

Messtechnische Erfassung begrünter/nicht begrünter Objekte zur Adaptierung von Berechnungsmodellen (MARGRET)

Berichte aus Energie- und Umweltforschung 61/2026

Wien, 2026

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:

Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur,
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination: Abteilung III/3 - Energie und Umwelttechnologien

Leitung: DI (FH) Isabella Warisch

Kontakt zur Mission „Klimaneutrale Stadt“: DIⁱⁿ (FH) Katrin Bolovich

Kontakt zu „Technologien und Innovationen für die klimaneutrale Stadt“: DIⁱⁿ (FH) Isabella Warisch

Autorinnen und Autoren:

Mag. (FH) Rudolf Bintinger (IBO – Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH)

DI Dr.med. Martina Majcen, DI Dr. Daniel Rüdissler (AEE INTEC)

Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. Ulrike Pitha, DI Udo Buttinger, Fridtjof Diekmann B.Sc. (Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau – IBLB, BOKU University)

DI Elisabeth Leitner, DI Susanne Formanek (Grünstattgrau Forschungs- und Innovations-GmbH)

Wien, März 2026

Ein Projektbericht gefördert im Rahmen von



Rückmeldungen:

Ihre Überlegungen zu vorliegender Publikation übermitteln Sie bitte an iii3@bmimi.gv.at.

Rechtlicher Hinweis

Dieser Ergebnisbericht wurde von die/der Projektnehmer:in erstellt. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit, Aktualität sowie die barrierefreie Gestaltung der Inhalte übernimmt das Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur (BMIMI) keine Haftung.

Mit der Übermittlung der Projektbeschreibung bestätigt die/der Projektnehmer:in ausdrücklich, über sämtliche für die Nutzung erforderlichen Rechte – insbesondere Urheberrechte, Leistungsschutzrechte sowie etwaige Persönlichkeitsrechte abgebildeter Personen – am bereitgestellten Bildmaterial zu verfügen.

Die/der Projektnehmer:in räumt dem BMIMI ein unentgeltliches, nicht ausschließliches, zeitlich und örtlich unbeschränktes sowie unwiderrufliches Nutzungsrecht ein, das übermittelte Bildmaterial in allen derzeit bekannten sowie künftig bekannt werdenden Nutzungsarten für Zwecke der Berichterstattung, Dokumentation und Öffentlichkeitsarbeit im Zusammenhang mit der geförderten Maßnahme zu verwenden, insbesondere zur Veröffentlichung in Printmedien, digitalen Medien, Präsentationen und sozialen Netzwerken.

Für den Fall, dass Dritte Ansprüche wegen einer Verletzung von Rechten am übermittelten Bildmaterial gegen das BMIMI geltend machen, verpflichtet sich die/der Projektnehmer:in, das BMIMI vollständig schad- und klaglos zu halten. Dies umfasst insbesondere auch die Kosten einer angemessenen rechtlichen Vertretung sowie etwaige gerichtliche und außergerichtliche Aufwendungen.

Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem FTI-Schwerpunkt „Klimaneutrale Stadt“ des Bundesministeriums für Innovation, Mobilität und Infrastruktur (BMIMI) und Klima- und Energiefonds (KLIEN). Im Rahmen dieses Schwerpunkts werden Forschung, Entwicklung und Demonstration von Technologien und Innovationen gefördert, mit dem Ziel, einen essentiellen Beitrag zur Erreichung der Klimaneutralität in Gebäuden, Quartieren und Städten zu liefern. Gleichzeitig wird dazu beigetragen, die Lebens- und Aufenthaltsqualität sowie die wirtschaftliche Standortattraktivität in Österreich zu erhöhen. Hierfür sind die Forschungsprojekte angehalten, einen gesamtheitlichen Ansatz zu verfolgen und im Sinne einer integrierten Planung – wie auch der Berücksichtigung aller relevanten Bereiche wie Energieerzeugung, -speicherung und -verteilung, Berücksichtigung von gebauter Infrastruktur, Mobilität und Digitalisierung – angewandte und bedarfsorientierte Fragestellungen zu adressieren.

Um die Wirkung des FTI-Schwerpunkts „Klimaneutrale Stadt“ zu erhöhen, ist die Verfügbarkeit und Verbreitung von Projektergebnissen ein elementarer Baustein. Durch Begleitmaßnahmen zu den Projekten – wie Kommunikation und Stakeholdermanagement – wird es ermöglicht, dass Projektergebnisse skaliert, multipliziert und „Von der Forschung in die Umsetzung“ begleitet werden. Daher werden alle Projekte nach dem Open Access Prinzip in der Schriftenreihe des BMIMI über die Plattform nachhaltigwirtschaften.at frei zugänglich gemacht. In diesem Sinne wünschen wir allen Interessierten und Anwender:innen eine interessante Lektüre.

Inhalt

Inhalt

Impressum	2
Vorbemerkung	4
Inhalt.....	5
Inhalt.....	5
1 Kurzfassung	8
Motivation	8
Ziele und Innovationsgehalt	8
Methodische Vorgehensweise	8
Ergebnisse und Schlussfolgerungen	9
Ausblick	9
2 Abstract.....	11
Motivation	11
Objectives and Innovative Content	11
Methodological Approach.....	11
Results and Conclusions.....	12
Outlook.....	12
3 Ausgangslage, Methodisches Vorgehen	13
3.1 Ausgangslage	13
3.2 Entwicklung der Messverfahren (AEE, Boku)	23
3.2.1 Prüfaufbau für Vertikalbegrünungen	23
3.2.2 Innovation Pyroscanner	28
3.2.3 Prüfaufbau für die Dachbegrünung	29
3.2.4 Datenübertragung, Aufzeichnung, Monitoring am Digitalen Zwilling.....	31
3.2.5 Pflanzenauswahl.....	33
3.2.6 Verfahren für das Pflanzenmonitoring	36
3.3 Durchführen der Messungen	43
3.3.1 Pflanzentechnische Herausforderungen	43
3.3.2 Bewässerung	46
3.3.3 Fassadenwechsel	47
3.3.4 Technische Herausforderungen und Empfehlungen für künftige Prüfsettings	48
3.4 Einbindung Stakeholder durch Fachdiskussionen und Workshops	48
3.4.1 Transdisziplinärer Workshop	49
3.4.2 Victorian Calling.....	50
3.4.3 Qualitative Inhaltsanalyse nach Mayring.....	50
4 Ergebnisse und Interpretation.....	52
4.1 Vertikalbegrünungen	52

4.1.1	Bewässerung Vertikalbegrünung	53
4.1.2	Pflanzenspezifische Parameter Vertikalbegrünung (Boku).....	59
4.1.3	Klimatische Bedingungen im Messzeitraum	81
4.1.4	Albedomessungen	83
4.1.5	Strahlungsminderung, punktuelle Messung Wand	85
4.1.6	Strahlungsminderung, flächige Messung durch transparente Bauteile mittels Pyroscanner.	90
4.1.7	Oberflächentemperaturen und Wärmestrom Fassade	94
4.1.8	Kühlbedarf Fassadenprüfbox	101
4.2	Gründächer.....	105
4.2.1	Bewässerung Dachbegrünung.....	105
4.2.2	Pflanzenspezifische Parameter Dachbegrünung (Boku).....	110
4.2.3	Lufttemperatur	116
4.2.4	Oberflächentemperatur.....	119
4.2.5	Wärmestrom und Wärmeeintrag.....	122
4.2.6	Wärmedurchgangswiderstand und U-Wert.....	126
4.3	Stakeholder-Dialog: Formate & Ergebnisse	130
4.3.1	UGreen Austauschgruppe.....	130
4.3.2	MARGRET Fachdiskussion am 26.11.2024	130
4.3.3	Präsentation Projektstand, Verband für Bauwerksbegrünung	132
4.3.4	HEDWIG und MARGRET Workshop am 03.07.2025	133
4.3.5	HEDWIG und MARGRET Ergebnispräsentation am 19.09.2025	134
4.4	Empfehlungen zu Adaptierungen in den Berechnungsmodellen bzw. Normen	137
4.4.1	Stakeholder: zentrale Aussagen	137
4.4.2	Ableitung geeigneter Kennwerte	139
4.4.3	Empfehlungen für standardisierte Mess- und Prüfverfahren.....	141
4.4.4	Empfehlungen zur Adaptierung in Berechnungsmodellen bzw. Normen.	144
5	Schlussfolgerungen	159
5.1	Was sind die in dem Projekt gewonnenen Erkenntnisse für das Projektteam (fachliche Einschätzung)?.....	159
5.2	Wie arbeitet das Projektteam mit den erarbeiteten Ergebnissen weiter?	160
5.3	Für welche Zielgruppen sind die Projektergebnisse relevant und interessant und wer kann damit wie weiterarbeiten?.....	160
5.4	Mögliche rechtlichen Hürden, welche in Zusammenhang mit den ausgearbeiteten Konzepten bzw. Technologien bestehen.....	161
5.5	Beschreiben Sie auch bisherige Verwertungs- und Verbreitungsaktivitäten und stellen Sie das weitere (Markt-/ Verbreitungs-) Potenzial dar.....	162
6	Ausblick und Empfehlungen	163
	Empfehlungen für weiterführende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten.....	163
	Tabellenverzeichnis.....	166
	Abbildungsverzeichnis.....	168

Literaturverzeichnis.....	172
7 Anhang.....	175
7.1 Anhang 1: Data Management Plan (DMP)	175
7.1.1 Datenerstellung und Dokumentation.....	175
7.1.2 Ethische, rechtliche und Sicherheitsaspekte.....	175
7.1.3 Datenspeicherung und -erhalt	175
7.1.4 Wiederverwendbarkeit der Daten	175
7.2 Anhang 2: Fassadenwechsel und Prüfpositionenverlauf	176
7.2.1 Messpositionenverlauf 2024.....	177
7.2.2 Messpositionenverlauf 2025.....	178
7.2.3 Zusatzmessungen Fassade, August 2025.....	179
7.3 Anhang 3: Bewässerungszeiten troggebundene Vertikalbegrünung	180
7.3.1 Bewässerungszeiten troggebundene Vertikalbegrünung 2024	181
7.3.2 Bewässerungszeiten troggebundene Vertikalbegrünung 2025	182

1 Kurzfassung

Motivation

Gebäudeintegrierte Begrünungsmaßnahmen wie Dach- und Fassadenbegrünungen leisten einen wichtigen Beitrag zur energieeffizienten und nachhaltigen Gebäude- und Stadtplanung. Verdunstungskühlung, Verschattung, Dämmung und verbessertes Mikroklima ermöglichen das energetische Optimierungspotential neben baulichen und haustechnischen Maßnahmen auszuweiten. Vor allem in Hinblick auf höhere Außentemperaturen durch den voranschreitenden Klimawandel ist es entscheidend, alle verfügbaren Möglichkeiten zur Kühlung und Resilienzsteigerung zu nutzen. Derzeit fehlt Planungs Beteiligten und Bauherrschaften jedoch die Möglichkeit, den konkreten Einfluss von Begrünungsmaßnahmen auf das Gebäude, beispielsweise anhand des Energieausweises, verlässlich zu quantifizieren und objektiv zu vergleichen.

Ziele und Innovationsgehalt

Das Ziel von MARGRET war es, Verfahren zur Messung der Wirkungseffekte von Bauwerksbegrünungen zu definieren und konkrete Adaptierungen in den Berechnungsmodellen beziehungsweise Normen vorzuschlagen. Dazu wurden Begrünungen an einer Fassadenprüfbox sowie an speziellen Dachbegrünungstestständen unter natürlichem Witterungseinfluss messtechnisch untersucht. Die Untersuchungen fokussierten sich primär auf den Vergleich zwischen begrünten und nicht begrünten Referenzobjekten bei zeitgemäßem Gebäudestandard. Ein wesentlicher Innovationsgehalt lag in der Entwicklung und Erprobung standardisierter Prüfverfahren, die eine Ableitung geeigneter Kennwerte für die Implementierung in die relevanten Normwerke ermöglichen.

Methodische Vorgehensweise

Das methodische Vorgehen gliederte sich in die Entwicklung spezialisierter Messverfahren und deren praktische Anwendung im Feldversuch. Für die Vertikalbegrünungen kam die AEE INTEC Fassadenprüfbox zum Einsatz, welche über zwei thermisch entkoppelte Räume mit identischen Fassadengrößen verfügt. Eine technische Neuerung stellte der Einsatz des Pyroscanners zur hochauflösenden Erfassung der Verschattungsleistung dar. Parallel dazu wurden Prüfaufbauten für Dachbegrünungen errichtet, um die Differenz zwischen einem intensiv reduzierten Gründach und einem herkömmlichen Kiesdach zu evaluieren. Die Datenaufzeichnung und das Monitoring wurden über einen digitalen Zwilling realisiert. Flankiert wurde die technische Messung durch ein begleitendes

Pflanzenmonitoring. Um die Praxistauglichkeit sicherzustellen, erfolgte eine transdisziplinäre Stakeholdereinbindung durch Fachdiskussionen und Workshops.

Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Im Zuge des Projekts wurden standardisierte Mess- und Prüfverfahren für die Bauwerksbegrünung erfolgreich entwickelt und validiert. Die Messungen an der opaken, hochgedämmten Fassade verdeutlichten, dass die verbleibenden Wärmeströme bei zeitgemäßen Baustandards bereits weitestgehend minimiert sind, wodurch der maßgebliche energetische Hebel primär im Bereich der transparenten Bauteile liegt. Die Untersuchungen zur Fassadenbegrünung lieferten zudem wichtige Erkenntnisse zur Dynamik des Bioshadings. Es zeigte sich, dass die Abschirmung der Solarstrahlung erst mit zunehmender Tageszeit signifikant ansteigt und am Vormittag kaum ausgeprägt ist. Eine zentrale Schlussfolgerung stellt die teilweise Kompensation der Beschattungswirkung durch zusätzliche Diffusstrahlung über das Blattwerk dar. Eine methodische Herausforderung blieb der dynamische Charakter des Bauteils Pflanze, da der Biomassezuwachs am exponierten Standort trotz vorzeitiger Kultivierung und professioneller Betreuung hinter den Erwartungen zurückblieb. Ein signifikantes Potenzial wurde für Gründächer identifiziert, für die ein erhebliches Einsparpotenzial bei herkömmlichen Dämmstoffen an Dachflächen berechnet wurde. Zudem leisten deren hohes Wasserrückhaltevermögen und die damit verbundene Verdunstungskühle einen passiven Beitrag zum sommerlichen Überhitzungsschutz und entlasten gleichzeitig das Kanalsystem bei Starkregenereignissen. Auf Basis dieser Daten wurden Vorschläge zur Bestimmung relevanter Kenngrößen erarbeitet, welche die Grundlage für die Weiterentwicklung von Berechnungsmodellen bilden.

Ausblick

Ein zentraler Bereich für zukünftige Forschungsarbeiten liegt in der tiefergehenden Analyse des Bioshadings, insbesondere im Hinblick auf die Dynamik der Strahlungsabschirmung bei transparenten Bauteilen. Um diese Effekte planungssicher abzubilden, wird empfohlen, Tabellenkennwerte für den jahreszeitlich schwankenden Gesamtenergiedurchlassgrad des kombinierten Systems aus Verglasung und Vegetation zu erstellen. Ein weiterer Fokus liegt in der methodischen Vereinfachung der Bewertung von Gründächern. Es wird empfohlen, die Vielzahl komplexer Einzelparameter durch einen validierten äquivalenten Wärmedämmwert zu ersetzen. Ein solcher pauschaler Kennwert würde die energetische Performance des gesamten Aufbaus in einer normfähigen Größe zusammenfassen und die Integration in Energieausweise massiv erleichtern. Diese weiterführenden Aspekte werden im Folgeprojekt MARGRET Bioshade detailliert betrachtet.



Abbildung 1: Fassadenprüflinge und Dachteststände aus dem Projekt MARGRET. Fotos: M.Majcen, AEE INTEC.

2 Abstract

Motivation

Building integrated greening measures such as roof and facade greening make an important contribution to energy efficient and sustainable building and urban planning. Evaporative cooling, shading, insulation, and an improved microclimate allow the energy optimization potential to be expanded beyond purely structural and technical building measures. Especially in view of higher outdoor temperatures caused by advancing climate change it is crucial to use all available options for cooling and increasing resilience. Currently however planning participants and building owners lack the possibility to reliably quantify and objectively compare the specific influence of greening measures on a building for example by using the energy performance certificate.

Objectives and Innovative Content

The goal of MARGRET was to define procedures for measuring the impact effects of building greening and to propose specific adaptations in calculation models and standards. To this end greening was metrologically investigated on a facade test box and at special roof greening test stands under natural weather conditions. The investigations focused primarily on the comparison between greened and non greened reference objects based on contemporary building standards. A significant innovative aspect lay in the development and testing of standardized test procedures that enable the derivation of suitable characteristic values for implementation in the relevant standards.

Methodological Approach

The methodological approach was divided into the development of specialized measuring procedures and their practical application in field trials. For the vertical greening the AEE INTEC facade test box was used which has two thermally decoupled rooms with identical facade sizes. A technical innovation was the use of a pyroscanner for high resolution recording of the shading performance. In parallel test setups for roof greening were established to evaluate the difference between an intensively reduced green roof and a conventional gravel roof. Data recording and monitoring were realized via a digital twin. The technical measurement was flanked by accompanying plant monitoring. To ensure practical feasibility transdisciplinary stakeholder involvement was carried out through technical discussions and workshops.

Results and Conclusions

In the course of the project standardized measuring and testing procedures for building greening were successfully developed and validated. Measurements on the opaque highly insulated facade clarified that the remaining heat flows in contemporary building standards are already largely minimized which means that the decisive energy lever lies primarily in the area of transparent components. The investigations into facade greening also provided important insights into the dynamics of bioshading. It was shown that the shielding of solar radiation only increases significantly as the day progresses and is hardly pronounced in the morning. A central conclusion is the partial compensation of the shading effect by additional diffuse radiation via the foliage. A methodological challenge remained the dynamic character of the plant as a building component since the biomass growth at the exposed location fell behind expectations despite early cultivation and professional care. Significant potential was identified for green roofs for which a substantial savings potential for conventional insulation materials on roof surfaces was calculated. Furthermore their high water retention capacity and the associated evaporative cooling provide a passive contribution to summer overheating protection and simultaneously relieve the sewer system during heavy rain events. Based on these data proposals for determining relevant characteristic values were developed which form the basis for the further development of calculation models.

Outlook

A central area for future research lies in the deeper analysis of bioshading particularly with regard to the dynamics of radiation shielding in transparent components. In order to map these effects reliably for planning it is recommended to create tabular characteristic values for the seasonally fluctuating total energy transmittance of the combined system of glazing and vegetation. A further focus lies on the methodological simplification of the evaluation of green roofs. It is recommended to replace the multitude of complex individual parameters with a validated equivalent thermal insulation value. Such a flat rate characteristic value would summarize the energetic performance of the entire setup in a standardizable size and significantly facilitate integration into energy performance certificates. These further aspects will be considered in detail in the follow up project MARGRET Bioshade.

3 Ausgangslage, Methodisches Vorgehen

3.1 Ausgangslage

Am Beginn des Projektes stand eine ausführliche Literaturrecherche und -analyse mit dem vorrangigen Ziel, die aktuell im Bereich Gebäudebegrünung verwendeten Messverfahren und Prüfaufbauten zu analysieren, um ein zeitgemäßes, belastbares Prüfsetting zu entwickeln. Dafür wurden Studien der letzten 15 Jahre ausgewählt, die Gebäudebegrünung in experimentellen Settings mit begrünten und identischen, jedoch unbegrünten Referenzobjekten untersuchten. Reine Simulationsstudien wurden ausgeschlossen. Den Ausgangspunkt bildete die Literaturanalyse im Projektbericht zu „Wirkungen der grünen Stadt“ (Stangl et.al. 2019). Im Rahmen einer systematischen Recherche in den Datenbanken ScienceDirect, ResearchGate und Google Scholar sowie durch Anwendung des Schneeballprinzips wurden insgesamt 14 Publikationen identifiziert. Diese wurden nach ihrer Bedeutung für die Projektziele selektiert und als wesentliche Grundlage für die Entwicklung der Mess- und Prüfverfahren herangezogen. Die Analyse erbrachte fundierte Erkenntnisse, welche in Tabellen systematisch nach den Kriterien der Messart, der erhobenen Parameter sowie des spezifischen Mess-Setups aufbereitet und den jeweiligen Begrünungstechniken für Fassade oder Dach zugeordnet wurden.

Die untersuchten Konstruktionen der Gebäudeaußenhüllen und Bauwerksbegrünungen wichen stark voneinander ab, was durch die Vielzahl an getesteten Varianten wie boden-, trog- oder wandgebundenen Systemen sowie durch die diversen Dachbegrünungsaufbauten bedingt war. Eine direkte Vergleichbarkeit der Ergebnisse zwischen den einzelnen Studien ist daher kaum gegeben. Erschwerend kommt die Problematik der unterschiedlichen Klimazonen nach Köppen-Geiger hinzu, die zusammen mit den variierenden Geopositionen der Versuchsstandorte zu deutlich unterschiedlichen Verläufen und Intensitäten der solaren Einstrahlung führte.

Die Art der erhobenen Messparameter in den Studien dagegen differiert weniger stark. Lufttemperaturen, -feuchtigkeit in unterschiedlichen Positionen, Wandtemperaturen und solare Einstrahlung sowie Windparameter aus Wetter- und Klimastationen bilden die Basis. In einzelnen Studien kommen Wärmestrommessungen hinzu, die jedoch nur dann sinnvoll eingesetzt werden können, wenn das Prüfsetting einen – idealerweise konditionierten – Raum hinter der Begrünung beinhaltet. Bei Coma (2017) wurde zusätzlich eine Energieverbrauchsmessung für die Raumkonditionierung durchgeführt.

Auffallend ist auch, dass keines der beschriebenen Prüfsettings Fenster in den Prüfwänden beinhaltet, auch wenn gut ausgestattete Prüfboxen verwendet wurden. Dadurch gibt es bisher nur Ergebnisse zu den Effekten auf opake Bauteile, während die Einflüsse von Begrünung auf die Performanz transparenter Bauteile, die fixer Bestandteil realer Gebäude sind, kaum untersucht ist. Diese Fragestellung wurde im gerade abgeschlossenen österreichischen Demonstrationsprojekt GLAS-Grün (Stangl et al. 2025) untersucht, deren Ergebnisse bereits publiziert wurde. Eine umfassende Auflistung der in der ausgewählten Literatur identifizierten angewandten Arten der Messungen, sowie ermittelten Messparameter und verwendete Sensorik im Bereich Fassadenbegrünung wird in Tabelle 1 bis Tabelle 3 dargestellt. In Tabelle 4 bis Tabelle 6 sind die detaillierten Aufbauten, U-Werte, lokalen Klimata und verwendeten Bepflanzungsarten derselben Studien zu entnehmen.

Legende der Messparameter in Tabelle 1 bis Tabelle 3

Kurzbezeichnung	Parameter
LT (i, b, h, a)	Lufttemperatur (innen, Begrünungsebene, Hinterlüftungsebene, außen)
LF (i, b, h, a)	Luftfeuchtigkeit (innen, Begrünungsebene, Hinterlüftungsebene, außen)
WT (i, b, a)	Wandtemperatur (innen, Blattwerk, außen)
WS	Wärmestrom
WG, WR	Windgeschwindigkeit, Windrichtung
N	Niederschlag
SS	Solarstrahlung
OT	Operative Temperatur
BT, BF	Bodentemperatur, Bodenfeuchte

Tabelle 1: Literaturanalyse Fassadenbegrünung: Testsettings und Messparameter Teil A

Quelle	Name der Studie	Art der Messungen		Erhobene Parameter		Messsetup
		Kurzbeschreibung	Details	Gemessen	Berechnet	Verwendete Sensoren
Vox et al. (2018)	Green facades to control wall surface temperature in buildings	Vergleich Oberflächentemperatur Wand begrünt/nicht begrünt an ausgewählten repräsentativen Tagen. Statistische Analyse der Zusammenhänge OT_{wa} mit Klimadaten	"Testboxen" bodengebunden begrünt, unbegrünt, im Labor zuerst Messung des Reflexionsvermögens der Testwand ohne Begrünung im sichtbaren und Infrarotbereich; Solarstrahlung direkt auf die Wand und auf horizontale Fläche gemessen --> Vergleichbarkeit von Klimazonen	LT, LF, WG, WTa, SS, LAI	Emissionsgrad Wand, one-way ANOVA für Klimaeinflüsse. Duncan's Test, Tukey-Kramers Test	Spektrophotometer: double beam UV-VIS-NIR spectrophotometer (Lambda 950, Perkin Elmer Instruments, Norwalk, CT, USA). Tests in der LWIR range: FT-IR spectrophotometer (1760 X, Perkin Elmer Instruments, Norwalk, CT, USA) 2500-25000nm, LAI: AccuPAR PAR/LAI Ceptometer (model LP-80, Decagon Devices Inc., Pullman, WA, USA); OTwa: thermistors (Tecno.EL s.r.l. Formello, Rome, Italy); SS: pyranometers (model 8-48, Eppley Laboratory, Newport, RI, USA) in the wavelength range 300-3000 nm, Klimastation
Convertino et al. (2021)	Evaluation of the cooling effect provided by a green façade as nature-based system for buildings	Messungen an unbegrünter und begrünter Fassade (zwei Pflanzvarianten) + Berechnung latente Wärme als direkte Funktion von Klima- und Pflanzenparametern. Vergleich Messung Evapotranspiration mit bekannten Berechnungsmethoden.	Testfassaden bodengebunden bzw. im Trog am Boden begrünt vs. Unbegrünt an „Testboxen“. LAI Erhebung, solares Absorptions- und Emissionsvermögen der Blätter und der Putzwand. Vergleich unterschiedlicher Methoden für die LAI Bestimmung.	WTi, WTb, WTa, LTi, LFi, LTh, LFh, LTb, Lfb, LTa, Lfa, SS, WG, WR, Wägezellen, LAI	LAI (gemessen und berechnet), Latent heat transfer, Energiebilanz der Begrünungsschicht, Berechnungen Evapotranspiration über Deardorff Gleichung und Penman-Monteith Gleichung	Klimastation (CR10X und CR100, Campbell Logan, USA), Pyranometer (model 8-48, Eppley Laboratory, USA), LT, LF: HygroClip-S3 (Rotronic, Zurich), WT: thermistors (Tecno.el s.r.l. Formello, Rom), Canopy Temperatur: Apogee SI 400 radiometer (Logan, USA). Pyrgeometer für LWIR (Eppley Laboratory, USA), Solarstrahlung vor und hinter Vegetation: Pyranometer PIR02 (Geoves s.n.c. Conegliano, Italien). WG, WR: ATMOS 22 ultrasonic anemometers (METER group, Inc. Pullman, USA). Wägezelle: 30kg Kapazität, combined error +/- 0.017%rc(Scaime, Juvigny, France).
Chen et al. (2013)	An experimental evaluation of the living wall system in hot and humid climate	Living Wall System; Vergleich begrünt/unbegrünt/unterschiedl. Distanzen LWS-Wand	2 identische Prüfboxen, verschiedene Varianten jeweils im Vergleich mit unbegrünter Wand oder untereinander. Daten wurden nur von klaren Tagen ausgewählt. Z.T. mit Air conditioning	WTi, WTa, LTi, LFi, LTh, LFh, LTa, Lfa, SS, WG	konvektiver Wärmestrom, Strahlungswärmestrom	WT: Thermocouples (Type T, copper-constantan, accuracy: 1.0°C or 0.75°C); 6 Messpunkte pro Testfassade

Tabelle 2- Literaturanalyse Fassadenbegrünung: Testsettings und Messparameter Teil B

Quelle	Name der Studie	Art der Messungen		Erhobene Parameter		Messsetup
		Kurzbeschreibung	Details	Gemessen	Berechnet	Verwendete Sensoren
Olivieri et al. (2014)	Experimental study of the thermal-energy performance of an insulated vegetal facade under summer conditions in a continental mediterranean climate	2 Prüfräume, komplett isoliert außer Testwand. 1x Living Wall mit Sedum als Fassade, 1x Living Wall nur mit trockenem Substrat. Messungen im Sommer: 1.6. bis 5.9. 2012	Testfassade besteht rein aus Living Wall mit 7 cm EPS dahinter, 1xbewässert und begrünt mit Sedum (Wärmeleitfähigkeit 0,191 W/mK), 1x trocken (Wärmeleitfähigkeit = 0,029 W/mK). $U=0,66\text{W/m}^2\text{K}$ wird von beiden Wänden erreicht (dort gesetzl. vorgeschrieben.). Messungen von Temperaturgradienten durch die Wandschichten, Wärmestrommessungen	SS, LT, LF, WG, N, LTi, WTi, WTa, WT zw. Kassette und EPS, WS (nur zw. 21.8. und 5.9.)	Wärmestrom "by applying the methods based in steady state conditions" kalkuliert als Vergleich zu gemessenen Werten	Klimastation, PT100 thermoresistances, Huseflux HFP01 für Wärmestrommessung. Aufzeichnung in 5 min Intervallen, Aufzeichnung mit Software vom SCADA Typ
Mazzali et al. (2013)	Experimental investigation on the energy performance of Living Walls in a temperate climate	3 unterschiedliche Living Walls vor 3 Bestandswänden in Oberitalien an drei unterschiedl. Standorten	Vergleich von Solarstrahlung, Wärmeströmen, Fassaden-Oberflächen- und Lufttemperaturen zwischen mit Living walls begrünzten und unbegrünzten, Teilen von ungedämmten Leichtbetonwänden.	WTa, LT, LF, WG, SS, WS		nur Angabe der Messgenauigkeit der Instrumente, keine Produktangaben
Wong et al. (2010)	Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls	8 verschiedene vertikale Begrünungssysteme, unbegrünte Vergleichswand, keine Räume dahinter	Vergleich von Auswirkungen verschiedener vertikaler Begrünungssysteme (7x Living walls, 1x troggebunden am Boden) auf Wandoberflächentemperaturen und Umgebungstemperaturen in unterschiedlichen Abständen von der Wand	WT_a , WT_b (Substratoberfläche), SS, LT, LF, N, WG, WR,		44 sets of single channel Hobo U12T type thermocouple dat loggers with an accuracy of +/- 1.5°C, Klimastation

Tabelle 3- Literaturanalyse Fassadenbegrünung: Testsettings und Messparameter Teil C

Quelle	Name Studie	Art der Messungen		Erhobene Parameter		Messsetup
		Kurzbeschreibung	Details	Gemessen	Berechnet	Verwendete Sensoren
Zhang et al. (2019)	Thermal behavior of a vertical green facade and its impact on the indoor and outdoor thermal environment	troggebundene Begrünung und Referenzfassade an Fassadenprüfbox mit zwei identischen Räumen.	Drahtgitter mit troggebundener Begrünung vor Prüfbox mit zwei identischen Testräumen. Messung der Netto-Photosynthese und Transpiration des Blattwerks, um thermischen Effekt der Pflanzenaktivität abzuschätzen. Berechnungsformeln zur Energiebalance, thermischem Effekt der Netto-Photosynthese.	WT _i , WT _a , WT _{br} , WS, LAI, LT _a , LT _{br} , LT _{iv} , LF _a , LF _{br} , LF _{iv} , WF, OT, SS, WG, WR, Wet-Bulb Globe Temperatur (WBGT)		LAI-2200C plant canopy analyzer (Li-Cor, USA) Photosynthese-Messgerät Li-6400 (Li-Cor, USA), 3 Paar Pyranometer CMP3 (Kipp&Zonen, NL); 3 Paar Pyrgeometer (Hukseflux, NL), fünf WBGT Messgeräte (Kugelthermometer-Kombi) HD32.2 (Delta Ohm, Italien), direkte Thermosensoren auf Blättern zur Messung Blatttemperatur, Lufttemperatur, Wandoberflächentemperatur, Heat-flow sensoren an der Wand; Windgeschwindigkeitssensoren HD 32.2 (Delta-Ohm, IT), T und LF außen und innen, Stromverbrauchsmessung des Kühlgerätes im Rauminnen, Klimastation
Coma et al. (2017)	Vertical greenery systems for energy savings in buildings: A comparative study between green walls and green facades	3 Testboxen, 2 unterschiedlich begrünt, 1 als Referenz	Vergleich von Auswirkungen verschiedener vertikaler Begrünungssysteme (3 identische Prüfboxen, 1 x bodengebunden, 1 x Living Wall, 1 x Referenz) auf Energieverbrauch der Wärmepumpe im Innenraum (Heizung / Kühlung), saisonaler Vergleich Winter / Sommer	W _t i, W _T a, W _T b, W _T d, LT _i , LFi, LT _a , LFa, SS (horizontal, vertikal), Energieverbrauch	Thermischer Stabilitätskoeffizient (TSC): Verhältnis zwischen inneren und äußeren thermischen Amplituden, wenn keine Kühlung eingesetzt wird	Pt-100 DIN B probes, Middleton Solar pyranometer SK08, electrical network analysers (MK-30-LCD – Class 1), ELEKTRONIK EE21FT6AA21
H. Weinläder, M. Reim (noch unveröffentlicht)	CAE Center for Applied Energy Research, Projekt U-green, noch unveröffentlichte Daten	unterschiedliche Begrünungen an einem gemeinsamen "Klimahaus"	Schritt 1: U-Wert Messungen Gabionen, Vertiko Living Wall, Rinnen, Living Panel bepflanzt/unbepflanzt mit/ohne Hinterlüftung an Hotbox, Schritt 2 alle Systeme gemeinsam mit Referenzflächen auf auf Klimahaus (21-24°C) im Feldversuch, Süd- Ost- bzw. Westfassade	Evapotransp (Klimakammer), U-Wert (Hot Box), WT _a , WS, LT _{a,br} , SS, BT, BF, LAI,		noch nicht veröffentlicht

Tabelle 4 – Prüfaufbauten, Klimata, Referenzaufbauten und Bepflanzungsparameter der analysierten Fassadenbegrünungsstudien Teil A

Quelle	Prüfaufbau	Wandaufbau ohne Begrünung		Hinterlüftung	Begrünungssystem	Pflanzenart		
		U- Wert Wand nicht begrünt (W/m²K)	Schichtaufbau Wand	Hinterlüftungsebene (cm)	Art: troggebunden, wandgebunden, bodengebunden,	Seil/Netz/etc.	Name	Deckung
Vox et al. (2018)	3 Testwände b=1m, h=1,55m, 2x immergrün begrünt, 1x nicht begrünt als Kontrolle Bari, Italien, Klima Csa	berechnet nach Angabe Lambda-Werte 1,1	Testfassade Süd: Lochziegel 20cm, Putz 2cm, andere Wände Nord/Ost/West und Dach: 3cm EPS, abgedichtet, Beschattungsnetz darüber	10 bis 11	bodengebunden	Stahlnetz im 15cm Abstand zur Wand	Pandorea jasminoides, variegated (Laubenwein, immergrün, nicht winterhart), Rhynchospermum jasminoides (Sternjasmin, immergrün, bedingt winterhart)	vollflächige Deckung, 15-20cm dicke Vegetationsschicht, im Winter etwas weniger Blätter
Convertino et al. (2021)	1 Testwand mit 4,2 m Breite, 2 m Höhe, nebeneinander 1x unbegrünter Teil, 1x immergrüne Begrünung in Töpfen, 1x immergrüne bodengebundene Begrünung. Kein eigentlicher Raum. Bari, Italien, Klima Cfa	berechnet nach Angabe Lambda-Werte 1,1	Testfassade Süd: Lochziegel 20cm, Putz 2cm, andere Wände Nord/Ost/West und Dach: 3cm EPS, abgedichtet, Beschattungsnetz darüber	15	Bodengebunden und in Trog am Boden	Stahlnetz im 15cm Abstand zur Wand	Rhynchospermum jasminoides (Sternjasmin, immergrün, bedingt winterhart)	vollflächige Deckung, ca. 30cm dicke Vegetationsschicht
Chen et al. (2013)	2 "thermal Labs" am Dach gebaut, Wuhan, China, Klima Cfa	0,25	2 modern isolierte Prüfboxen, Dach doppelt mit belüftetem Zusatzdach für Beschattung (siehe Foto und Zeichnung).	3-60, unterschiedl. Distanzen als Forschungsfrage	wandgebunden		6 verschiedene, in 50x50 Boxen	
Olivieri et al. (2014)	1 Testwand und 1 Prüfwand an 2 isolierten Prüfbox. Spanien, Klima Csa	"adiabatische Prüfräume" mit 60cm XPS (λ=0,035 W/mK, U=0,058 W/m²K) innen zur Isolierung von Boden, Dach und Seitenwänden.	Testfassade besteht rein aus Living Wall mit 7cm EPS dahinter. Paneele mit 0,6x0,6x0,08m, v. innen n. außen: 7cm EPS, Stahlkassetten mit Polyestervlies, Substrat bewässert (Wärmeleitfähigkeit 0,191 W/mK) mit Sedum, Polyestervlies, Stahl-Haltekonstruktion. Referenz identisch, aber nur trockenes Substrat (Wärmeleitfähigkeit = 0,029 W/mK). U=0,66W/m²K wird lt. Studie von beiden Wänden erreicht (gesetzl. Vorgabe)	k.A.	wandgebunden (Living Wall)		Sedum	vollflächige Deckung

Tabelle 5 - Prüfaufbauten, Klimata, Referenzaufbauten und Bepflanzungsparameter der analysierten Fassadenbegrünungsstudien Teil B

Quelle	Prüfaufbau	Wandaufbau ohne Begrünung		Hinterlüftung Hinterlüftungsebene (cm)	Begrünungssystem Art: troggebunden, Seil/Netz/etc. wandgebunden, bodengebunden,	Pflanzenart	
		U- Wert Wand nicht begrünt (W/m²K)	Schichtaufbau Wand			Name	Deckung
Mazzali et al. (2013)	3 verschiedene Living Wall Testwände an drei verschiedenen Orten. Testfassade A: 3x3m Living Wall Süd-West mit bewässerten Filztaschen auf Aluminium mit PVC, Testfassade B: Living Wall Süd-West, Alu-Konstruktion mit vertikaler Vlieslage mit Torf-Gras Wand C: 10,8x2,8m, 123 recycelte Polypropylen Blöcke mit Gräsern , 15% ohne Bepflanzung als Referenz. Klima: A und B: Cfb, C: Csa	Beispielrechnung mit Leichtbetonblöcken A: 0,75 B: ca. 0,7 C: 0,97	Wand A: 40cm Betonblöcke mit Innen- und Außenputz, Wand B: 40cm HLZ mit Innen- und Außenputz, Wand C: 30cm Betonblöcke	A: 5 B: 3 C:5	wandgebunden (Living Wall)	Wand A : stark gemischte Bepflanzung, Wand B: <i>Zoysia species</i> (ein Gras) Wand C: versch. Gräser	vollflächige Deckung
Wong et al. (2010)	7 versch. Living wall Systeme + 1 troggebundenes System am Boden vor b4xh8xd0,3m Beton-Testwänden, keine Räume, Singapur, Klima Cfa	berechnet nach Angabe Aufbau ca. 2,1	Betonwand 30cm	Diverse	7 living walls, 1 mit Trögen am Boden stehend	Diverse	Diverse
Zhang et al. (2019)	begrüntes Stahlnetz: 2,1x2,1m vor Testbox mit zwei identischen Räumen 2x2x h1,9m in "Pufferraum", West orientiert, Ghuangzou Klima Cfa	berechnet nach Angabe Aufbau ca. 2,6	Testfassade West: Kalksandstein 15cm, innen und außen 15mm Zementputz. andere Wände: innerhalb einer Prüfbox, Nord/Ost/West und Dach: 10cm EPS, Boden 10cm XPS.	40	Tröge am Dach stehend Kunststoff-beschichtetes Drahtgitter	<i>Pyrostegia venusta</i> (Feuerranke, immergrün)	vollflächige Deckung, Dicke ca. 18 cm; 3-day mean LAI 4,51 +/- 0,33

Tabelle 6 - Prüfaufbauten, Klimata, Referenzaufbauten und Bepflanzungsparameter der analysierten Fassadenbegrünungsstudien Teil C

Quelle	Prüfaufbau	Wandaufbau ohne Begrünung		Hinterlüftung	Begrünungssystem		Pflanzenart	
		U- Wert Wand nicht begrünt (W/m²K)	Schichtaufbau Wand	Hinterlüftungsebene (cm)	Art: troggebunden, wandgebunden, bodengebunden,	Seil/Netz/etc.	Name	Deckung
Coma et al. (2017)	3 identische Prüfboxen 3x3x3m, 1 x bodengebunden, 1 x Living Wall, je auf Ost-, Süd- und Westseite, 1x Referenz unbegrünt Klima Csa	0,784	29 cm HLZ, innen Gipsputz, außen Zementputz	25 (boden-gebundene Begrünung); k.A. für die wandgebundene Begrünung	bodengebunden, wandgebunden: PE-Module gefüllt mit Kokosfasern	Kunststoffbeschichtete Drahtgitter für bodengebundene Begrünung	bodengebunden: <i>Parthenocissus tricuspidata</i> wandgebunden: <i>Rosmarinus officinalis</i> , <i>Helihchrysium thinaschanicum</i>	vollflächige Deckung
H. Weinläder, M. Reim (noch unveröffentlicht)	Schritt 1: U-Wert Messungen Gabionen, Vertiko, Rinnen, Living Panel bepflanzt/ unbepflanzt mit/ohne Hinterlüftung an Hotbox, Schritt 2 alle Systeme gemeinsam mit Referenzflächen auf Klimahaus (21-24°C) im Feldversuch, Ost: 2x bodengebundene Begrünung, 1 Referenzfeld; Süd: 3x wandgebundene Begrünung, 1 Referenzfeld; West: 5x wandgebundene Begrünung, 1 Referenzfeld, Klima Cfb	0,21	Stahlbetonwand + 18cm Mineralwolle	k.A.	Gabionen, Vertiko Living Wall, Rinnensystem, Living Wall Systeme unterschiedlicher Hersteller	Alle Systeme auf Probenhaltern mit Boden-aufstellung, dadurch keine Wärmebrückeneffekte	Diverse	bis auf Rinnen vollflächige Deckung

Auf Basis der Literaturanalyse wurde als Hauptreferenz für den messtechnischen Aufbau für die Fassadenbegrünungsteststände das Paper von Zhang (2019) herangezogen, da durch die Verwendung zweier identischer, thermisch abgepufferter Versuchsräume und sehr umfassender Sensorik die größte Analogie zu den versuchstechnischen Möglichkeiten der AEE-Fassadenprüfbox Bestand. Vergleichende Wärmestrommessungen zwischen begrünter und identischer Referenzwand mit dahinterliegenden, konditionierten Räumen waren bei den anderen Studien kaum enthalten. Ein reger Austausch zum Versuchsaufbau erfolgte auch im Rahmen der neu gegründeten Austauschgruppe UGreen mit dem Team des Center for Applied Energy Research e.V. (Würzburg, Deutschland) die ähnliche Versuche im Forschungsprojekt U-green: Bauphysikalische Bewertung von Fassaden- und Dachbegrünungen (CAE 2025) durchgeführt haben. Die UGreen Austauschgruppe entstand aus dem Bedarf, die aktuelle Forschungsbewegung auch im DACH-Raum (Deutschland, Österreich, Schweiz) kennenzulernen und aus anderen themenverwandten Forschungsprojekten Erkenntnisse und Lerneffekte zu erhalten. Eingeleitet wurde das erste Kick-Off Treffen im November 2023 mit Vorstellung der Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt GREENergieausweis: Integration von Begrünung in den österreichischen Energieausweis (Kresser et. al. 2021), sowie dem oben genannten Forschungsprojekt U-green, um den regelmäßigen interdisziplinären Fachaustausch zwischen Experten voranzutreiben. Aufbauend darauf wurden quartalsweise Treffen mit jeweils ein bis zwei Präsentationen zur messbaren und berechenbaren Wirkung von Gebäudebegrünung und anschließender Diskussionen durchgeführt. Die Austauschgruppe UGreen vernetzt derzeit rund 55 Expertinnen und Experten aus Forschungseinrichtungen, Universitäten, der Privatwirtschaft, sowie aus Stadtverwaltungen und weiteren relevanten Institutionen.

