultät für Bauingenieurwesen der TU Wien gestartet und widmet Teile einer Lehrveranstaltung den Ergebnissen dieses Projektes.

Die Konsortialführung (TU Wien) arbeitet an der Vorbereitung eines interdisziplinären Projektes für die ökonomische Bewertung von Gebäudebegrünung. Es werden ExpertInnen aus den Fachrichtungen Wirtschaft, Psychologie, Soziologie, Medizin, Chemie und Klima zu

Sondierungsgesprächen eingeladen. Es soll ein mehrjähriges Projekt entstehen, das eine neue ökonomische Bewertungsmethode ausarbeitet, um Gebäudebegrünung ganzheitlich evaluieren zu können.

4.3. Zielgruppen: Nutzen und Sichtbarkeit

Diese Ergebnisse sind relevant für alle Forschungseinrichtungen, die sich mit der Behaglichkeit in Räumen beschäftigen. Auch für den Stadtschulrat, DirektorInnen, LehrerInnen, SchülerInnen und Eltern von SchülerInnen sind die Forschungsergebnisse relevant. Es werden Ansatzpunkte gezeigt, um das Raumklima in Schulklassen zu verbessern. Dabei ist eine ausreichende Belüftung sicherzustellen sowie Maßnahmen gegen zu niedrige Luftfeuchtigkeit, gegen sommerliche Überwärmung sowie gegen zu lange Nachhallzeiten zu setzen. Innen- und Außenbegrünung kann als Maßnahme gegen diese Herausforderungen eingesetzt werden.

EntscheidungsträgerInnen in der Stadtplanung stehen vor der Aufgabe, gegen den UHI-Effekt vorzugehen. Dieses Projekt hat die Kühlleistung von Fassadenbegrünung berechnet und zeigt Maßnahmen gegen den UHI-Effekt auf. Die Wartung verschiedener Begrünungssysteme sowie deren Vor- und Nachteile werden dargestellt.

BauträgerInnen, ArchitektInnen und BaumeisterInnen können bei der Planung aller Gebäudetypen auf Teile der Projektergebnisse zurückgreifen. Einige der Projektergebnisse sind auch auf andere Gebäudetypen und andere Gebäudenutzungsarten übertragbar.

Auch für HerstellerInnen von Begrünungssystemen sind die Forschungsergebnisse von großer Bedeutung. In diesem Bericht werden Hemmnisse für den Einsatz von Begrünungssystemen in Schulen und anderen potenzielle Gebäuden dargestellt. Darunter fallen Wartung, Stabilität der Systeme und die Zugänglichkeit. Auch die Optimierung der Systeme wird auf der Basis der hier berechneten ökologischen und ökonomischen Daten angedacht.

In der Aula und dem Physikraum der Schule wurden die Erträge der PV-Anlage auf Screens dargestellt (siehe Abbildung 99 und Abbildung 100). So wird SchülerInnen, Eltern und allen BesucherInnen der Schule das Forschungsprojekt nähergebracht.

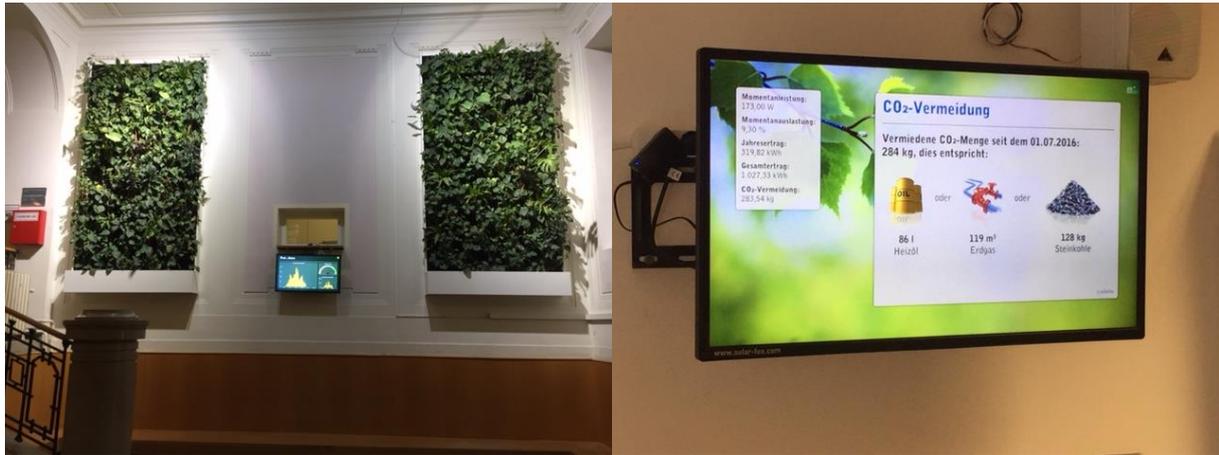


Abbildung 99: Links: Innenraumbegrünung Aula mit PV-Screen zur einfachen Darstellung des PV-Ertrages. Rechts: Vergleich des CO₂-Ertrags mit fossilen Brennstoffen.



Abbildung 100: Darstellung des PV-Ertrags hinsichtlich möglicher Nutzung. Übersichtliche Darstellung des PV-Ertrags. Daten werden für den Physikunterricht verwendet.

Das Projekt war wissenschaftlich erfolgreich und wurde mehrmals in hochrangigen wissenschaftlichen Journalen publiziert. Die jeweiligen Publikationen sind im Literaturverzeichnis **fett markiert**. Auch an zahlreichen nationalen und internationalen Konferenzen wurde das Projekt vorgestellt und präsentiert.