Die Literaturanalyse zu Prüfaufbauten von Dachbegrünungen ergab zum Zeitpunkt der Durchführung (2023) wiederum sehr inhomogene Prüfaufbauten. Hier zeichnete sich gerade ein Wandel ab von Messungen an Gründachaufbauten, die direkt auf Bestandsdächern aufgebracht werden, hin zu eigens errichteten Dachprüfboxen mit eingebautem darunterliegendem Raum und einer baulichen Trennung zwischen Referenz- und Gründach. Diese Maßnahme erleichtert vergleichende Messungen zum Wärmestrom und Energieeintrag durch begrünte vs. unbegrünte Dächer sehr, vor allem wenn die Hohlräume konditioniert werden. Während in den ersten Studien neben Wetterdaten und solarer Einstrahlung hauptsächlich Luft-, Oberflächen- und Bodentemperaturen gemessen wurden, manchmal ergänzt durch Bodenfeuchte oder Wasserabflussmessung, setzt sich nun zunehmend der Einsatz von Wärmestromplatten zur direkten Messung des Wärmeflusses durch, der zuvor häufig aus unterschiedlichen Temperaturdaten errechnet wurde. Da beim vorliegenden Projekt der Einfluss auf den Energieeintrag für die Entwicklung von Kennwerten eine wesentliche Rolle spielte, wurde auf Basis der Literaturanalyse der Einsatz von Wärmestromplatten im Messsetting jedenfalls als erforderlich eingestuft. Einen Überblick zu den repräsentativen, analysierten Studien zu Dachbegrünungen, den verwendeten Aufbauten und Messparametern gibt Tabelle 7.

Tabelle 7 Literaturanalyse Messtechnik Dachbegrünungen. Standorte, Aufbauten und Sensoren

Quelle	Name der Studie	Ort / Klima	Art des Messaufbaus		Messparameter
			kurz	Detail	
Jim et Peng (2012)	Weather effect on thermal and energy performance of an extensive tropical green roof	Hong Kong, Klima Cwa	Extensives Gründach über einer Bahnstation. Untersuchung vor und nach Begrünung und Vergleich mit Referenzdach.	Untersuchtes Gründach: 484 m ² , Referenz: Dach auf nahegelegenen Gebäudeteil ohne Begrünung: 106 m ² 5cm Substrat	<i>Arachis pinto</i> (dichter tropischer Bodendecker aus der Gruppe der Leguminosen) LT, LF, SS, WG, BF, OT (Infrarot), T Oberfläche Massivdach unter Gründachaufbau, OT-Decke innen. Wärmestrom und Kühllast rechnerisch
Solcerova et al. (2017)	Do green roofs cool the air?	Utrecht (NL) Klima Cfb	Unterschiedliche extensiv begrünte Testflächen am Dach einer Schule angelegt	7 verschiedene Gründächer am Dach eines Schulgebäudes, je 7 x 3,5 m, Kiesdach als Referenz, alle extensiv. 2 Gründächer + Referenz wurden repräsentativ untersucht. 3,5 cm Substrat (!)	LT, SS, WG, N, LT 15 und 30 cm über Dachoberfläche, BF, BT im Substrat bzw. Kies, Wasserabfluss
Huang et al. (2018)	Thermal performance of extensive green roofs in a subtropical metropolitan area	Taichung (Taiwan) Klima Cfa	Aufbau von Testflächen auf Flachdächern typischer Mehrparteinhäusern, nur Mai und Juni untersucht.	4 versch. Bepflanzungen, je 0,5 x 0,5 m und jeweils eine dazugehörige Referenzfläche mit demselben Substrat ohne Bepflanzung. 15 cm Leichtsubstrat	Je Versuchsfläche eine Pflanzenart: <i>Aglaia odorata</i> Lour., <i>Impatiens walleriana</i> , <i>Wisteria sinensis</i> , and <i>Cynodon L.C. Rich</i> LT, LF, SS, OT, BT unter Substrat
Scharf, Zluwa (2017)	Case study investigation of the building physical properties of seven different green roof systems	Wien (AT), Klima Cfb	Testareal auf bestehendem, metallgedecktem Flachdach. Heiße und kälteste Woche des Jahres und je ein repräsentativer Tag daraus publiziert.	7 verschiedene Dachbegrünungssysteme, 5-mal extensiv, 2-mal reduziert intensiv, Raum unter dem Dach nicht konditioniert 7 – 12 cm Substrat extensiv, z.T. mit zusätzlicher Schicht aus Blähton oder Ziegelsplitt 10 cm + 10 cm Perlite bzw. 15 cm + 15 cm Perlite reduziert intensiv	Alle mit Gräser-Kräuter-Sedum Mischung Wetterstation: LT, LF, WG, N, SS, BF, T und WS über der Schutzmatte zum Metaldach. T direkt unter Substratoberfläche und über der Drainschicht. U-Wer rechnerisch ermittelt
H. Weinläder, M. Reim (2023)	CAE – Center for Applied Energy Research, Projekt U-green, 2023, noch unveröffentlichte Daten	Würzburg (D), Klima Cfb	Eigene Prüfboxen mit darunterliegendem, konditioniertem Hohlraum	3 Extensivdach- und 2 Intensivdachsysteme unterschiedlicher Hersteller: innen, Referenzdach mit 6 cm Kies. Substrathöhe 6 cm und 2-mal 10 cm extensiv bzw. ca. 25 cm intensiv	Diverse, abgestimmt auf das jeweilige Begrünungssystem Wetterstation, SS, LT _{a,h,r} , OT (Infrarot), T und BF im Substrat, T unter Drainage über Holzboden, WS, Wägezellen

3.2 Entwicklung der Messverfahren (AEE, Boku)

Auf Basis der Literaturrecherche und -analyse wurde ein Entwurf der Prüfinfrastruktur erstellt. Dabei leiteten folgende Anforderungs- und Bauprinzipien die Entwicklung an:

- Nutzung der vorhandenen AEE INTEC Fassadenprüfbox mit zwei thermisch entkoppelten und konditionierbaren Räumen für die Untersuchung unterschiedlicher Vertikalbegrünungen
- Ausrichtung der AEE-Prüfbox in der Himmelsrichtung Süd-West, da in diesen beiden Richtungen die stärkste Reduktion des solaren Energieeintrages durch Vertikalbegrünungen zu erwarten war (vgl. Coma et. al. 2017)
- Messung von fünf Vertikalbegrünungsvarianten, davon zwei häufig verwendete troggebundene Begrünungen jeweils mit und ohne Fensterausschnitt und eine wandgebundene Vertikalbegrünung.
- Entwicklung manuell verschiebbarer Vertikalbegrünungsprüflinge, die zwischen Park- und Messposition vor der AEE-Prüfbox wechseln können, um die jeweiligen Messkampagnen zu ermöglichen. Bei jeder Variante parallele Messung der unbegrünten identischen Fassade als Referenz.
- Messung einer reduziert-intensiven Dachbegrünungsvariante inkl. einer Referenzvariante mit Kiesauflage an eigens errichteten Dachbegrünungstestständen mit integriertem, konditionierbarem darunterliegendem Raum und Wärmestrommessung.
- Sicherstellung eines aktuellen, OIB¹-gerechten Dämmstandards der Fassaden und Dachteststände und normgerechte² Errichtung der Begrünungen

Beim Entwicklungsprozess der Prüfinfrastruktur und des erforderlichen Messsetups inkl. Datenlogging wurde auf die Expertise der international besetzten Austauschgruppe UGreen zurückgegriffen. Im Rahmen von Fachgesprächen konnte wertvolles Know-how sowie fundierte Erfahrungen von bereits durchgeführten Messungen abgegriffen werden und für die Auswahl der relevanten Parameter und Kennwerte genutzt. Daraus abgeleitet, entstand das MARGRET-Messkonzept.

3.2.1 Prüfaufbau für Vertikalbegrünungen

Die besondere technische Herausforderung bestand darin, mehrere unterschiedliche Vertikalbegrünungsvarianten (Modul 1 bis 5) vor einer Fassadenprüfbox zu messen. Dafür wurden eigens mobile Probenwagen aus 45x45 mm Aluminiumprofilen entwickelt, die mit jeweils der passenden Kletterhilfe und Troghalterung für die troggebundenen Begrünungen bzw. einer Unterkonstruktion für die wandgebundene Vertikalbegrünungsvariante ausgestattet wurden. Die Bepflanzungströge wurden in Form von je drei 90 l Kunststofftrögen (Mörteltröge) pro Fassadenmodul hergestellt.

¹ Lt. OIB RL 6 vom Mai 2023

² Lt. ÖNORM L 1131 von 2010 (Dachbegrünung) bzw. ÖNORM L_1136 von 2021 (Vertikalbegrünung)

Fünf solcher Wagen mit den Abmessungen $l = 3 \text{ m}$, $b = 1 \text{ m}$ (Ausleger zur Windstabilisierung), $h = 4,17 \text{ m}$ wurden errichtet (Abbildung 2).

In Abhängigkeit der zu testenden Pflanzenarten wurden unterschiedliche Rankhilfen konstruiert. Zur Herstellung der Rankhilfe für die *Wisteria sinensis* (Chinesischer Blauregen) wurden 20 mm starke Polypropylen-Rohre, Wandstärke 2,8 mm (aquatechnik, art. Nr 61158) mit Abdeckkappen oben und unten verwendet und im Abstand von 30 cm am Prüfwagen montiert. Als Kletterhilfe für den *Parthenocissus quinquefolia* (Wilder Wein) wurde ein verzinktes Stahlgitter mit 2 mm Drahtstärke und Maschenweite 50x50 mm eingesetzt. Drei der Module erhielten eine Rankhilfe mit Fensterausschnitt, bei zwei Modulen wurde die Begrünung über das Fenster der Prüfbox gezogen, mit dem Ziel, Effekte auf opake und transparente Bauteile unterscheiden zu können.



Abbildung 2: Drei der fünf Probenwagen: Living Wall (links), *Wisteria sinensis* mit Rohren als Rankhilfe und Fensterausschnitt (Mitte) und *Parthenocissus q.* mit Rankgitter ohne Fensterausschnitt (rechts). Fotos: M.Majcen, AEE INTEC.

Abstandhalterungen an der Prüfbox wurden angebracht, um für die mobilen Wagen mit Kletterhilfen denselben Abstand zwischen Wandoberfläche und Kletterhilfe von 23 cm zu gewährleisten. Dadurch wurde der in der Literatur gängige Luftspalt von ca. 15 cm zwischen Begrünung und Wand hergestellt. Konstruktionsbedingt konnte für die mobile Living Wall der sonst übliche Luftspalt von 40 mm nicht hergestellt werden. Der geringstmögliche Abstand zwischen Paneel-Rückseite und Wandoberfläche betrug 20 cm. Zur Kompensation wurden seitliche Abschlüsse der Testwand und Einengungen des Luftspaltes oben, unten aus Holz angebracht, um der realen Montagesituation möglichst nahe zu kommen.

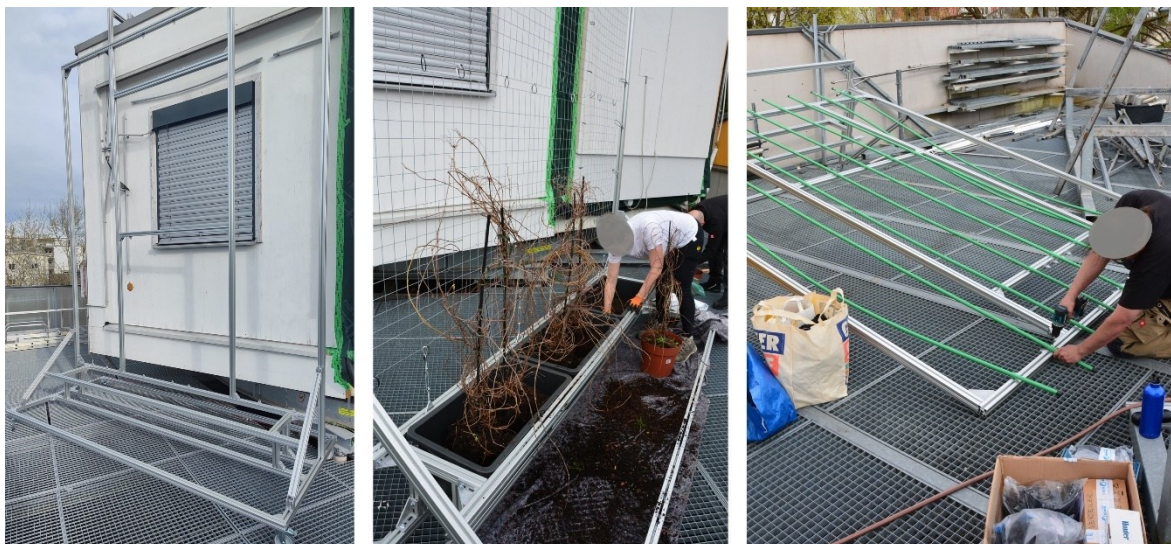


Abbildung 3: Aufbau der mobilen Probewagen: Wagen ohne Tröge (li.), mit Rankgitter und Trögen bei der Bepflanzung (Mitte) und die Montage der Rankhilfen für die Wisteria (re.).

Die verwendete Fassadenprüfeinrichtung wurde 2017 im Rahmen eines ACR Strategischen Projektes auf dem Dach des AEE-INTEC Labors errichtet. Die Prüfbox wird durch eine wärmebrückenfreie Massivholz-konstruktion gebildet, deren U-Werte im Bereich von 0,10 W/m²K liegen. Im Gegensatz zum üblichen Aufbau einer Gebäudehülle, lässt sich diese aber in zwei unterschiedlichen Ebenen temperieren. Die außenliegende Aktivierung dient dazu den Wärmestrom aus dem Innenbereich in allen Flächen - außer der Prüfebene - zu neutralisieren. Hierdurch wird praktisch eine „unendlich starke“ Dämmung realisiert. Das Innere der Box besteht aus zwei komplett identischen Räumen und einem Serviceraum mit Steuereinheit. Die Box ist auf einem Drehkranz montiert und somit in beliebiger Himmelsrichtung ausrichtbar.

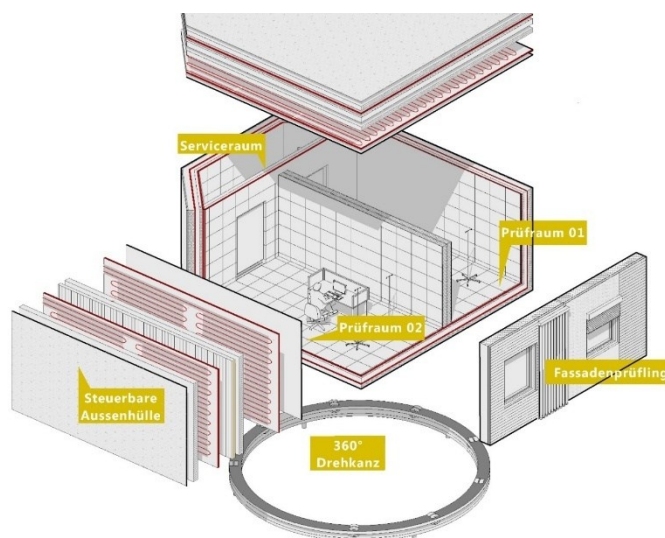


Abbildung 4: Aufbau der AEE INTEC Fassadenprüfbox.
Grafik: T. Weiss, AEE INTEC

Abbildung 5 zeigt den Aufbau des Fassadenprüflings und einen Detailschnitt des geprüften Fensters. Die opaken Teile der Prüffassade wiesen von innen nach außen folgenden Aufbau auf: weiße Siebdruckplatte 18mm, Dampfbremse, Dämmung 240mm Mineralwolle, beschichtete Dreischichtplatte 18mm. Der U-Wert dieses Aufbaus beträgt 0,155W/(m²K) und liegt damit deutlich unter den

aktuellen Mindestanforderungen der OIB RL 6 von $U \leq 0,35 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. In die Prüf- und Referenzfassade war jeweils ein Verbundfenster der Fa. Katzbeck mit einer Glaslichte von B 1020mm x H 1225mm eingebaut. Das Fenster hat einen U_g -Wert von $0,869 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ und einen g_{tot} von 0,53.

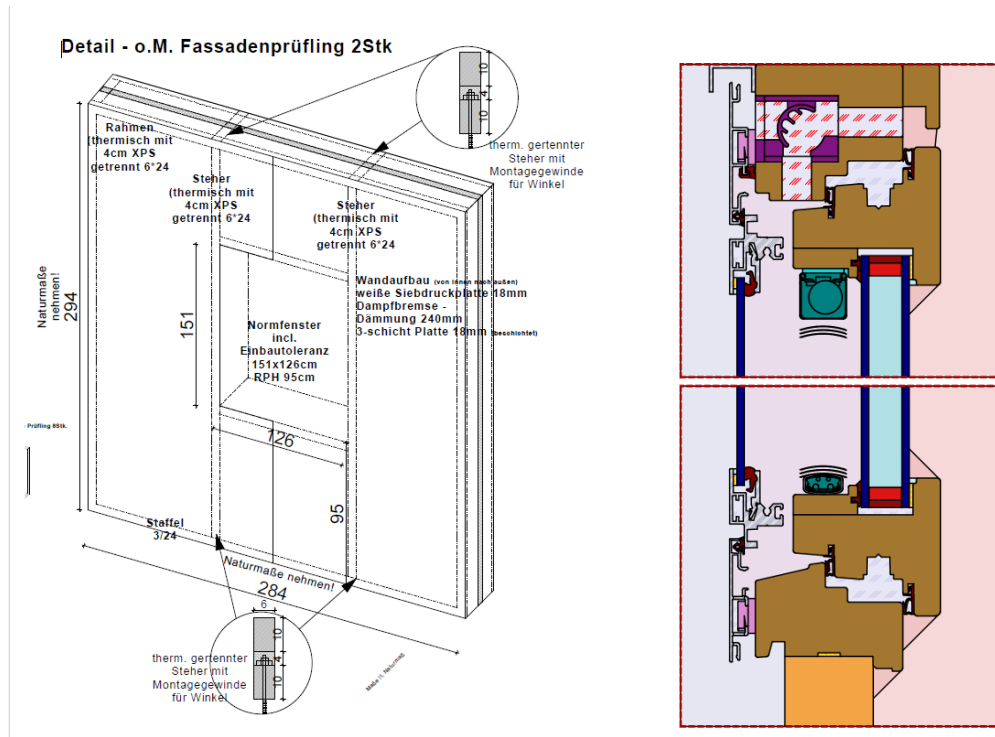


Abbildung 5: Aufbau des Fassadenprüflings und Detailschnitt des verwendeten Fensters im Prüfaufbau. Grafik: AEE-INTEC (links) bzw. Fa. Katzbeck (rechts).

Da die Messung unterschiedlicher Himmelsrichtungen zusätzlich zu den unterschiedlichen Grünfassaden bei ähnlichen Witterungsverhältnissen im Versuchszeitraum nicht realisierbar war, fiel die Entscheidung, basierend auf der Literaturrecherche, auf eine Süd-West-Ausrichtung der Prüffassade (s. oben). Die Innenraumkonditionierung des Test- und Referenzraumes wurde mit 22°C im Winter und 24°C im Sommer definiert, um eine realitätsnahe Situation abzubilden.

Abbildung 6 zeigt die Art und Positionierung der Sensorik im Grundriss und Abbildung 7 in der Ansicht. Die Lufttemperatur in den Innenräumen wurde in 4 verschiedenen Höhen gemessen, beginnend von 10 cm über der Fußbodenoberkante über 110 und 170 cm bis 10 cm unter der Decke. Da keine Feuchteinträge im Raum durch Menschen, Lüftung oder Geräte entstanden, wurde auf eine Daueraufzeichnung der Luftfeuchtigkeit in den Innenräumen verzichtet.

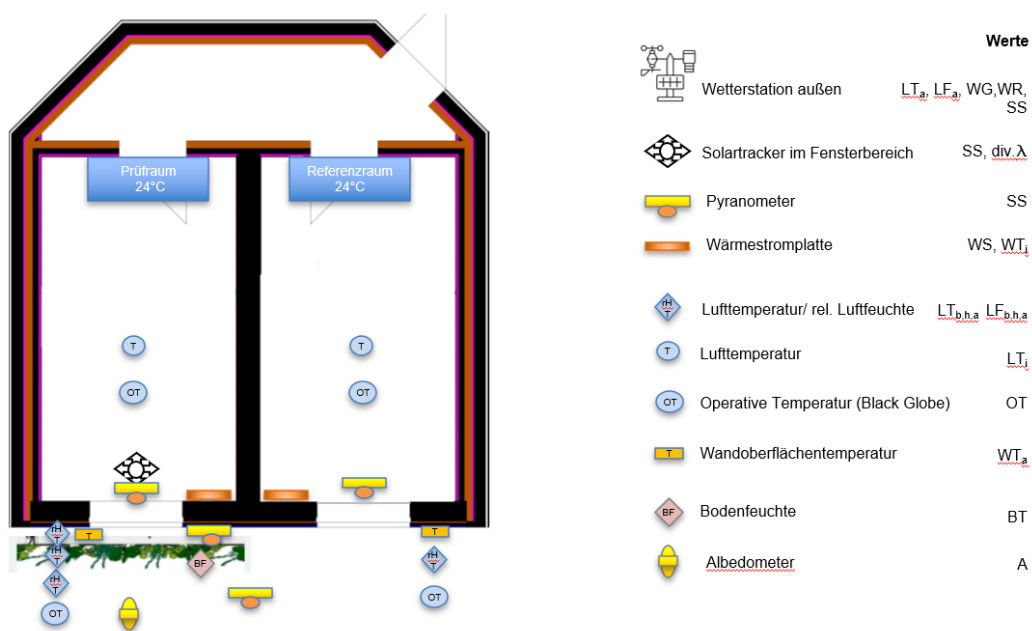


Abbildung 6: Prüfbox mit Grünfassadenprüfung im Grundriss. Positionierung der Sensorik inkl. Legende. Grafik: W. Wagner und M. Majcen, AEE INTEC

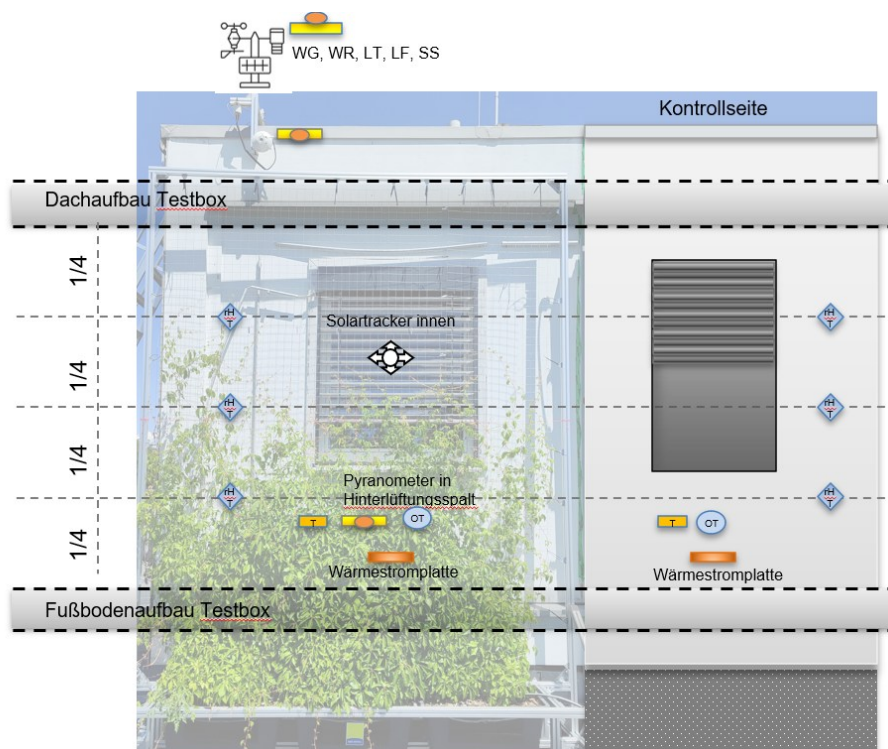


Abbildung 7: Ansicht der Prüfbox mit Fassadenprüfung und Darstellung der vertikalen Positionierung der Sensorik. Grafik: M. Majcen, AEE INTEC

3.2.2 Innovation Pyroscanner

Die Bestimmung des solaren Transmissionsgrads ($\tau_{e,B}$) bildet die Grundlage für die Berechnung des Gesamtenergiedurchlassgrades (g_{tot}) von begrünter Architektur. Da die Vegetation jedoch kein statisches, homogenes Bauteil darstellt, stößt die konventionelle Messtechnik hier an ihre Grenzen.

Limitationen der normativen Messverfahren (EN 14500)

Die Standardmethode nach EN 14500 sieht die Verwendung einer Ulbricht-Kugel vor. Während dieses Verfahren für flächige, technische Sonnenschutzsysteme (Gewebe, Folien) präzise Ergebnisse liefert, ist es für die Charakterisierung von Begrünungen aus bauphysikalischer Sicht ungeeignet. Die Ulbricht-Kugel erfordert plan an der Messöffnung anliegende Proben. Die physikalische Tiefe einer Grünfassade (15–20 cm) führt zu seitlichem Strahlungsverlust, was die Messergebnisse systematisch verfälscht. Die Messöffnungen standardisierter Kugeln sind zu klein (<50 mm), um die stochastische Inhomogenität von Blattstrukturen und Lichtlücken repräsentativ zu erfassen.

Etablierte methodische Alternativen und deren Grenzen

Um diese Defizite zu umgehen, werden in der Forschung häufig zwei alternative Wege beschritten, die auch im Kontext dieses Projekts als Referenz dienen. Großskalige Feldmessungen mittels Pyranometern vor und hinter der Vegetation installiert. Diese Methode hat den Vorteil, die realen Umgebungsbedingungen abzubilden. Sie ist jedoch hochgradig fehleranfällig gegenüber lokalen Extremwerten, da ein stationärer Sensor permanent in einem Lichtfleck oder im Kernschatten eines Blattes verharren kann.

Numerische Simulation (Monte-Carlo-Raytracing) in denen mittels 3D-Scans die Vegetation digitalisiert und der Strahlungsdurchgang berechnet wird. Dies bietet eine hohe theoretische Präzision, erfordert jedoch eine komplexe Parametrisierung der optischen Blatteigenschaften und bildet die zeitliche Dynamik des realen Standorts nur mit hohem Rechenaufwand ab.

Lösung der räumlichen Varianz durch die Raster-Methodik

Um die Realitätsnähe der Feldmessung mit einer statistischen Repräsentativität zu vereinen, wurde im Rahmen dieser Untersuchung eine innovative Messmethodik angewandt. Die konkrete Anordnung der Vegetationselemente – insbesondere der Blätter – beeinflusst die lokale Einstrahlung maßgeblich. Da sich Struktur, Blattdichte und Verteilung im Zuge des saisonalen Wachstums kontinuierlich verändern, entstehen stark ortsabhängige und zeitlich variable Einstrahlungsmuster. Punktueller Messungen liefern daher keine repräsentativen Aussagen für die gesamte Fassaden- bzw. Fensterfläche. Gerade die Verschattungswirkung vor transparenten Fassadenelementen stellt jedoch den zentralen energetischen Einfluss begrünter Fassaden auf das Gebäude dar, da sie direkt die solaren Gewinne und damit den Heiz- und Kühlenergiebedarf beeinflusst. Um diese methodische Einschränkung zu überwinden, wurde der bei AEE INTEC entwickelte Pyroscanner eingesetzt (Rüdisser et. al. 2022).

Das Herzstück dieser Methodik bildet ein beweglich geführtes Pyranometer, das auf einer zweiachsigen und mikrocontrollergesteuerten Router-Plattform installiert ist. Das Messgerät wird entlang einer optimierten Route hinter der transparenten Fassadenfläche verfahren und erfasst die räumlich fluktuierende solare Einstrahlung an 230 diskreten Messpositionen. Ein vollständiger Scandurchgang dauert 799 Sekunden, sodass bei kontinuierlichem Betrieb etwa alle 14 Minuten ein hochaufgelöstes Bild der Strahlungssituation vorliegt.

Der Strahlungsdurchgang durch die Begrünung wird anschließend für jeden Scandurchgang als Durchschnittswert über alle 230 Messpunkte berechnet. Durch diese flächenhafte Erfassung kann die Änderung der Transmissionseigenschaften des Fensters in direkter Abhängigkeit vom jeweiligen Bewuchsstand sowie von den vorherrschenden Einstrahlungsbedingungen präzise quantifiziert werden. Durch die flächenhafte Erfassung und anschließende Auswertung der Messdaten kann die durch die Grünfassade verursachte Änderung der Transmissionseigenschaften des Fensters in Abhängigkeit vom jeweiligen Bewuchsstand sowie von den vorherrschenden Einstrahlungsbedingungen quantifiziert werden. Damit wird eine deutlich verbesserte Repräsentativität der Messergebnisse gegenüber konventionellen, ortsfesten Messanordnungen erreicht.

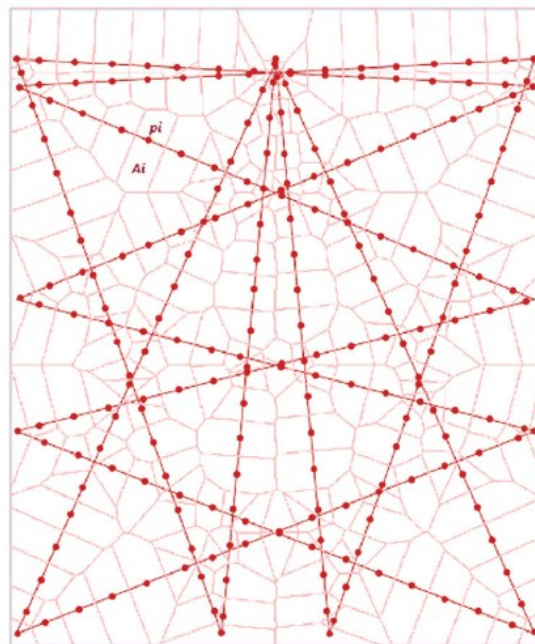
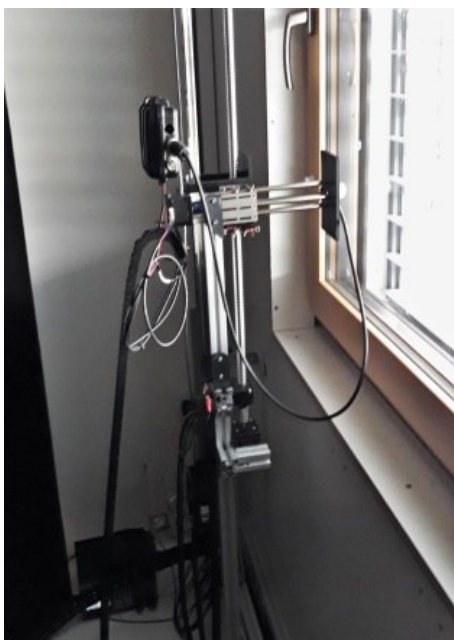


Abbildung 8: Der Pyroscanner (links) und eine grafische Darstellung der erfassten Messpunkte in einem Scandurchgang (rechts). Bilder: M. Majcen (links), D. Rüdiger (rechts), AEE INTEC

3.2.3 Prüfaufbau für die Dachbegrünung

Für die bauphysikalische Vermessung einer Dachbegrünung wurden zwei identische Teststände am Dach des AEE INTEC-Labors aufgebaut. Die Dachbegrünungsteststände sind mit 18 cm Däm-

mung und normgerechter Folienabdichtung sowie Schutzvlies versehen, was einem OIB-konformen Dämmstandard mit einem U-Wert von 0,199 entspricht. Unter der Dachkonstruktion befindet sich eine Kammer, die analog zu einer Fußbodenheizung, mittels darunterliegendem wassergeführtem System auf Temperaturen von 22° (Heizperiode) bis 24° (Kühlperiode) konditioniert wurde und damit eine reale Dachsituation simulierte. Beide Teststände waren mit einem fachgerecht eingeschweißten Wasserablauf versehen. Das Testdach wurde über der Abdichtung mit einem Schutzvlies (RMS 500, Optigrün), einer Festkörperdrainage (FKD 40, Optigrün), einem Filtervlies (FIL 105, Optigrün) und 15cm Oprigrün-Extensivsubstrat M-Leicht aufgebaut (Abbildung 9). Dieser reduziert-intensive Aufbau wurde und mit Sedumsprossen, Gräsern und Kräutern bepflanzt. Damit konnte in kurzer Zeit eine sehr dichte und optisch ansprechende Begrünung erreicht werden. Als Referenzdach wurde 6cm Kiesauflage (16/32) über demselben Schutzvlies (RMS500, Optigrün) gewählt.

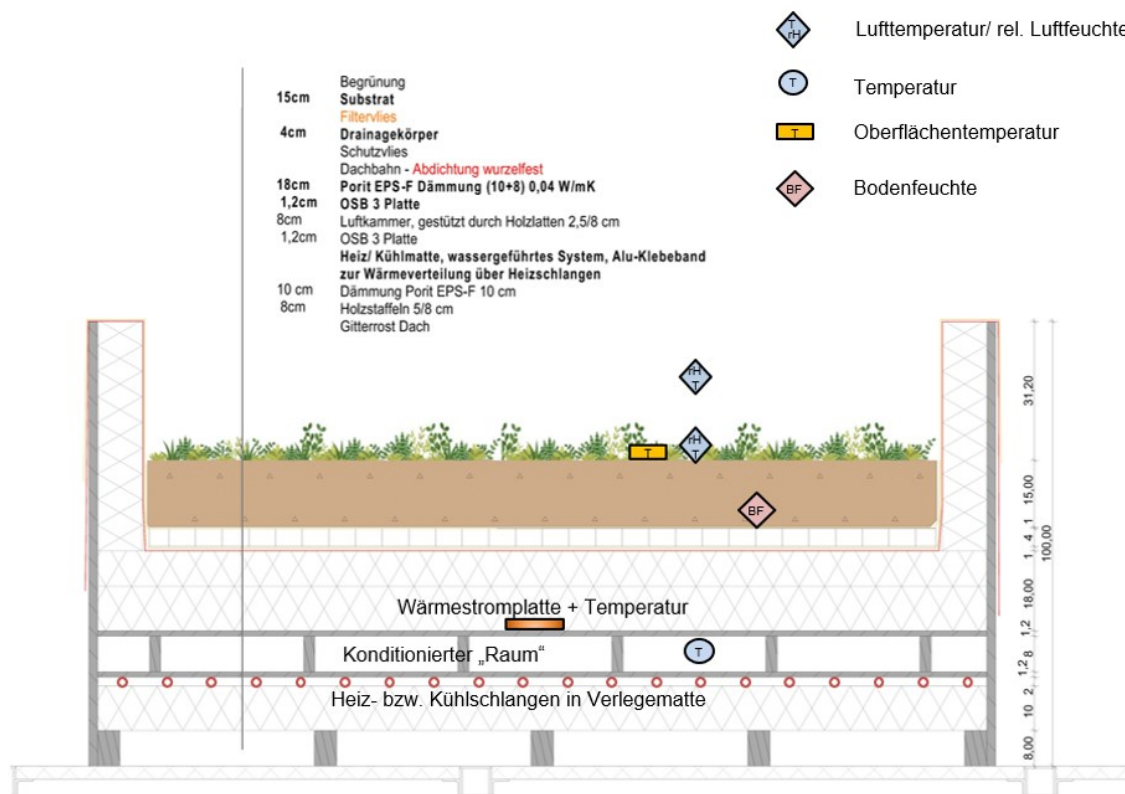


Abbildung 9: Schnitt durch den Dachbegrünungsteststand mit Aufbauten und Sensoren. Maßangaben in Zentimetern. Grafik: M.Majcen.



Abbildung 10: Dachteststände: reduziert-intensive Begrünung 4 Monate nach Anlage (links) und Referenz-Kiesdach (rechts). Fotos: M.Majcen

Bezüglich der Sensorik in den Dachbegrünungstestständen kam es bereits kurz nach der Inbetriebnahme zu einem den Ausfall einer Temperaturmessung in der Kammer unter der Dachbegrünung. Aufgrund der Unzugänglichkeit des Sensors wurde dem wurde insofern begegnet, als dass die wassergeführte Raumkonditionierung mit eingestellter Temperatur und maximalem Volumendurchfluss betrieben wurde, sodass eine gleichbleibende Temperatur in der Kammer sichergestellt werden sollte.

An dieser Stelle ist auch anzumerken, dass die Lufttemperatur im „konditionierten Raum“ mit diesem Aufbau die eingestellten Temperaturen des wassergeführten Systems trotz des hohen Durchflusses nicht immer erreichte. Dies könnte an der unzureichenden Wärmeleitfähigkeit der 1,2 cm starken OSB Platte über den Heiz-/bzw. Kühlschlangen liegen, wodurch das System eine doch erhebliche Trägheit aufweist. Für das Folgeprojekte MARGRET Bioshade wird hier eine alternative Heiz-/ Kühlmethode zum Einsatz kommen.

3.2.4 Datenübertragung, Aufzeichnung, Monitoring am Digitalen Zwilling

Die Dokumentation des Messsystems setzt sich aus einer Messstellenliste, dem Messkonzept und einer Sensordokumentation zusammen. In der Messstellenliste ist für jede Messposition eine Beschreibung der Messwerte, die jeweilige Einheit, die Datenquelle und die Kurzbezeichnung, die in der Datenbank verwendet wird, ersichtlich. Das Messkonzept besteht aus Plänen und Darstellungen, in denen die Messpositionen gekennzeichnet sind. Für jede dieser Messpositionen ist in der Sensordokumentation ein Foto mit der realen Einbaulage und zusätzlichen Informationen zu finden.

Zur Datenübertragung der mobilen Sensoren wurde ein LoRaWAN-System ausgewählt, da es die Installation zahlreicher Sensoren im Innen- und Außenbereich ohne Verkabelung ermöglicht und ein zentrales Gateway zur Übermittlung der Daten an die IoT-Plattform ThingsBoard von AEE INTEC nutzt. Bei der Sensorik für die Grünmodule wurde darauf geachtet, ausschließlich LoRaWAN-fähige Geräte bzw. Sensoren mit Analogsignalen in Kombination mit LoRaWAN-Transmittern einzusetzen. Das Messintervall der LoRaWAN-Sensoren betrug 5 Minuten. Die Werte wurden laufend mit einem Aufzeichnungsintervall von 20 Minuten im objektrelationalen Datenbankmanagementsystem ThingsBoard in einer PostgreSQL Datenbank gespeichert. Zusätzlich zur Datenbank wurde monatlich ein Backup auf einem physischen Server erstellt. Um das energetische Monitoring zu vervollständigen, wurde auf eine bestehende Messinfrastruktur der AEE-Fassadenprüfbox zugegriffen. Hierbei werden Messwerte im Minutenintervall mittels speicherprogrammierbarer Steuerung aufgezeichnet und ans ThingsBoard übertragen. Das technische Messkonzept sowie die Messtellenliste mit der Beschreibung der 77 einzelnen Sensoren sind in kompakter Form dem Anhang zu entnehmen.

Im Rahmen des Monitorings wurde ein digitaler Zwilling der Teststände implementiert, der auf einem detaillierten 3D-Modell der Versuchsaufbauten sowie der integrierten Sensorik basiert. Das IFC-Modell wurde anschließend in den webbasierten BIM-Viewer buildingTwin.at³, entwickelt von AEE INTEC hochgeladen. Im buildingTwin erfolgte die Verknüpfung der Sensordaten aus der Thingsboard-Datenbank mit den entsprechenden Modellelementen. Damit stand dem gesamten Projektkonsortium ein ortsunabhängiger Zugriff auf die erfassten Echtzeit-Messdaten zur Verfügung. Die räumliche Verknüpfung der Sensordaten mit dem digitalen Modell ermöglicht eine intuitive Visualisierung sowie eine kontextbezogene Interpretation der Messergebnisse. Dadurch können projektspezifische Fragestellungen effizient in gemeinsamen Live-Analysen diskutiert und bewertet werden. Die entwickelte Methodik zum Monitoring mittels digitalen Zwillings und integrierten Echtzeit-Monitoringdaten stellte sich als äußerst hilfreich im Projekt heraus und wurde in der Folge bereits in weiteren Forschungsprojekten implementiert.

³ <https://buildingtwin.net/>

Tabelle 8: Gegenüberstellung internationaler Hersteller:innen von wandgebundenen Begrünungssystemen (Vertiko GmbH, 2025a, 2025b; Terapia Urbana, 2022; Sempergreen Group, o.J.; NatureBase GmbH, 2023).

Hersteller	Terapia Urbana	Vertiko	Sempergreen	NatureBase
Bezeichnung	Fytotextile vertikaler Garten	Living Wall Outdoor	SemperGreenwall Outdoor	LivingPANELS
Vegetationsträger	Mehrschicht-Textilsystem, atmungsaktiv	Vliessystem, vernäht mit Vertiko Spezial-Substrat	TPO-Trägerplatte mit Substratkörper, Vliesabdeckung	EPS-Träger mit mineralischem Substrat, Vliesabdeckung
Verfügbarkeit	Sevilla, ES	Wuppertal, DE	Odijk, NL	Wien, AT
Statik	28-35 kg/m ² (	35 kg/m ² (vollbewachsen, wassergesättigt)	Max. 45 kg/m ² (wassergesättigt)	< 50 kg/m ² (wassergesättigt)
Kultivierung	Hohe Pflanzendichte, 36 oder 49 Pflanzen/m ²	Vor-Ort-Montage (geschlossene Pflanzendecke nach 3-6 Monaten), spezielle, vorkultivierte Module möglich	Standardisierte Vorkultivierung (90% Deckung bei Lieferung)	Standardisierte Vorkultivierung in Österreich (Grün bei Fertigstellung) 50 Pflanzen/m ²
Rechtslage/ Brandschutz	Brandverhalten Klasse B-S20-D0		Brandschutzzertifiziert A2-S2-D0 und B-S2-D0	Brandschutzzertifiziert B-S1-D0, ÖNORM L 1136 konform

Die Systeme unterscheiden sich besonders beim Vegetationsträger. Bei „Terapia Urbana“ und „Vertiko“ wird auf ein System auf Textilbasis zurückgegriffen. Die Hersteller „Sempergreen“ und „NatureBase“ setzen auf feste Vegetationskörper mit einer Substratfüllung und vorderseitigen Vliesabdeckung. Das Produkt der NatureBase GmbH (Wien, AT) greift auf einen neuartigen mineralischen Substratverbund zurück. Dieser ist laut Hersteller wissenschaftlich erforscht und bietet ausgezeichnete Entwicklungsmöglichkeiten der eingesetzten Pflanzen durch optimale Wasser- und Nährstoffversorgung. Zudem wird eine wissenschaftlich erprobte Pflanzenauswahl eingesetzt, um optimal auf Standort und Exposition reagieren zu können. Das Produkt wurde in Österreich entwickelt und wird auch weiterhin hier produziert, was für die Verwendung bei einem nationalen Forschungsprojekt mit Bezug zum Energieausweis spricht. Durch die Ansässigkeit in Österreich ist das System auch mit der ÖNORM L 1136:2021 (Kategorie V Wandgebundene Vertikalbegrünung mit vollflächigem Vegetationsträger) konform. Auch eine Brandschutzzertifizierung (B-S1-D0) liegt vor, wobei dies auch beim Großteil der internationalen Vergleichssysteme sichergestellt ist. Für das System vom Hersteller Vertiko (Wuppertal, DE) konnten keine Informationen zur Brandschutzzertifizierung gefunden werden. Beim Themenpunkt „Kultivierung“ überzeugte das Produkt der NatureBase GmbH auch durch eine standardisierte Vorkultivierung innerhalb von Österreich, dadurch wird bereits bei der Lieferung ein hoher Deckungsgrad erreicht. Außerdem weist dieses Produkt, laut den vorliegenden Informationen, mit 50 Pflanzen/m² die höchste Pflanzendichte auf. Statisch

ist das Produkt der NatureBase GmbH zwar am schwersten, aber es wurde entschieden, dass den Punkten Verfügbarkeit, Vorkultivierung und der Bezug zu Österreich im Auswahlverfahren eine höhere Gewichtung im Rahmen des Projekts MARGRET zuzuschreiben ist.

3.2.6 Verfahren für das Pflanzenmonitoring

Das Pflanzenmonitoring der Vertikal- und Dachbegrünungsvarianten wurde so konzipiert, dass es in den Vegetationsperioden 2024 (Juni – Oktober) und 2025 (April – Juli) in monatlichen Abständen durchgeführt werden konnte. Im Prozess des Monitorings wurden messbare Parameter zur **Vitalität der Pflanzen, kubischem Pflanzenvolumen, (Wall) Leaf Area Index [WLAI/LAI], stomatären Gasfluss** und dem **Deckungsgrad** erhoben, außerdem wurden **Aufnahmen der Oberflächen-temperatur** mittels Wärmebildkamera durchgeführt.

Tabelle 9 zeigt die für die Auswertung relevanten Parameter, wobei die Vitalität der Pflanzen sowie der stomatäre Gasfluss[gs] zwar im Rahmen des Monitorings erhoben, jedoch im weiteren Verlauf des Endberichts nicht vertiefend ausgewertet und weiter berücksichtigt wurden. Das Messkonzept sah vor, die Begrünungsmodule als Ganzes zu untersuchen und wurde weitgehend mit manuellen Handmessgeräten durchgeführt. Zur besseren Kategorisierung wurden die Zielflächen der Begrünungsmodule in vier Quadranten geteilt. So lassen sich spezifische Aussagen zu möglichen Entwicklungsstadien der Pflanzen tätigen, beispielsweise ist im unteren Teil der begrün-ten Zielfläche deutlich früher mit einer hohen Dichte an Biomasse zu rechnen als im oberen. Dauerhafte Aufzeichnungen erfolgten zur Ermittlung des **Wasserverbrauchs** und der **Bodenfeuchte**. Hierfür wurde ein Wasserzähler an der Bewässerungsanlage montiert, zusätzlich bietet die Software „Hydrawise“ (Hunter Industries Inc, San Marcos, USA) eine Berichtsfunktion. Hierbei können Bewässerungsintervalle und Wassermengen für jeden Kreis, Wassereinsparungen und Durchflussraten je Minute und Stunde ausgelesen werden. Diese Berichte werden monatlich ausgelesen und ausgewertet. Zur Ermittlung der Bodenfeuchte wurde in jede Begrünungsart ein Bodenfeuchtesensor SMT100 (Truebner GmbH, Neustadt, DE) eingebaut. Diese geben im Abstand von zehn Minuten einen aktuellen Wert der Bodenfeuchte. Ziel der Bodenfeuchtesensoren ist es, eine positive Auswirkung auf die Wasserbilanz zu nehmen.

Tabelle 9: Ausgewählte vegetationstechnische und pflanzenphysiologische Parameter (Bezeichnung deutsch/englisch) mit jeweiligen Abkürzungen und SI-Einheiten.

Parameter dt.	Parameter eng.	Kürzel	Signatur	SI-Einheit
Kubisches Pflanzenvolumen	cubic volume	V _{cub}	cv	m ³
(Wand-)Blattflächenindex, Pflanzenflächenindex	(wall) leaf area index, plant area index	WLAI/LAI, PAI	WLAI/LAI, PAI	
Deckungsgrad – Zielfläche:	vegetation/plant cover:	DG _{Ziel}	pcov-targ	%
Anteiliger Deckungsgrad je Begrünungsart; Fläche wird durch Kletterhilfe bzw. verfügbaren Fassadenfläche definiert	coverage ratio to the target area (percentage)			
Deckungsgrad – Projektiv:	vegetation/plant cover:	DG _p	pcov-proj	%

Verhältnis zwischen Blattdeckung
und dahinterliegender Grundfläche

coverage ratio to projected
(percentage)

Thermalbilder:

Thermal images:

IR_T

IR_T

Bildliche Darstellung zur Ermittlung
der Oberflächentemperatur

visual representation for deter-
mining the surface tempera-
ture

Das **kubische Pflanzenvolumen** [m³] wurde als Produkt aus dem flächenbezogenen Deckungsgrad [m²] und der mittleren Schichttiefe [cm] des Vegetationskörpers bestimmt. Zur Ermittlung eines repräsentativen Mittelwerts erfolgte die Datenerhebung an mehreren definierten Referenzpunkten (Abbildung 13). Innerhalb jedes Quadranten wurden fünf Messpunkte definiert, die in der Anordnung einer Würfelzahl „5“ (vier Eckpunkte und ein zentraler Punkt) positioniert sind. Die Erfassung erfolgt bei jedem Monitoringdurchgang unter identischen Bedingungen, um eine reproduzierbare und vergleichbare Datengrundlage zu gewährleisten. Bei Begrünungssystemen mit strukturell bedingten Fensterausparungen werden die betroffenen Messpunkte nicht berücksichtigt; an diesen Positionen wird ein Messwert von „0“ eingetragen – siehe Abbildung 12. Die äußeren Begrenzungen der Quadranten wurden zu Versuchsbeginn präzise vermessen und dauerhaft markiert. Auf diese Weise erfolgt die Volumenbestimmung innerhalb standardisierter, flächenmäßig definierter und zwischen den Quadranten direkt vergleichbarer Untersuchungseinheiten. Diese Vorgehensweise trägt der ausgeprägten Heterogenität urbaner Vegetationssysteme Rechnung, da sowohl Unterschiede im Wuchsverhalten als auch in der Artenzusammensetzung auftreten können. Vereinzelte, über die Hauptvegetationsschicht hinausragende Triebe wurden bei der Datenerfassung nicht berücksichtigt, um eine konsistente Volumenabschätzung zu gewährleisten.

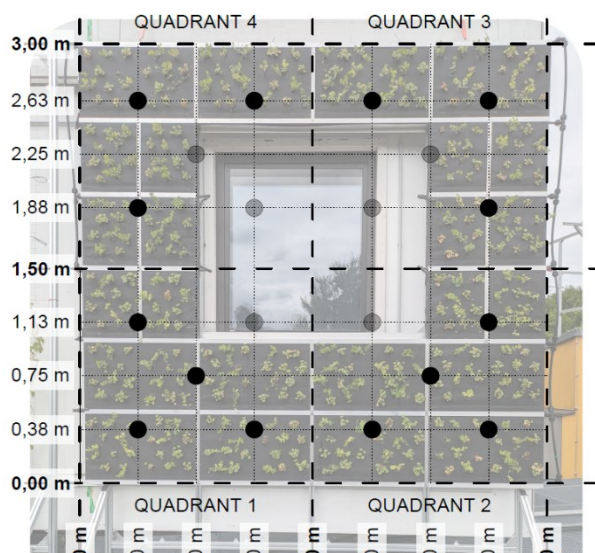


Abbildung 12: Konzeptionelle Darstellung zur Aufnahme des kubischen Pflanzenvolumens an der wandgebundenen Vertikalbegrünungsvariante mit Fensterausparung (IBLB, BOKU University, 2024).

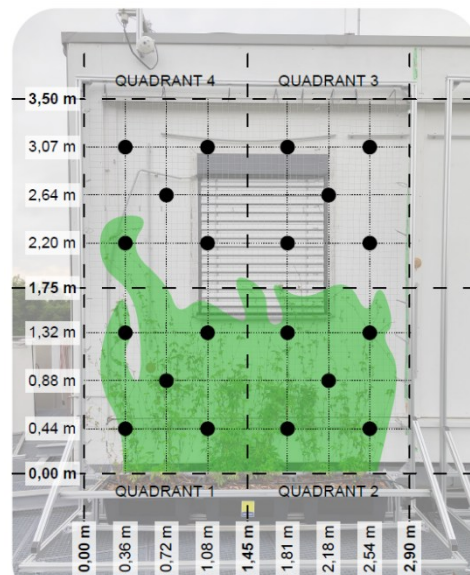


Abbildung 13: Konzeptionelle Darstellung zur Aufnahme des kubischen Pflanzenvolumens an troggebenen Begrünungsarten ohne Fensterausparung (IBLB, BOKU University, 2024).

Der **(Wand) Blattflächenindex** bzw. **(Wall) Leaf Area Index [WLAI/LAI]** ist eine dimensionslose Kennzahl, die das Verhältnis der gesamten Blattfläche einer Pflanze zur ihr zugeordneten Bodenfläche beschreibt ($LAI = \text{Blattfläche} / \text{Bodenfläche}$, m^2/m^2). Bei vertikalen Begrünungssystemen bezieht sich die Bezugsfläche auf die vertikale Wandfläche, woraus sich der sogenannte Wand-Blattflächenindex (WLAI) ableitet (Watson, 1947; Koch et al., 2023). In den Messkampagnen dieses Projektes wurden Aufnahmen an vertikalen und horizontalen Grünflächen durchgeführt, weswegen beide Begriffe verwendet werden. Der Wert bewegt sich zwischen 0 und 10, wobei ein höherer Wert als 1 darauf hinweist, dass die Blättfläche die jeweilige Grundfläche übersteigt – ein wichtiger Hinweis auf die vorhandene Biomasse und die damit verbundene Photosyntheseleistung (de Bock et al., 2023).

Wie bereits in vorherigen Forschungsprojekten, wurde zur Messung dieses Parameters das Ceptometer AccuPar LP-80 (METER Group Inc. USA, 2365 NE Hopkins Court, Pullman, WA 99163, USA) verwendet (Stangl et al., 2025). Die Aufnahmen erfolgten mit dem kalibrierten Messgerät hinter der Bepflanzung (troggebundene Vertikalbegrünung) bzw. in der Biomasse (Dachbegrünung und wandgebundene Vertikalbegrünung). Zur Aufnahme der Referenzstrahlung vor/über der Begrünung kam ein Silicon-Cell Pyranometer von Apogee Instruments (Logan, USA) zum Einsatz. Aus der Differenz der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) am Referenzsensor und am Messgerät errechnet sich der Wert des WLAI/LAI. Pro Quadranten wurde der Parameter jeweils an zwei Messpunkten in verschiedenen Höhen aufgenommen. Je Messpunkt wurden drei Aufzeichnungen durchgeführt. Das heißt, dass je Quadrant sechs [$n = 6$] und je Begrünungsart 24 WLAI/LAI-Werte [$n = 24$] vorliegen. Bei Aufnahmen hinter der Begrünung wurde das Messgerät mit einem Abstand von ca. 30 cm platziert, wobei der Sensorkopf parallel zur Vegetation ausgerichtet war. Der Referenzsensor wiederum befand sich exponiert vor der Fassade.

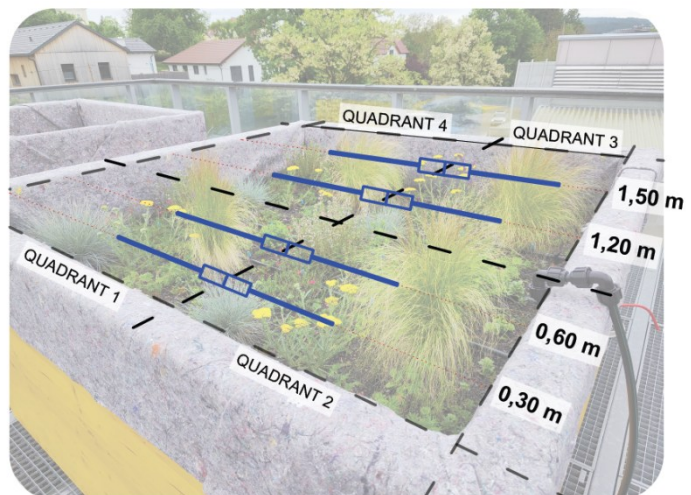


Abbildung 14: Konzeptionelle Darstellung zur Aufnahme des LAI am Prüfstand der Dachbegrünung (IBLB, BOKU University, 2024).

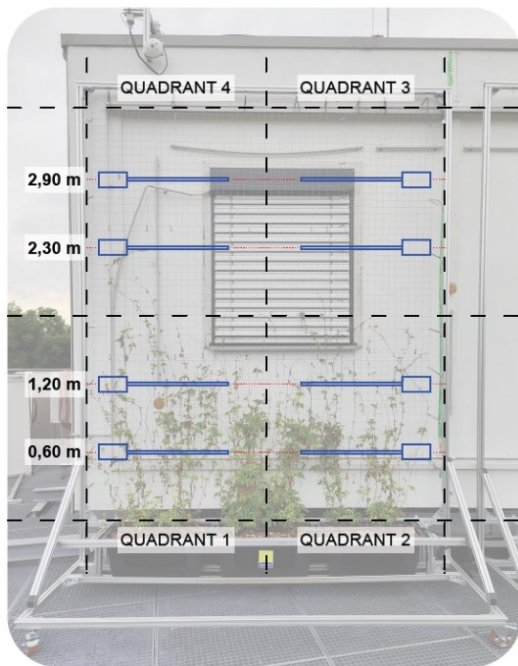


Abbildung 16: Konzeptionelle Darstellung zur Aufnahme des WLAI an den troggebundenen Begrünungsarten (IBLB, BOKU University, 2024).

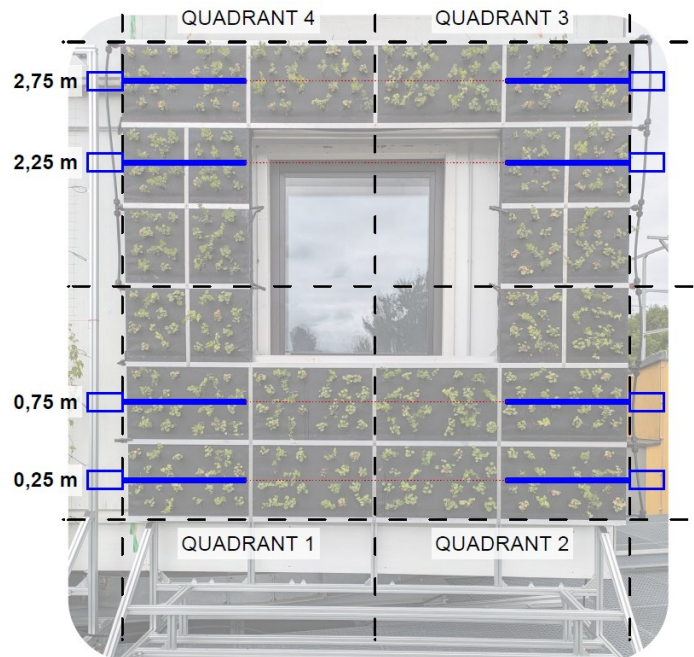


Abbildung 15: Konzeptionelle Darstellung zur Aufnahme des WLAI an der Living Wall (IBLB, BOKU University, 2025).

Die Aufzeichnung des Parameters ermöglicht Rückschlüsse zur Transmissionsreduktion der Vegetation im Verhältnis zur PAR-Strahlung vor dem Pflanzkörper. Weiterhin sind mögliche Korrelationen zum Deckungsgrad und dem kubischen Pflanzenvolumen darstellbar. Auch Vergleiche zwischen den vorhandenen Begrünungsarten sind denkbar.

Die Erhebung des **Deckungsgrades** erfolgte für alle Begrünungsarten. Auch hier wurde im Monitoring je Quadrant (projektiver Deckungsgrad DG_p , %) vorgegangen, zusätzlich wurde für die jeweilige gesamte Zielfläche ein prozentualer Deckungsgrad (DG_{Ziel}) errechnet Stangl et al. (2025). Bei den troggebundenen Vertikalbegrünungen konnte mithilfe eines weißen Textils (300 g/m²) eine einheitliche Fläche geschaffen werden, welche einen guten Kontrast zur Pflanze bietet. Aufgrund der Machbarkeit vor Ort wurde bei der Gründachfläche je eine separate Aufnahme je Quadrant durchgeführt, bei den anderen Begrünungssystemen konnte eine Aufnahme der gesamten Fläche durchgeführt werden. Die hochauflösenden Bilder wurden mit dem Smartphone Google Pixel 7a (Google LLC, Kalifornien, USA) aufgenommen. In der Bildbearbeitungssoftware Affinity Photo 2 (Serif Europe Ltd., Nottingham, UK) wurden die Bilder skaliert, anschließend zugeschnitten und in Binärbilder umgewandelt. Durch weitere Einstellungen in den Farbkanälen wurde sichergestellt, dass sich die schwarz eingefärbten Pflanzenteile noch besser vom Rest abheben (Abbildung 17). Im Fall der wandgebundenen Vertikalbegrünung und der Dachbegrünung konnte kein einheitlicher weißer Hintergrund geschaffen werden, weswegen die Biomasse hier weiß, eingefärbt wurde (Abbildung 18).



Abbildung 17: Auswertung am Beispiel eines Quadranten von *Wisteria sinensis* mit weißem Hintergrund – Biomasse ist schwarz eingefärbt (IBLB, BOKU University, 2025).

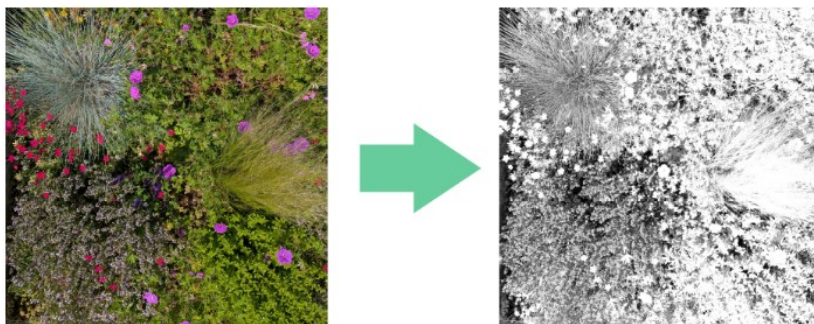


Abbildung 18: Auswertung am Beispiel eines Quadranten der Dachbegrünung – Biomasse ist weiß eingefärbt (IBLB, BOKU University, 2025).

Die weitere Auswertung wurde mit der Open Source Software Python (Python Software Foundation, Delaware, US) durchgeführt. Damit konnte eine Auswertung anhand des Grauwerts (8-Bit-Graustufen) vorgenommen werden. Die Graustufen sind im Bereich von 0 – 255 kategorisiert, wobei 0 einem schwarzen und 255 einem reinweißen Pixel entspricht. Alle Werte dazwischen geben eine Abstufung von 254 verschiedenen Grauwerten an (Werner, 2021). Im Vorfeld der Auswertung wurden die Graustufen der Biomasse in den Bilddateien manuell auf Plausibilität geprüft, um so ein klares Ergebnis zwischen Vegetationsfläche und Hintergrund zu erzielen. Die Betrachtungsbereiche sind in Tabelle 10 dargestellt. Durch die Auswertung wird eine präzise Quantifizierung der bewachsenen Vegetationsfläche in z.B. [m²] oder [%] ermöglicht.

Tabelle 10: Begrünungstypen, Auswertung des Deckungsgrades und dazugehöriger Graustufen-Betrachtungsbereich und begrünbare Flächen für DG_p und DG_{Ziel} (IBLB, BOKU University, 2026).

Modultyp	Kürzel	Darstellungsart	Betrachtungsbereich	Max. DG _p (m ²)	Max. DG _{Ziel} (m ²)
Living Wall	FB_LW	Vegetation weiß/ Hintergrund schwarz	115 - 255	2,01 (Q1-Q4)	7,28
Dachbegrünung	DB_ext	Vegetation weiß/ Hintergrund schwarz	0 – 50	0,865 (Q1-Q4)	3,46
<i>W. sinensis</i> (ohne Fenster)	FB_WS_oF	Vegetation schwarz/ Hintergrund weiß	0 – 50	2,54 (Q1-Q4)	10,16
<i>W. sinensis</i> (mit Fenster)	FB_WS_mF	Vegetation schwarz/ Hintergrund weiß	0 – 50	2,247 (Q1/Q2) 1,753 (Q3/Q4)	8,00
<i>P. quinquefolia</i> (ohne Fenster)	FB_PQ_oF	Vegetation schwarz/ Hintergrund weiß	0 – 50	2,54 (Q1-Q4)	10,16
<i>P. quinquefolia</i> (mit Fenster)	FB_PQ_mF	Vegetation schwarz/ Hintergrund weiß	0 – 50	2,247 (Q1/Q2) 1,753 (Q3/Q4)	8,00

Der projektive Deckungsgrad (DG_p) entspricht bei jedem Begrünungstyp jeweils einem Quadranten und der Zieldeckungsgrad (DG_{Ziel}) bezieht sich auf die verfügbare erschließbare Fläche. Bei den troggeordneten Modulen ist hierbei zwischen „ohne Fenster“ und „mit Fenster“ zu unterscheiden. Die Fensterausparung stellt keine potenzielle Erschließungsfläche für die Vegetation dar, weswegen diese abgezogen werden muss. Tabelle 10 zeigt eine Übersicht der potenziellen Bedeckungsflächen. Zusätzlich zum projektiven Deckungsgrad (DG_p) und dem Zieldeckungsgrad (DG_{Ziel}) wurde für ausgewählte Monate auch der Deckungsgrad im Bereich der Fensterfläche vor der Prüffassade ausgewertet. Hintergrund ist hier eine möglichst präzise Auswertung in Verbindung mit den Aufnahmen des Pyroscanners von AEE Intec treffen zu können.

Die Erfassung der Oberflächentemperatur erfolgte mittels **Infrarot-Thermografie (IR_T)** unter Verwendung einer Wärmebildkamera des Typen *GTC 400 C Professional* (Robert Bosch Power Tools GmbH, Stuttgart, Deutschland). Im Rahmen des monatlichen Monitorings wurde jeweils eine thermografische Aufnahme der Testflächen „Gründach“ und „Referenzdach“ angefertigt. Die Aufnahmen wurden in der Zeitspanne zwischen 12:00 und 14:00 Uhr durchgeführt, um den Zeitraum mit dem höchsten Sonnenstand und somit der maximalen Strahlungsintensität zu erfassen. Messungen erfolgten ausschließlich bei klarer, sonniger Witterung, um externe Witterungseinflüsse auf die Oberflächentemperatur zu minimieren. Die nachfolgenden Bildauswertungen wurden mit der *GTC Transfer Software* (Robert Bosch Power Tools GmbH) durchgeführt. Dabei wurde für alle thermografischen Aufnahmen ein einheitlicher Temperaturbereich definiert, um eine direkte Vergleichbarkeit der Messergebnisse zwischen den Messzeitpunkten und Untersuchungsflächen zu gewährleisten.

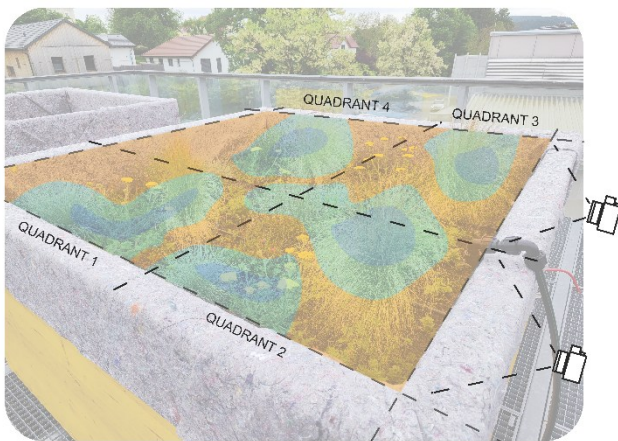


Abbildung 19: Konzeptionelle Darstellung zur Aufnahme der Wärmebilder am Teststand „Gründach“ (IBLB, BOKU University, 2024).

Um die energetischen Fragestellungen im Projekt MARGRET bearbeiten zu können, wurde für die Dachbegrünungstestboxen ein Aufbau mit darunterliegender, konditionierter Hohlkammer und getrennten Boxen für das Gründach und Referenzdach gewählt. Beide haben einen OIB-gerechten Aufbau mit einem U-Wert von 0,199. Für das Gründach wurde ein Aufbau nach der Dachbegrünungsnorm ÖNORM L1131 mit 15 cm Substrat und reduziert-intensiver Begrünung mit Gräsern, Kräutern und Sedum gewählt. Diese Substrathöhe stellt einen guten Mittelweg zwischen der Ermöglichung dichten Bewuchses mit entsprechend zu erwartenden messbaren Effekten und überschaubaren statischen Lasten in einer großflächigen praktischen Umsetzung dar. Eine Bepflanzung mit hohem Biodiversitätswert ist bei dieser Substratstärke ebenfalls gut möglich. Zur Konditionierung der Hohlkammer wurde ein wassergeführtes Heiz-/Kühlsystem installiert (s. Messkonzept im Anhang). Der Aufbau erfolgte in Anlehnung an das Referenzprojekt U-green (CAE 2025), um eine direkte Vergleichbarkeit der generierten Daten zu gewährleisten.

3.3 Durchführen der Messungen

Die Durchführung der Messungen sowie das Pflanzenmonitoring erfolgten während der Vegetationsperioden der Jahre 2024 und 2025. Ergänzend wurden Datenerhebungen in den Wintermonaten 2024/2025 vorgenommen.

Verschiedene Umwelteinflüsse sowie Einschränkungen in der Handhabung der Versuchsfläche beeinflussten sowohl die Pflanzenentwicklung als auch den Gesamtversuch. Die Versuchseinheiten waren auf dem stark exponierten Versuchsdach sämtlichen Witterungseinflüssen ungeschützt ausgesetzt. Lediglich im Bereich vor der Prüfbox bestand ein Windschutz; die übrigen Vertikalbegrünungen befanden sich in freier Exposition. Die mobilen Prüfwagen wurden während der Messperioden im wöchentlichen Abstand vor der Prüffassade gewechselt. Dadurch sollte gewährleistet werden, dass eventuelle Akklimatisierungseffekte bei zu kurzen Verweildauern vor der Prüffassade ausgeschlossen werden, und eine Messung der unterschiedlichen Vertikalbegrünungen zumindest bei ähnlichen Witterungsverhältnissen möglich war. Es bleibt jedoch die Einschränkung bestehen, dass die Module nicht parallel bei völlig identischen Außenbedingungen vermessen werden konnten, was beim Vergleich der Datensätze zu berücksichtigen ist.

3.3.1 Pflanzentechnische Herausforderungen

Bereits kurz nach der Errichtung im April 2024 konnte ein ausgeprägter Austrieb der Kletterpflanzen beobachtet werden, weshalb der erste Monitoringtermin für Mai 2024 vorgesehen war. Zwei aufeinanderfolgende **Spätfrostnächte** um den 20. April 2024 führten jedoch zu einem vollständigen Absterben der frischen Triebe (Abbildung 20). In der anschließenden Regenerationsphase kam es zu einer **deutlichen Wachstumsverzögerung**, die insbesondere bei den Modulen mit *Wisteria sinensis* ausgeprägt war. Drei Pflanzen mussten im Juni 2024 ersetzt werden. Das reguläre Pflanzenmonitoring konnte daher erst im Juni 2024 aufgenommen werden. Zu diesem Zeitpunkt war eine vollständige Erfassung sämtlicher Parameter noch nicht möglich. Beispielsweise konnte die

stomatäre Leitfähigkeit [g_s] nicht gemessen werden, da sich die Blätter überwiegend im juvenilen Entwicklungsstadium befanden. Ab Juli 2024 lagen ausreichend entwickelte Blattstrukturen vor, sodass die Aufzeichnung sämtlicher pflanzenphysiologischer Parameter durchgeführt werden konnte.



Abbildung 20: *P. quinquefolia* und *W. sinensis* bevor (15.04.2024, oben) und nach (29.04.2024, unten) den Frostnächten im April 2024 (M. Majcen, AEE Intec, 2024).

Die Module bepflanzt mit *Parthenocissus quinquefolia* (FB_PQ_oF, FB_PQ_mF), regenerierten sich rasch konnten trotz des frühjährlichen Komplettausfalls auch in der Vegetationsperiode 2024 weitreichende Ergebnisse liefern. Düngergaben unterstützten die Pflanzen im Wachstumsprozess:

- April 2024: Langzeit Depotdüngung mit SUBSTRAL (Evergreen Garden Care Österreich GmbH) – 50 g je Pflanzgefäß
- Juli 2024: WUXAL Universaldünger (Hauert MANNA Düngerwerke GmbH) – 10 Liter je Pflanzgefäß (2ml/l Mischverhältnis)
- April 2025: WUXAL Universaldünger (Hauert MANNA Düngerwerke GmbH) – 10 Liter je Pflanzgefäß (2ml/l Mischverhältnis)

Im Rahmen des Monitorings im **Juli 2024** wurden an mehreren Blättern von *Parthenocissus quinquefolia* (Modul FB_PQ_mF) auffällige Veränderungen festgestellt. Die betroffenen Blätter zeigten strukturelle Abweichungen, punktuell depigmentierte (weiße) Bereiche sowie teilweise eine

frühzeitige rötliche Verfärbung. Eine Rücksprache mit der Firma biohelp – Biologischer Pflanzenschutz, Nützlingsproduktions-, Handels- und Beratungs-GmbH (Wien, Österreich) ergab keine eindeutige Diagnose. Es wurde empfohlen, die *Austrian Agency for Health and Food Safety* (AGES, Wien, Österreich) zu konsultieren. Auch dort konnte anhand der zur Verfügung gestellten Fotodokumentation keine genaue Bestimmung der Schadursache erfolgen. Da der Befall im Jahr 2024 nur lokal begrenzt auftrat und sich die Vegetationsperiode bereits im fortgeschrittenen Stadium befand, wurde entschieden, zunächst keine weiteren Maßnahmen zu ergreifen.