Das Projekt wird stark medial verfolgt und hat folgende Preise gewonnen:

- Österreichischer Schulpreis 2016
- Energy Globe Wien 2017 für die Kategorie Jugend
- ÖGUT Umweltpreis 2017 (Nominierung)

<https://nachhaltigwirtschaften.at/de/sdz/highlights/newton-stadt-4-0-filmserie.php#schl3>

5. Ausblick und Empfehlungen

Gebäudebegrünung ermöglicht die Kühlung von Städten. Anders als beim Einsatz von Klimaanlage werden nicht bestimmte Räume gekühlt und die Umgebung aufgeheizt, sondern eine nachhaltige Kühlleistung generiert, die sich auf die Umgebung auswirkt. GebäudenutzerInnen profitieren von dieser Kühlleistung nur gering, da im Innenraum wenig Kühlleistung ankommt. Auch andere Eigenschaften von Gebäudebegrünung wirken in einem größeren Maßstab und nicht nur auf die GebäudenutzerInnen. Im dicht verbauten Gebiet profitieren viele Menschen von den im Projekt vorgestellten Auswirkungen der Gebäudebegrünung. Die Reduktion der Feinstaubbelastung, der Nachhallzeit, der CO₂-Emissionen und des UHI-Effektes wirkt sich positiv auf die Gesundheit vieler Menschen aus. Die genauen Vorteile, insbesondere die noch nicht quantifizierbaren, sind komplex, weitgehend noch nicht erforscht und nur schwer allgemein darstellbar. Hiermit eröffnet sich Potenzial für weitere Forschungsarbeiten. Umso genauer die Auswirkungen beschrieben werden können, desto besser wird eine ganzheitliche Analyse möglich.

In weiterer Folge stellt die Unschärfe der Profiteure von Gebäudebegrünung eine Hürde für die Technologie dar. Die Investitionskosten und Wartungskosten müssen von einer bestimmten Person, Firma oder Gruppe getragen werden. Sind die Profiteure klar definiert, können sie für sich selbst bestimmen, ob eine Investition sinnvoll ist oder nicht. Bei Gebäudebegrünung ist das (noch) nicht der Fall: Es profitieren weitaus mehr Personen und Lebewesen als diejenigen, die die Kosten tragen. Hier liegt Potenzial für weiteren Forschungsbedarf.

Ein Ergebnis des vorliegenden Projektes sind die ermittelten Vor- und Nachteile der Kombination aus Photovoltaik und Gebäudebegrünung. Bei dieser Kombination können die Profiteure der Begrünung klarer definiert werden, da die Stromproduktion zunimmt. Profiteure sind deshalb im überwiegenden Maß die BesitzerInnen der PV-Anlagen. Der nächste Schritt könnte ein Demonstrationsprojekt mit größeren PV-Grün-Flächen sein, welches eine genaue Ermittlung des Sommer- und Winterschutzes zulassen würde. Große Flächen sind für genaue Messungen und Quantifizierung der Wechselwirkungen auf das Gebäude vorteilhaft.

6. Verzeichnisse

6.1. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ermittlung der optimalen Begrünungsflächen und des richtigen Platzes für Photovoltaik (siehe rechten Teil des Bildes).....	15
Abbildung 2: Installation des Vliessystems. Die Kunststoffplatten wurden fertig geliefert (Rechts) und mittels Schienen an die Wand gehängt (Mitte). Das Fertige System ist rechts ersichtlich.....	16
Abbildung 3: Einsetzen und testen der ersten Pflanzen im Trogsystem (Biologieraum).....	16
Abbildung 4: Installation der Schienensysteme (Oben-Links), der Sensoren (Oben-Rechts), der Tröge und Kassetten (Unten-Links, Unten-Mitte), die fertigen Begrünungssysteme mit jungen, kleinen Pflanzen (Unten-Rechts).....	17
Abbildung 5: Gemeinsam mit SchülerInnen wurden die Pflanzen im Trogsystem eingesetzt.	18
Abbildung 6: Drainageelemente mit Filtervlies und Einblasen des Dachbegrünungssubstrates.....	19
Abbildung 7: Letzte Arbeiten an der Unterkonstruktion für die Photovoltaik-Aufdachanlage.	19
Abbildung 8: Links: Lin Picco A05; Links: mit Schutzhülle. Mitte: ohne Schutzhülle. Rechts: 53 A - Datenlogger	22
Abbildung 9: Behaglichkeitsdiagramm zur Bewertung der hygrothermischen Behaglichkeit [20]	22
Abbildung 10: Schimmelsporenmessung im GRG7.....	24
Abbildung 11: Aufbau Messinstrumente: Links Fidas® 200, rechts Kondensationspartikelzähler.....	26
Abbildung 12: Ventilator des Blower Door-Tests im Türstock der begrünten Klasse.	28
Abbildung 13: Abgeklebte Fugen, Kanten und Öffnungen zur Umgebungs- und Außenluft.....	28
Abbildung 14: Versuchsaufbau vor den Klassenräumen.....	29
Abbildung 15: Versuchsaufbau in den Klassen, am Beispiel der Klasse 1c mit Sensoren und Ventilatoren.....	29
Abbildung 16: Schematische Darstellung einer Nachhallzeit-Messung [31].....	32
Abbildung 17: Darstellung der U-Werte. U_g (mit Begrünung) und U_{ng} (ohne Begrünung)	34
Abbildung 18: Schematische Darstellung des Messaufbaus.....	35
Abbildung 19: Links: Strahlenschutzschirm für die Messung der Außenlufttemperatur. Mitte: Wärmestrommessfolie von Phymeas 25 cm x 25 cm zur Messung des Wärmestroms durch die Konstruktion. Rechts: PT 1000 zur Messung der Oberflächentemperaturen innen und außen.	36
Abbildung 20: Wärmebildkamera zur Aufnahme der thermographischen Bilder.	36
Abbildung 21: Sensoren-Lage: PV-Fassade- und PV-Dach-Anlage. Abmessungen, Varianten PV-Fassaden-Anlage.....	40
Abbildung 22: „PV+Grün“-Kombinationen. Untersuchte Fassaden- und Dachsystem-Varianten. Abmessungen PV-Dach Anlage. Lage der Sensoren im Dachsubstrat (Bildquelle:[43]).....	41
Abbildung 23: Die beiden Elemente des Vliessystems in der Aula [9].....	42
Abbildung 24: Schematische Darstellung eines Begrünungselementes [9].....	43
Abbildung 25: Vliessystem im Klassenraum [9]	44
Abbildung 26: Schematische Darstellung des Vliessystems im Klassenraum [9].....	44