In der **Vegetationsperiode 2025 zeigte sich der Befall in deutlich größerem Ausmaß** und trat an beiden *Parthenocissus*-Modulen auf. Auf Grundlage der Symptomatik wurde ein Pilzbefall vermutet, woraufhin eine Behandlung mit dem Fungizid *Compo Duaxon Universal Pilz-frei AZ* (Compo Austria GmbH, Wien, Österreich) erfolgte. Zusätzlich wurde der vorhandene Rindenmulch entfernt und durch frisches Substrat ersetzt, um potenzielle Infektionsquellen im Bodenbereich zu reduzieren. Im weiteren Verlauf der Vegetationsperiode 2025 zeigten die Pflanzen eine sichtbare Schwächung. Diese äußerte sich in einer verringerten Biomasseproduktion, einer reduzierten Blattgröße sowie einem insgesamt weniger dichten Wuchsbild.



Abbildung 21: Zustand *Parthenocissus quinquefolia* (FB_PQ_oF) im August 2024 (links) und im Juli 2025 (rechts) (IBLB, BOKU University, 2024/2025).

Im Rahmen des Monitorings im **August 2024** wurde an einem der *Wisteria*-Module (FB_WS_mF) ein **geringer Befall durch Blattläuse** festgestellt. Zur Befallsbekämpfung wurde die betroffene Pflanze am 19. September 2024 mit einem Neemölpräparat behandelt. Hierfür wurden 2 ml des Mittels *Solabiol Neem Bio-Schädlingsfrei* (SBM Life Science GmbH, Langenfeld, Deutschland) in etwa 330 ml Wasser verdünnt und die Lösung anschließend mithilfe einer Handsprühflasche groß-

zünftig auf die befallenen Pflanzenbereiche appliziert. Bei den Folgebeobachtungen in der Vegetationsperiode 2025 konnte kein erneuter Befall festgestellt werden, was auf eine erfolgreiche Reduktion der Blattlauspopulation durch die Neemölbehandlung hinweist.

3.3.2 Bewässerung

Die **Bewässerung der Versuchsmodule** erfolgt über ein System der Firma Hunter Industries Inc. (USA). Für jedes Modul wurde ein separater Bewässerungskreis eingerichtet. Die Steuerung erfolgt über das Gerät *Pro-HC* (max. 12 Stationen) desselben Herstellers; insgesamt sind sechs Bewässerungskreise in Betrieb. Der Wasserverbrauch wird mittels eines $\frac{3}{4}$ "-Einstrahl-Wasserzählers (Typ ETK LZ, Kaltwasser, mit Reed-Kontaktgeber 1 L/Impuls) erfasst. Die Daten werden über die Software *Hydrawise* ausgelesen. Für die **troggebundenen Vertikalbegrünungen** wurden je Pflanzgefäß fünf Einzeltropfer (ca. 8 L/h) an ein 16 mm Bewässerungsrohr angeschlossen, entsprechend 15 Tropfern pro Modul. Im Verlauf der Aufzeichnungen zeigte sich jedoch, dass der Impulszähler bei geringen Durchflussraten der Tropfer (Module mit *Wisteria sinensis* und *Parthenocissus quinquefolia*) nicht zuverlässig auslöst. Dies führte in den Berichten zu zahlreichen Zyklen mit einer registrierten Wassermenge von „0 L“. Zur Verifizierung wurde am 19.09.2024 ein Kontrollversuch durchgeführt. Dabei wurde der Tropfschlauch je Modul demontiert und das ausgebrachte Wasser während dreier fünfminütiger Bewässerungszyklen volumetrisch erfasst. Der mittlere Ausstoß betrug 2,625 L pro Zyklus, was etwa 6,3 l/h pro Tropfer entspricht und unter den Herstellerangaben liegt (Hunter Industries Inc., 2025). Die Abweichung zwischen realem Wasserverbrauch und Zähleranzeige machte eine nachträgliche Korrektur erforderlich. Für die Datenauswertung wurden daher die registrierten Bewässerungszyklen der troggebundenen Vertikalbegrünungen auf Basis der gemessenen realen Durchflussmengen neu berechnet, um eine belastbare Wasserbilanz zu erstellen.

Das **wandgebundene Begrünungssystem** wurde im Juni 2024 installiert. Die Bewässerung erfolgt über Tropfrohre mit einem Tropfabstand von 20 cm, wobei über jeder Modulebene ein Rohr installiert ist. Jedes Modul verfügt über Zuläufe an der Oberseite und Abläufe an der Unterseite, wodurch eine kaskadierende Wasserverteilung entsteht. Nach der Installation am 11. Juni 2024 begann der Bewässerungsbetrieb am 12. Juni 2024 mit zwei täglichen Bewässerungszyklen (jeweils 3 Minuten um 5:50 Uhr und 17:50 Uhr). Auf Empfehlung der NatureBase GmbH wurde kurzfristig ein zusätzlicher Zyklus um 12:50 Uhr eingeführt, der nach dem Monitoring im Juli aufgrund zu hoher Feuchtigkeit und mäßiger Pflanzenentwicklung wieder eingestellt wurde. Im Rahmen des Monitorings im Juli 2024 erfolgte zudem die erste Pflege. Dabei wurden ausgefallene Pflanzen ersetzt, vertrocknete Pflanzenteile entfernt und eine manuelle Düngung durchgeführt. Jede Pflanze erhielt mittels Laborflasche einen Spritzer einer Lösung aus 20 ml WUXAL Universaldünger (Hauert MANNA Düngerwerke GmbH) pro Liter Wasser. Diese Methode wurde nach Rücksprache mit der NatureBase GmbH als nicht dauerhaft geeignet bewertet. Daher wurde am 29. August 2024 eine Düngereinjektorpumpe (Hersteller: NEWTRY UK, Hangzhou Changchen Electronic Technology Co. Ltd, China) installiert. Seither erfolgt die Nährstoffzugabe automatisch über die Bewässerung, was in einem deutlichen Zuwachs an Biomasse resultierte. Das Mischverhältnis im Vorratsbehälter be-

trägt 1:14 (21 L Wasser mit 1,5 L WUXAL), wobei pro Bewässerungszyklus 0,4 % dieser Lösung dosiert werden. Der Füllstand des Kanisters wurde regelmäßig im Rahmen der Monitoring-Termine überprüft. Die morgendlichen und abendlichen Bewässerungsintervalle wurden bis Mitte Oktober beibehalten und anschließend auf drei Zyklen pro Woche reduziert. Nach einem Frostschaden am 12. November 2024 wurde die Bewässerung bis 3. Dezember ausgesetzt und bis 15. Dezember manuell durchgeführt. In den anschließenden Wintermonaten erfolgte die Bewässerung zweimal wöchentlich um 12:00 Uhr, um weitere Frostschäden möglichst zu vermeiden.

3.3.3 Fassadenwechsel

Für jede der zwei Vegetationsperioden wurde jeweils im Voraus ein Plan für den wöchentlichen Wechsel der Fassadenprüflinge erstellt. Ein regelmäßiger Wechsel, normalerweise Montagvormittag, erleichterte die Einplanung der nötigen personellen Ressourcen und wurde meist gleich in Kombination mit der wöchentlichen Fotodokumentation durchgeführt. Lediglich bei sehr ungünstigen Witterungsbedingungen oder Feiertagen wurde der Wechsel um ein bis zwei Tage verschoben. Der Prüfaufbau erwies sich als sehr gut handhabbar und ein Fassadenwechsel incl. Umstecken der Sensorik konnte von zwei Personen innerhalb von maximal 30 Minuten durchgeführt werden, war aber auch alleine möglich, falls erforderlich. Die Tabelle mit der Auflistung von Fassadenwechseldaten ist dem Anhang zu entnehmen.

Dieses Prüfsetting hat Vor- und Nachteile. Es können so zwar große Fassadenprüflinge ohne gegenseitige Beeinflussung in einem sehr hohen Detaillierungsgrad vermessen werden, ein direkter Vergleich zwischen unterschiedlichen Begrünungsarten bei identischen Sonnenstands- und Witterungsbedingungen ist aber nicht möglich. Auch eine kurzfristige Reaktion auf günstige Witterungsbedingungen, zum Beispiel das Messen von zwei unterschiedlichen Prüflingen innerhalb einer einzelnen Schönwetterperiode ist nur mit erhöhtem personellem und organisatorischem Aufwand möglich.

Der wöchentliche Wechsel wurde ursprünglich angesetzt, um den Fassaden nach dem jeweiligen Wechsel 1-2 Tage zur Ausbildung eines stabilen Mikroklimas vor der Wand zu geben und so valide Messwerte zu erhalten. Es zeigte sich jedoch, dass das nicht vonnöten ist, sodass auch kürzere Messperioden zum Vergleich von unterschiedlichen Vertikalbegrünungen valide wären. Da es am Prüfstandort in Österreich praktisch keine fünfwöchigen Perioden mit gleichbleibender Witterung und Temperaturniveau gibt, stellte dies auch eine gewisse Einschränkung der Versuche mit den fünf unterschiedlichen Vertikalbegrünungen dar. Die Messintervalle sollten bei künftigen Versuchen jedenfalls gut auf die jeweiligen Fragestellungen abgestimmt werden und müssen keine ganze Woche betragen, da sich Tagesverläufe der Messwerte bei gleichbleibender Witterung wenig unterscheiden.

3.3.4 Technische Herausforderungen und Empfehlungen für künftige Prüfsettings

Wie bereits im Kapitel 3.2.3 zum Aufbau der Dachbegrünungsteststände beschrieben, konnte mit der eingesetzten Anordnung und Regelungstechnik der Heiz- und Kühlschlangen an heißen Sommertagen das Temperaturniveau in der „Prüfkammer“ unter der Begrünung nicht bei 24 Grad gehalten werden. Hier wird künftige sowohl zusätzlich eine Ventilation und Durchbohrung der Holzstege zur besseren Verteilung der gekühlten Luft als auch eine bessere Regelungstechnik zum Erreichen höherer Temperaturdifferenzen zwischen Innenraum und Kühlkreislauf und eine zusätzliche Randdämmung des Hohlraumes zum Außenraum zum Einsatz kommen.

Leider bestand auch bei der Fassadenprüfbox nach der Nutzung für andere Versuche im Winter 2024/25 ein Problem mit der Hydraulik der Deckenkühlung, sodass bis zu einem späten bemerken des Fehlers im Juli 2025 eine zu geringe Kühlleistung, vor allem im Referenzraum, erzielt werden konnte. Da das Problem aber mehr den Referenz- als den Prüfraum betraf, sind die relativen Unterschiede der Wärmeströme, nämlich mehr Wärmestrom IN den Referenzraum die im Mai-Juli 2025 gemessen wurden, sogar noch als zu niedrig anzusehen. Trotzdem wurde nach Reparatur im August 2025 noch eine zusätzliche Messperiode eingeschoben, um die Werte noch einmal zu überprüfen. Die genauen Zeitpunkte der Nachmessungen sind Anhang 1 zu entnehmen.

Gerade bei der Wärmestrommessung musste sehr hohe Sorgfalt angewendet werden, da die auftretenden Wärmeströme bei den sehr gut gedämmten Fassaden und Dächern sehr klein waren (+/- 0-5 Watt). In diesem Bereich wirken sich sämtliche Montageungenauigkeiten der Wärmestromplatten, z.B. ein nicht lückenloser Kontakt zur zu messenden Wand, bereits auf die Messwerte aus. Bei den Dachbegrünungen, wo die Platten auch durch das Gewicht des Dachaufbaus einem gewissen Anpressdruck unterliegen, traten hier keine Probleme auf. Bei den Fassadenbegrünungen zeigten jedoch auch Nullmessungen ohne Vertikalbegrünung vor beiden Räumen (14.8. – 17.8. 2025) geringfügige Abweichungen zwischen den Messwerten der beiden Fassaden, sodass die Ergebnisse hier vorsichtiger zu interpretieren sind.

Die Messung der Lufttemperaturen in drei verschiedenen Höhen vor jeder Vertikalbegrünung und an der Prüffassade hinter den Begrünungen sowie an der Referenzfassade stellte sich als nicht erforderlich für künftige Prüfsettings heraus. Die Messungen an der begrünten versus unbegrünten Wand sollten weiterhin erfolgen, jedoch konnte praktisch kein Unterschied zwischen Messungen unten, mittig oder oben an der jeweiligen Wand festgestellt werden, sodass das Messsetting in zukünftigen Versuchen auf jeweils einen strahlungsgeschützten Lufttemperatursensor vor und hinter der Grünfassade sowie vor der Referenzfassade in jeweils mittlerer Höhe reduziert werden kann.

3.4 Einbindung Stakeholder durch Fachdiskussionen und Workshops

Im Rahmen des Forschungsprojekts MARGRET wurden zwei Workshops sowie eine Ergebnispräsentation mit anschließender Diskussions- und Fragerunde durchgeführt. Ergänzend fand seit Pro-

jekt-beginn im November 2023 ein kontinuierlicher fachlicher Austausch in der international besetzten Austauschgruppe UGreen statt. Diese Gruppe wurde zu Projektstart gegründet und dient der gemeinsamen Diskussion des aktuellen Forschungsstands zur Mess- und Berechenbarkeit von Gebäudebegrünung.

Ziel der Einbindung von Stakeholder:innen waren:

- Den Bedarf an geeigneten Kennwerten für die Integration von Gebäudebegrünung in den Energieausweis sowie in Gebäudesimulationsprogramme zu ermitteln
- Die im Projekt MARGRET abgeleiteten Kennwerte und die dafür angewendeten Methoden zu überprüfen und
- Die praktische Anwendbarkeit dieser Kennwerte gemeinsam zu diskutieren.

Am ersten MARGRET-Workshop im November 2024 nahm zusätzlich das Konsortium des Forschungsprojekts HEDWIG teil. Aufgrund ähnlicher, teilweise deckungsgleicher Zielsetzungen der beiden Forschungsprojekte, jedoch unterschiedlicher Messbedingungen, entwickelte sich eine enge Zusammenarbeit zur gemeinsamen Einbindung von Stakeholder:innen. Die kooperativ durchgeführten Workshops im Juli 2025 sowie die gemeinsame Ergebnispräsentation mit Diskussionsrunde im September 2025 führten zu weitgehend übereinstimmenden Vorgehensweisen, vergleichbaren Abläufen und inhaltlich ähnlichen, praxisrelevanten Ergebnissen. Diese flossen auch in die Publikationen des Forschungsprojekts HEDWIG ein. (Konsortium des Forschungsprojektes HEDWIG, 2022-2026)

Zur aktiven Beteiligung von Stakeholder:innen in den Workshops sowie während der Ergebnispräsentation mit anschließender Diskussion wurden bewusst mehrere wissenschaftliche Methoden kombiniert. Niederberger und Wassermann (2015) zeigen, dass Beteiligungsformate an Wirksamkeit gewinnen, wenn sie sich an übergeordneten Gestaltungsprinzipien orientieren und nicht ausschließlich auf einzelne Methoden beschränkt bleiben.

Die eingesetzten Methoden werden in den folgenden Unterkapiteln näher.

Die Treffen der Austauschgruppe UGreen fanden viermal jährlich statt. Pro Termin wurden ein bis zwei Fachpräsentationen durchgeführt, die jeweils durch eine moderierte Diskussion zu den vorgestellten Vorgehensweisen und Methoden ergänzt wurden. Auch das Projekt MARGRET wurde im Verlauf der Projektlaufzeit mehrfach vorgestellt und innerhalb der Gruppe ausführlich diskutiert.

3.4.1 Transdisziplinärer Workshop

Transdisziplinäre Workshops führen Akteur:innen aus Wissenschaft und Forschung mit externen Anwender:innen zusammen. Sie können einmalig oder mehrfach während eines Projekts durchgeführt werden und dienen dem strukturierten Austausch zwischen Theorie und Praxis sowie der gemeinsamen Erarbeitung projektbezogener Ergebnisse. (Niederberger & Wassermann, 2015).

Charakteristisch ist, dass die Teilnehmer:innen nur für die Dauer des Workshops zusammenkommen und häufig keine vorherige Zusammenarbeit besteht. Externe Fachexpert:innen sind nicht

oder nur teilweise mit dem Projekt verbunden. Die Zielsetzung ergibt sich aus dem Forschungsvorhaben und nicht aus den individuellen Arbeitslogiken der Beteiligten. Gerade deshalb werden Stakeholder:innen gezielt eingeladen, um ihre jeweiligen Perspektiven einzubringen und ihre eigenen Denk- und Handlungsweisen beizubehalten. (Niederberger & Wassermann, 2015)

Für die Planung eines Stakeholder:innen-Workshops sind folgende zentrale Gestaltungsprinzipien zu berücksichtigen: ein geeigneter Zeitpunkt mit ersten vorliegenden Ergebnissen, klar definierte Ziele, eine aktive Mitwirkung der Teilnehmer:innen, eine sorgfältige Dokumentation und qualitative Auswertung, transparente Kommunikation der gemeinsamen Verantwortung, eine strukturierte Organisation sowie eine wertschätzende und motivierende Atmosphäre.

Die Inhalte der Workshops wurden auf Basis des Vorgehens nach Niederberger und Wassermann (2015) entwickelt und an die Anforderungen der Projekte MARGRET und HEDWIG angepasst. Bei der Planung, Durchführung und Nachbereitung der HEDWIG- und MARGRET-Workshops im Juli 2025 wurden alle beschriebenen Gestaltungsprinzipien systematisch umgesetzt.

3.4.2 Victorian Calling

Die Methode „Victorian Calling“ dient der gemeinsamen Diskussion von Forschungsergebnissen und daraus abgeleiteten Handlungsempfehlungen. Ziel ist es, Inhalte im Dialog mit Anwender:innen weiterzuentwickeln. Ursprünglich als transdisziplinäres Tagungsformat konzipiert, stellt „Victorian Calling“ heute eine eigenständige Methode dar, mit der Praxisakteur:innen gezielt in die Weiterentwicklung wissenschaftlicher Ergebnisse eingebunden werden. (Niederberger & Wassermann, 2015)

Im Rahmen der MARGRET Fachdiskussion im November 2024 und des HEDWIG- und MARGRET-Workshops im Juli 2025 wurde diese Methode in angepasster Form eingesetzt. Die Teilnehmer:innen erhielten vorab zentrale Fragestellungen sowie Kurzfassungen der Projekte. Ergänzend wurde die Wissensbasis im Juli 2025 durch eine Poster-Ausstellung und eine Projektpräsentation an beiden Terminen erweitert. Da die Methode mit weiteren Formaten kombiniert wurde, kamen ausgewählte Elemente des ursprünglichen Konzepts zur Anwendung.

3.4.3 Qualitative Inhaltsanalyse nach Mayring

Die qualitative Inhaltsanalyse nach Mayring ist ein systematisches, kategoriegeleitetes Verfahren zur Auswertung qualitativer Daten. Sie ermöglicht die strukturierte Analyse umfangreichen Materials und berücksichtigt neben expliziten auch verborgene (latente) Inhalte. Durch ein klar definiertes Vorgehen ist eine intersubjektive Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse gewährleistet. (Mayring & Fenzl, 2019)

Zur Auswertung der im November 2024 und im Juli 2025 durchgeführten Workshops wurde dieses Verfahren angewendet. Ziel war es, die Aussagen der interdisziplinären Expert:innen zu verdichten, transparent darzustellen und theoriegeleitet auszuwerten. Grundlage bildeten vorab formu-

lierte Leitfragen zur praktischen Nutzbarkeit der Kennwerte, zu weiterem Bedarf sowie zu zukünftigen Forschungsansätzen.

Die Analyse erfolgte mehrstufig: Zunächst wurden relevante Aussagen paraphrasiert und auf ein einheitliches Abstraktionsniveau gebracht. Anschließend wurden in mehreren Reduktionsschritten inhaltlich gleiche oder ähnliche Aussagen zusammengeführt und zu übergeordneten Kategorien verdichtet. Dieser iterative Prozess wurde so lange fortgeführt, bis eine konsistente Kategoriestruktur vorlag. Die Ergebnisse sind in Kapitel 4.3 dargestellt.

4 Ergebnisse und Interpretation

Im vierten Kapitel werden die im Projektverlauf generierten Daten zusammengeführt, analysiert und interpretiert.

Der erste Teil der Auswertung widmet sich detailliert den Vertikalbegrünungen und Gründächern. Hierbei werden die biologischen Faktoren wie Bewässerung und Pflanzenwachstum unmittelbar mit den physikalischen Messgrößen verknüpft. Die Analyse umfasst das gesamte Spektrum des Strahlungshaushalts, wobei insbesondere die Albedowerte und die mittels Pyroscanner ermittelte Strahlungsminderung bei transparenten Bauteilen im Fokus stehen. Parallel dazu bilden die in umfangreichen Versuchsreihen direkt gemessenen Oberflächentemperaturen, Wärmeströme sowie der tatsächlich ermittelte Kühlbedarf die wesentliche Säule der Untersuchung. Diese Messdaten münden schlussendlich in der Ermittlung realer U-Werte unter dem Einfluss der Vegetation und dienen der Validierung energetischer Berechnungsmodelle.

Um die Praxistauglichkeit der entwickelten Ansätze sicherzustellen, wurde die technische Forschung durchgehend durch das Einholen externer Meinungen und Expertisen flankiert. Im Abschnitt zur Stakeholder-Einbindung wird dokumentiert, wie die Zwischenergebnisse in Fachdiskussionen, Workshops und Präsentationen – etwa im Rahmen der Austauschgruppe UGreen oder bei gemeinsamen Workshops mit dem Projektkonsortium HEDWIG – gespiegelt und validiert wurden. Dieser interdisziplinäre Dialog stellte sicher, dass die gewonnenen Daten nicht nur wissenschaftlich exakt sind, sondern auch die praktischen Bedürfnisse der Wirtschaft und Stadtverwaltung widerspiegeln.

Die Synthese aus messtechnischen Erkenntnissen und dem Feedback der Fachwelt führt im abschließenden Teil zu konkreten Empfehlungen für die Normung und Berechnungsmodelle. Hier werden die theoretischen Modelle in Richtung standardisierter Mess- und Prüfverfahren weiterentwickelt. Die daraus abgeleiteten Kennwerte dienen als Vorschlag für die Adaptierung bestehender Normen und sollen den Weg ebnen, um Bauwerksbegrünung als verlässliches und rechtssicheres Instrument in der energetischen Gebäudeplanung zu etablieren.

4.1 Vertikalbegrünungen

In diesem Kapitel werden die umfassenden Messergebnisse und Analysen zur Wirksamkeit von Vertikalbegrünungen unter realen Bedingungen zusammengeführt. Die energetische Bewertung einer grünen Fassade erfordert eine ganzheitliche Betrachtung, die bei den biologischen Grundlagen ansetzt und bis zur messbaren Reduktion des Kühlbedarfs im Gebäudeinneren reicht. Um ein präzises Bild der Systemleistung zu erhalten, werden zunächst die pflanzenspezifischen Parameter

der eingesetzten Vegetation analysiert, wobei das Monitoring durch die BOKU IBLB die Basis für das Verständnis von Biomassezuwachs und Blattflächenindex bildet. Diese biologischen Kennwerte werden unmittelbar mit den klimatischen Bedingungen im Messzeitraum korreliert, um die Leistungsfähigkeit der Begrünung in Abhängigkeit von der tatsächlichen Wettercharakteristik und der solaren Einstrahlung zu bewerten.

Ein wesentlicher Teil der Untersuchung widmet sich dem Strahlungshaushalt der begrünten Fassade. Hierbei werden die Albedomessungen unterschiedlicher Pflanzenarten sowie die Strahlungsminderung herangezogen, die sowohl durch punktuelle Messungen an der opaken Wand als auch durch innovative, flächige Scans hinter transparenten Bauteilen mittels Pyroscanner ermittelt wurde. Diese differenzierte Erfassung der Strahlungsbilanz ermöglicht es, die komplexen Wechselwirkungen zwischen Reflexion, Absorption und Transmission der Vegetation physikalisch zu beschreiben.

Den Abschluss der Analyse bildet die thermische Wirkungsweise auf die Gebäudehülle. Durch die Auswertung der Oberflächentemperaturen und der resultierenden Wärmeströme an der Fassade wird quantifiziert, wie effektiv die Begrünung als thermischer Puffer fungiert. Diese Daten münden schließlich in der Berechnung des tatsächlichen Kühlbedarfs der Fassadenprüfbox.

4.1.1 Bewässerung Vertikalbegrünung

Abbildung 22 zeigt monatliche Bewässerungsmengen in der Vegetationsperiode 2024 (Mai – Oktober) an den vertikalen Begrünungsarten. Die wandgebundene Vertikalbegrünung (FB_LW_mF) wurde erst Anfang Juni 2024 am Versuchsstandort installiert, weswegen hier keine Werte für Mai vorliegen. Im Jahr 2025 (Abbildung 23) konnten aufgrund der Projektlaufzeit keine Werte nach August aufgezeichnet werden.

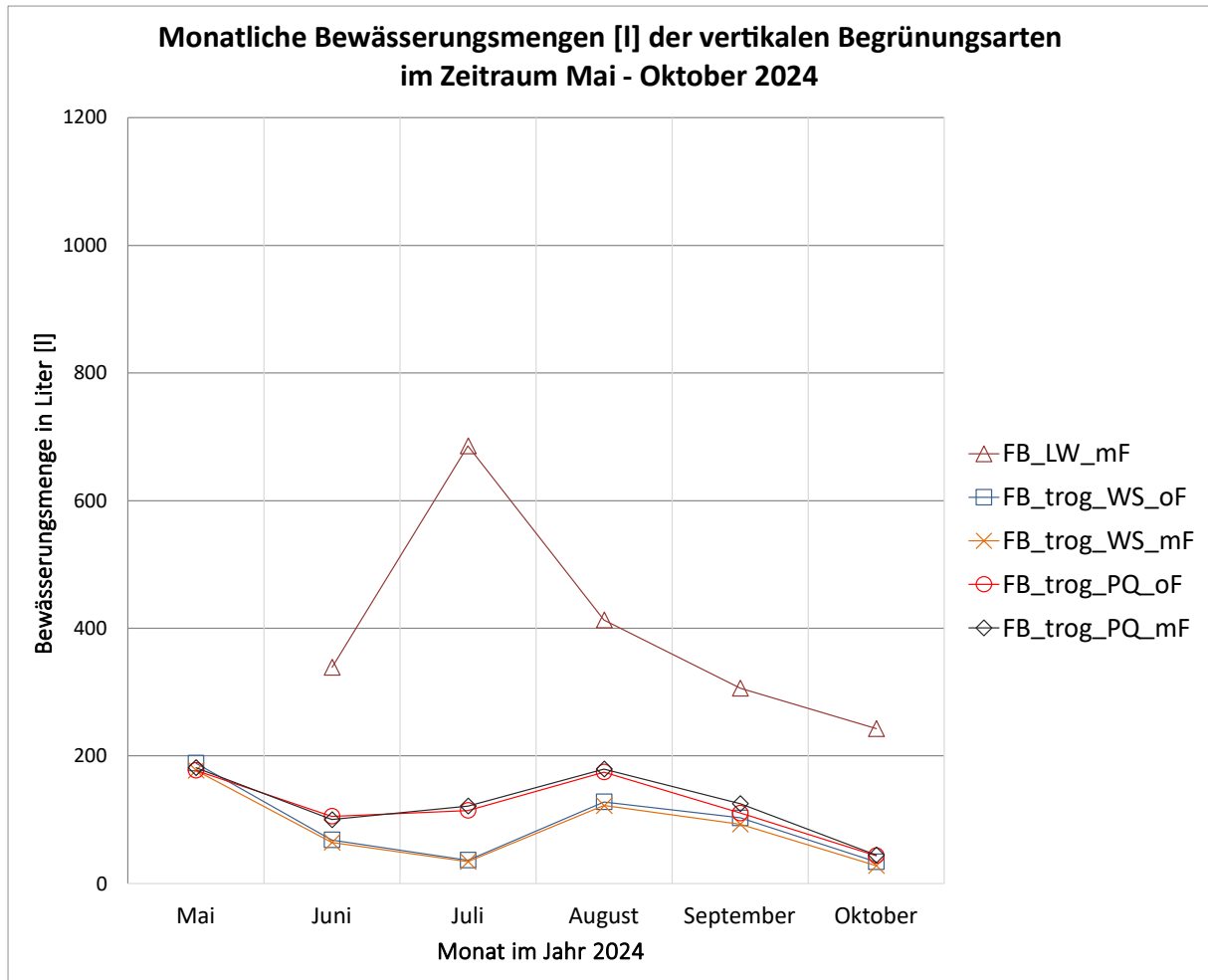


Abbildung 22: Monatliche Bewässerungsmenge in den Monaten Mai - Oktober 2024 an den fünf vertikalen Begrünungsarten (IBLB, BOKU University, 2026).

Wandgebundenes System (FB_LW_mF)

Am Beispiel von FB_LW_mF (Zielfläche 7,28 m²) ist ein starker Anstieg der Bewässerungsgabe im Juli (686 l; 94,23 l/m²; täglicher Durchschnitt 3,04 l/m²) erkennbar, welche gleichmäßig bis zum Oktober 2024 (243 l; 33,38 l/m², täglicher Durchschnitt 1,08 l/m²) zurückgenommen wurde. Die Pflanzen befanden sich in dieser Vegetationsperiode noch in der Entwicklungs- und Anwuchsphase. Im Mai 2025 (295 l; 40,52 l/m²; täglicher Durchschnitt 1,30 l/m²) wurde mit einer vergleichbaren Menge als auch im Oktober 2024 gestartet. Aufgrund des fortgeschrittenen Entwicklungsstadium der Pflanzen, musste die Wassergabe mit Juni 2025 auf 925 l (127,06 l/m²; täglicher Durchschnitt 4,1 l/m²) erhöht werden. Im Juli (1092 l; 150 l/m²; täglicher Durchschnitt 4,84 l/m²) und August (955 l; 131,18 l/m²; täglicher Durchschnitt 4,23 l/m²) wurden geringe Anpassungen durchgeführt, aber die Bewässerungsmenge konnte sich im selben Bereich einpendeln. In beiden Perioden sind deutlich höhere Bewässerungsmengen im Vergleich zu den troggeordneten Vertikalbegrünungen erkennbar.

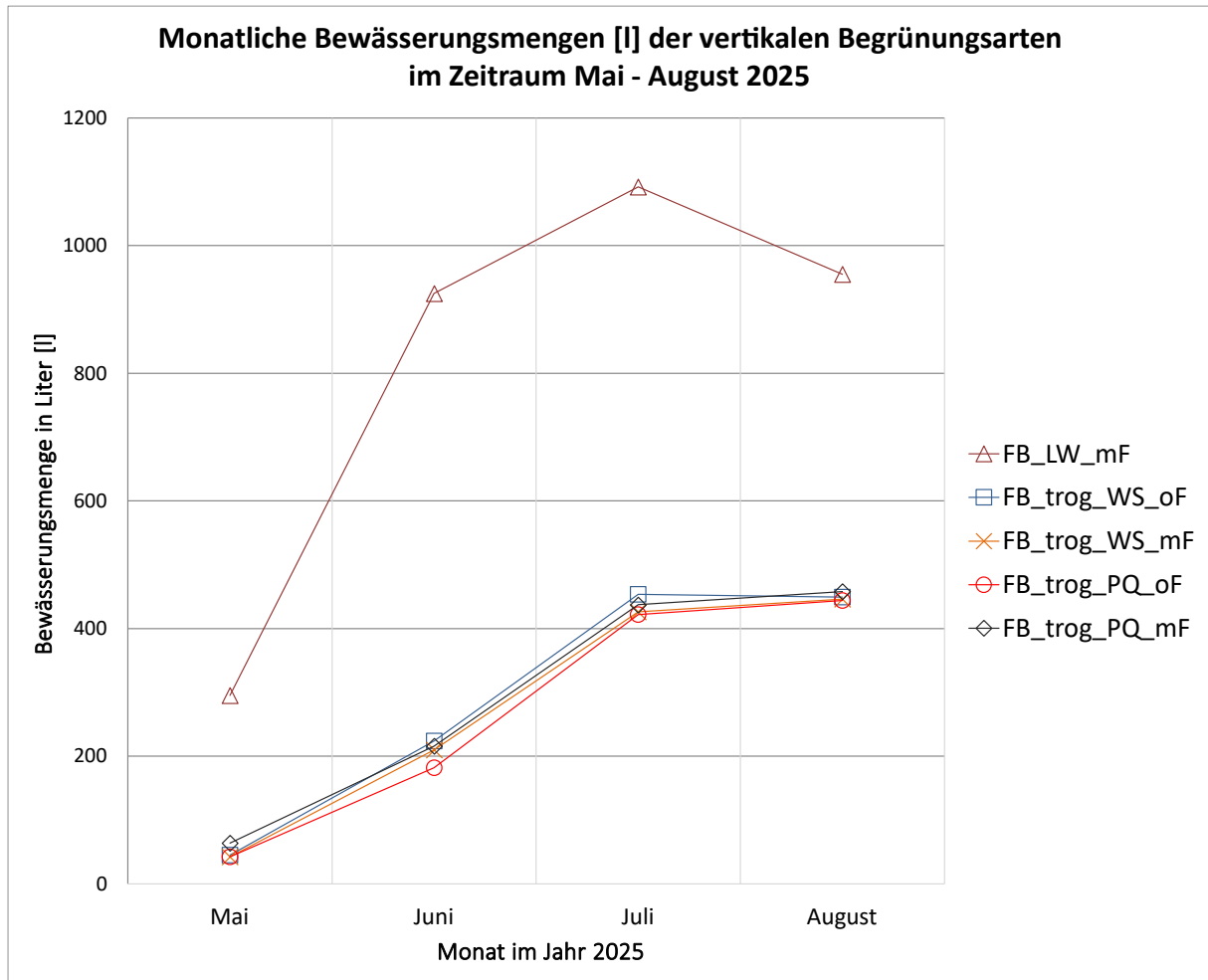


Abbildung 23: Monatliche Bewässerungsmenge in den Monaten Mai - August 2025 an den fünf vertikalen Begrünungsarten (IBLB, BOKU University, 2026).

***Wisteria sinensis* – Systeme (FB_trog_WS_oF und FB_trog_WS_mF)**

Die beiden Module mit *Wisteria sinensis* (FB_trog_WS_mF – Zielfläche 8,0 m², FB_trog_WS_oF – Zielfläche 10,16 m²) wurden in den beiden Vegetationsperioden identisch bewässert. Es sind geringe Abweichungen erkennbar, aber dies lässt sich auf unterschiedliche Leistungen der einzelnen Tropfer zurückführen. 2024 ist erkennbar, dass die Bewässerung von Mai (177,11 l; 22,14 l/m²; 0,71 l/m²/Tag; 188,59 l; 18,53 l/m²; 0,60 l/m²/Tag) bis Juli (34,45 l; 4,31 l/m²; 0,14 l/m²/Tag; 36,57 l; 3,59 l/m²; 0,12 l/m²/Tag) zurückgenommen wurde – dies ist dem Zustand der Pflanzen nach dem Spätfrost geschuldet. Mit zunehmender Regeneration der Pflanzen wurde die Bewässerung im August 2024 auf 122,17 l (15,27 l/m²; 0,49 l/m²/Tag) bzw. 127,93 l (12,57 l/m²; 0,41 l/m²/Tag) erhöht. Bis Oktober (27,69 l; 3,46 l/m²; 0,11 l/m²/Tag; 33,93 l; 3,33 l/m²; 0,11 l/m²/Tag) konnte eine gleichmäßige Rücknahme der Bewässerung vorgenommen werden. In der Vegetationsperiode 2025 konnten sich die bereits etablierten Pflanzen deutlich besser entwickeln, dies ist auch im Bewässerungsbedarf erkennbar. Im Mai (42,08 l; 5,26 l/m²; 0,17 l/m²/Tag; 44,84 l; 4,40 l/m²; 0,14 l/m²/Tag) wurde mit einer geringen Bewässerungsmenge gestartet, welche bis Juli (426,04 l; 53,26 l/m²; 1,72 l/m²/Tag; 453,76 l; 44,57 l/m²; 1,44 l/m²/Tag) und August (446,10 l; 55,76 l/m²; 1,80

l/m²/Tag; 449,34 l; 44,14 l/m²; 1,42 l/m²/Tag) gleichmäßig gesteigerte wurde und hier ihren Höhepunkt findet.

***Parthenocissus quinquefolia* – Systeme (FB_trog_PQ_oF und FB_trog_PQ_mF)**

An den Vertikalbegrünungen mit *Parthenocissus quinquefolia* (FB_trog_PQ_mF – Zielfläche 8,0 m², FB_trog_PQ_oF - Zielfläche 10,16 m²) lässt sich ein ähnliches Bild ablesen. Auch hier wurde die Wassergabe nach Mai 2024 (181,69 l; 22,71 l/m²; 0,73 l/m²/Tag, 177,11 l; 17,43 l/m²; 0,56 l/m²/Tag) zurückgenommen. Der Frostschaden war nicht so weitreichend und die Regeneration erfolgte schneller, weswegen hier schon im Juli (121,23 l; 15,15 l/m²; 0,49 l/m²/Tag; 114,38 l; 11,26 l/m²; 0,36 l/m²/Tag) erhöht werden konnte. Die höchste Wassergabe erfolgte im August 2024 mit 179,15 l; 22,39 l/m²; 0,72 l/m²/Tag (FB_trog_PQ_mF) und 174,45 l; 17,17 l/m²; 0,55 l/m²/Tag (FB_trog_PQ_oF). Auch an diesen Modulen ist eine gleichmäßige Zurücknahme bis Oktober (44,8 l; 5,60 l/m²; 0,18 l/m²/Tag, 43,6 l; 4,29 l/m²; 0,14 l/m²/Tag) erkennbar. In der Periode 2025 wurden alle vier troggeordneten Vertikalbegrünungsarten identisch bewässert. Es wurde mit Tiefstwerten von 62,76 l (7,97 l/m²; 0,26 l/m²/Tag) und 42,08 l (4,14 l/m²; 0,13 l/m²/Tag) im Mai gestartet und es ist eine Steigerung bis August 2025 auf 457,66 l; 57,21 l/m²; 1,85 l/m²/Tag (FB_trog_PQ_mF) und 444,05 l; 43,71 l/m²; 1,41 l/m²/Tag (FB_trog_PQ_oF) zu erkennen.

4.1.1.1 Bewässerungszyklen der troggeordneten Vertikalbegrünungen in den Vegetationsperioden 2024 und 2025

Die einzelnen Module werden über eigene Bewässerungskreise angesteuert. Dementsprechend können Bewässerungsintervalle individuell angepasst werden, aber eine zeitgleiche Bewässerung von mehreren Modulen war nicht möglich, wodurch die Zeiten durch die Rotation der Begrünungstypen etwas schwanken. Aus diesem Grund werden in den Tabellen nur die Zeitfenster morgens (5:50 – 6:50 Uhr), mittags (12:50 Uhr) und abends (17:05 – 18:10 Uhr) angeführt. Die Bewässerung an den troggeordneten Vertikalbegrünungen erfolgte über 15 Einzeltropfer (5 Stk. Je Pflanzgefäß), was ca. 0,53 l/min pro Modul entsprach und dementsprechend 0,18 l/min je Pflanzgefäß. Abgesehen von den üblich eingestellten Intervallen wurden auch Bewässerungstrigger in Verbindung mit aktuellen Wetterprognosen eingestellt. So findet keine Beregnung statt, wenn eine Temperatur unter 5 °C vorhergesagt wird. Dasselbe gilt auch bei einer Niederschlagswahrscheinlichkeit von über 80 %. Außerdem wird eine automatische Bewässerungsreduzierung von 30 % bei einer prognostizierten Temperatur von 20 °C oder weniger vorgenommen. In der Spalte „Anmerkung“ sind diese Bewässerungstrigger aufgeführt. Am 19.09.2024 ist „Ungültig“ aufgeführt. Dies hat den Hintergrund, dass an diesem Tag im Zuge des September-Monitorings die Überprüfung der Bewässerungsmenge durch die Tropfbewässerung an den troggeordneten Vertikalbegrünungen durchgeführt wurde, wie im oberen Absatz bereits beschrieben. Die Bewässerungsintervalle wurden innerhalb der Vegetationsperiode zeitlich angepasst. Die Reduktion oder Erhöhung wurde je nach Witterung und Feuchtigkeit der Tröge vor Ort vorgenommen. Zeitlich wurden alle vier Module jeweils am Morgen (Montag, Mittwoch, Freitag und Sonntag) sowie am Abend (Montag, Mittwoch und Freitag) bewässert. Mitte Oktober wurde eine Reduktion der Bewässerung auf

Montag und Freitag morgens sowie Mittwoch am Abend eingestellt. Die genauen Bewässerungszeiten sind Anhang 7.3 zu entnehmen.

4.1.1.2 Bewässerungszyklen der wandgebundenen Vertikalbegrünung in den Vegetationsperioden 2024 und 2025

Die wandgebundene Vertikalbegrünung wurde über spezielle Tropfrohre mit einem Abstand von 20 cm pro Tropföffnung bewässert. Über jeder Modulebene sitzt eines dieser Rohre. Jeder Modulträger besitzt Öffnungen zur Aufnahme der Bewässerung an der Oberseite, bzw. welche an der Unterseite zur Entwässerung. Die einzelnen Vegetationsmodule werden somit direkt bewässert. Die unteren Module profitieren zusätzlich vom Kaskadeneffekt der darüberliegenden Vegetationsmodule. Je Minute erfolgte eine Wasserabgabe von ca. 2,5 - 3,0 Liter.

Tabelle 11: Übersicht Bewässerungszeiten der wandgebundenen Vertikalbegrünungen 2024 (IBLB, BOKU University, 2024).

Modulcode	Zyklusbeginn	Zyklusende	Intervall	Wochentage	Anmerkung
FB_LW_mF	12.06.2024	25.06.2024	3 min.	Tägl. – morgens und abends	-
	26.06.2024	04.07.2024	4 min.	Tägl. – morgens, mittags, abends	Prognose >30°C
	05.07.2024	22.07.2024	3 min.		-
	23.07.2024	19.08.2024	3 min.	Tägl. – morgens und abends	-
	20.08.2024	29.08.2024	2 min.		-
	30.08.2024	15.10.2024	3 min.		-
	16.10.2024	11.11.2024	3 min.	Mo/Fr – morgens, Mi – abends	-
	12.11.2024	03.12.2024	0 min.	Nicht bewässert	Frostschaden
	04.12.2024	15.12.2024	manuell (5 min.)	1x wöchentlich	-
	16.12.2024	30.04.2025	4 min.	Mi/Sa – mittags	Winterbetrieb

Tabelle 11 zeigt eine Übersicht der Bewässerungszyklen 2024. Nach der Installation am 11. Juni 2024 wurde die Fassadenbegrünung ab 12. Juni 2024 zweimal täglich für jeweils drei Minuten bewässert. Nach Anraten der NatureBase GmbH wurde ein Zyklus am Mittag hinzugefügt. Nach einer Kontrolle beim Juli-Monitoring wurde der Bewässerungszyklus am Mittag wieder ausgesetzt, weil die Bepflanzung sehr feucht wirkte und sich die Pflanzen von Juni bis Juli nur mäßig entwickelten. Die Bewässerungsintervalle am Morgen und Abend wurden bis Mitte Oktober so beibehalten und ab 16.10.2024 auf eine Wassergabe zu drei Zeiten je Woche zurückgedreht. Aufgrund eines Frostschadens der Bewässerungsanlage fand vom 12.11.2024 bis 03.12.2024 keine aktive Bewässerung statt. Bis 15.12.2024 konnte nur eine manuelle Bewässerung erfolgen. Für die restlichen Wintermonate sind Bewässerungszyklen nur noch zweimal wöchentliche durchgeführt worden. Hierfür wurde eine Startzeit um 12 Uhr mittags gewählt, weil die Gefahr von Frostschäden zur Mittagszeit geringer ist.

Die Bewässerungszyklen der LivingWall werden über dieselben Trigger durch Wettervorhersagen gedrosselt oder ausgesetzt wie die der troggebundenen Vertikalbegrünungen. Da die wandgebundene Fassadenbegrünung tendenziell bei hoher Hitze schneller austrocknet als die Pflanztröge, wurde bei diesem Modul zusätzlich eine 30 % höhere Bewässerung bei einer Temperaturprognose von über 30 °C eingestellt.

Tabelle 12: Übersicht Bewässerungszeiten der wandgebundenen Vertikalbegrünungen 2025 (IBLB, BOKU University, 2026).

Modulcode	Zyklusbeginn	Zyklusende	Intervall	Wochentage	Anmerkung
FB_LW_mF	01.05.2025	12.05.2025	3 min.	Tägl. – morgens	-
	13.05.2025	13.05.2025	7 min.		Prognose <20°C
	14.05.2025	14.05.2025	10 min.		-
	15.05.2025	18.05.2025	7 min.		Prognose <20°C
	19.05.2025	02.06.2025	10 min.		-
	03.06.2025	08.06.2025	6 min.	Tägl. – morgens und abends	-
	09.06.2025	09.06.2025	5 min.		Prognose <20°C
	10.06.2025	15.06.2025	6 min.		-
	17.06.2025	27.06.2025	10 min.	Tägl. – morgens und abends	Fehleinstellung Standortwechse
	28.06.2025	01.07.2025	15 min.		I
	01.07.2025	03.07.2025	7 min.	Tägl. – morgens, mittags, abends	Prognose >30 °C
	04.07.2025	17.07.2025	6 min.		-
	17.07.2025	20.07.2025	5 min.		-
	21.07.2025	21.07.2025	6 min.		Prognose >30 °C
	22.07.2025	04.08.2025	5 min.		-
	05.08.2025	14.08.2025	5 min.	Tägl. – morgens und abends	-
	15.08.2025	16.08.2025	19 min.	Tägl. – morgens und abends	Prognose >30 °C
	17.08.2025	19.08.2025	15 min.		Fehleinstellung Standortwechse
	20.08.2025	22.08.2025	5 min.		I
	23.08.2025	24.08.2025	4 min.		-
	25.08.2025	31.08.2025	5 min.		Prognose <20°C
					-

4.1.2 Pflanzenspezifische Parameter Vertikalbegrünung (Boku)

Pflanzenspezifische Parameter wurden an den vertikalen Begrünungsarten in den Vegetationsperioden 2024 und 2025 gemonitort. Die folgenden Abbildungen zeigen exemplarisch das Wuchsverhalten einzelner Teststände im besagten Zeitraum.

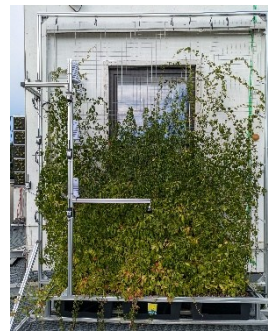
Tabelle 13: Wuchsverhalten am Beispiel FB_trog_PQ_oF in den Vegetationsperioden 2024 und 2025 (IBLB, BOKU University, 2024/2025).



Juni 2024



Juli 2024



August 2024



September 2024



Mai 2025



Juni 2025



Juli 2025

**Wuchsverhalten
FB_trog_PQ_oF**

06 – 09/2024

05 – 07/2025

Am Beispiel von FB_trog_PQ_oF ist 2024 eine starke Deckung in den unteren Quadranten erkennbar. Durch das zunehmende Pflanzenwachstum konnten auch zunehmend die Quadranten 3 und 4 erschlossen werden. 2025 zeigt ein anderes Bild, hier ist allgemein ein lichterer Wuchs zu sehen. Der dichteste Bereich befand sich in der Mitte der Kletterhilfe. Der schütterere Pflanzenkörper ist auch den Pilzbefall in dieser Vegetationsperiode zurückzuführen.

Tabelle 14: Wuchsverhalten am Beispiel FB_trog_WS_oF in den Vegetationsperioden 2024 und 2025 (IBLB, BOKU University, 2024/2025).



Juni 2024



Juli 2024



August 2024



September 2024



Mai 2025



Juni 2025



Juli 2025

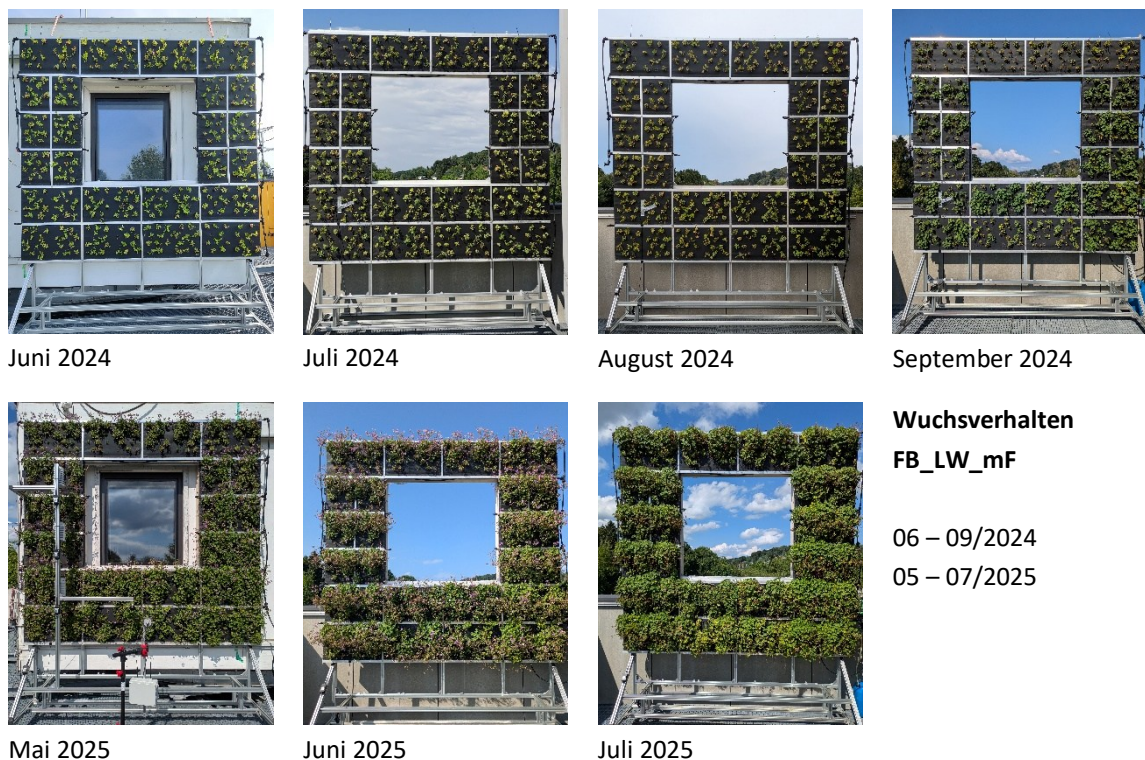
Wuchsverhalten FB_trog_WS_oF

06 – 09/2024

05 – 07/2025

Bedingt durch den starken Frostschaden war der Wuchs von FB_trog_WS_oF in der Vegetationsperiode 2024 sehr schleppend und erst im August/September waren größere Wachstumsschübe erkennbar. Im Jahr 2025 konnte eine weitaus bessere Entwicklung verzeichnet werden. Im Juli 2025 ist bereits ein Bewuchs an der gesamten Kletterhilfe mit teilweiser Deckung erkennbar.

Tabelle 15: Wuchsverhalten am Beispiel FB_LW_mF in den Vegetationsperioden 2024 und 2025 (IBLB, BOKU University, 2024/2025; M. Majcen, 2024).



Auch die Pflanzen in FB_LW_mF benötigten 2024 eine gewisse Entwicklungszeit. Im September 2024 ist ein größeres Wachstum nachweisbar, was sich mit der Optimierung der Düngung begründen lässt. Von Mai bis Juli 2025 konnte ein sehr gutes Wachstum verzeichnet werden und eine hohe Deckung in der Vegetationsperiode 2025 erreicht werden.

4.1.2.1 Kubisches Pflanzenvolumen [m³]

Die grafische Darstellung des kubischen Pflanzenvolumens [m³] erfolgt in den nachfolgenden Säulendiagrammen (Abbildung 24 bis Abbildung 28). Aufgrund der unterschiedlichen Flächenausdehnungen der Begrünungssysteme variieren die Größen der jeweiligen Quadranten und damit auch deren ermittelte Volumina. So würde beispielsweise ein Quadrant der üppig bewachsenen Dachbegrünung ein deutlich geringeres Volumen aufweisen als ein Quadrant einer troggebundenen Vertikalbegrünung, selbst wenn dieser nur teilweise bewachsen ist. Zur Verbesserung der Vergleichbarkeit wurden die Volumina daher flächenbezogen normiert und in der Einheit m³ pro m² dargestellt.

4.1.2.1.1 *Parthenocissus quinquefolia* – Systeme (FB_trog_PQ_oF und FB_trog_PQ_mF)

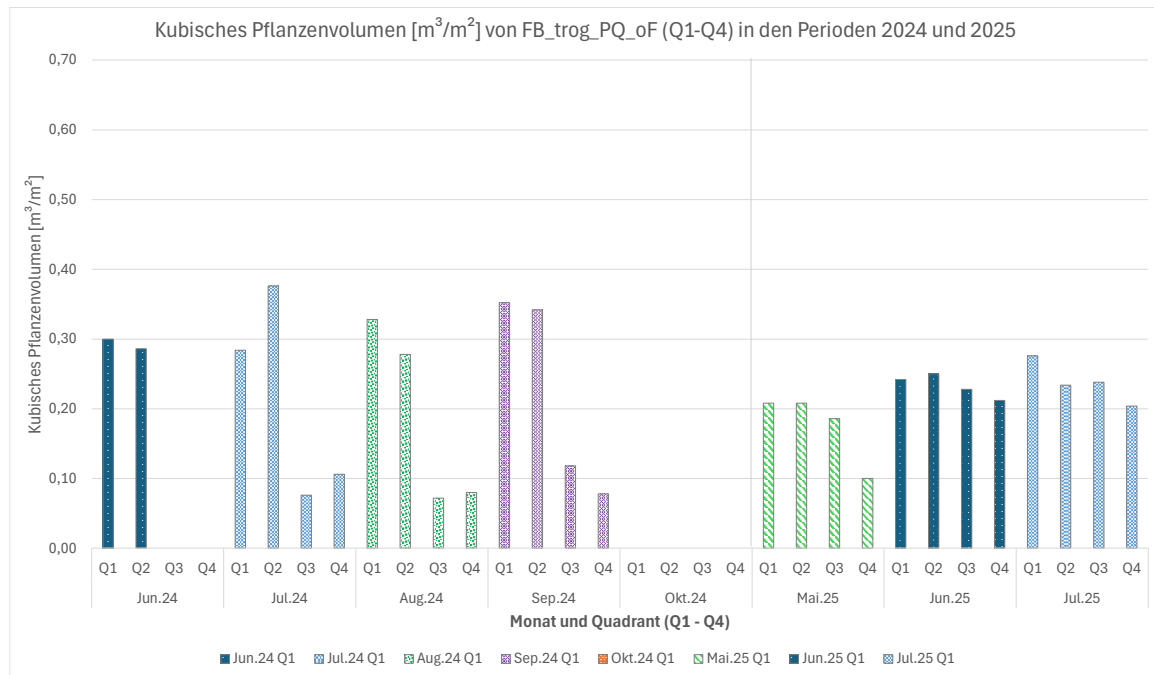


Abbildung 24: Entwicklung des kubischen Pflanzenvolumens in m^3/m^2 je Quadrant (Q1-Q4) an FB_trog_PQ_oF in den Vegetationsperioden 2024 und 2025 (IBLB, BOKU University, 2025).

Im Fall von FB_trog_PQ_oF zeigte sich eine deutliche Differenz der Biomasse zwischen den unteren (Q1/Q2) und oberen Quadranten (Q3/Q4). In allen vier Quadranten war eine Steigerung innerhalb der Vegetationsperiode zu erkennen. Im Oktober war herbstbedingt bereits das Laub abgefallen, somit konnten hier keine Aufnahmen durchgeführt werden. In Q1 und Q2 wurden im Juni Werte von $0,30 \text{ m}^3/\text{m}^2$ und $0,29 \text{ m}^3/\text{m}^2$ gemessen. Hier kam es zu einer Steigerung auf $0,35 \text{ m}^3/\text{m}^2$ (Q3) und $0,34 \text{ m}^3/\text{m}^2$ (Q4) im September. Die oberen Quadranten (Q3/Q4) waren im Juni noch nicht bewachsen. Bis September konnten sich Volumina von $0,12 \text{ m}^3/\text{m}^2$ (Q3) und $0,08 \text{ m}^3/\text{m}^2$ (Q4) bilden.

Das System FB_trog_PQ_oF zeigte im Vergleich zum Jahr 2024 ein gleichmäßigeres Bild im Beobachtungszeitraum 2025. Das kubische Pflanzenvolumen nahm flächendeckend in allen Quadranten zu, wobei im Mai 2025 noch ein größerer Unterschied erkennbar war. Die unteren Quadranten (Q1/Q2) lagen bei $0,21 \text{ m}^3/\text{m}^2$, während die oberen mit Quadranten mit $0,19 \text{ m}^3/\text{m}^2$ (Q3) und $0,10 \text{ m}^3/\text{m}^2$ (Q4) gerinter eWerte aufwiesen. In den Monaten Juni (Q1 $0,24 \text{ m}^3/\text{m}^2$; Q2 $0,25 \text{ m}^3/\text{m}^2$; Q3 $0,23 \text{ m}^3/\text{m}^2$; Q4 $0,21 \text{ m}^3/\text{m}^2$) und Juli (Q1 $0,28 \text{ m}^3/\text{m}^2$; Q2 $0,23 \text{ m}^3/\text{m}^2$; Q3 $0,24 \text{ m}^3/\text{m}^2$; Q4 $0,20 \text{ m}^3/\text{m}^2$) konnte ein Zuwachs in allen Quadranten festgestellt werden. Die Werte zwischen den Quadranten schwanken leicht, dennoch verlief das Wachstum insgesamt gleichmäßig, mit einer leichten Dominanz der unteren Systemhälfte.

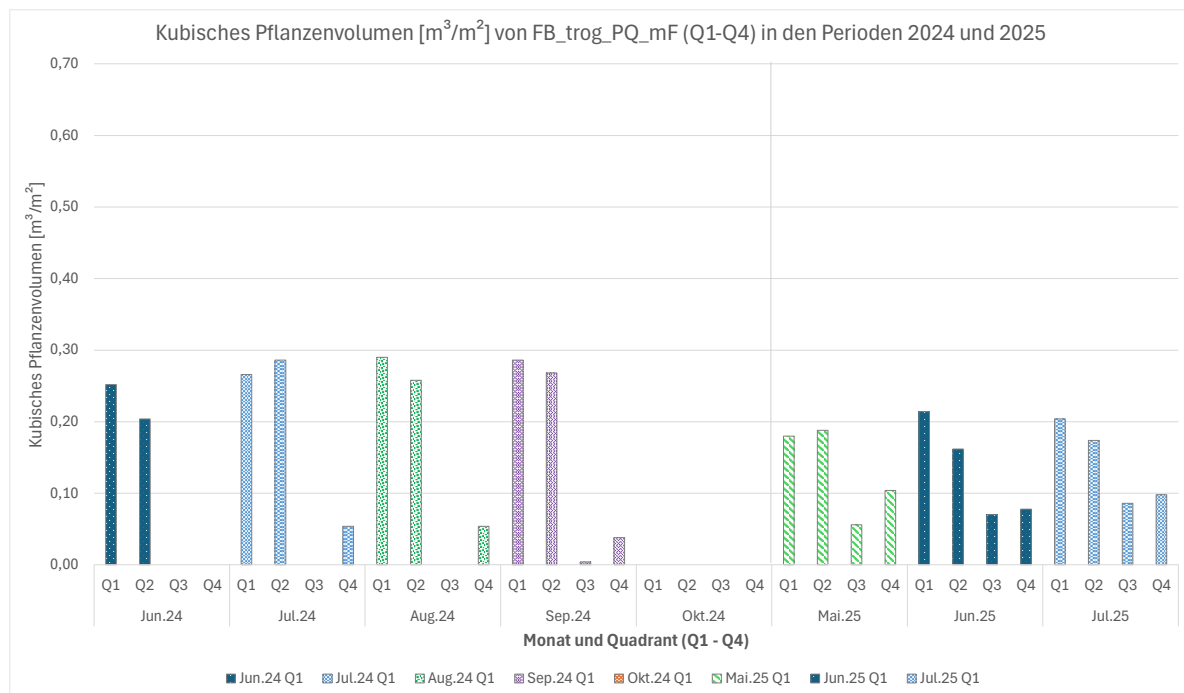


Abbildung 25: Entwicklung des kubischen Pflanzenvolumens in m^3/m^2 je Quadrant (Q1-Q4) an FB_trog_PQ_mF in den Vegetationsperioden 2024 und 2025 (IBLB, BOKU University, 2025).

Das *Parthenocissus*-System mit Fensteraussparung (FB_trog_PQ_mF) zeigte ein vergleichbares Bild wie FB_trog_PQ_oF. Die Werte fallen insgesamt etwas geringer aus, aber auch mit einer hohen Differenz zwischen den horizontalen Systemhälften. Q1 und Q2 hatten im Juni Volumina von $0,25 \text{ m}^3/\text{m}^2$ und $0,20 \text{ m}^3/\text{m}^2$. Im September war eine geringe Steigerung auf $0,29 \text{ m}^3/\text{m}^2$ (Q3) und $0,26 \text{ m}^3/\text{m}^2$ (Q4) nachweisbar. Auch hier konnte die Vegetation bis Juni noch nicht bis zu den oberen Quadranten vor-dringen (Q3/Q4 = $0,00 \text{ m}^3/\text{m}^2$). In Q4 konnte sich ein leichter Bewuchs entwickeln und im August ein Wert von $0,05 \text{ m}^3/\text{m}^2$ aufgezeichnet werden. Quadrant 3 blieb in dieser Vegetationsperiode ohne Bewuchs.

Das System FB_trog_PQ_mF wies 2025 geringere Volumina und ein stärker differenziertes vertikales Wachstumsbild auf. Im Mai lagen die Werte in den unteren Quadranten bei $0,18 \text{ m}^3/\text{m}^2$ (Q1) und $0,19 \text{ m}^3/\text{m}^2$ (Q2), während die oberen Quadranten deutlich niedrigere Werte aufwiesen ($0,06 \text{ m}^3/\text{m}^2$ (Q3), $0,10 \text{ m}^3/\text{m}^2$ (Q4)). Bis Juni kam es zu einer moderaten Zunahme in allen Quadranten, besonders in Q1 ($0,21 \text{ m}^3/\text{m}^2$) und Q3 ($0,07 \text{ m}^3/\text{m}^2$). Im Juli erreichten die Quadranten Q1–Q4 Werte von $0,20 \text{ m}^3/\text{m}^2$, $0,17 \text{ m}^3/\text{m}^2$, $0,09 \text{ m}^3/\text{m}^2$ und $0,10 \text{ m}^3/\text{m}^2$. Das Wachstum in der Vegetationsperiode 2025 ist somit gering bzw. schwankt zwischen den untersuchten Monaten.

4.1.2.1.2 *Wisteria sinensis* – Systeme (FB_trog_WS_oF und FB_trog_WS_mF)

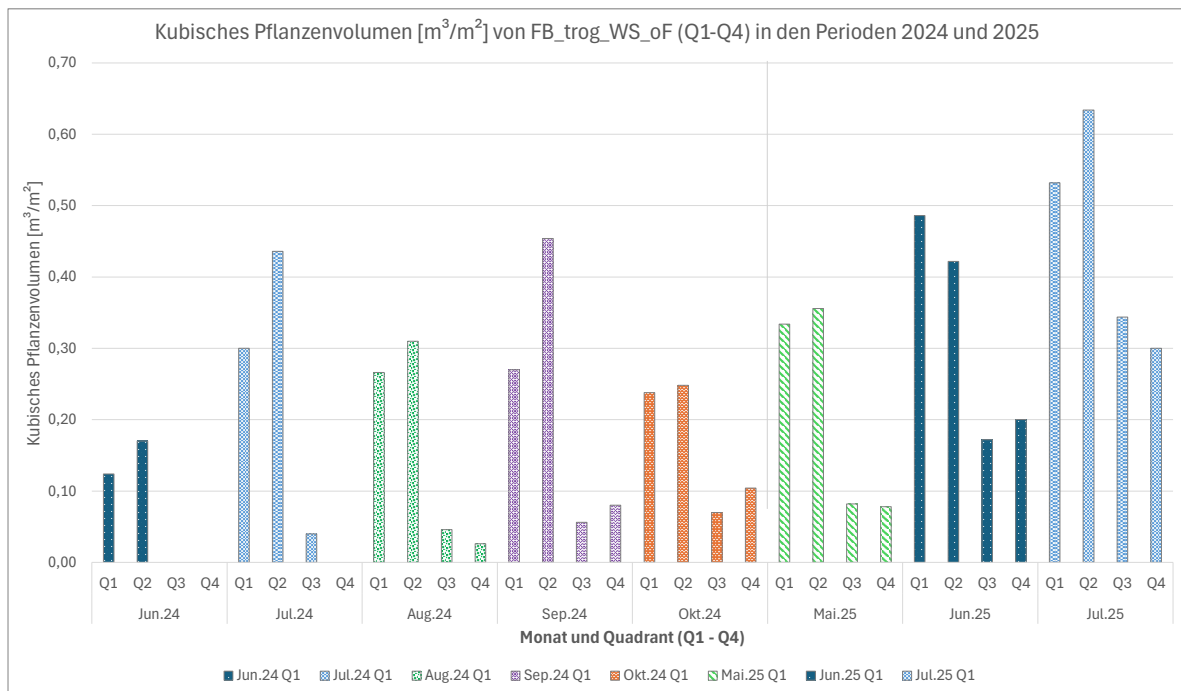


Abbildung 26: Entwicklung des kubischen Pflanzenvolumens in m³/m² je Quadrant (Q1-Q4) an FB_trog_WS_oF in den Vegetationsperioden 2024 und 2025 (IBLB, BOKU University, 2025).

Das *Wisteria*-System *FB_trog_WS_oF* zeigte in den unteren Quadranten (Q1, Q2) eine deutlich höhere Biomasseentwicklung als in den oberen (Q3, Q4). Dennoch war in allen vier Quadranten im Verlauf des Untersuchungszeitraums eine Zunahme der Vegetationsvolumina erkennbar. In den oberen Quadranten, die im Juni noch kein messbares Volumen aufwiesen, stieg das Volumen bis Oktober auf 0,07 m³/m² in Q3 und 0,10 m³/m² in Q4 an. In den unteren Quadranten war ein deutlich stärkerer Anstieg zu verzeichnen: Q1 zeigte im Juni ein Volumen von 0,12 m³/m² und erreichte im Juli den Höchstwert von 0,30 m³/m². In Q2 lag das Ausgangsvolumen im Juni bei 0,17 m³/m² und stieg bis September auf den Maximalwert von 0,45 m³/m² an. Im Oktober war in beiden unteren Quadranten ein Rückgang der Volumina festzustellen.

Das System *FB_trog_WS_oF* zeigt die deutlichste Zunahme der Biomasse aller untersuchten trog-basierten Begrünungstypen. Bereits im Mai 2025 lagen die unteren Quadranten bei 0,33 m³/m² (Q1) und 0,36 m³/m² (Q2), während die oberen Quadranten deutlich geringere Volumina aufwiesen (0,08 m³/m² (Q3), 0,08 m³/m² (Q4)). Im Juni war eine deutliche Zunahme sichtbar, vor allem in den unteren Quadranten (0,49 m³/m² (Q1), 0,42 m³/m² (Q2)), während die oberen mit 0,17 m³/m² und 0,20 m³/m² nachzogen. Bis Juli konnten die Höchstwerte aufgezeichnet werden und das Volumen stieg in Q1 auf 0,53 m³/m² und in Q2 sogar auf 0,63 m³/m², während Q3 und Q4 mit 0,34 m³/m² bzw. 0,30 m³/m² ebenfalls deutlich zulegten. Das System zeige eine ausgeprägte Wachstumsdynamik, mit starkem vertikalem Aufwuchs über die Sommermonate.

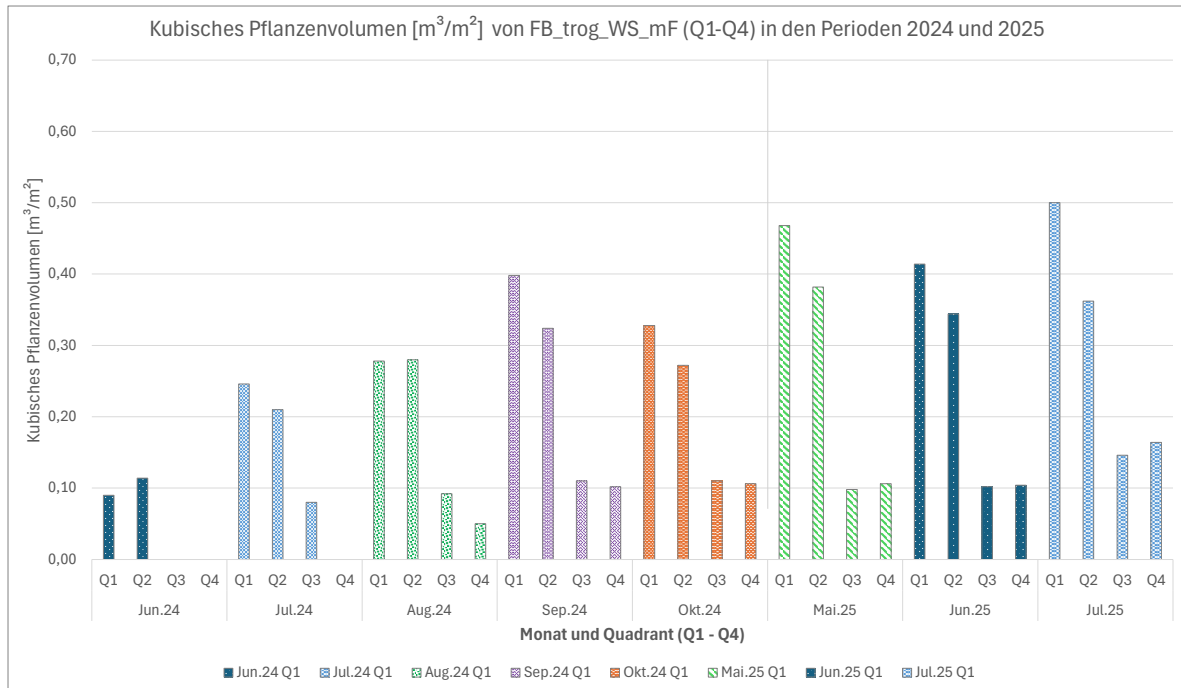


Abbildung 27: Entwicklung des kubischen Pflanzenvolumens in m^3/m^2 je Quadrant (Q1-Q4) an FB_trog_WS_mF in den Vegetationsperioden 2024 und 2025 (IBLB, BOKU University, 2025).

Ein vergleichbares Muster zeigte sich im System *FB_trog_WS_mF*. Auch hier traten deutliche Unterschiede zwischen der oberen und unteren Systemhälfte auf. Die oberen Quadranten (Q3, Q4) wiesen im Juni noch kein messbares Pflanzenvolumen auf, bis Oktober jedoch eine Zunahme auf jeweils $0,11 \text{ m}^3/\text{m}^2$. In den unteren Quadranten (Q1, Q2) konnten bereits im Juni Volumina von $0,09 \text{ m}^3/\text{m}^2$ (Q1) und $0,11 \text{ m}^3/\text{m}^2$ (Q2) gemessen werden. Die höchsten Werte wurden im September erreicht, mit $0,40 \text{ m}^3/\text{m}^2$ in Q1 und $0,32 \text{ m}^3/\text{m}^2$ in Q2. Auch hier kam es im Oktober zu einem Rückgang der Volumina.

Auf bei FB_trog_WS_mF war ein Zuwachs erkennbar, wenngleich auf insgesamt niedrigerem Niveau. Im Mai 2025 lagen die Werte bei $0,47 \text{ m}^3/\text{m}^2$ (Q1) und $0,38 \text{ m}^3/\text{m}^2$ (Q2) in der unteren Systemhälfte, während Q3 und Q4 mit $0,10 \text{ m}^3/\text{m}^2$ und $0,11 \text{ m}^3/\text{m}^2$ noch spärlich bewachsen waren. Im Juni zeigte sich in den unteren Quadranten eine leichte Reduktion ($0,41 \text{ m}^3/\text{m}^2$ (Q1), $0,34 \text{ m}^3/\text{m}^2$ (Q2)), gefolgt von einer deutlichen Steigerung im Juli auf $0,50 \text{ m}^3/\text{m}^2$ (Q1) und $0,36 \text{ m}^3/\text{m}^2$ (Q2). Die oberen Quadranten verzeichneten bis Juli eine Zunahme auf $0,15 \text{ m}^3/\text{m}^2$ (Q3) und $0,16 \text{ m}^3/\text{m}^2$ (Q4). Insgesamt zeigt sich hier ein kräftiger, aber verzögerter Aufwuchs in der oberen Systemhälfte, mit einem weiterhin dominanten unteren Vegetationsbereich.

4.1.2.1.3 Wandgebundenes System (FB_LW_mF)

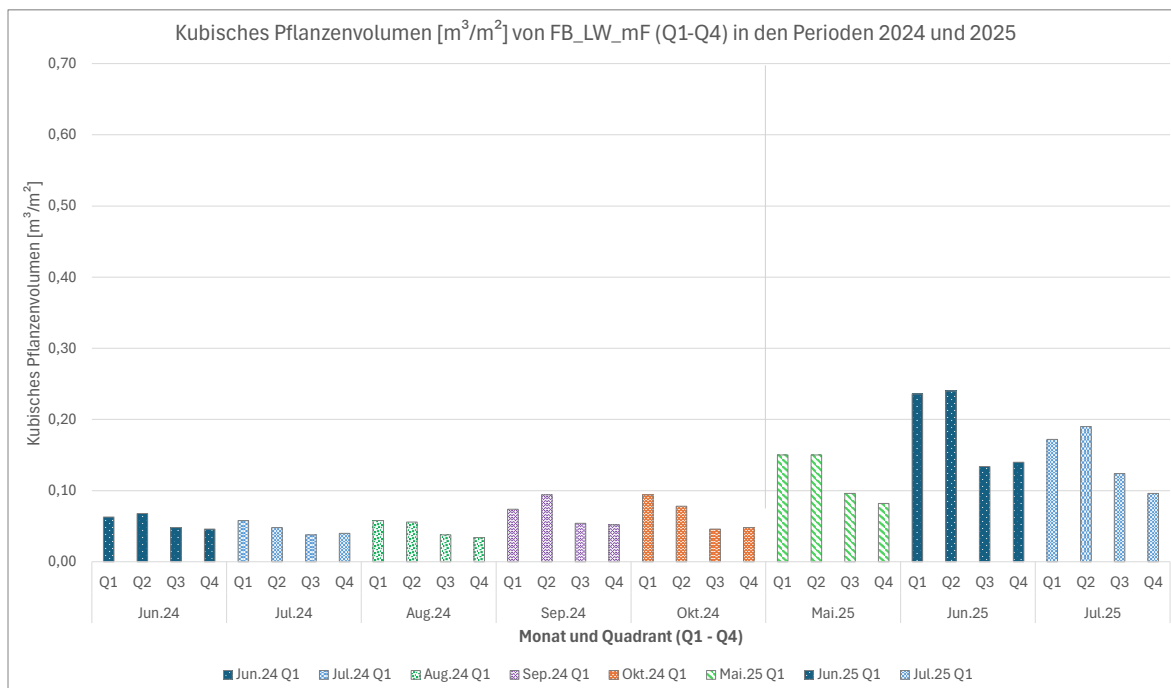


Abbildung 28: Entwicklung des kubischen Pflanzenvolumens in m^3/m^2 je Quadrant (Q1-Q4) an FB_LW_mF in den Vegetationsperioden 2024 und 2025 (IBLB, BOKU University, 2025).

Das wandgebundene System weist ein durchweg niedriges Volumenniveau auf, wobei im Spätsommer ein Anstieg erkennbar ist (Installation Düngepumpe im August). Besonders die beiden unteren Quadranten (Q1/Q2) konnten im September (Q1 $0,07 \text{ m}^3/\text{m}^2$; Q2 $0,09 \text{ m}^3/\text{m}^2$) und Oktober (Q1 $0,09 \text{ m}^3/\text{m}^2$; Q2 $0,08 \text{ m}^3/\text{m}^2$) profitieren

Das FB_LW_mF-System weist insgesamt geringere Biomassewerte auf, mit einer leichten Zunahme über den Sommer hinweg. Im Mai 2025 lagen die unteren Quadranten bei $0,15 \text{ m}^3/\text{m}^2$, während die oberen mit $0,10 \text{ m}^3/\text{m}^2$ (Q3) und $0,08 \text{ m}^3/\text{m}^2$ (Q4) deutlich darunter lagen. Bis Juni stiegen die Volumina gleichmäßig an und erreichten mit $0,24 \text{ m}^3/\text{m}^2$ (Q1/Q2), $0,13 \text{ m}^3/\text{m}^2$ (Q3) und $0,14 \text{ m}^3/\text{m}^2$ (Q4) Höchstwerte im Betrachtungszeitraum 2025. Im Juli zeigte sich besonders in Q1 ($0,17 \text{ m}^3/\text{m}^2$) und Q4 ($0,10 \text{ m}^3/\text{m}^2$) eine leichte Abnahme. Das Wachstum bleibt auf moderatem Niveau, mit klarer Dominanz der unteren Systemhälfte.