Abbildung 27: Das Trogsystem im Biologiesaal.....	45
Abbildung 28: Schematische Darstellung des Trogsystems im Biologiesaal [9].....	46
Abbildung 29: Trogsystem im Innenhof.	47
Abbildung 30: Schematische Darstellung Trogsystem.	48
Abbildung 31: Links: Schematische Darstellung; Recht: Foto Kassettensystem	50
Abbildung 32: Verteilung der Messwerte im nicht begrünten Klassenraum, zwischen 2. Feb. 2016 und 28. Jun. 2018.	54
Abbildung 33: Verteilung der Messwerte im begrünten Klassenraum, zwischen 2. Feb. 2016 und 28. Jun. 2018.	54
Abbildung 34: Verteilung der Messwerte im nicht begrünten Klassenraum zwischen 1. Oktober und 31. März in den Jahren 2016, 2017 und 2018.....	55
Abbildung 35: Verteilung der Messwerte im begrünten Klassenraum zwischen 1. Oktober und 31. März in den Jahren 2016, 2017 und 2018.....	55
Abbildung 36: Häufigkeiten der unterschiedlichen Behaglichkeitsstufen im nicht begrünten Klassenraum (links) und im begrünten Klassenraum (rechts), zwischen 1. Oktober und 31. März in den Jahren 2016, 2017 und 2018.....	56
Abbildung 37: Konzentration der unterschiedlichen Feinstaubgrößen im begrünten und im nicht begrünten Klassenraum. Mittelwerte aller Messwerte	60
Abbildung 38: Konzentration der unterschiedlichen Feinstaubgrößen im begrünten und im nicht begrünten Klassenraum. Mittelwerte der Messwerte während Unterricht oder Pausen in den jeweiligen Räumen war.....	61
Abbildung 39: Konzentration der unterschiedlichen Feinstaubgrößen im begrünten und im nicht begrünten Klassenraum. Mittelwerte der Messwerte ab dem Jahr 2016.	62
Abbildung 40: CO ₂ Konzentration in einer untersuchten Schulkasse an einem Schultag. (Messgrenze des Sensors ist 2.000 ppm, darüber liegende Werte werden als 2.000 ppm dargestellt.).....	63
Abbildung 41: CO ₂ Konzentration in einer untersuchten Schulkasse an einem Schultag. (Messgrenze des Sensors ist 2.000 ppm, darüber liegende Werte werden als 2.000 ppm dargestellt.).....	63
Abbildung 42: Abfall der CO ₂ -Konzentration in den ersten 8 Stunden. Messung 1 bis Messung 4.....	65
Abbildung 43: Abfall der CO ₂ -Konzentration während der Nachtstunden in der begrünten und der nicht begrünten Klasse	66
Abbildung 44: Abfall der CO ₂ -Konzentration während des Tages der begrünten und der nicht begrünten Klasse	66
Abbildung 45: Schallabsorptionsgrade der grünen Wände, berechnet auf Basis der Nachhallzeitmessungen.....	67
Abbildung 46: Messung ohne Begrünung in der Aula sowie mit Begrünung.....	68
Abbildung 47: Messung mit Begrünung, ohne Mooswand und Messung mit Mooswand in der Aula.	69
Abbildung 48: Messung des Biologieraumes ohne Begrünung und mit Begrünung.....	69
Abbildung 49: Die Messung des Klassenraumes ohne Begrünung und mit Begrünung.	70
Abbildung 50: Nachhallzeit Schulhof am 16. Juli 2015 vor Installation der fassadengebundene Begrünung und am 27. Oktober 2017 mit Begrünung.....	70

Abbildung 51: Wärmedurchgangswiderstände der nicht begrünten und der begrünten Fassade mit kleinflächigen Begrünungssystem ohne Verblendung.	71
Abbildung 52: Wärmedurchgangswiderstände der nicht begrünten und der begrünten Fassade mit großflächigen Begrünungssystem mit Verblendung.	72
Abbildung 53: U-Werte der begrünten und der nicht begrünten Fassade des großflächigen Begrünungssystem mit Verblendung und des kleinflächigen Begrünungssystem ohne Verblendung.	72
Abbildung 54: Turnsaaldach der Schule.	73
Abbildung 55: Fotos zu Abbildung 54.	73
Abbildung 56: Kombination Begrünung und Photovoltaik an der Fassade. Links: thermographische Aufnahme, Rechts: Foto.	74
Abbildung 57: Kombination von Photovoltaik und Begrünung am Turnsaaldach und an der Fassade zur Zeit der Thermographieaufnahmen in Abbildung 54 und Abbildung 56.	74
Abbildung 58: Thermographische Aufnahme eines begrünten Fassadenabschnitts (links). Foto zur thermographischen Abbildung (rechts).	75
Abbildung 59: Aufnahmen von der Innenseite der Fassade auf die außen begrünte Fassade. Links: Thermographie, Rechts: Foto.	75
Abbildung 60: Verdampfungsenergie pro Tag für August 2017.	76
Abbildung 61: Verdampfungsenergie pro Tag, und Quadratmeter 1. bis 18. August 2017.	76
Abbildung 62: Oberflächentemperatur der Fassade außen. Ohne Begrünung und mit Begrünung mittels Trogsystem.	77
Abbildung 63: Oberflächentemperatur der Fassade außen. Ohne Begrünung und mit Begrünung mittels Kassettensystem.	77
Abbildung 64: Tagesmitteltemperatur der Oberflächentemperatur an der Innenseite der Außenwand.	78
Abbildung 65: Komponenten und Verschaltung Auf Dach	79
Abbildung 66: Südansicht der Unterkonstruktion.	80
Abbildung 67: 2 Modulträger als „Twinni“ übereinander im Doppelpack].	80
Abbildung 68: Variante 2 - Unteransicht Träger	81
Abbildung 69: Variante 2 - Seitenansicht Aufdachanlage	81
Abbildung 70: Komponenten und Verschaltung Fassade	82
Abbildung 71: Abstände und Maße für die Fassadenkonstruktion.	83
Abbildung 72: Links: Klappbare Unterkonstruktion; Rechts: Fixe Unterkonstruktion.	83
Abbildung 73: PV+Gründach - monatliche maximale Betriebstemperaturen der PV-Module (Max. Temp. F4-PV jeweils die linke Säule, Max Temp. F5-PV jeweils die rechte Säule) und der maximale Temperaturunterschied zwischen F5 vs. F4 (gestrichelte Linie).	84
Abbildung 74: monatliche maximale Betriebstemperaturen PV-Module und der maximale Temperaturunterschied zwischen F1 vs. F3 (kariert dargestellt).	85
Abbildung 75: Tagesverlauf PV-Betriebstemperaturen für die ausgewählten Tage der unterschiedlichen Jahreszeiten. Die dunkelgrau markierten Bereiche stellen die Kühlwirkung (max. Temp. Diff. F1-F3) der PV+Grün Fassade-Kombination dar und die hellgrau markierten Bereiche	

zeigen die Zeiten, in denen das PV-Modul ohne Begrünung (F3) niedrigere Betriebstemperaturen, als die Module mit Begrünung (F1 und F2) hatte.....	88
Abbildung 76: PV+Gründach - monatliche Mittelwerte der Substrat-Temperaturen. Phasen der Pufferwirkung [43] Die Reihenfolge der Legende (von oben nach unten) entspricht der Reihenfolge der Säulen (von links nach rechts).....	89
Abbildung 77: Fassade - maximale und minimale monatliche Wandtemperaturen sowie die Wandtemperaturunterschiede zwischen F1 vs. F3. Die eingefärbten Bereiche stellen den Sommer- (Diff.Max.Temp.F1-F3) und Winterschutz (Diff.Max.Temp.F1-F3)	90
Abbildung 78: Vergleich der Ergebnisse aus Simulation und den Messdaten für die Aufdachanlage. (Messdaten Links, Prognosewerte rechts).....	91
Abbildung 79: Vergleich der Ergebnisse aus Simulation und den Messdaten für die Aufdachanlage (Messdaten Links, Prognosewerte rechts).....	91
Abbildung 80: Vergleich der Ergebnisse aus Simulation und den Messdaten für die Aufdachanlage (Messdaten Links, Prognosewerte rechts).....	92
Abbildung 81: Vergleich der Ergebnisse aus Simulation und den Messdaten für die Fassadenanlage. (Messdaten Links, Prognosewerte rechts).....	92
Abbildung 82: Vergleich der Ergebnisse aus Simulation und den Messdaten für die Fassadenanlage. (Messdaten Links, Prognosewerte rechts).....	93
Abbildung 83: Vergleich der Ergebnisse aus Simulation und den Messdaten für die Fassadenanlage. (Messdaten Links, Prognosewerte rechts).....	94
Abbildung 84: Vergleich der Fassadenanlage im östlichen und im westlichen Bereich aus den Messdaten. (Messdaten Links, Prognosewerte rechts)	94
Abbildung 85: Temperaturen über die Fläche	96
Abbildung 86: Temperaturen Labormessung PT100.....	97
Abbildung 87: Gegenüberstellung Erzeugung vs. Verbrauch.....	98
Abbildung 88: die Schüler und Schülerinnen beim Bepflanzungsworkshop des Wandbegrünungssystems im Biologiesaal.....	100
Abbildung 89: Möglichkeiten der individuellen Einstellungen der Slideshows [Quelle: Solarfox]	101
Abbildung 90: Kosten- und Nutzenübersicht für die Dachbegrünung	106
Abbildung 91: Kosten- und Nutzenübersicht für das Vliessystem im Klassenraum.....	107
Abbildung 92: Kosten- und Nutzenübersicht für das Trogsystem außen	108
Abbildung 93: ökologische Bewertung der Außenbegrünungssysteme	115
Abbildung 94 Gewicht der Außenbegrünungssysteme.....	115
Abbildung 95:Ökologische Bewertung der Innenbegrünungssysteme.....	116
Abbildung 96: Gewicht der Innenbegrünungssysteme	116
Abbildung 97: Vergleich einer Prognose der Kühlgradtage mit den Referenzen 1981-1990 und 2041-2050 und einer Berechnung für die Jahre 2012-2017.....	118
Abbildung 98: Mögliche Entwicklung der Bewertbarkeit der Kosten und Nutzen	118
Abbildung 99: Links: Innenraumbegrünung Aula mit PV-Screen zur einfachen Darstellung des PV-Ertrages. Rechts: Vergleich des CO ₂ -Ertrags mit fossilen Brennstoffen.....	123

Abbildung 100: Darstellung des PV-Ertrags hinsichtlich möglicher Nutzung. Übersichtliche Darstellung des PV-Ertrags. Daten werden für den Physikunterricht verwendet..... 123