4.1.2.2 Wall Leaf Area Index [WLAI]

Die Darstellung der Ergebnisse zum Wall Leaf Area Index (Auswertung von Vertikalbegrünungen) erfolgen für die Vegetationsperioden 2024 (Juli – Oktober) und 2025 (Mai – Juli). Es werden jeweils Mittelwerte von 6 Einzelmessungen an zwei Messpunkten je Quadrant dargestellt [n=6]. Das Monitoringergebnis 2024 verdeutlicht anhand der troggebundenen Vertikalbegrünungssysteme (FB_trog_PQ_oF, FB_trog_PQ_mF, FB_trog_WS_oF, FB_trog_WS_mF) signifikante Unterschiede zwischen den unteren (Q1/Q2) und oberen Quadranten (Q3/Q4). Im Monitoringjahr 2025 zeigten die Messergebnisse der troggebundenen Vertikalbegrünungssysteme (FB_trog_PQ_oF, FB_trog_PQ_mF, FB_trog_WS_oF, FB_trog_WS_mF) eine zunehmende Konvergenz der Messwerte zwischen den oberen und unteren Quadranten.

Parthenocissus quinquefolia – Systeme (FB_trog_PQ_oF und FB_trog_PQ_mF)

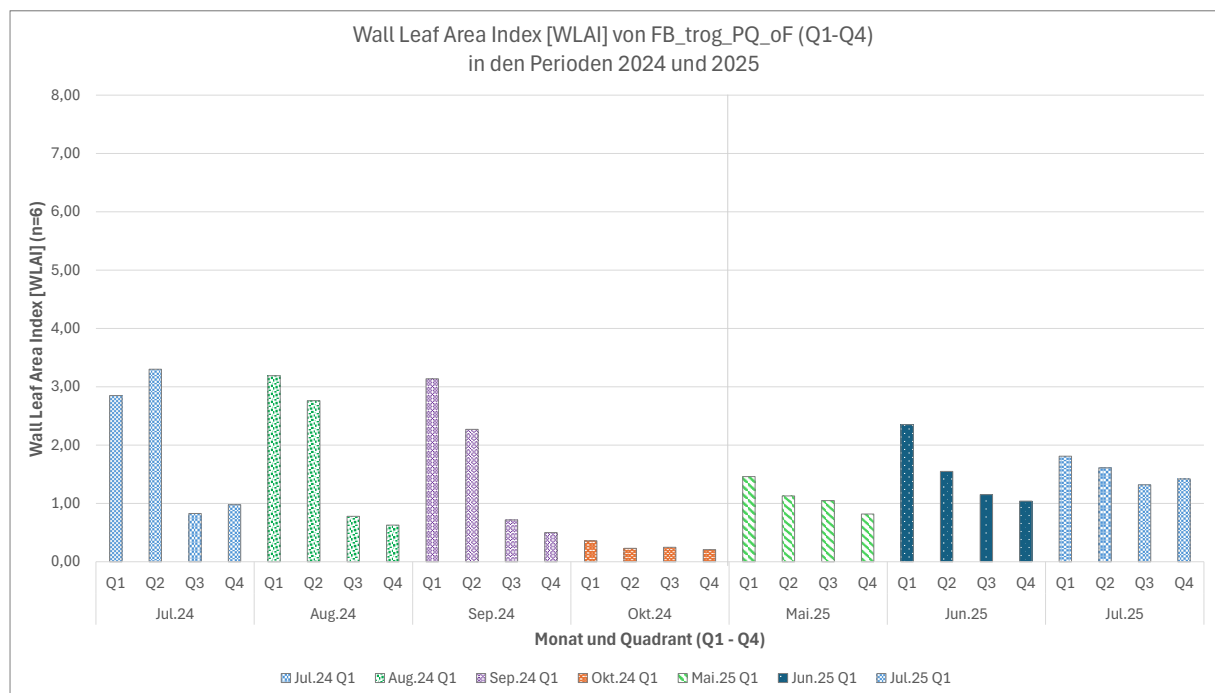


Abbildung 29: Entwicklung des WLAI je Quadrant (Q1-Q4) an FB_trog_PQ_oF in den Vegetationsperioden 2024 und 2025 (IBLB, BOKU University, 2025).

Beim Begrünungstyp FB_trog_PQ_oF wurde am 14.08.2024 in Quadrant 1 ein durchschnittlicher WLAI-Wert von 3,19 und am 18.07.2024 in Quadrant 2 ein Wert von 3,30 ermittelt. Im Gegensatz dazu lagen die Maximalwerte der oberen Quadranten im Juli 2024 deutlich niedriger – bei 0,83 (Q3) und 0,98 (Q4).

Am System FB_trog_PQ_oF zeigt sich eine zunehmende Angleichung der WLAI-Werte zwischen den vier Quadranten. Im Juni wurde in Quadrant 1 ein Maximalwert von 2,35 erfasst, während der

niedrigste Wert mit 0,82 in Quadrant 4 im Mai 2025 auftrat. Die übrigen Mittelwerte liegen im Bereich zwischen 1,04 und 1,81, was auf eine homogenere Vegetationsentwicklung innerhalb der Zielfläche hinweist. Die im Vergleich zu 2024 insgesamt geringeren Maximalwerte lassen sich durch die reduzierte Biomasse infolge des Pilzbefalls erklären.

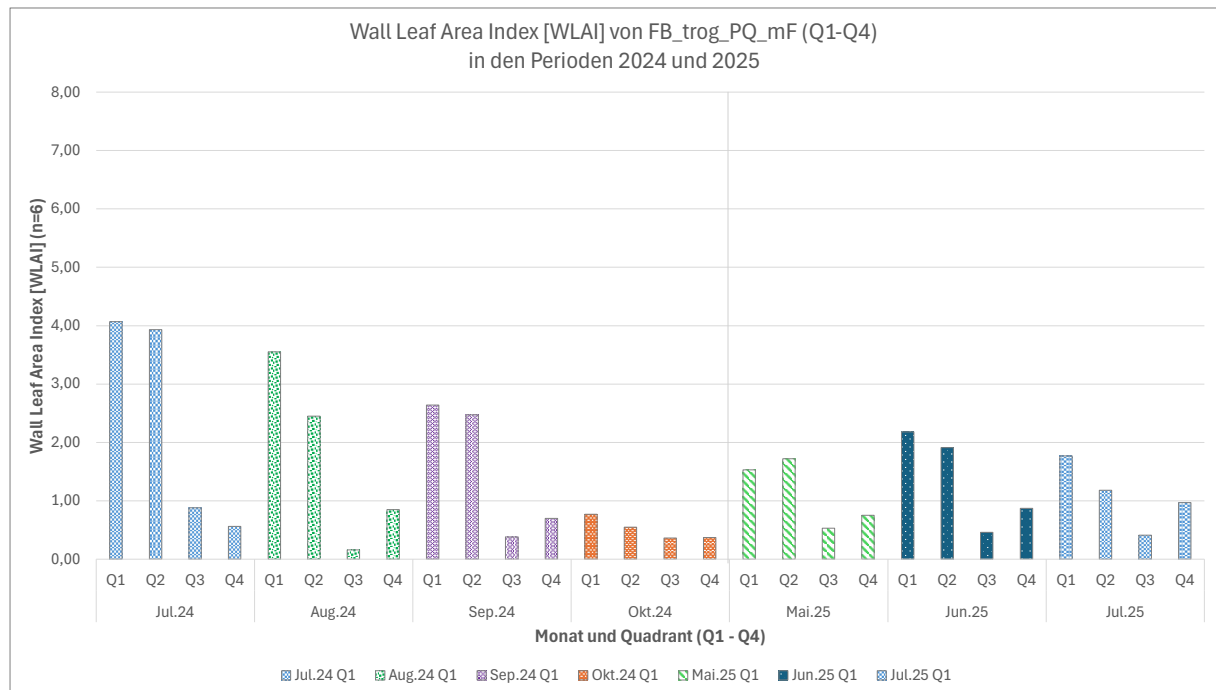


Abbildung 30: Entwicklung des WLAI je Quadrant (Q1-Q4) an FB_trog_PQ_mF in den Vegetationsperioden 2024 und 2025 (IBLB, BOKU University, 2025).

Ein ähnliches Muster zeigt FB_trog_PQ_mF das im Juli 2024 die höchsten Mittelwerte mit 4,07 (Q1) und 3,93 (Q2) aufwies. Die oberen Quadranten erreichten mit 0,88 (Q3; 18.07.2024) und 0,85 (Q4; 14.08.2024) vergleichbare Werte wie FB_trog_PQ_oF. Auffällig ist, dass die WLAI-Werte von FB_trog_PQ_mF nach dem Juli kontinuierlich abnehmen. Diese Entwicklung lässt auf einen Rückgang der Biomasse durch den leichten Pilzbefall schließen. Im Oktober 2024 wurden bei beiden Parthenocissus-Systemen sehr niedrige Werte gemessen, da das Laub zu diesem Zeitpunkt bereits vollständig abgefallen war und somit nur noch die Gehölzstruktur und die Rankhilfen erfasst wurden.

Die Werte des Systems FB_trog_PQ_mF zeigen ein ähnliches Muster wie im Monitoringjahr 2024. Auch hier sind die Gesamtwerte tendenziell niedriger, jedoch bestehen weiterhin deutliche Unterschiede zwischen den oberen und unteren Quadranten. Am 12.06.2025 wurde in Quadrant 1 ein Höchstwert von 2,18 gemessen. Beim Monitoring im Juli wurde in den oberen Quadranten ein maximaler WLAI von lediglich 0,97 (Q4) aufgezeichnet. In den Quadranten 3 und 4 ist jedoch eine kontinuierliche Zunahme des WLAI im Beobachtungszeitraum zu erkennen.

4.1.2.2.1 *Wisteria sinensis* – Systeme (FB_trog_WS_oF und FB_trog_WS_mF)

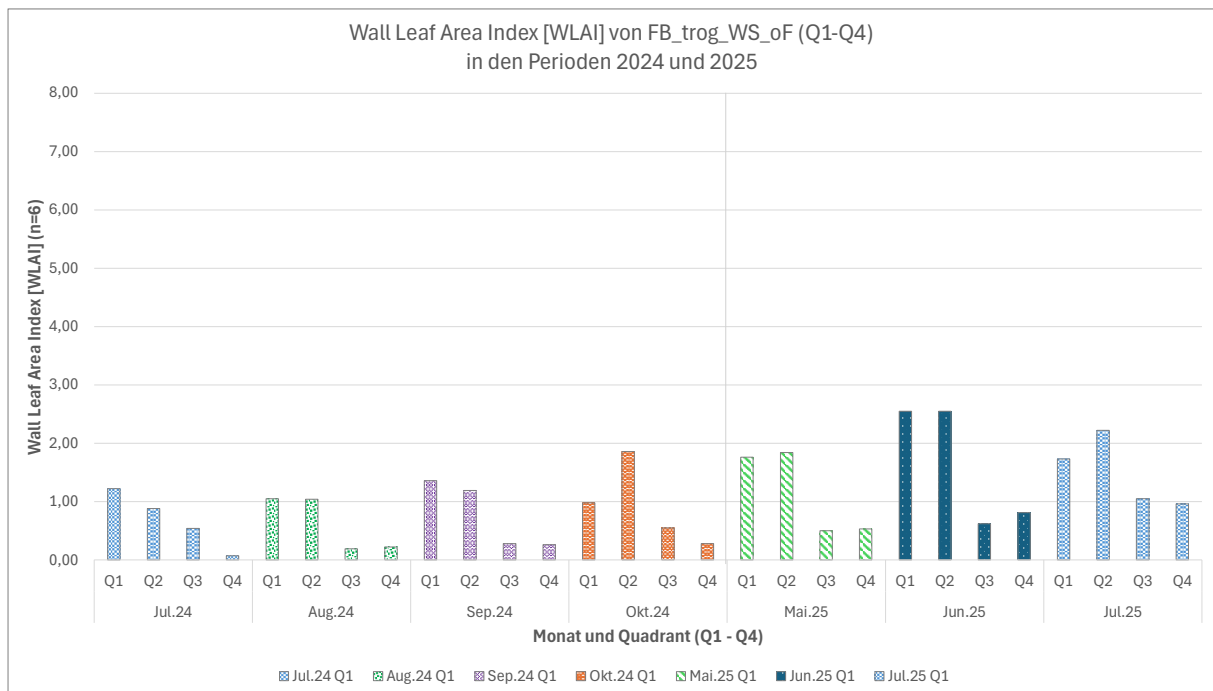


Abbildung 31: Entwicklung des WLAI je Quadrant (Q1-Q4) an FB_trog_WS_oF in den Vegetationsperioden 2024 und 2025 (IBLB, BOKU University, 2025).

Die trogebundenen Vertikalbegrünungen mit *Wisteria sinensis* weisen – insbesondere in den unteren Quadranten – deutlich geringere WLAI-Werte auf als die Systeme mit *Parthenocissus quinquefolia*. Beim System FB_trog_WS_oF wurde am 19.09.2024 in Quadrant 1 ein Wert von 1,36 und am 17.10.2024 ein Höchstwert von 1,86 in Quadrant 2 gemessen. In den oberen Quadranten erreichten die Mittelwerte im Oktober 2024 maximal 0,55 (Q3) und 0,28 (Q4).

Im System FB_trog_WS_oF zeigt sich ein ähnliches Muster wie an FB_trog_PQ_mF. Die unteren Quadranten weisen deutlich höhere WLAI-Werte auf als die oberen, wobei in Quadrant 3 und 4 eine kontinuierliche Zunahme über den Beobachtungszeitraum erkennbar ist. Insgesamt liegen die Werte dieser Vertikalbegrünung über dem Niveau des Jahres 2024. Im Juni 2025 wurde ein Maximalwert von 2,55 in den Quadranten 1 und 2 erfasst. Ein weiterer Höchstwert in den oberen Quadranten trat im Juli 2025 auf, als in Quadrant 3 ein WLAI von 1,05 gemessen wurde. Dieser Wert stellt eine deutliche Zunahme gegenüber dem Oktober 2024 dar, als dort lediglich 0,55 registriert wurden.

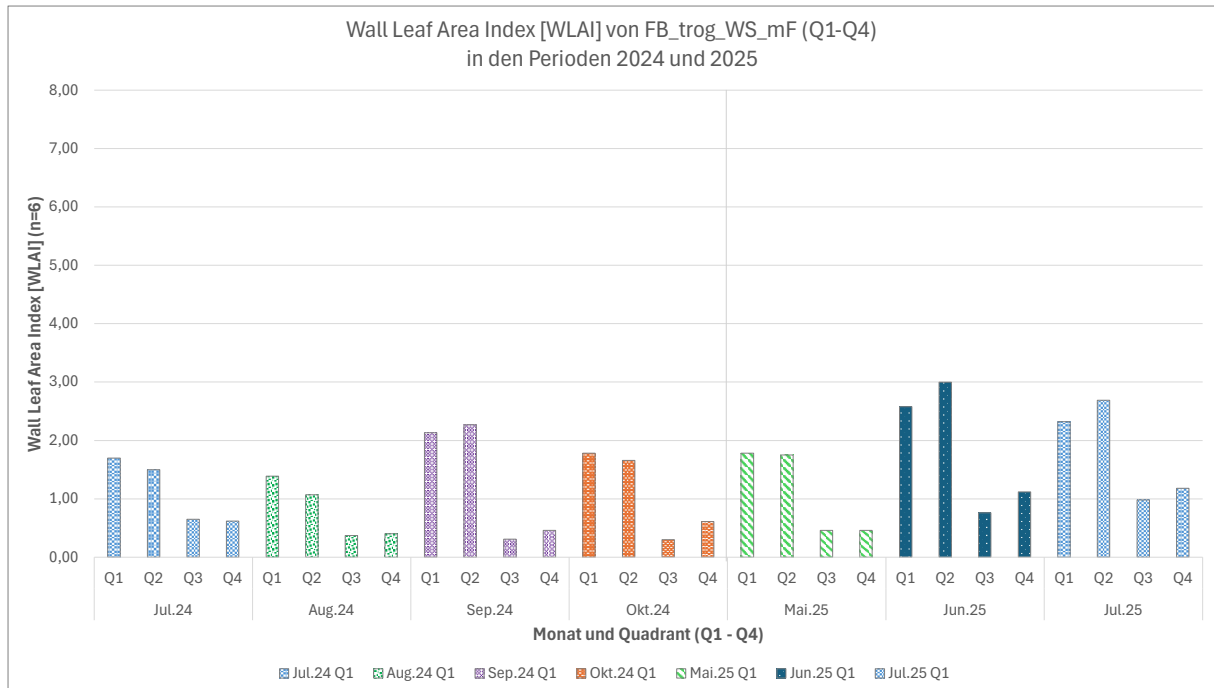


Abbildung 32: Entwicklung des WLAI je Quadrant (Q1-Q4) an FB_trog_WS_mF in den Vegetationsperioden 2024 und 2025 (IBLB, BOKU University, 2025).

Das System FB_trog_WS_mF zeigt ein vergleichbares, jedoch insgesamt höheres WLAI-Niveau. Die höchsten Werte wurden am 19.09.2024 mit 2,13 (Q1) und 2,27 (Q2) registriert. Auch die oberen Quadranten lagen mit 0,65 (Q3) und 0,62 (Q4) am 18.07.2024 über den entsprechenden Werten von FB_trog_WS_oF.

Das System FB_trog_WS_mF zeigt ein vergleichbares Verhalten. Auch hier sind die unteren Quadranten (Q1/Q2) durchgehend durch höhere WLAI-Werte gekennzeichnet als die oberen. In den Quadranten 3 und 4 ist von Mai bis Juli 2025 ein kontinuierlicher Anstieg zu beobachten. Die höchsten Mittelwerte wurden im Juni 2025 in den unteren Quadranten erreicht – 2,58 (Q1) und 3,00 (Q2). Entsprechend des anhaltenden Anstiegs in den oberen Quadranten wurden hier im Juli 2025 die höchsten Werte gemessen, mit 0,98 (Q3) und 1,18 (Q4). Auch in diesem System zeigt sich damit eine deutliche Steigerung gegenüber den Messungen aus dem Jahr 2024.

4.1.2.2.2 Wandgebundenes System (FB_LW_mF)

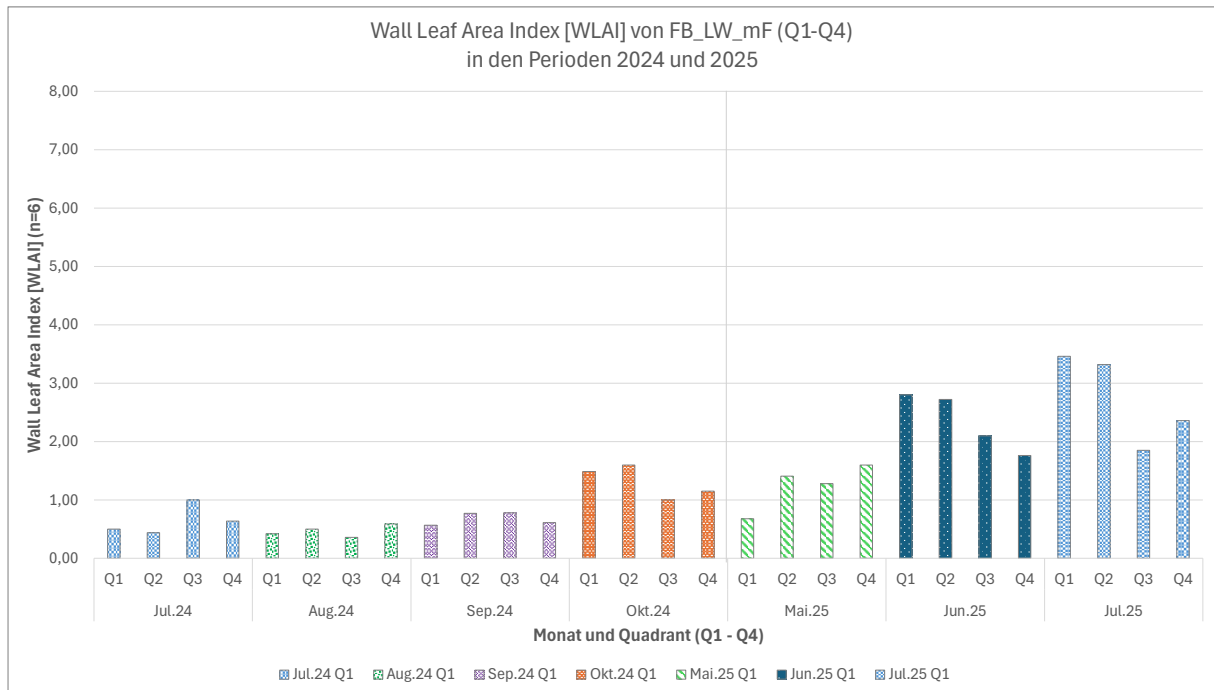


Abbildung 33: Entwicklung des WLAI je Quadrant (Q1-Q4) an FB_LW_mF in den Vegetationsperioden 2024 und 2025 (IBLB, BOKU University, 2025).

Das wandgebundene Begrünungssystem FB_LW_mF zeigt von Juli bis September 2024 nur einen leichten Anstieg der WLAI-Werte in allen Quadranten. Die Werte bewegten sich zunächst zwischen 0,36 und 1,00, bevor im Oktober ein deutlicher Zuwachs verzeichnet wurde. Zu diesem Zeitpunkt erreichten die Quadranten Werte von 1,49 (Q1), 1,60 (Q2), 1,00 (Q3) und 1,15 (Q4). Diese Entwicklung ist vermutlich auf die ab Ende August 2024 einsetzende kontinuierliche Düngergabe zurückzuführen, die zu einer verbesserten Biomassebildung führte.

Beim wandgebundenen System zeigte sich in der Vegetationsperiode 2025 die deutlichste Veränderung im Vergleich zu 2024. Die WLAI-Werte weisen einen kontinuierlichen Anstieg über den Beobachtungszeitraum hinweg auf, was auf eine Zunahme der Biomasseentwicklung schließen lässt. Beim Monitoring im Juli 2025 wurde in Quadrant 1 ein Höchstwert von 3,46 erfasst. Zum Vergleich: Im Oktober 2024 lag der Maximalwert desselben Quadranten noch bei 1,49, was eine markante Steigerung des Vegetationszuwachses innerhalb eines Jahres verdeutlicht. Dieser Trend ist auch in den anderen Quadranten erkennbar.

4.1.2.3 Projektiver Deckungsgrad [DB_p] und Zieldeckungsgrad [DG_{Ziel}]

Die Auswertung des projektiven Deckungsgrades [DG_p] ist grafisch und textlich im folgenden Kapitel für die Vegetationsperioden 2024 und 2025 dargestellt. Die Auswertung zeigt in beiden Standjahren eine deutliche Entwicklung der Pflanzen. Besonders im ersten Standjahr ist die große Diskrepanz zwischen den unteren (Q1/Q2) und oberen (Q3/Q4) Quadranten bei den troggebondenen Vertikalbegrünungen auffällig.

4.1.2.3.1 Parthenocissus quinquefolia – Systeme (FB_trog_PQ_oF und FB_trog_PQ_mF)

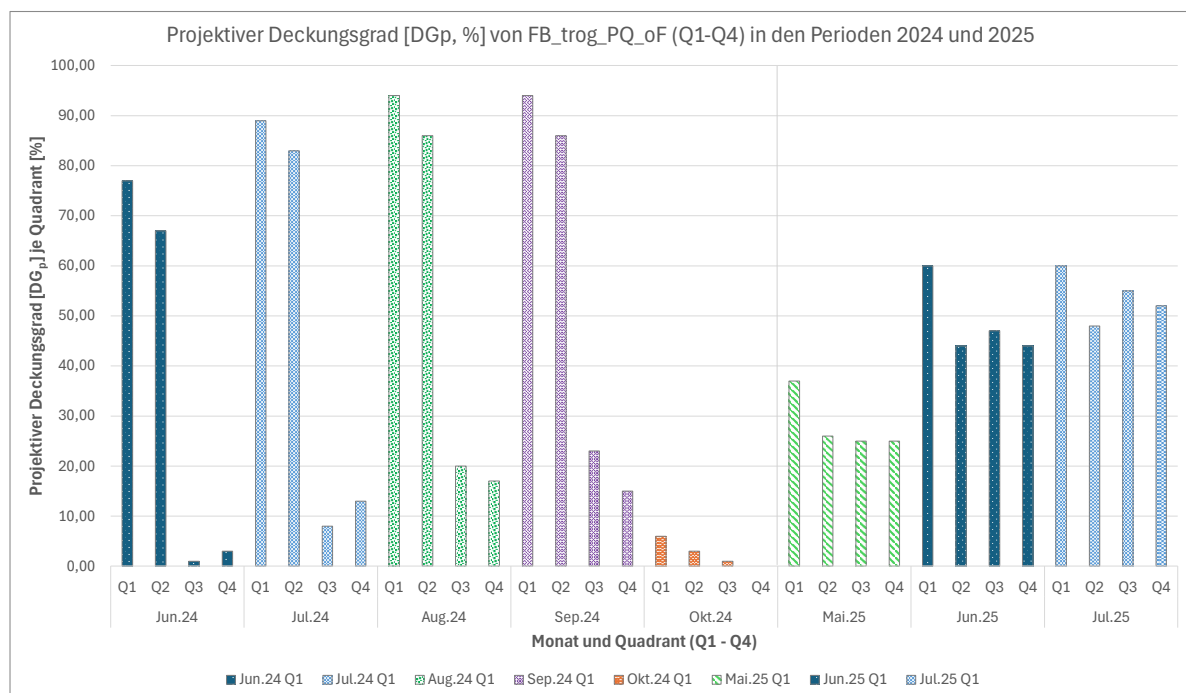


Abbildung 34: Projektiver Deckungsgrad [DG_p] in % je Quadrant (Q1-Q4) an FB_trog_PQ_oF in den Vegetationsperioden 2024 und 2025 (IBLB, BOKU University, 2025).

Das System FB_trog_PQ_oF wies in den Quadranten 1 (Q1) und 2 (Q2) bereits im Juni 2024 eine hohe Flächendeckung auf (Q1: 77 %, Q2: 67 %). Diese erhöhte sich bis September kontinuierlich auf 94 % (Q1) bzw. 86 % (Q2). Im Oktober trat infolge des Laubfalls ein deutlicher Rückgang der Deckungsgrade auf. Auch in den Quadranten 3 (Q3) und 4 (Q4) konnte eine positive Entwicklung festgestellt werden. Die Deckungsgrade stiegen dort von 1 % (Q3) bzw. 3 % (Q4) im Juni auf 23 % (Q3) und 15 % (Q4) im September.

Die Entwicklung des Zieldeckungsgrades [DG_{Ziel}] bestätigt diesen Trend. Bezogen auf eine betrachtete Fläche von 10,18 m² ergaben sich folgende Werte:

- Juni 37 %
- Juli 48 %
- August 54 %
- September 55 %
- Oktober 2 %

Die Werte von FB_trog_PQ_oF unterscheiden sich stark vom Monitoringergebnis 2024. Die vier Quadranten befinden sich mehr auf einer Höhe und es sind keine so großen Unterschiede zwischen oberen (Q3/Q4) und unteren Quadranten (Q1/Q2) zu erkennen. Es war ein kontinuierlicher Anstieg mit einem leichten Sprung von Mai (Q1 37 %, Q2 26 %, Q3 25 %, Q4 25 %) auf Juni (Q1 60 %, Q2 44 %, Q3 47 %, Q4 44 %) erkennbar. Die Höchstwerte wurden im Juli 2025 aufgenommen – Q1 60 %, Q2 48 %, Q3 55 %, Q4 52 %. In den unteren Quadranten lagen die Werte deutlich unter denen der Vegetationsperiode 2024, in den oberen wiederum ist es umgekehrt. Aus diesen Werten wurden folgende Zieldeckungsgrade [DG_{Ziel}] errechnet (Fläche 10,16 m²):

- Mai 28 %
- Juni 49 %
- Juli 54 %

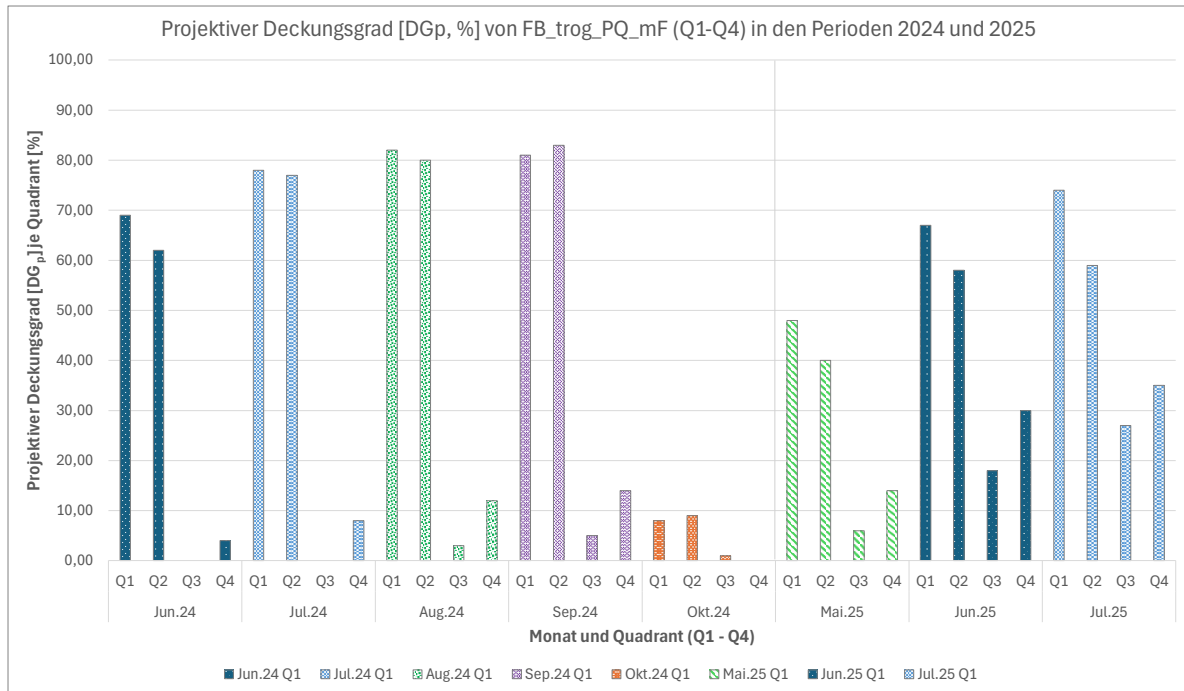


Abbildung 35: Projektiver Deckungsgrad [DGp] in % je Quadrant (Q1-Q4) an FB_trog_PQ_mF in den Vegetationsperioden 2024 und 2025 (IBLB, BOKU University, 2025).

Für das System FB_trog_PQ_mF zeigte sich im Jahr 2024 ein ähnlicher Verlauf. Auch hier wurde bereits im Juni eine hohe Flächendeckung in den unteren Quadranten beobachtet (Q1: 69 %, Q2: 62 %), die bis September weiter zunahm (Q1: 81 %, Q2: 83 %). Insgesamt lagen die Werte jedoch leicht unter denen des Systems FB_trog_PQ_oF. In den oberen Quadranten (Q3 und Q4) war ebenfalls eine positive Entwicklung erkennbar, wenn auch auf einem insgesamt niedrigeren Niveau: Die Deckungsgrade stiegen von 0 % (Q3) bzw. 4 % (Q4) im Juni auf 5 % (Q3) und 14 % (Q4) im September.

Der Zieldeckungsgrad [DG_{Ziel}] für dieses System, bezogen auf eine Fläche von 8 m², zeigte folgende Entwicklung:

- Juni 38 %
- Juli 45 %
- August 49 %
- September 50 %
- Oktober 5 %

Im Falle von FB_trog_PQ_mF ist eine größere Diskrepanz zwischen Q1/Q2 und Q3/Q4 erkennbar. Anfangs (Mai: Q1 48 %, Q2 40 %, Q3 6 %, Q4 14 %) noch vergleichbar mit Werten von 2024, aber mit zunehmender Vegetationsperiode näherte sich die oberen Deckungsgrade kontinuierlich an die unteren Werte an (Juli: Q1 74 %, Q2 58 %, Q3 27 %, Q4 35 %). Bei Betrachtung der Juli-Werte

von 2025 ist erkennbar, dass sich die oberen Quadranten etwa bis zur Hälfte der Deckung des jeweils darunterliegenden Quadranten entwickeln konnten. Für den Zieldeckungsgrad [DG_{Ziel}] einer Betrachtungsfläche von 8 m² konnten folgende Werte errechnet werden:

- Mai 29 %
- Juni 46 %
- Juli 51 %

4.1.2.3.2 *Wisteria sinensis* – Systeme (FB_trog_WS_oF und FB_trog_WS_mF)

An den Systemen FB_trog_WS_oF und FB_trog_WS_mF zeigte sich ebenfalls eine kontinuierlich positive Entwicklung in der Vegetationsperiode 2024. Beide Module haben weitaus weniger Deckung als die Module mit *Parthenocissus quinquefolia*, was wohl der langsameren Regeneration durch den Frostschaden geschuldet ist. Auch 2025 zeigte sich an beiden *Wisteria*-Systemen ein kontinuierliches Wachstum im Messzeitraum. Die Deckung ist im Vergleich zu 2024 sehr viel höher und es kann von einer signifikanten Zunahme an Biomasse ausgegangen werden.

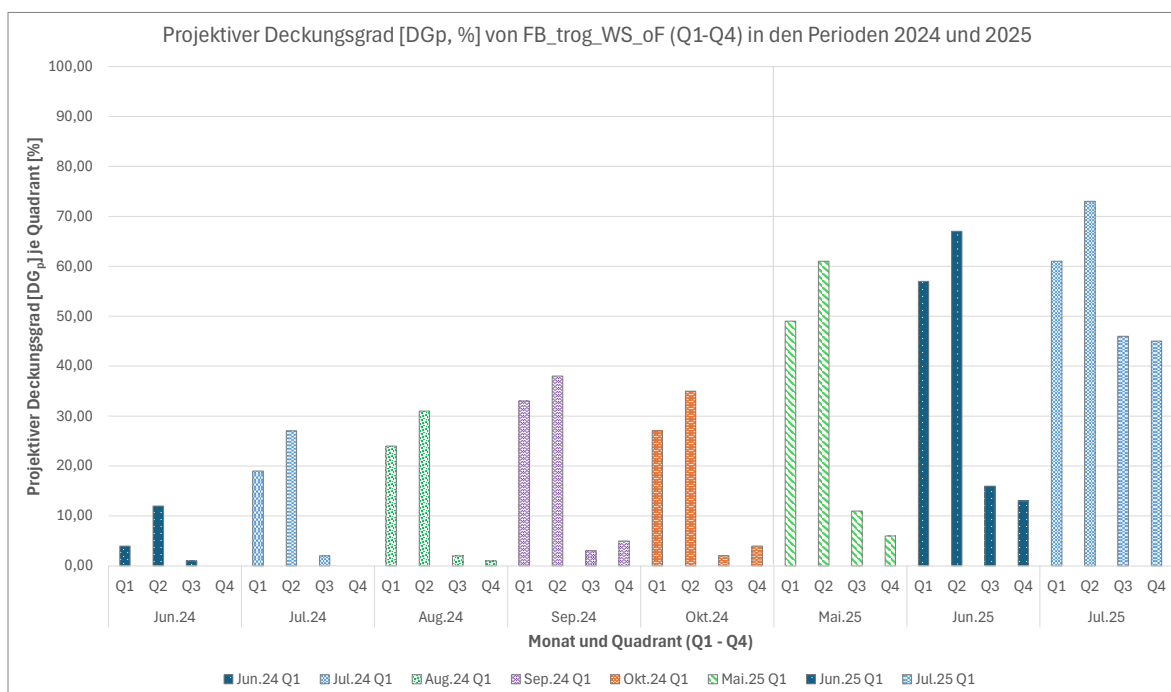


Abbildung 36: Projektiver Deckungsgrad [DGp] in % je Quadrant (Q1-Q4) an FB_trog_WS_oF in den Vegetationsperioden 2024 und 2025 (IBLB, BOKU University, 2025).

FB_trog_WS_oF zeigte eine Deckung von 4 % (Q1) und 12 % (Q2) in den unteren Quadranten bei der Junimessung 2024. Diese Werte steigerten sich bis September 2024 auf 33 % (Q1) und 38 % (Q2). Im Oktober war die Pflanze noch belaubt, aber der Deckungsgrad bereits etwas geringer. Die

oberen Quadranten entwickelten sich etwas langsamer, aber auch hier sind positive Entwicklungen zu erkennen. Quadrant 3 konnte 1 % im Juni verzeichnen und steigerte sich auf 3 % im September. Quadrant 4 entwickelte sich von 0% (Juni) auf 5 % (September). Bezogen auf die Fläche von 10,18 m² zeigt der Zieldeckungsgrad [DG_{Ziel}] folgende Werte:

- Juni 4 %
- Juli 12 %
- August 14 %
- September 20 %
- Oktober 17 %

FB_trog_WS_oF zeigte zur Maimessung noch einen sehr hohen Unterschied zwischen den oberen (Q3, Q4) und unteren Quadranten (Q1/Q2). In Quadrant 1 konnte hier eine Deckung von 49 % und in Quadrant 2 61 % gemessen werden. In der oberen Hälfte des Systems wurde eine sehr viel niedrigere Deckung aufgezeichnet (Q3 6 %, Q4 11 %). Zur Julimessung zeigte sich ein anderes Bild – Q1 und Q2 erreichten 61 % bzw. 73 %. Ein noch stärkerer Zuwachs konnte in den Quadranten 3 und 4 mit 46 % (Q3) und 45 % (Q4) nachgewiesen werden. Bezogen auf die Fläche von 10,18 m² zeigt der Zieldeckungsgrad [DG_{Ziel}] folgende Werte und bestätigte diese Entwicklung:

- Mai 32 %
- Juni 38 %
- Juli 56 %

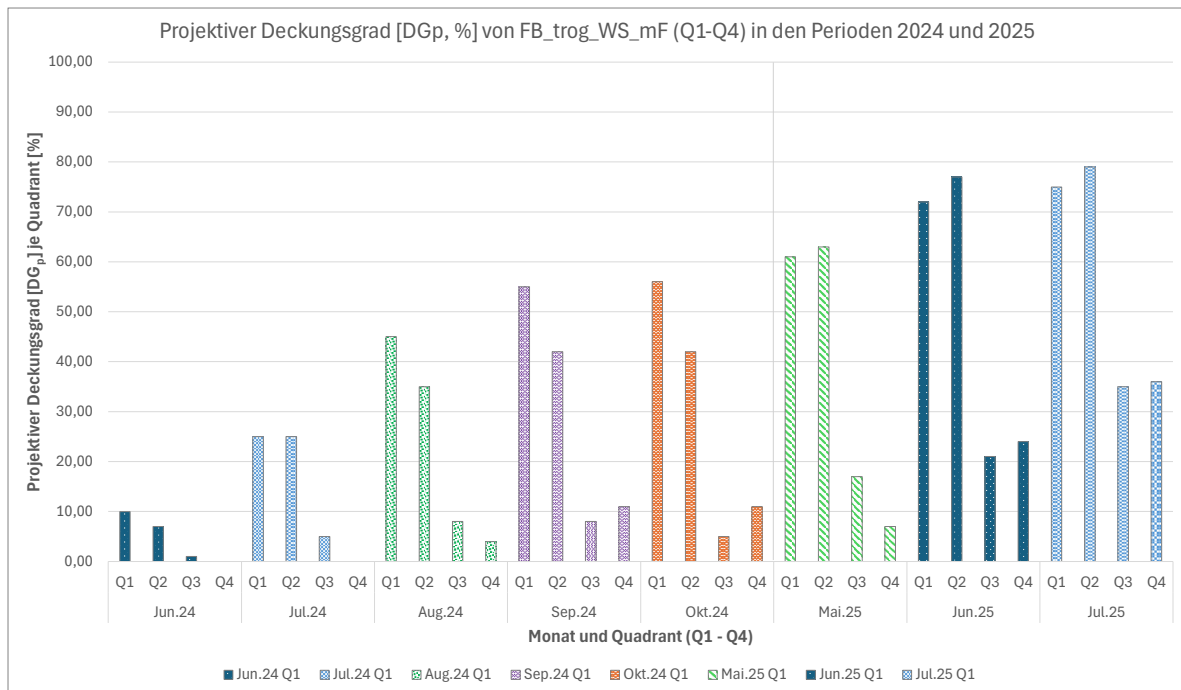


Abbildung 37: Projektiver Deckungsgrad [DGp] in % je Quadrant (Q1-Q4) an FB_trog_WS_mF in den Vegetationsperioden 2024 und 2025 (IBLB, BOKU University, 2025).