6.2. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Flächengröße der Begrünungssysteme und der installierten PV-Module.....	20
Tabelle 2: Zusammenfassung, Vergleich und Übersicht zur Bedienbarkeit der Begrünungselemente und deren Systemkomponenten.....	53
Tabelle 3: Raumdatenklimadaten und Sporenkonzentration während den Messungen im Juni 2016	57
Tabelle 4: Raumdatenklimadaten und Sporenkonzentration während den Messungen am 6. Feb. 2017.....	58
Tabelle 5: Raumdatenklimadaten und Sporenkonzentration während den Messungen am 15. Feb. 2017.....	58
Tabelle 6: Bewertungshilfe für kultivierbare Schimmelpilze, nach [45]	59
Tabelle 7: CO ₂ -Reduktion pro Stunde und Mehrabfall.....	64
Tabelle 8: Aufbau der Dach-Anlage.....	79
Tabelle 9: Aufbau der Anlage Ost bzw. West.....	82
Tabelle 10: monatliche maximale Betriebstemperaturen PV-Module und maximale Temperaturdifferenzen zwischen begrünten und nicht begrünten Testfelder (F1 und F3) sowie zwischen beiden begrünten Testfelder (F1 und F2).....	86
Tabelle 11: Photovoltaikerträge Vergleich der begrünten Testfelder (F1-F2) für das Zeitintervall von 10:00 bis 14:00 Uhr.	95
Tabelle 12: Verbrauchswerte der Begrünungssysteme	98
Tabelle 13: Bewertungsmöglichkeiten der Nutzen der vertikalen Begrünung [53].....	103
Tabelle 14: Wasserverbrauch der Begrünungssysteme	105
Tabelle 15: Stromverbrauch der Begrünungssysteme innen	105
Tabelle 16: Bestandteile und deren Lebensdauern – Vliestaschensystem.....	113
Tabelle 17: Bestandteile und deren Lebensdauern – Trogsystem	113
Tabelle 18: Bestandteile und deren Lebensdauern – Kassettensystem	114

6.3. Literaturverzeichnis

- [1] United Nations - Department of Economic and Social Affairs/Population Division, „World Urbanization Prospects: The 2011 Revision“, New York, 2012.
- [2] Der Spiegel, „Forscher befürchten mehr Todesopfer“, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/hitzewellen-mehr-todesopfer-befuerchtet-a-1152981.html>. [Zugegriffen: 27-Juni-2018].
- [3] Der Standard, „150 bis 1.200 Hitzetote im Jahr – je nach Temperatur und Berechnung“, 2018.

- [Online]. Verfügbar unter: 150 bis 1.200 Hitzetote im Jahr – je nach Temperatur und Berechnung - derstandard.at/2000063314371/150-bis-1200-Hitzetote-im-Jahr-je-nach-Temperatur-und. [Zugegriffen: 03-Sep-2018].
- [4] ORF, „Sterberisiko um 13 Prozent höher“, 2018. [Online]. Verfügbar unter: https://news1.orf.at/070622-13664/?href=https%3A%2F%2Fnews1.orf.at%2F070622-13664%2F13668txt_story.html. [Zugegriffen: 03-Sep-2018].
- [5] Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik ZAMG, „Hitzewellen: 2015 eines der extremsten Jahre der Messgeschichte“, 2018. [Online]. Verfügbar unter: https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/news/hitzewellen-2015-eines-der-extremsten-jahre-der-messgeschichte?utm_source=twitterfeed&utm_medium=twitter. [Zugegriffen: 03-Sep-2018].
- [6] Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik ZAMG, „Klimatologische Kenntage in Wien 1955 bis 2017“, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.wien.gv.at/statistik/lebensraum/tabellen/eis-hitze-tage-zr.html>. [Zugegriffen: 03-Sep-2018].
- [7] U. Pitha u. a., *Leitfaden Fassadenbegrünung*. Wien: ÖkoKauf Wien, Arbeitsgruppe 25, Grün- und Freiräume Arbeitsgruppenleiter: Jürgen Preiss/Wiener Umweltschutzabteilung – MA 22, 2013.
- [8] Buch: H. Dierschke, *Pflanzensoziologie*. Stuttgart: Eugen Ulmer GmB&Co., 1994.
- [9] E. Abel und B. Kopelent, „Handhabung und Eignung von Vertikalbegrünungen im Innen- und Außenraum öffentlicher Gebäude Anhand der Schule GRG 7 Wien.“, Universität für Bodenkultur Wien, 2018.
- [10] H. Huang, S. Kato, und R. Hu, „Optimum design for indoor humidity by coupling Genetic Algorithm with transient simulation based on Contribution Ratio of Indoor Humidity and Climate analysis“, *Energy and Buildings*, Bd. 47, S. 208–216, 2012.
- [11] B. W. OLESEN, „Thermische Behaglichkeit“, *Technical Review*, Nr. 2, S. 30ff, 1982. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwibkJSYmNbeAhVB8ywKHYBFAYoQFjACegQICBAC&url=http%3A%2F%2Faldebaran.feld.cvut.cz%2Fvyuka%2Fenvironmental_engineering%2Flectures%2FL10%2520Thermal%2520Comfort.pdf&usg=AOvVaw327r_J8yNEstf85ohqihjn [Zugegriffen: 03-Sep-2018].
- [12] P. O. Fanger, „Thermal comfort – analysis and applications in environmental engineering“, *Danish Technical Press, Copenhagen*, 1970. <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/146642407209200337> [Zugegriffen: 03-Sep-2018].
- [13] W. Richter, *Handbuch der thermischen Behaglichkeit – Sommerlicher Kühlbetrieb*. 2007.
- [14] A. Dentel und U. Dietrich, „Thermische Behaglichkeit - Komfort in Gebäuden“, *Rom-Umwelt-Stiftung.De*, S. 1–37, 2013.
- [15] A. Mair, I. Fakult, und G. D. Beurteiler, „Messung und Auswertung zur Behaglichkeit insbesondere im Sommerfall am Beispiel der Höttinger Hauptschule“, 2012.
- [16] A. Holm, H. M. Kuenzel, und K. Sedlbauer, „the Hygrothermal Behaviour of Rooms : Combining Thermal Building Simulation and Hygrothermal Envelope Calculation“, *Building Simulation*, S. 499–506, 2003.

- [17] DIN EN ISO 7730:2006-03, „Ergonomie der thermischen Umgebung. Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit“.
- [18] S. Beranova, L. Feifer, M. W. Elkjær, M. K. Rasmussen, U. Bang, und J. Christoffersen, „Healthy Home Barometer – a survey among European citizens“, S. 1283–1287, 2016.
- [19] N. Langner und M. Illner, „Thermische Behaglichkeit nach DIN EN ISO 7730 - Ein Ansatz zur vereinfachten Datenaufnahme und Berechnung für die Bewertung von Bürogebäuden“, Bd. 37, 2015.
- [20] W. Frank, „Raumklima und Thermische Behaglichkeit“, *Berichte aus der Bauforschung*, Bd. 104, 1975.
https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKewirh7KwmdbeAhXJXSwKHfe9AOUQFjAAegQICRAC&url=https%3A%2F%2Fwww.energieinstitut-hessen.de%2Fapp%2Fdownload%2F9014018%2FBehaglichkeit%2Bund%2BW%25C3%25A4rmeschutz.pdf&usg=AOvVaw3GSBOXRslYudzTYmcab_gd [Zugegriffen: 03-Sep-2018].
- [21] DIN ISO 16000-18, *Innenraumluftverunreinigungen – Teil 18: Nachweis und Zählung von Schimmelpilzen – Probenahme durch Impaktion*. Germany, 2012.
- [22] United States Environmental Protection, „Air Quality Criteria for Particulate Matter Volume III of III“, *Environmental Protection*, Bd. III, S. 554, 1996.
- [23] Ozkaynak et al, „The PTEAM Study“. 1996.
<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/30003CKT.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=1995+Thru+1999&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&File=D%3A%5Czyfiles%5CIndex%20Data%5C95thru99%5Ctxt%5C00000003%5C30003CKT.txt&User=ANONYMOUS&Password=anonymous&SortMethod=h%7C-&MaximumDocuments=1&FuzzyDegree=0&ImageQuality=r75g8/r75g8/x150y150g16/i425&Display=hpfr&DefSeekPage=x&SearchBack=ZyActionL&Back=ZyActionS&BackDesc=Results%20page&MaximumPages=1&ZyEntry=1&SeekPage=x&ZyPURL> [Zugegriffen: 03-Sep-2018].
- [24] Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes Berlin, „Leitfaden für die Innenraumhygiene in Schulgebäuden“, S. 138, 2008.
<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKewirvLC2mtbeAhWDZCwKHXLZoQFjAAegQIBxAC&url=https%3A%2F%2Fwww.umweltbundesamt.de%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2Fmedien%2Fpublikation%2Flong%2F3689.pdf&usg=AOvVaw0x8m0XDC-pyOPd4cBoXYJL> [Zugegriffen: 03-Sep-2018].
- [25] J. Schneider und W. Spangl, *Schwebstaub in Österreich*. 2006. Umweltbundesamt Österreich
https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwj_07emtbeAhVIBywKHacmA3AQFjAAegQICRAC&url=http%3A%2F%2Fwww.umweltbundesamt.at%2Ffileadmin%2Fsite%2Fpublikationen%2FBE277.pdf&usg=AOvVaw0yam2ieEfyDxhQX6SLIZ3i [Zugegriffen: 03-Sep-2018].
- [26] EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG, „DIN EN 481 :1993“. 1993.
- [27] Buch: C. Riccabona und T. Bednar, *Baukonstruktionslehre 4*. Vienna, 2013. Manz Verlag
- [28] K. Eggenschwiler, „Raumakustik der Klassenzimmer der Rudolf Steiner Schule Zürcher Oberland 2 Wirkung von Lärm und schlechter Akustik in Schulzimmern 3 Anforderungen an die Akustik in Klassenzimmern“, S. 1–10, 1996.