Das *Wisteria*-System mit Fensterausparung (FB_trog_WS_mF) zeigte eine ähnliche Entwicklung wie FB_trog_WS_oF mit einer Deckung von 10 % (Q1) und 7 % (Q2) in der unteren Modulhälfte im Juni 2024. Höchstwerte wurden hier im Oktober 2024 gemessen (Q1 56 %, Q2 42 %), aber die Unterscheidung ist in Q1 lediglich +1 % zur Septembermessung (Q1 55 %). Die Messung in Q2 erzielte bei beiden Monaten dasselbe Ergebnis (Q2 42 %). In Quadrant 3 konnte zum Zeitpunkt der Juni-messung auch hier 1 % Deckung errechnet werden und in Q4 0 %. Die Werte steigerten sich kontinuierlich bis September 2024 – Q3 8 % und Q4 11 %. Im Oktober nam der Wert von Q3 bereits etwas ab (Q3 5 %), Q4 mit 11 % hingegen gleichbleibend. Die Deckungsgrade sind im Vergleich zu FB_trog_WS_oF insgesamt etwas höher. Bezogen auf eine Betrachtungsfläche von 8,00 m², zeigte sich dies auch im Zieldeckungsgrad [DG_{Ziel}]:

- Juni 5 %
- Juli 15 %
- August 25 %
- September 31 %
- Oktober 31 %

Auch FB_trog_WS_mF zeigte im Mai noch hohe Differenzen zwischen den beiden Systemhälften (Q1/Q2 zu Q3/Q4). In den beiden unteren Quadranten konnte mit 61 % (Q1) und 63 % (Q2) bereits eine hohe Deckung erfasst werden. Dem gegenüber standen 17 % in Quadrant 3 und 7 % in Quadrant 4. Bis Juli konnte besonders in den oberen Quadranten ein gutes Wachstum verzeichnet wer-

den – Q3 35 % und Q4 36 %. Auch in den unteren Quadranten war eine Zunahme des Deckungsgrades nachweisbar (Q1 75 %, Q2 79 %). Der Zieldeckungsgrad [DG_{Ziel}] bezieht sich bei diesem System auf eine Fläche von 8 m² und daraus errechnen sich folgende Werte:

- Mai 40 %
- Juni 56 %
- Juli 59 %

4.1.2.3.3 Wandgebundenes System (FB_LW_mF)

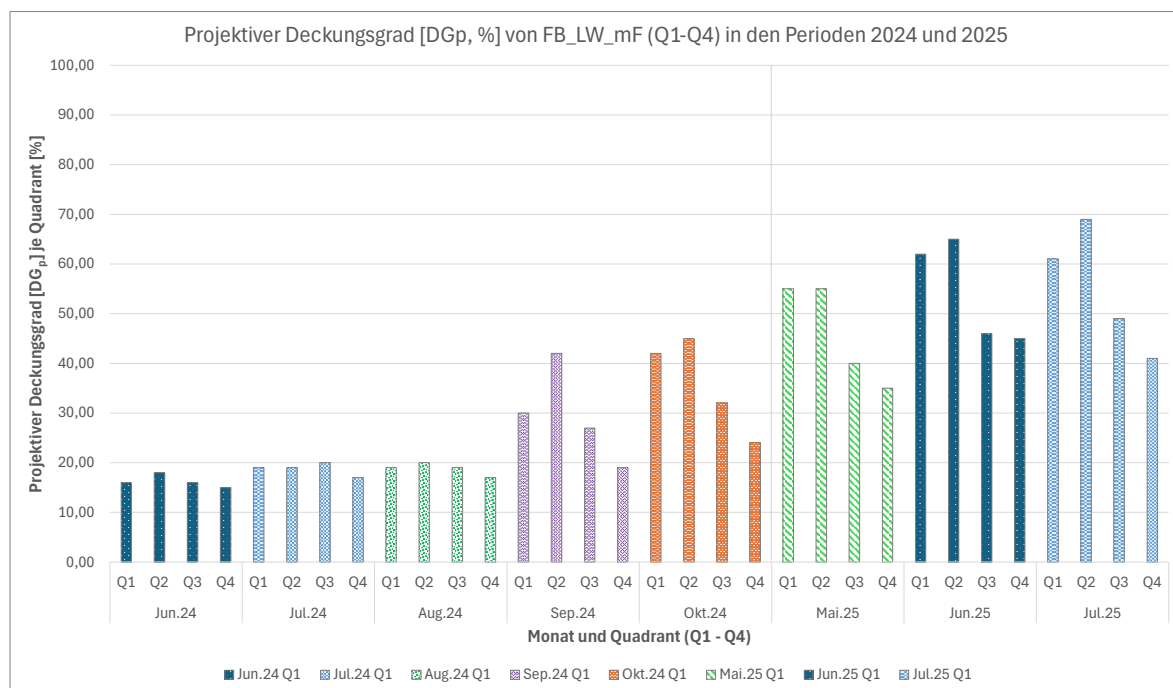


Abbildung 38: Projektiver Deckungsgrad [DGp] in % je Quadrant (Q1-Q4) an FB_LW_mF in den Vegetationsperioden 2024 und 2025 (IBLB, BOKU University, 2025).

Wie auch in der WLAI-Auswertung bereits beschrieben, ist auch in den Werten des Deckungsgrades ein erhöhter Anstieg ab September 2024 (Q1 30 %, Q2 42 %, Q3 27 %, Q4 19 %) zu erkennen. Juni (Q1 16 %, Q2 18 %, Q3 16 %, Q4 15 %) bis August (Q1 19 %, Q2 20 %, Q3 19 %, Q4 17 %) sind keine nennenswerten Wertsteigerungen zu verzeichnen. Im Oktober 2024 erreichen die durchschnittlichen Werte je Quadrant die Höchstwerte beim wandgebundenen System – Q1 42 %, Q2 45 %, Q3 32 %, Q4 24 %. In den beiden unteren Quadranten haben sich die Werte somit in zwei Monaten mehr als verdoppelt. Der Zieldeckungsgrad [DG_{Ziel}] bezieht sich bei diesem System auf eine Fläche von 7,28 m²:

- Juni 16 %
- Juli 19 %
- August 19 %
- September 30 %
- Oktober 37 %

Das wandgebundene System konnte 2025 eine deutlich höhere Werte erzielen als 2024. Die Werte im Mai 2025 (Q1 55 %, Q2 55 %, Q3 40 %, Q4 35 %) lagen bereits über den Höchstwerten des Monitorings 2024. Im Juni (Q1 62 %, Q2 65 %, Q3 46 %, Q4 45 %) und Juli 2025 (Q1 61 %, Q2 69 %, Q3 49 %, Q4 41 %) wurden annähernd identische Werte mit geringen Schwankungen der einzelnen Quadranten aufgezeichnet. Ein Blick auf die Werte des Zieldeckungsgrades [DG_{Ziel}] bestätigt das ebenfalls (Fläche 7,28 m²):

- Mai 47 %
- Juni 56 %
- Juli 56 %

Tabelle 16: Zusammenfassung der untersuchten pflanzenphysiologischen Parameter V_{cub} , $WLAI/LAI$, DG_p und DG_{Ziel} an den vertikalen Begrünungssystemen in den Vegetationsperioden 2024 und 2025 (IBLB, BOKU University, 2026).

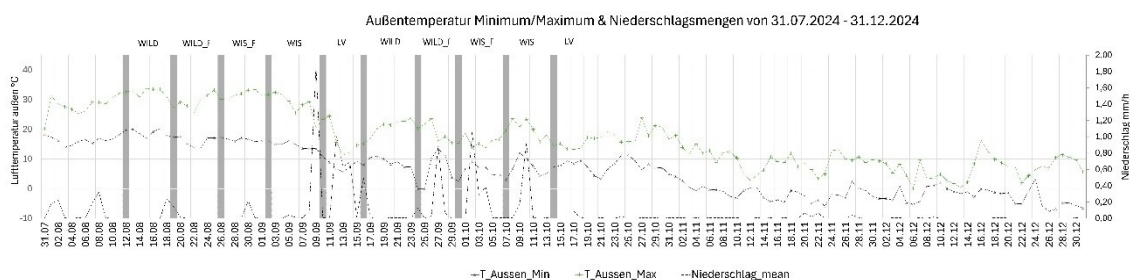
Periode		Parameter	Begrünungssysteme																							
Jahr	Monat		FB_trog_PQ_oF				FB_trog_PQ_mF				FB_trog_WS_oF				FB_trog_WS_mF				FB_LW_mF				DB_ext			
			Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
2024	Juni	Kubisches Pflanzenvolumen in m³/m² [V _{cub}]	0,30	0,29	0,00	0,00	0,25	0,20	0,00	0,00	0,12	0,17	0,00	0,00	0,09	0,11	0,00	0,00	0,06	0,07	0,05	0,05	0,26	0,23	0,18	0,24
	Juli		0,28	038	0,08	011	0,27	0,29	0,00	0,05	0,30	0,44	0,04	0,00	0,25	0,21	0,08	0,00	0,06	0,05	0,04	0,04	0,31	0,32	0,28	0,28
	August		0,33	0,28	0,07	0,08	0,29	0,26	0,00	0,05	0,27	0,31	0,05	0,03	0,28	0,28	0,09	0,05	0,06	0,06	0,04	0,03	0,28	0,32	0,30	0,22
	September		0,35	0,34	0,12	0,08	0,29	0,27	0,00	0,04	0,27	0,45	0,06	0,08	0,40	0,32	0,11	0,10	0,07	0,09	0,05	0,05	031	0,40	0,41	0,32
	Oktober		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,24	0,25	0,07	0,10	0,33	0,27	0,11	0,11	0,09	0,08	0,05	0,05	0,30	0,37	0,41	0,26
	Juli	(Wall) Leaf Area Index [WLAI/LAI]	2,85	3,30	0,83	0,98	4,07	3,93	0,88	0,56	1,22	0,88	0,54	0,07	1,70	1,50	0,65	0,62	0,50	0,44	1,00	0,64	2,82	3,88	4,05	3,02
	August		3,19	2,76	0,78	0,63	3,55	2,45	0,16	0,85	1,05	1,04	0,19	0,22	1,39	1,07	0,37	0,40	0,42	0,50	0,36	0,59	3,79	5,31	4,90	3,77
	September		3,14	2,27	0,72	0,50	2,64	2,47	0,38	0,70	1,36	1,19	0,28	0,26	2,13	2,27	0,31	0,46	0,57	0,77	0,78	0,61	4,91	4,84	6,09	6,64
	Oktober		0,36	0,23	0,25	0,21	0,77	0,55	0,36	0,37	0,98	1,86	0,55	0,28	1,78	1,66	0,30	0,61	1,49	1,60	1,00	1,15	4,19	3,23	4,22	3,63
	Juni	Projektiver Deckungsgrad in % [DG _p]	77,0	67,0	1,0	3,0	69,0	62,0	0,0	4,0	4,0	12,0	1,0	0,0	10,0	7,0	1,0	0,0	16,0	18,0	16,0	15,0	91,0	92,0	91,0	91,0
	Juli		89,0	83,0	8,0	13,0	78,0	77,0	0,0	8,0	19,0	27,0	2,0	0,0	25,0	25,0	5,0	0,0	19,0	19,0	20,0	17,0	86,0	94,0	91,0	89,0
	August		94,0	86,0	20,0	17,0	82,0	80,0	3,0	12,0	24,0	31,0	2,0	1,0	45,0	35,0	8,0	4,0	19,0	20,0	19,0	17,0	94,0	95,0	93,0	92,0
	September		94,0	86,0	23,0	15,0	81,0	83,0	5,0	14,0	33,0	38,0	3,0	5,0	55,0	420	8,0	11,0	30,0	42,0	27,0	19,0	90,0	93,0	90,0	85,0
	Oktober		6,0	3,0	1,0	0,0	8,0	9,0	1,0	0,0	27,0	35,0	2,0	4,0	56,0	42,0	5,0	11,0	42,0	45,0	32,0	24,0	92,0	95,0	95,0	95,0
	Juni	Zieldeckungsgrad in % [DG _{Ziel}]	37,0				38,0				4,0				5,0				16,0				91,0			
	Juli		48,0				54,0				12,0				15,0				19,0				90,0			
	August		54,0				49,0				14,0				25,0				19,0				93,0			
	September		55,0				50,0				20,0				31,0				30,0				89,0			
	Oktober		2,0				5,0				17,0				31,0				37,0				94,0			
2025	Mai	Kubisches Pflanzenvolumen in m³/m² [V _{cub}]	0,21	0,21	0,19	0,10	0,18	0,19	0,06	0,10	0,33	0,36	0,08	0,08	0,47	0,38	0,10	0,11	0,15	0,15	0,10	0,08	0,25	0,26	0,19	0,24
	Juni	Pflanzenvolumen in m³/m² [V _{cub}]	0,24	0,25	0,23	0,21	0,21	0,16	0,07	0,08	0,49	0,42	0,17	0,20	0,41	0,34	0,10	0,10	0,24	0,24	0,13	0,14	0,29	0,32	0,34	0,31
	Juli		0,28	0,23	0,24	0,20	0,20	0,17	0,09	0,10	0,53	0,63	0,34	0,30	0,50	0,36	0,15	0,16	0,17	0,19	0,12	0,10	0,38	0,41	0,41	0,40
	Mai	(Wall) Leaf Area Index [WLAI/LAI]	1,46	1,13	1,05	0,82	1,53	1,72	0,53	0,75	1,76	1,84	0,50	0,53	1,78	1,75	0,46	0,46	0,68	1,41	1,28	1,60	2,26	2,41	2,55	2,30
	Juni	Index [WLAI/LAI]	2,35	1,55	1,15	1,04	2,18	1,91	0,46	0,87	2,55	2,55	0,62	0,81	2,58	3,00	0,76	1,12	2,80	2,72	2,10	1,76	7,10	6,18	4,07	5,37
	Juli		1,81	1,61	1,32	1,42	1,77	1,18	0,41	0,97	1,73	2,22	1,05	0,96	2,32	2,69	0,98	1,18	3,46	3,32	1,85	2,36	4,48	4,12	4,26	4,39
	Mai	Projektiver Deckungsgrad in % [DG _p]	37,0	26,0	25,0	25,0	48,0	40,0	6,0	14,0	49,0	61,0	11,0	6,0	61,0	63,0	17,0	7,0	55,0	55,0	40,0	35,0	94,0	96,0	93,0	92,0
	Juni	Deckungsgrad in % [DG _p]	60,0	44,0	47,0	44,0	67,0	58,0	18,0	30,0	57,0	67,0	16,0	13,0	72,0	77,0	21,0	24,0	62,0	65,0	46,0	45,0	95,0	97,0	94,0	95,0
	Juli		60,0	48,0	55,0	52,0	74,0	59,0	27,0	35,0	61,0	73,0	46,0	45,0	75,0	79,0	35,0	36,0	61,0	69,0	49,0	41,0	95,0	97,0	94,0	95,0
	Mai	Zieldeckungsgrad in % [DG _{Ziel}]	28,0				29,0				32,0				40,0				47,0				93,0			
	Juni		49,0				46,0				38,0				56,0				56,0				95,0			
	Juli		54,0				51,0				56,0				59,0				56,0				95,0			

Tabelle 22 zeigt eine Zusammenfassung der untersuchten pflanzenphysiologischen Parameter. Bei allen Systemen ist in der Vegetationsperiode 2024 (Juni – Oktober) ein kontinuierlicher Anstieg von V_{cub} , WLAI, DG_p und DG_{Ziel} zu erkennen. Im Oktober ist ein starker Einbruch der Werte bei FB_trog_PQ_oF und FB_trog_PQ_mF erkennbar, dies ist auf den Laubfall zurückzuführen. Die restlichen Systeme waren zu diesem Zeitpunkt noch belaubt, besonders bei FB-LW_mF war im Spätherbst noch eine Zunahme der Parameter erkennbar. 2025 stiegen die Werte frühzeitig in der Vegetationsperiode stärker an und erreichten im Juli mehrfach Höchstwerte, was auf die fortschreitende Etablierung und Entwicklung der Pflanzen im zweiten Standjahr zurückzuführen ist.

Die Parameter V_{cub} und WLAI zeigten weitgehend vergleichbare Zunahmen an – ein Anstieg des Volumens geht mit erhöhter Blattfläche und Entwicklung der Pflanze einher. Auch bei DG_p und DG_{Ziel} lässt sich diese positive Entwicklung ablesen. Die Zunahme von Volumen und Blattmaßen resultierte in einer erhöhten vertikalen Deckung der Betrachtungsflächen, was den Zusammenhang der untersuchten Parameter unterstreicht. Die Heterogenität zwischen den unteren (Q1/Q2) und den oberen Quadranten (Q3/Q4) war besonders im ersten Standjahr sehr prägnant. 2025 näherten sich die Werte zunehmend an, aufgrund der fortschreitenden Entwicklung und Längenwachstum der Pflanzen.

4.1.3 Klimatische Bedingungen im Messzeitraum

Abbildung 39 zeigt die minimalen und maximalen Außenlufttemperaturen sowie die Niederschlagsmengen im Messzeitraum 2024 bzw. 2025. Die jeweils vor der Prüfbox angebrachten Prüflinge sind ebenfalls angegeben. Der Prüfort liegt in der Klimazone Cfb nach Köppen-Geiger, das entspricht einem warmgemäßigten, vollhumiden Klima mit warmem Sommer. Eine Herausforderung im Prüfsetting bestand darin, trotz der hohen Anzahl an unterschiedlichen Prüflingen Messungen unter ähnlichen Klimabedingungen durchführen zu können.



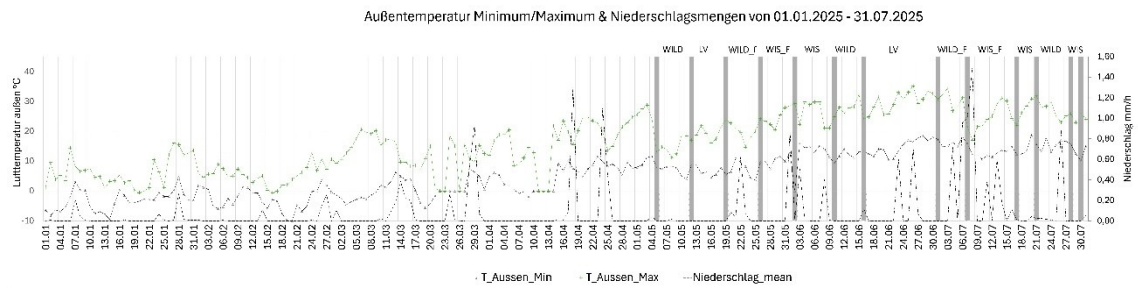


Abbildung 39: Klimatische Bedingungen während der Messzeiträume für die unterschiedlichen Fassadenprüflinge 2024 und 2025.

4.1.4 Albedomessungen

Im Sommer 2025 wurden die weitgehend entwickelten Fassaden mittels eines SP-710-SS Strahlungsbilanzsensor/Albedometer von Apogee vermessen. Das Gerät erfasst die kurzweilige Strahlung. Die Albedomessungen erfolgten kontinuierlich, die Auswertung wurde jedoch auf die relevante Tageszeit von 8:00 bis 17:00 beschränkt. Die beiden troggebenen Fassadenbegrünungen zeigten an einem repräsentativen, sonnigen Tag Mittelwerte von 30 % (*Wisteria*, Standardabweichung SD 0,11) bzw. 25% (Wilder Wein, SD 0,04), die Living Wall lag mit 27,3% (SD 0,08) dazwischen. Zieht man nur die Werte bei maximaler Sonneneinstrahlung auf die Fassade zwischen 14:00 und 15:00 heran, liegen die Werte von *Wisteria* (24,6%), Wildem Wein (25,7%) und Living Wall (31%) noch knapper beisammen. Bei der weißen Referenzfassade wurde dagegen im Mittelwert mit 75,8% ein deutlich höherer Anteil der reflektierten an der einfallenden Strahlung über den Tagesverlauf gemessen (SD 0,09, 15:00 Wert 81%).

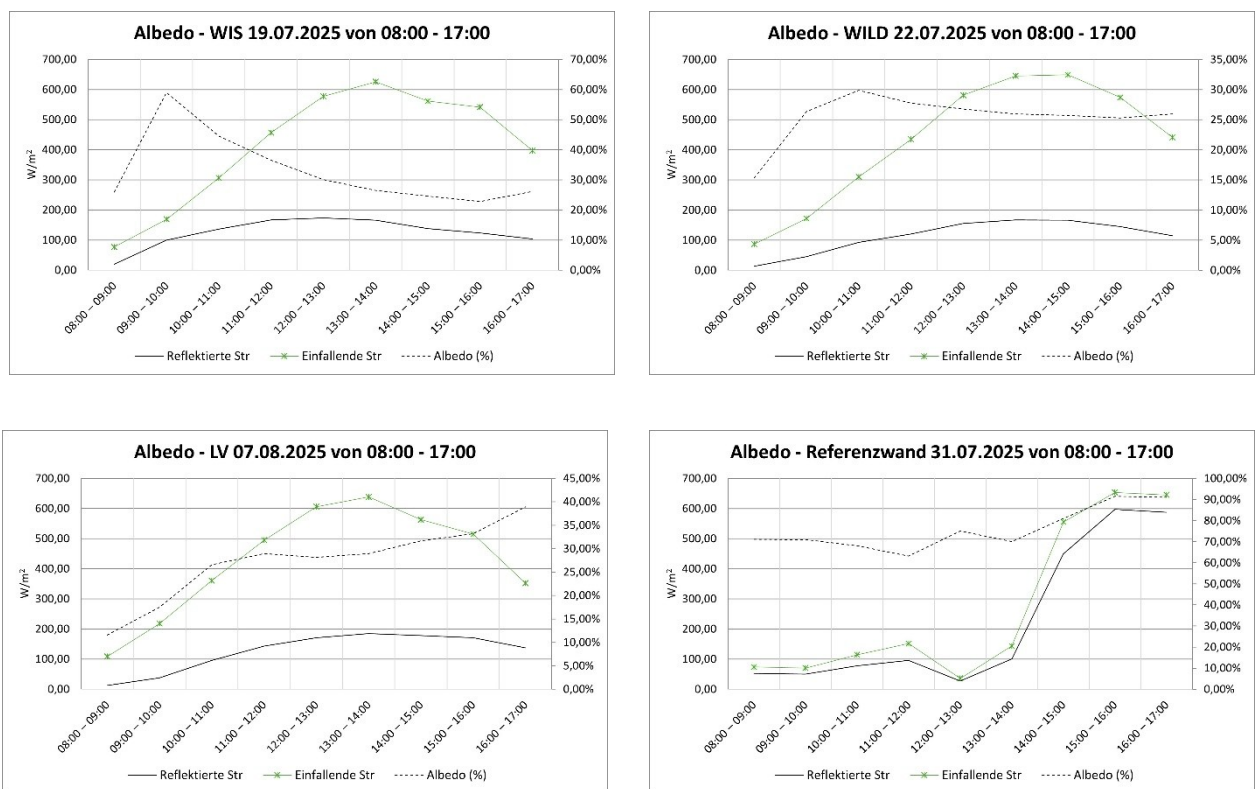


Abbildung 40: Albedomessungen, Tagesverläufe

Fotodokumentation der vermessenen Elemente im Aufzeichnungszeitraum. Die Messpunkte sind gelb markiert. Grafik/ Fotos: AEE INTEC



WIS (*Wisteria sinensis*), Bild vom 22.7.2025



WILD (*Parthenocissus quinquefolia*, „Wilder Wein“), Bild vom 22.7.2025 vor der Prüfbox. Rechts im Bild die weiße Referenzwand.



LV (Living Wall), Bild vom 4.8.2025

Abbildung 41: Fotodokumentation der vermessenen Elemente im Aufzeichnungszeitraum. Die Messpunkte sind gelb markiert. Grafik/ Fotos: AEE INTEC

Die gemessenen Werte decken sich sehr gut mit bisher veröffentlichten Daten, wie bei Zhang (2019), der bei einem Testsetting mit Vertikalbegrünung aus Feuerranke (*Pyrostegia venusta*) eine Albedo („reflectance“) von 0,26 misst. Die Albedo unterschied sich bei unseren Messungen zwischen unterschiedlichen Pflanzenarten der troggebundenen Vertikalbegrünung nicht wesentlich, lediglich bei der Living Wall lag sie etwas höher. Eine mögliche Ursache dafür könnte das schwarze Trägervlies der Living Wall sein, während die troggebundene Begrünung vor der weißen Referenzwand platziert ist. Die konsistenten Werte trotz unterschiedlicher Pflanzenarten lassen zu, dass für künftige näherungsweise Berechnungen von Strahlungsbilanzen und Annahmen in Gebäudesimulationsprogrammen für belaubte Vertikalbegrünungen ein Wert von 0,25 angesetzt werden kann. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass 75% der eintreffenden Solarstrahlung von der Begrünung entweder absorbiert oder transmittiert werden.

4.1.5 Strahlungsminderung, punktuelle Messung Wand

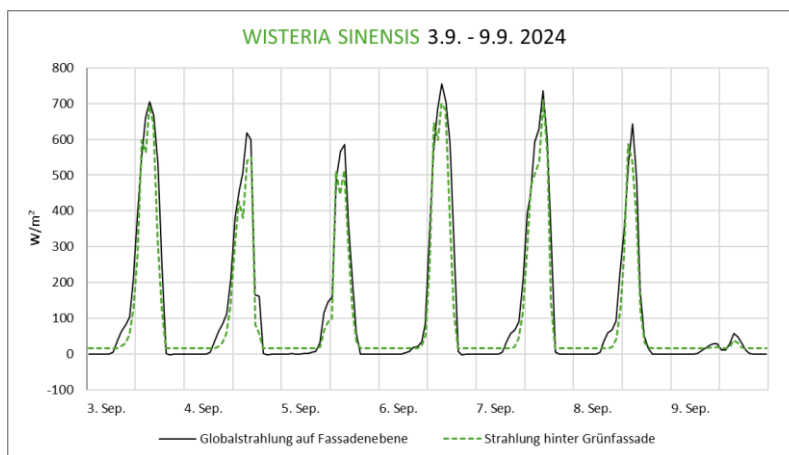
Im Folgenden werden die Ergebnisse der stationären Pyranometermessung vor und hinter der Begrünung dargestellt. Damit wird abgebildet, welcher Anteil der eintreffenden Solarstrahlung durch die Begrünung transmittiert wird und auf die dahinterliegende Wand trifft.

LIVING WALL

Die Messungen an der Living Wall dienen zur Überprüfung der Messtechnik und zeigten erwartungsgemäß die vollständige Abschirmung der eintreffenden Solarstrahlung durch die opake Trägerkonstruktion.

WISTERIA SINENSIS (chinesischer Blauregen)

Der Anteil der transmittierten Strahlung auf die dahinterliegende Wand reduzierte sich zunehmend in der Anwuchsphase der Fassadenbegrünung. Abbildung 42 zeigt die entsprechenden Messungen im Pflanzjahr 2024, wo aufgrund eines Spätfrostes das Hauptwachstum erst im Herbst stattfand, und im darauffolgenden Sommer 2025. Für die Grafik wurden Stundenmittelwerte der einfallenden und transmittierten Strahlung in W/m^2 verwendet. Rechts sind die Werte für den errechneten Transmissionsgrad (transmittierte Strahlung/einfallende Strahlung) in Prozent für einen repräsentativen Tageszeitraum angegeben. Weiters sind die dazugehörigen Durchschnittswerte für Deckungsgrad, Wall Leaf Area Index (WLAI) und kubisches Pflanzenvolumen der unteren beiden Quadranten, wo das Pyranometer positioniert ist, angeführt.



3.9.2024, 08:30-18:30

Transmissionsgrad

Mittelwert 65%

Min 35% (08:30)

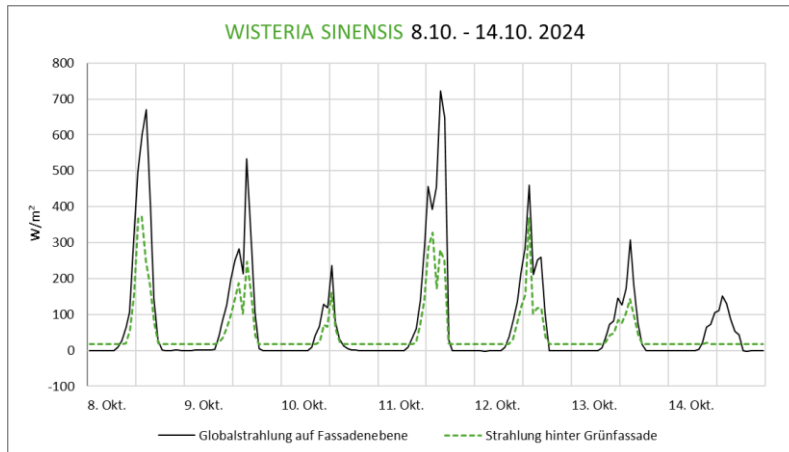
Max 98% (15:30)

Deckungsgrad 35,5%

WLAI 1,27

Kub. Pflanzenvolumen

0,36 m^3/m^2



08.10.2024, 08:30-17:30

Transmissionsgrad

Mittelwert 53%

Min 31%

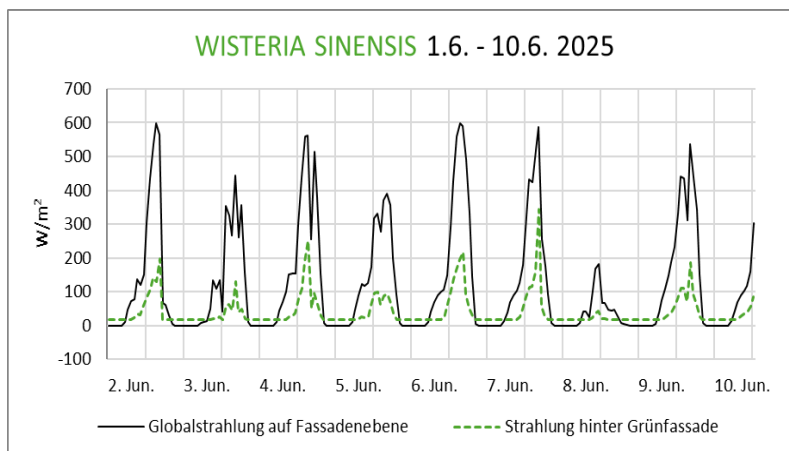
Max 74%

Deckungsgrad 31%

WLAI 1,42

Kub. Pflanzenvolumen

0,25 m³/m²



06.06.2025, 07:30-19:30

Transmissionsgrad

Mittelwert 26%

Min 16%

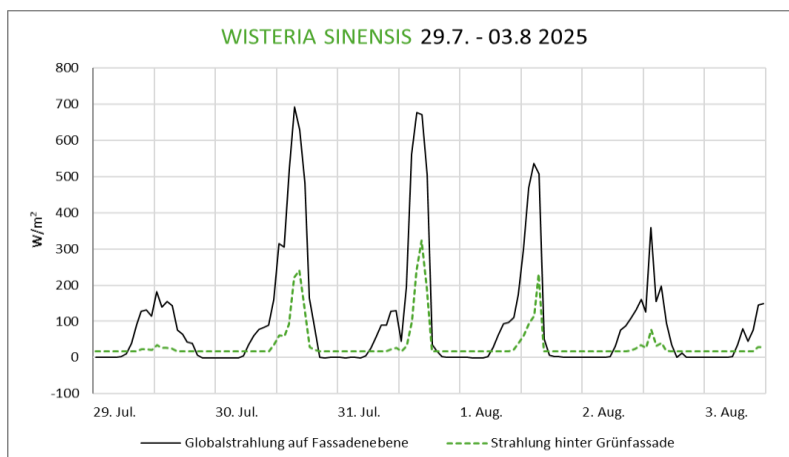
Max 37%

Deckungsgrad 62%

WLAI 2,55

Kub. Pflanzenvolumen

0,46 m³/m²



30.07.2025, 08:30-18:30

Transmissionsgrad

Mittelwert 23%

Min 17%

Max 38%

Deckungsgrad 67%

WLAI 1,97

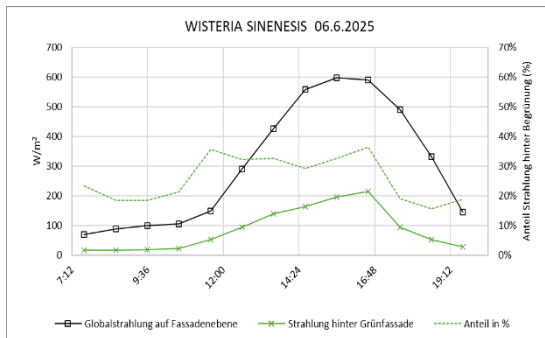
Kub. Pflanzenvolumen

0,58 m³/m²

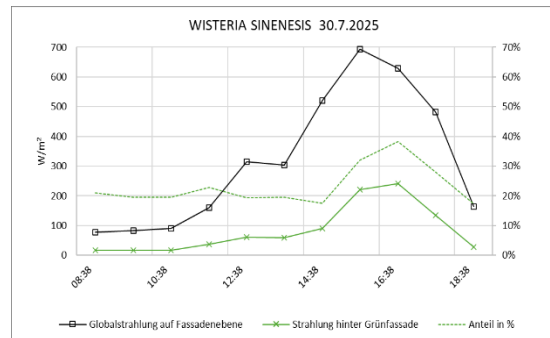
Abbildung 42: Globalstrahlung in Fassadenebene und transmittierte Strahlung hinter der Vertikalbegrünung. Verlauf mit zunehmenden Pflanzenwachstum. Rechts: Werte für je einen repräsentativen Tag und zugehörige Pflanzenparameter als Durchschnittswerte für Quadrant 1 und 2, die vor dem Pyranometer liegen.

Auch im Tagesverlauf – und damit bei unterschiedlichen Sonneneinstrahlungswinkeln auf die Testfassade – verändern sich die Transmissionswerte dynamisch (Abbildung 43: Strahlungstransmis-

sion im Tagesverlauf durch die Begrünung mit chinesischem Blauregen (Abbildung 43). Da die Testfassade südwestlich orientiert ist, ist die Sonneneinstrahlung gegen 15:00 am direktesten, was aus den Globalstrahlungskurven gut ablesbar ist. Gerade in den Nachmittagsstunden, die im urbanen Raum auch die höchste Hitzebelastung aufweisen, ist zwar der Transmissionsgrad am höchsten, der absolute Unterschied zwischen ankommender Strahlung und Strahlung hinter der Begrünung jedoch ebenfalls am größten. Er erreicht um 15:30 bis zu 403 W/m² am 6.6.2025 bzw. 471 W/m² am 30.7.2025, um die die solare Einstrahlung auf die Fassade reduziert wird.



Transmissionsgrad
Mittelwert 26%
 Min 16% (18:30)
 Max 37% (16:30)

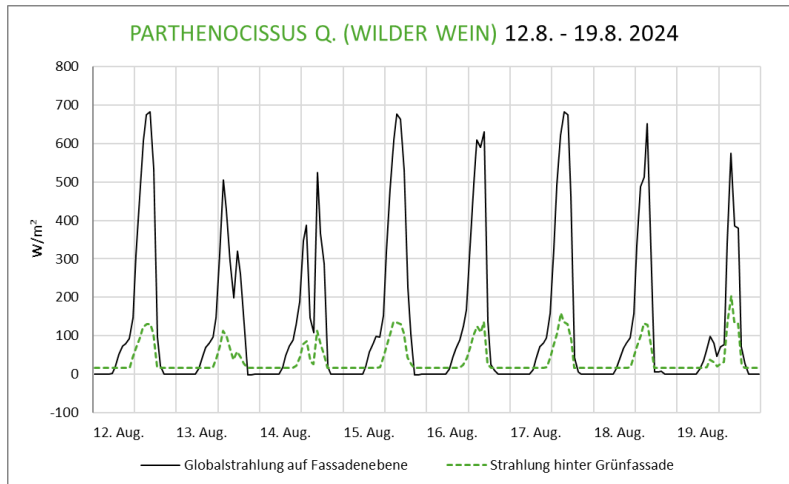


Transmissionsgrad
Mittelwert 23%
 Min 17% (18:30)
 Max 38% (16:30)

Abbildung 43: Strahlungstransmission im Tagesverlauf durch die Begrünung mit chinesischem Blauregen.

PARTHENOCISSUS QUINQUEFOLIA (Wilder Wein)

Beim Parthenocissus schlug sich der Unterschied zwischen dem dichten Anwuchs 2024 und zunehmend schütterer Belayung 2025 auch in den Transmissionsmessungen nieder (Abbildung 44). Die Tagesmittelwerte des Transmissionsgrades erreichten 2024 in gut angewachsenem Zustand 21%, während sie an den ausgewerteten Tagen im Folgejahr um 30% betrugen. Der Deckungsgrad der unteren beiden Quadranten lag analog dazu im August 2024 bei 90% und im Juli 2025 nur bei 54%.