- [29] ÖNORM B 8115-3, „Schallschutz und Raumakustik im Hochbau - Teil 3: Raumakustik“. Austrian Standards Institute, 2005.
- [30] 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, und ©, „DIN EN ISO 3382-3:2012-05 Nationales“, 2012.
- [31] L. Stockert, A. Korjenic, und T. David, „Bachelorarbeit: Untersuchungen von Nachhallzeiten in Räumen mit Wandbegrünungen“, TU Wien, 2017.
- [32] K. Perini, M. Ottel , A. L. A. Fraaij, E. M. Haas, und R. Raiteri, „Vertical greening systems and the effect on air flow and temperature on the building envelope“, *Building and Environment*, Bd. 46, Nr. 11, S. 2287–2294, 2011.
- [33] DIN EN ISO 6946, „Bauteile – Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren (ISO/DIS 6946:2015)“. 2015.
- [34] X. C. Pan und Y. X. Xiao, „Simulation Analysis of Building Green Facade Eco-Effect“, *Applied Mechanics and Materials*, Bd. 548, S. 1701–1705, 2014.
- [35] B. Bass, „Green Roofs and Green Walls : Potential Energy Savings in the Winter Report on Phase 1“, *Event London*, Bd. 54, Nr. 4, S. 461–476, 2007.
- [36] K. W. D. K. C. Dahanayake und C. L. Chow, „Studying the potential of energy saving through vertical greenery systems: Using EnergyPlus simulation program“, *Energy and Buildings*, Bd. 138, S. 47–59, 2017.
- [37] M. Ottel , K. Perini, A. L. A. Fraaij, E. M. Haas, und R. Raiteri, „Comparative life cycle analysis for green facades and living wall systems“, *Energy and Buildings*, Bd. 43, Nr. 12, 2011.
- [38] K. Stephan und F. Mayinger, *Thermodynamik. Mehrstoffsysteme und chemische Reaktionen Grundlagen und technische Anwendungen*, 14. Aufl. 1999.
- [39] S. Ansel, W., Appl, R., Betzler, F., Köhler, M., Mann, G., Ottel , M., & Wunschmann, „Planung-Konstruktion - Ausführung.“, *Köln: Handbuch Bauwerksbegrunung.*, 2012.
- [40] M. S. Penaranda Moren und A. Korjenic, „**Green buffer space influences on the temperature of photovoltaic modules: Multifunctional system: Building greening and photovoltaic**“, *Energy and Buildings*, Bd. 146, S. 364–382, 2017.
- [41] M. S. Penaranda Moren und A. Korjenic, „**Hotter and colder – How Do Photovoltaics and Greening Impact Exterior Facade Temperatures: The synergies of a Multifunctional System**“, *Energy and Buildings*, Bd. 147, S. 123–141, 2017.
- [42] M. Soledad, Penaranda Moren, „Multifunktionale Systemlösung : Gebaubegrunung und Photovoltaik“, Dissertation TU Wien, 2018.
- [43] M. S. Penaranda Moren und A. Korjenic, „**Untersuchungen zum ganzjährigen Wärmeschutz an Varianten eines kombinierten Dachaufbaus mit Photovoltaik und Begrünung**“, *Bauphysik*, Bd. 40, Nr. 3, S. 131–142, 2018.
- [44] S. Rief und J. Mitja, „Luftfeuchtigkeit am Büroarbeitsplatz; Studie zur Bedeutung der Luftfeuchtigkeit im Büro“, *Arbeitswirtschaft, Fraunhofer-Institut für*, 2014.
- [45] H. Behrendt, W. Bischof, M. Excner, B. Heinzow, und O. Herbarth, „Leitfaden zur Ursachensuche und Sanierung bei Schimmelpilzwachstum in Innenräumen“, *Umweltbundesamt Dessau*, 2005.

- [46] O. Gorbachevskaya und S. Herfort, „Feinstaubbindungsvermögen der für Bauwerksbegrünung typischen Pflanzen“, 2012.
<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKewiyjJ20m9beAhVkhaYKHdQjC6QQFjAAegQIARAC&url=http%3A%2F%2Fwww.iasp.berlin.de%2Fib2012.pdf&usg=AOvVaw1o6-bp9cns9x-kWedNWbIC> [Zugegriffen: 03-Sep-2018].
- [47] T. A. M. Pugh, A. R. MacKenzie, J. D. Whyatt, und C. N. Hewitt, „Effectiveness of Green Infrastructure for Improvement of Air Quality in Urban Street Canyons“, *Environmental Science & Technology*, Bd. 46, Nr. 14, S. 7692–7699, 2012.
- [48] T. Van Renterghem und D. Botteldooren, „Numerical evaluation of sound propagating over green roofs“, *Journal of Sound and Vibration*, Bd. 317, Nr. 3–5, S. 781–799, 2008.
- [49] UdK Berlin Sengspiel, „Absorptionsgrad größer 1 - Blatt 1“, S. 5301669, 2005.
<http://www.sengpielaudio.com/AbsorptionsgradGroesserEinsBild.pdf> [Zugegriffen: 03-Sep-2018].
- [50] D. Tudiwer und A. Korjenic, „**The effect of living wall systems on the thermal resistance of the façade**“, *Energy and Buildings*, Bd. 135, S. 10–19, 2017.
- [51] B. Brettschneider, A. Korjenic, U. Pitha, und M. Lutz, „Greening Aspang - Endbericht“, 2017.
- [52] D. Tudiwer, V. Höckner, und A. Korjenic, „Greening Aspang – Hygrothermische Gebäudesimulation“, *Bauphysik*, Bd. 40, Nr. 3, S. 120–130, 2018.
- [53] K. Perini und P. Rosasco, „Cost-benefit analysis for green facades and living wall systems“, *Building and Environment*, Bd. 70, 2013.
- [54] ÖNORM B 1801-2, „Bauprojekt- und Objektmanagement - Teil 2: Objekt-Folgekosten“. Austrian Standards Institute, 2011.
- [55] ÖNORM B 1801-1, „Bauprojekt- und Objektmanagement - Teil 1: Objektterrichtung“. Austrian Standards Institute, 2009.
- [56] Österreichische Nationalbank, „Anknüpfungszinssatz gem. §456 UGB“, 2018. [Online].
 Verfügbar unter: <https://www.oenb.at/Service/Zins--und-Wechselkurse/Anknuepfungszinssaetze.html>. [Zugegriffen: 28-Juni-2018].
- [57] H. Hirth, *Grundzüge der Finanzierung und Investition*. Berlin: De Gruyter Oldenbourg, 2011.
- [58] O. Nationalbank, „INFLATION AKTUELL Die Inflationsanalyse der OeNB Stabilität“, Wien, 2018.
<https://www.oenb.at/Publikationen/Volkswirtschaft/inflation-aktuell.html> [Zugegriffen: 28-Juni-2018].
- [59] EHL Immobilien GmbH, „Büromarktbericht Wien | Frühjahr 2018“, Wien, 2018.
- [60] EHL Immobilien GmbH, „Wiener Zinshaus-Marktbericht 2018“, Wien, 2018.
- [61] Stadt Wien - Wiener Wasser (MA 31), „Wasserbezugs- und Wasserzählergebühr - Meldung“, 2018. [Online]. Verfügbar unter:
<https://www.wien.gv.at/amtshelfer/umwelt/wasser/wasseranschluss/wassergebuehr.html>. [Zugegriffen: 27-Juni-2018].
- [62] Wien Energie Vertrieb GmbH & Co KG, „Unsere OPTIMA Strom-Tarife im Überblick!“, 2018. [Online]. Verfügbar unter:
<https://www.wienenergie.at/eportal3/ep/programView.do/pageTypeld/67825/programId/72008/channelId/-50041>. [Zugegriffen: 27-Juni-2018].

- [63] Stadt Wien - Magistratsabteilung 48, „Tarife für die Übernahme von Müll, Bauschutt und Erdaushub“, 2018.
- [64] BKI Baukosteninformationszentrum, *BKI Kostenplanung - Baukosten Positionen Altbau - Statistische Kostenkennwerte*. Müller, Rudolf, 2016.
- [65] J. Luttik, „The value of trees, water and open space as reflected by house prices in the Netherlands“, *Landscape and Urban Planning*, Bd. 48, Nr. 3–4, 2000.
- [66] A. Cadena und T. Thomson, „An Empirical Assessment of the Value of Green in Residential Real Estate“, *The Appraisal Journal*, Nr. October 2008, S. 32–40, 2015.
- [67] K. Perini und P. Rosasco, „Cost-benefit analysis for green façades and living wall systems“, *Building and Environment*, Bd. 70, S. 110–121, 2013.
- [68] MA 18 Stadtentwicklung und Stadtplanung, „Grün- und Freiraum, STEP 2025“, Wien, 2015.
- [69] U. Morawetz, D. Mayr, und D. Damyanovic, „Ökonomische Effekte grüner Infrastruktur als Teil eines Grünflächenfaktors. Ein Leitfaden.“, 2016.
- [70] W. A. Brunauer, S. Lang, P. Wechselberger, und S. Bienert, „Additive Hedonic Regression Models with Spatial Scaling Factors: An Application for Rents in Vienna“, *Journal of Real Estate Finance and Economics*, Bd. 41, Nr. 4, 2010.
- [71] ÖNORM H 7500-1, *ÖNORM H 7500-1 Heizungssysteme in Gebäuden*. Österreich, 2015.
- [72] Bundesministerium für Wissenschaft Forschung und Wirtschaft, „Klimadatenrechner“, 2017. .
- [73] I. Kovacic, „Lebenszyklusanalyse und Lebenszykluskosten“, Skriptum TU Wien 2015.
- [74] U. Pitha u. a., „Leitfaden Fassadenbegrünung“, Bd. „ÖkoKauf W, Nr. Wien, 2013.
- [75] Canada Mortgage and Housing Corporation - CMHC, „Greenbacks From Green Roofs: Forging a New Industry in Canada“, 1999.
- [76] Bundesministerium für Umwelt Naturschutz Bau und Reaktorsicherheit, „Lebensdauer von Bauteilen und Bauteilschichten“, Nr. 4, 2009.
- [77] P. Bickel u. a., „HEATCO - Developing harmonised European approaches for transport costing and project assessment. Deliverable 5.“, 2006.
- [78] Umweltbundesamt Deutschland, „Stickstoffoxide“. 2017.
<http://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/luft/luftschadstoffe/nox/> [Zugegriffen: 28-Juni-2018].
- [79] C. Clark, P. Adriaens, und F. B. Talbot, „Green roof valuation: a probabilistic economic analysis of environmental benefits“, *Environmental Science Technology*, Bd. 42, Nr. 6, 2008.
- [80] Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change MCC, „Emissionshandel durch Mindestpreis reformieren“, 2017. .
- [81] Europäische Kommission - Klimapolitik, „Emissions Trading System - Überarbeitung für Phase 4 (2021–2030)“. 2017.
- [82] T. A. M. Pugh, A. R. MacKenzie, J. D. Whyatt, und C. N. Hewitt, „Effectiveness of green infrastructure for improvement of air quality in urban street canyons“, *Environmental Science and Technology*, Bd. 46, 2012.

- [83] IBO Verein und GmbH, „eco2soft“, 2018. <https://www.baubook.info/eco2soft/> [Zugegriffen: 28-Juni-2018].
- [84] baubook GmbH, „baubook“, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.baubook.info/>. [Zugegriffen: 28-Juni-2018].
- [85] IINAS GmbH – Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien, „GEMIS - Globales Emissions-Modell integrierter Systeme“, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <http://iinas.org/gemis-de.html>. [Zugegriffen: 28-Juni-2018].
- [86] Bundesministerium des Innern für Bau und Heimat, „ÖKOBAUDAT“, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.oekobaudat.de/>. [Zugegriffen: 28-Juni-2018].
- [87] H. Kromp-Kolb, H. Formayer, und L. Clementschitsch, „Auswirkungen des Klimawandels auf Wien unter besonderer Berücksichtigung von Klimaszenarien“, Wien, 2007.
- [88] D. Tudiwer und A. Korjenic, „**The effect of an indoor living wall system on humidity, mould spores and CO₂-concentration**“, *Energy and Buildings*, Bd. 146, S. 73–86, 2017.
- [89] I. Zluwa, D. Tudiwer, A. Korjenic, und U. Pitha, „**Vertikale Innenraumbegrünung Ergebnisse zu Systemeignung und Raumklima**“, *Gebäudegrün*, Bd. 3, 2018.



Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien
[bmvit.gv.at](https://www.bmvit.gv.at)