15.08.2024, 08:30-18:30

Transmissionsgrad

Mittelwert 21%

Min 17%

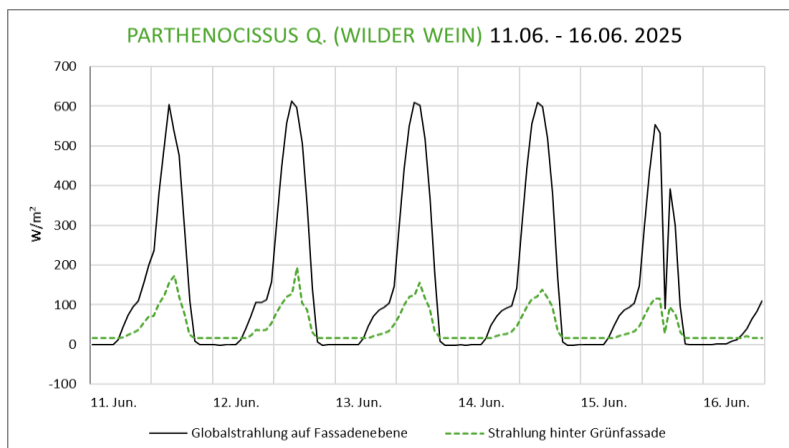
Max 28%

Deckungsgrad 90%

WLAI 2,97

Kub. Pflanzenvolumen

0,31 m³/m²



11.06.2025, 08:40-18:40

Transmissionsgrad

Mittelwert 30%

Min 24%

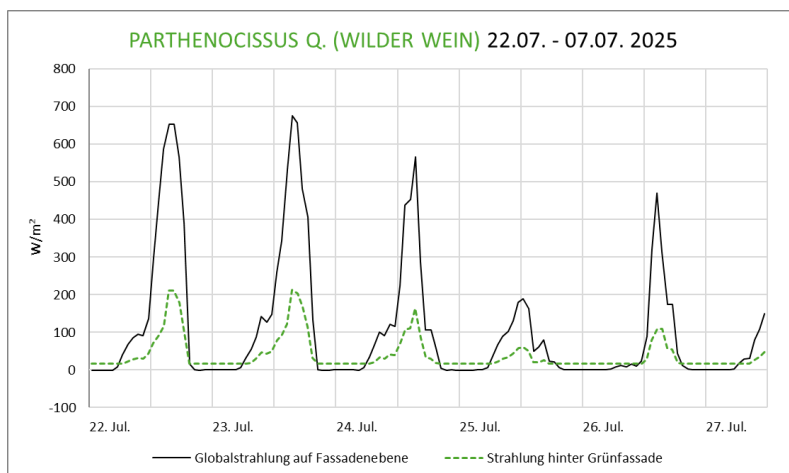
Max 35%

Deckungsgrad 52%

WLAI 1,95

Kub. Pflanzenvolumen

0,25 m³/m²



23.07.2025, 08:40-18:40

Transmissionsgrad

Mittelwert 31%

Min 23%

Max 35%

Deckungsgrad 54%

WLAI 1,71

Kub. Pflanzenvolumen

0,26 m³/m²

Abbildung 44: Globalstrahlung in Fassadenebene und transmittierte Strahlung hinter der Vertikalbegrünung mit Wildem Wein 2024 und 2025. Rechts: Werte für je einen repräsentativen Tag und zugehörige Pflanzenparameter als Durchschnittswerte für Quadrant 1 und 2.

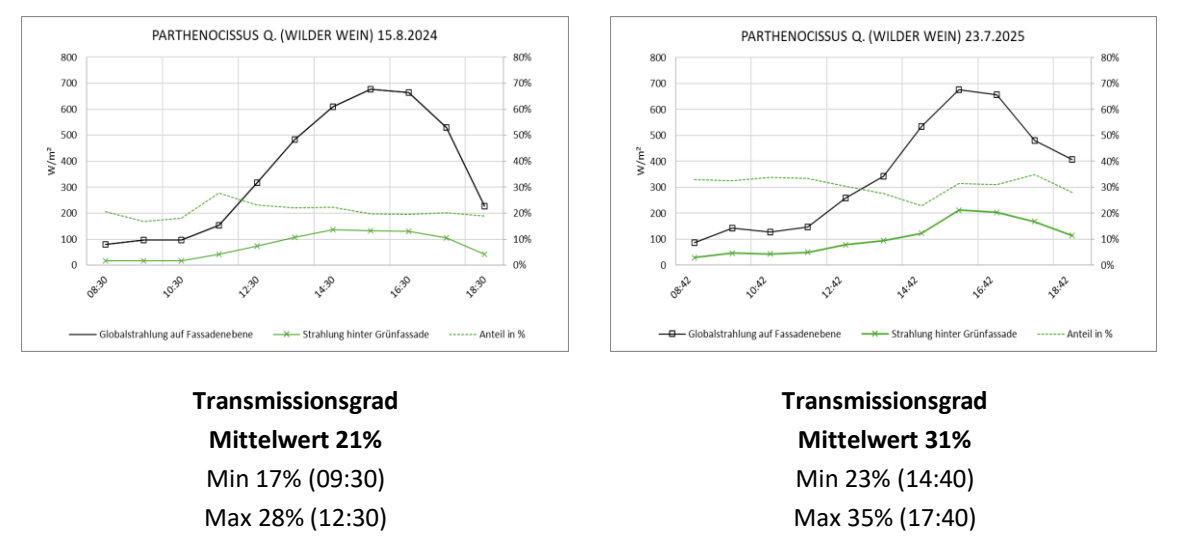


Abbildung 45: Strahlungstransmission im Tagesverlauf durch die Begrünung mit Wildem Wein.

Die im Detail analysierten Tagesverläufe, für die wieder möglichst sonnige Tage ohne Bewölkung ausgewählt wurden, zeigten weniger Schwankungsbreite im Transmissionsgrad über den Tagesverlauf als bei der Begrünung mit Wisteria. Bei guter Deckung wurden 2024 recht konstante 20% gemessen. Der höhere Deckungsgrad und WLAI beim Wilden Wein 2024 könnten zu dieser gleichmäßigeren Verteilung beitragen, da weniger Lücken in der grünen Wand vorhanden sind, durch die es je nach Sonnenstand zu erhöhter Einstrahlung auf das stationäre Pyranometer hinter der Begrünung kommen kann.

Tabelle 17: Transmission Tagesmittel, Vertikalbegrünung

Datum	Vertikalbegrünung	Transmission Tagesmittel %	Deckung %	WLAi	Kub. Pflanzen- volumen m³/m²
02.09.2024	Wisteria	65	35,5	1,27	0,36
08.10.2024	Wisteria	53	31	1,42	0,25
06.06.2025	Wisteria	26	62	2,55	0,46
30.08.2025	Wisteria	23	67	1,97	0,58
15.08.2024	Parthenocissus	21	90	2,97	0,31
11.06.2025	Parthenocissus	30	52	1,95	0,25

Datum	Vertikalbegrünung	Transmission Tagesmittel %	Deckung %	WLAI	Kub. Pflanzen- volumen m ³ /m ²
23.07.2025	Parthenocissus	31	54	1,71	0,26

4.1.6 Strahlungsminderung, flächige Messung durch transparente Bauteile mittels Pyroscanner.

Abbildung 46 zeigt den ersten Durchlauf der Pyroscanner-Messungen im September und Oktober 2024. Zu diesem Zeitpunkt erreichte die Vertikalbegrünung mit Wildem Wein (2_Wild) einen projizierten Deckungsgrad von 35% der Fensterfläche. Die Begrünung mit Wisteria (3_Wis) bedeckte die Glasfläche Fenster nicht, ebenso wie naturgemäß die beiden Fassaden mit Fensterausschnitt 4_Wild_F und 5_Wis_F, die somit als Referenz dienten. Der Gesamtenergiedurchlassgrad durch die Dreischeibenverglasung beträgt ohne Verschattung (bei Einstrahlung im rechten Winkel auf die Scheiben) 0,53. Er beschreibt die Summe aus der direkten Strahlungstransmission (τ_e) und der sekundären Wärmeabgabe (q_i) nach innen. Die sekundäre Wärmeabgabe liegt üblicherweise im Bereich von 2-5%, es kann also von einem maximal erreichbare Wert für den effektiven Transmissionsgrad von 0,48-0,51 ausgegangen werden. Die Verschattung wird analog zum Transmissionsgrad als Bioshading Factor F_{bs} angegeben, der beschreibt welcher Anteil der einfallenden Strahlung durch die Vertikalbegrünung hindurchdringt. Ein F_{bs} von 1,0 entspricht somit keiner Verschattung durch Begrünung, während ein F_{bs} von 0,0 eine völlige Verschattung repräsentieren würde. Für die Abbildung wurden alle Messwerte eliminiert, bei dem der Anteil diffuser Strahlung über 50% betrug, also eine starke Bewölkung vorlag. Anstelle der Uhrzeit wurde der relative Azimutwinkel verwendet. Er beschreibt, wie stark der Einstrahlungswinkel der Sonne zum jeweiligen Messzeitpunkt von der senkrechten Einstrahlung auf das Fenster abweicht. Null Grad entsprechen durch die südwestliche Fassadenausrichtung etwa 15:00 nachmittags. Die Messungen zeigten einen F_{bs} von 0,75 bei 35% Prozent Bewuchs, was hochgerechnet auf 100% Bewuchs einem F_{bs} von 0,30 entsprechen würde.

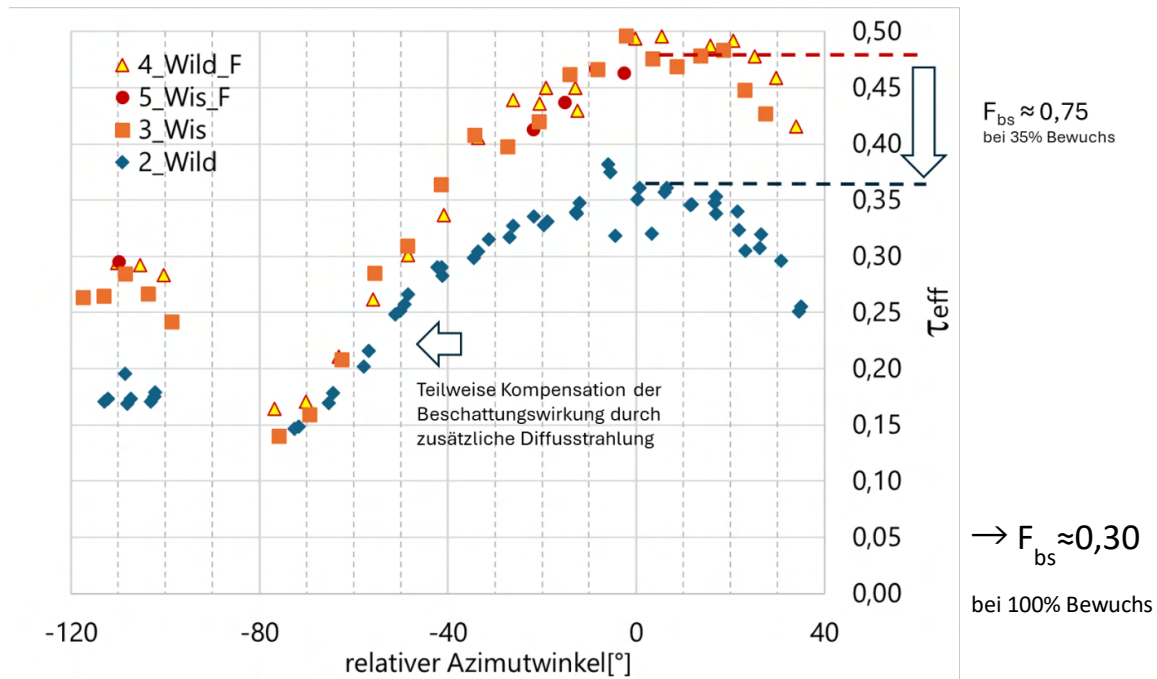


Abbildung 46: Messung des effektiven Transmissionsgrades durch die Verglasung mittels Py-roscanner und Umrechnung in den Bioshading coefficient F_{bs} . Messzeitraum Sept./Okt. 2024. Es wurden nur Messpunkte mit Diffusstrahlungsanteil unter 50% (keine starke Bewölkung) berücksichtigt.

Besonders interessant ist, dass die Abschirmung der Solarstrahlung durch die Begrünung erst mit zunehmender Tageszeit ansteigt und am Vormittag, wenn die Sonne nicht direkt auf die Verglasung strahlt (relativer Azimutwinkel unter -40°), kaum ausgeprägt ist. Das könnte auf eine teilweise Kompensation der Beschattungswirkung durch zusätzliche Diffusstrahlung über das Blattwerk sein. Diese Ergebnisse stehen dem gängigen Argument entgegen, dass durch Begrünung vor Fensterflächen eine deutliche Verdunkelung mit höherem Beleuchtungsenergieverbrauch eintritt.

Beim zweiten Messdurchgang im Juni/Juli 2025 wiesen sowohl der Prüfling mit Wildem Wein als auch der mit Wisteria eine teilweise Deckung der Fensterfläche auf, wobei der projizierten Deckungsgrad mit 78% (2_Wild) bzw. 55% (3_Wis) unterschiedlich hoch war. Zu beachten ist auch der zeitlich unterschiedliche Verlauf der Kurven. Durch den deutlich höheren Sonnenstand im Juni/Juli erfolgt die maximale Einstrahlung auf das Fenster erst am späteren Nachmittag, während das Maximum im September/Oktobre deutlich früher erreicht wird.

ERGEBNISSE PYROSCANNER JULI 2025

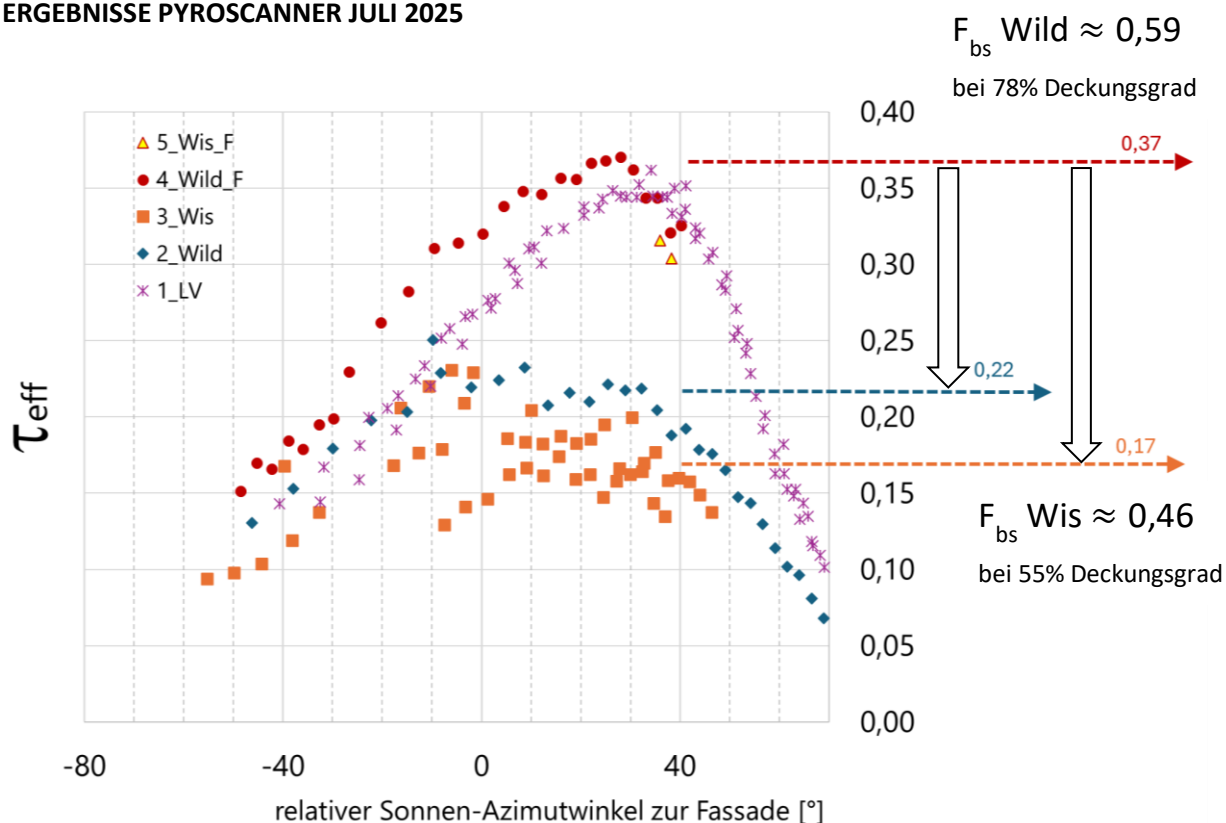


Abbildung 47: Messzeitraum Juni/Juli 2025. Messung des effektiven Transmissionsgrades durch die Verglasung mittels Pyroscanner und Umrechnung in den Bioshading coefficient F_{bs} . Es wurden nur Messpunkte mit Diffusstrahlungsanteil unter 50% berücksichtigt.

Interessant ist, dass die gemessenen Verschattungswerte der beiden Vertikalbegrünungen nicht mit dem projizierten Deckungsgrad korrelieren. Der F_{bs} der Wisteria ist trotz geringerem Deckungsgrad kleiner als der des Wilden Weines. Eine lineare Hochrechnung rein auf Basis des Deckungsgrades würde für 100% Deckung Werte von 0,48 für den Wilden Wein und 0,017 für die Wisteria ergeben, was im Vergleich zu den Messungen 2024 wenig glaubwürdig erscheint. Auf Basis dieser Erkenntnis wurden auch die anderen gemessenen Pflanzenparameter analysiert.

Tabelle 18: Transmissionsgrad und Pflanzenparameter zum Zeitpunkt der Pyroscannermessungen am 23 Juli 2025.

Modul	Transmissionsgrad	Deckungsgrad Fenster	WLAI alle Quadranten	Mittlere Tiefe Pflanzenkörper (cm)	Pflanzenvolumen m^3/m^2
Wilder Wein	0,59	0,78	1,539	23,8	0,238
Wisteria s.	0,46	0,55	1,488	45,25	0,452

Während der projizierte Deckungsgrad des Wilden Weines deutlich höher war, zeigten beide Vertikalbegrünungen einen ähnlichen WLAI. Die Tiefe des Pflanzenkörpers schließlich war bei der *Wisteria* fast doppelt so hoch, was auch den niedrigeren F_{bs} trotz geringerer Deckung erklären könnte. Die entsprechende Schlussfolgerung ist, dass rein der projizierte Deckungsgrad zur Beurteilung bzw. Voraussage der Verschattungsfunktion einer Vertikalbegrünung - zumindest bei mittleren Deckungsgraden - nicht ausreichend zu sein scheint. Andere Parameter wie WLAI, Pflanzenkörpervolumen und ev. auch die spezifische Blattbeschaffenheit der Pflanzenart könnten ebenfalls Einfluss haben. Dieser Punkt ist aktuell Gegenstand weiterer Forschungen.

Im kürzlich publizierten Projekt GLASGrün (Stangl et al. 2025) wurden eine Glasfassade mit unterschiedlichen Pflanzengattungen begrünt und der F_{bs} mittels einem statischen Pyranometer hinter der Vertikalbegrünung ermittelt (Poiss et al. 2025). Für die *Wisteria sinensis* wird im Mai 2024 bei einem Deckungsgrad von 43% ein F_{bs} von 0,58 angegeben. Dieser Wert korreliert zu dem in MARGRET gemessenen. Bei einem Deckungsgrad von 98% und einem WLAI von 4,1 erreichte die *Wisteria* im August bei GLASGrün ein F_{bs} von 0,16. Für die Begrünung mit Echtem Hopfen (*Humulus lupulus*) wurde dagegen bei etwas geringerer 95% Deckung, jedoch einem WLAI von 5,8 ein F_{bs} von nur 0,08 gemessen. Dies unterstützt die These über relevante Einflussgrößen auf den F_{bs} abseits des Deckungsgrades.

4.1.7 Oberflächentemperaturen und Wärmestrom Fassade

Der folgende Abschnitt umfasst die Auswertung erfassten Oberflächentemperaturen sowie der resultierenden Wärmeströme der begrünten Fassade im Vergleich zur Referenzfläche. Dabei wird die thermische Wirkung der Globalstrahlung auf die Außenoberflächen sowie der daraus resultierende energetische Eintrag durch die opaken Bauteile in den Innenraum quantifiziert. Die Gegenüberstellung der Messdaten dient der Veranschaulichung der thermischen Dämpfungs- und Verzögerungseffekte durch das Begrünungssystem.

Diese physikalischen Randbedingungen werden maßgeblich durch die variierende Vitalität der Pflanzen beeinflusst, da Frostschäden bei *Wisteria sinensis* im Jahr 2024 sowie ein Pilzbefall bei *Parthenocissus quinquefolia* im Jahr 2025 die Blattdichte und damit die Verschattungsleistung der Module veränderten (siehe Kapitel 3.3.1). Infolgedessen wies *Parthenocissus quinquefolia* in der Vegetationsperiode 2024 eine höhere Dichte als im Folgejahr auf, während bei *Wisteria sinensis* nach der anfänglichen Regenerationsphase 2025 ein deutlicher Zuwachs der Biomasse zu verzeichnen war. Die gedämmten Holzfassaden weisen einen U-Wert von $0,155 \text{ W/m}^2\text{K}$ auf bei einer gemessenen Albedo von rund 75 %. Bei Vergleichen Ergebnissen aus andern Forschungsprojekten ist das zu berücksichtigen.

Living Wall, 12. August 2025

Das Diagramm vom 12. August 2025 zeigt eine maximale Oberflächentemperatur an der Referenzfassade von $44,5 \text{ }^\circ\text{C}$ um 16:00 Uhr während die Oberflächentemperatur an der Fassade hinter der Living Wall zu diesem Zeitpunkt $31,3 \text{ }^\circ\text{C}$ beträgt was einer Reduktion von $13,2 \text{ K}$ entspricht. Die Globalstrahlung auf die Fassade erreicht zu diesem Zeitpunkt 701 W/m^2 bei einer Außenlufttemperatur von $28,7 \text{ }^\circ\text{C}$. Der thermische Peak der Referenzfassade liegt um 16:00 Uhr während die Living Wall ihr Temperaturmaximum von $31,6 \text{ }^\circ\text{C}$ um 16:30 Uhr erreicht woraus ein zeitlicher Versatz von 30 Minuten resultiert. Die kumulierten Wärmeströme belaufen sich auf $5,5 \text{ Wh/m}^2$ für die Referenzfassade und $6,8 \text{ Wh/m}^2$ für die Grünfassade was einen Differenzwärmestrom von $-1,3 \text{ Wh/m}^2$ ergibt.

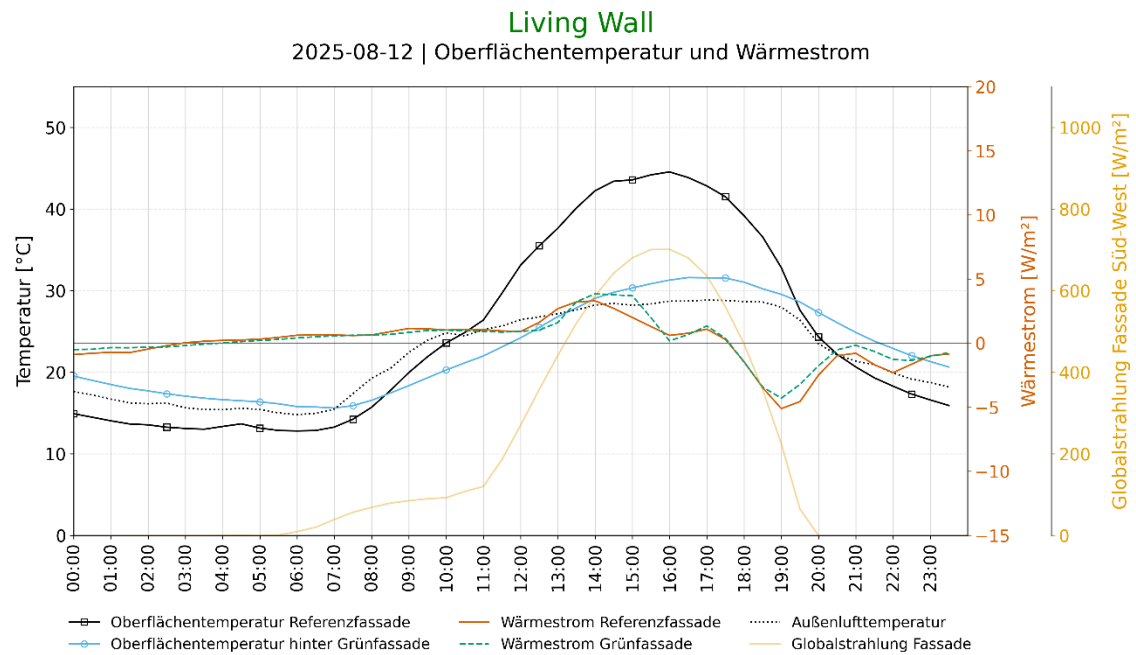


Abbildung 48: Oberflächentemperatur und Wärmestrom, Living Wall 12.8.2025

Living Wall, 13. August 2025

Am 13. August 2025 wird die maximale Oberflächentemperatur der Referenzfassade mit 45,6 °C um 15:30 Uhr gemessen wobei die Temperatur hinter der Begrünung 32,8 °C beträgt, was eine Differenz von 12,8 K darstellt. Zu diesem Zeitpunkt wirkt eine Globalstrahlung von 669 W/m² bei einer Außenlufttemperatur von 30,8 °C. Der Peak der Referenzfassade tritt um 15:30 Uhr auf, während die Grünfassade ihr Maximum von 33,4 °C erst um 17:00 Uhr verzeichnet was einem zeitlichen Versatz von 90 Minuten entspricht. Die kumulierten Wärmeströme betragen 4,6 Wh/m² für die Referenz und 5,3 Wh/m² für die Grünfassade mit einem Differenzwärmestrom von -0,7 Wh/m².

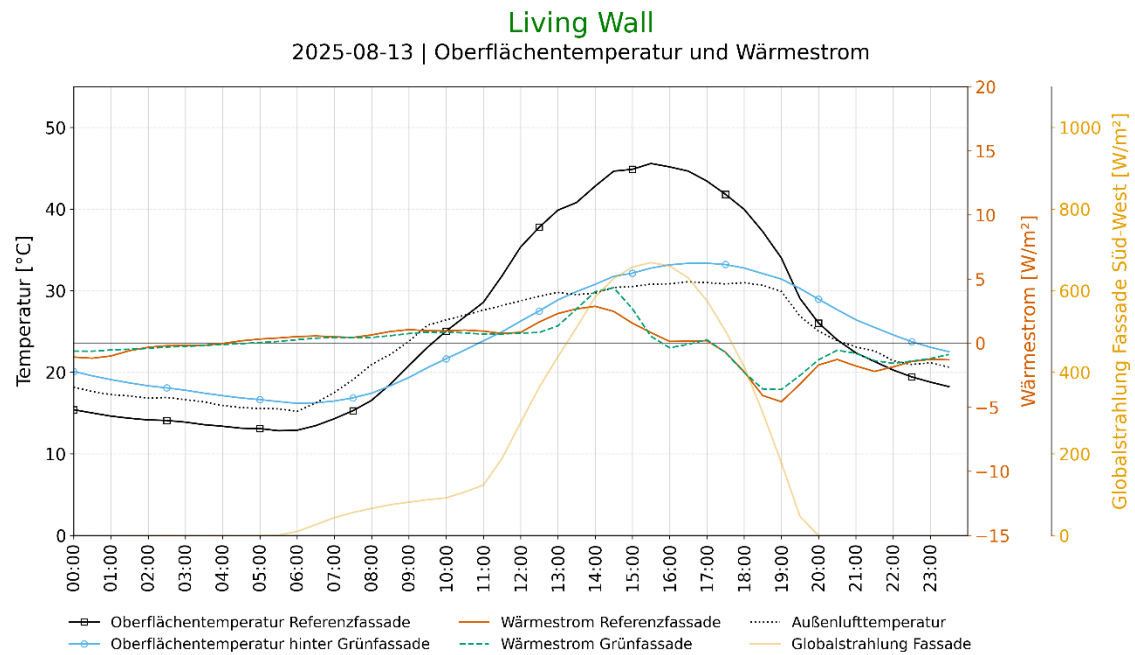


Abbildung 49: Oberflächentemperatur und Wärmestrom, Living Wall 13.8.2025

Parthenocissus quinquefolia, 15. August 2024

Die Messungen vom 15. August 2024 ergeben eine maximale Oberflächentemperatur der Referenz von 47,0 °C um 16:00 Uhr während hinter der Parthenocissus-Fassade 39,9 °C gemessen werden was einer Reduktion von 7,1 K entspricht. Die Globalstrahlung beträgt zu diesem Zeitpunkt 680 W/m² bei einer Außenlufttemperatur von 32,7 °C. Der Peak der Referenz liegt um 16:00 Uhr und der Peak der Grünfassade mit 39,9 °C tritt zeitgleich auf, sodass kein zeitlicher Versatz feststellbar ist. Der kumulierte Wärmestrom der Referenzfassade liegt bei 0,7 Wh/m² und der der Grünfassade bei -0,9 Wh/m² was eine Differenz von 1,6 Wh/m² ergibt. Die Performance lässt sich primär durch die Verschattungswirkung des Laubes erklären wobei der Abstand von 20 cm zur Fassade bei unvollständiger Ausbildung der Vegetation eine signifikante Hinterlüftung zulässt die den Wärmestrom in das Gebäude effektiv reduziert.

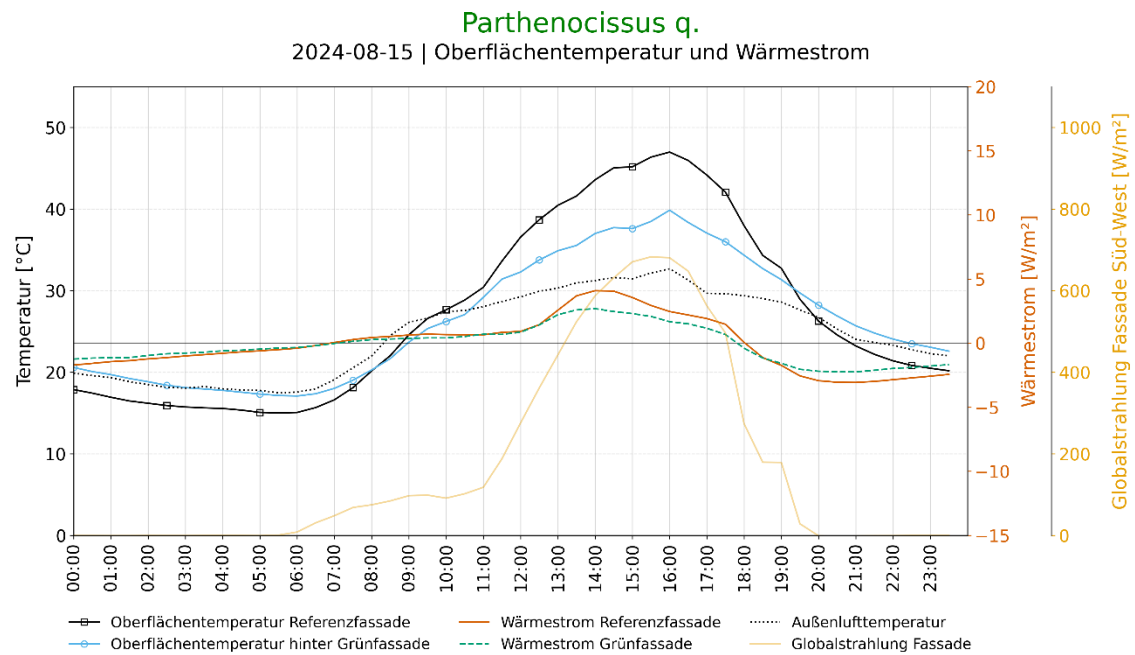


Abbildung 50: Oberflächentemperatur und Wärmestrom, Parthenocissus q. 15.8.2025

Parthenocissus quinquefolia, 19. August 2025

Am 19. August 2025 erreicht die Referenzfassade eine maximale Oberflächentemperatur von 42,3 °C um 16:00 Uhr während der Temperatur hinter der Begrünung bei 38,3 °C liegt, was eine Differenz von 4,0 K bedeutet. Die Globalstrahlung beträgt zu diesem Zeitpunkt 713 W/m² bei einer Außenlufttemperatur von 26,0 °C. Beide Maxima treten um 16:00 Uhr auf wodurch kein zeitlicher Versatz vorliegt. Die kumulierten Wärmeströme berechnen sich auf 10,7 Wh/m² für die Referenz und 11,4 Wh/m² für die Grünfassade mit einem Differenzwärmestrom von -0,7 Wh/m². Das physikalische Verhalten zeigt, dass bei einer nicht vollständig ausgebildeten Blattmatrix der Strahlungsschutz gemindert ist und die Fassade trotz des Abstands von 20 cm eine thermische Belastung erfährt, die der Referenz sehr nahe kommt.

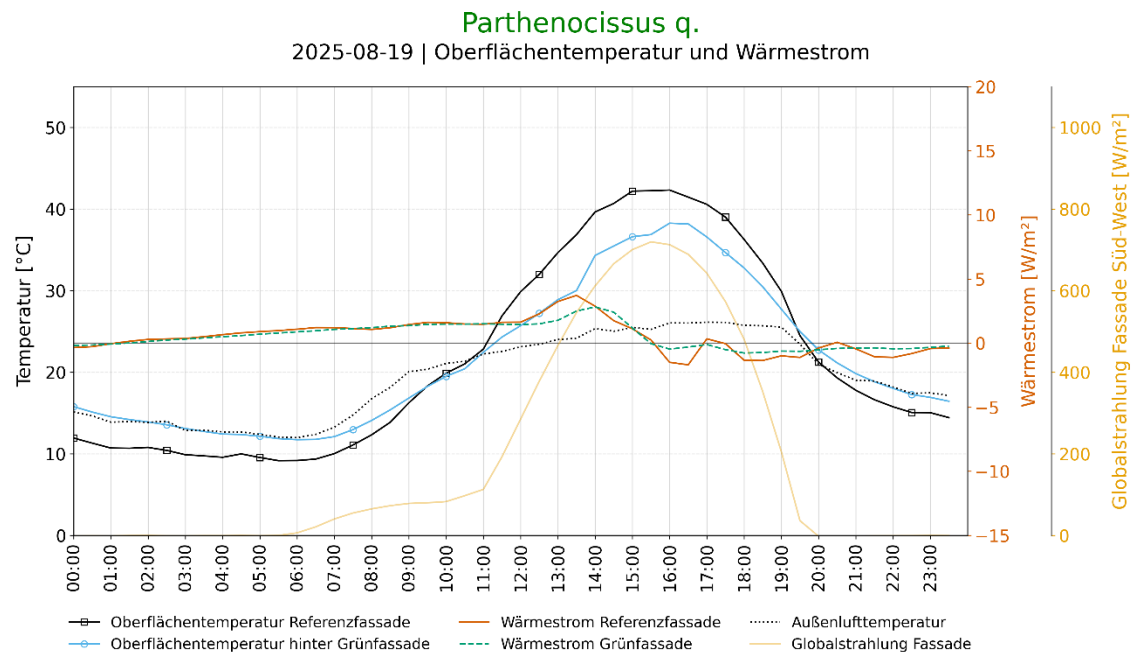


Abbildung 51: Oberflächentemperatur und Wärmestrom, Parthenocissus q. 19.8.2025

Parthenocissus quinquefolia (mit Fensterausschnitt), 23. August 2024

Am 23. August 2024 beträgt die maximale Oberflächentemperatur der Referenzfassade 44,3 °C um 15:30 Uhr während hinter der Fassade mit Fensterausschnitt 40,3 °C gemessen werden was einer Reduktion von 4,0 K entspricht. Zu diesem Zeitpunkt liegt die Globalstrahlung bei 723 W/m² und die Außenlufttemperatur bei 29,3 °C. Der Peak der Referenz tritt um 15:30 Uhr auf, während die Grünfassade ihr Maximum von 40,3 °C ebenfalls um 15:30 Uhr erreicht womit kein zeitlicher Versatz vorliegt. Die kumulierten Wärmeströme belaufen sich auf 3,1 Wh/m² für die Referenz und 4,4 Wh/m² für die Grünfassade was einen Differenzwärmestrom von -1,3 Wh/m² ergibt.

Parthenocissus q. mit Fensterausschnitt 2024-08-23 | Oberflächentemperatur und Wärmestrom

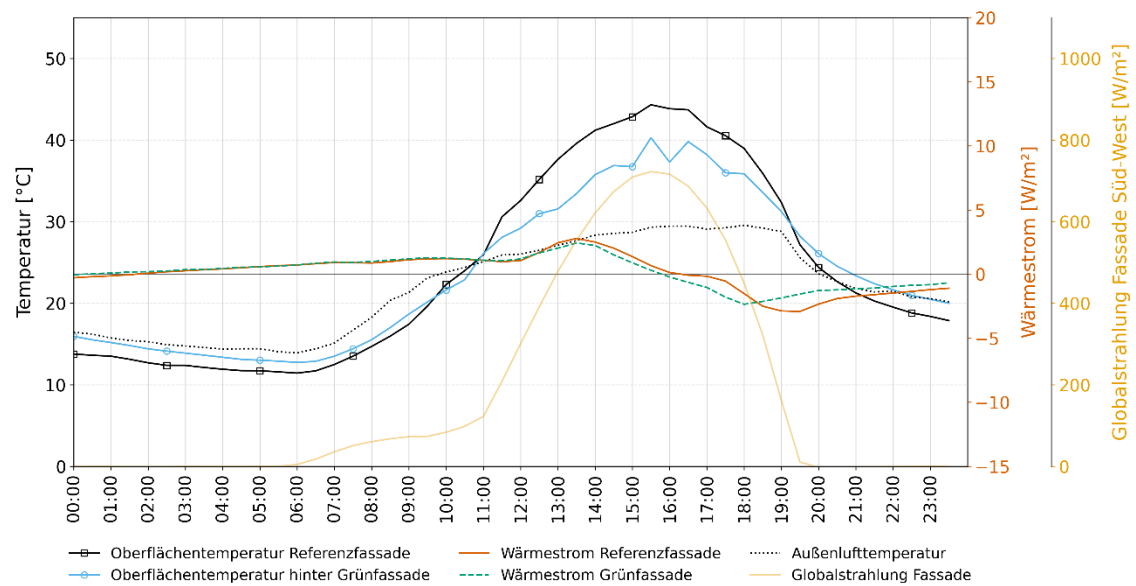


Abbildung 52: Oberflächentemperatur und Wärmestrom, Parthenocissus q. mit Fensterausschnitt
23.8.2024

Wisteria sinensis, 18. August 2025

Die Analyse für die Wisteria sinensis vom 18. August 2025 zeigt eine maximale Oberflächentemperatur der Referenz von 40,1 °C um 16:30 Uhr während der Temperatur hinter der Begrünung 34,0 °C beträgt was einer Reduktion von 6,1 K entspricht. Die Globalstrahlung liegt bei 654 W/m² bei einer Außenlufttemperatur von 25,2 °C. Der Peak der Referenzfassade wird um 16:30 Uhr erreicht, während die Grünfassade ihr Maximum von 35,2 °C bereits um 14:30 Uhr verzeichnete. Der kumulierte Wärmestrom der Referenzfassade beträgt 6,5 Wh/m² und der der Grünfassade 10,2 Wh/m² was zu einem Differenzwärmestrom von -3,7 Wh/m² führt.

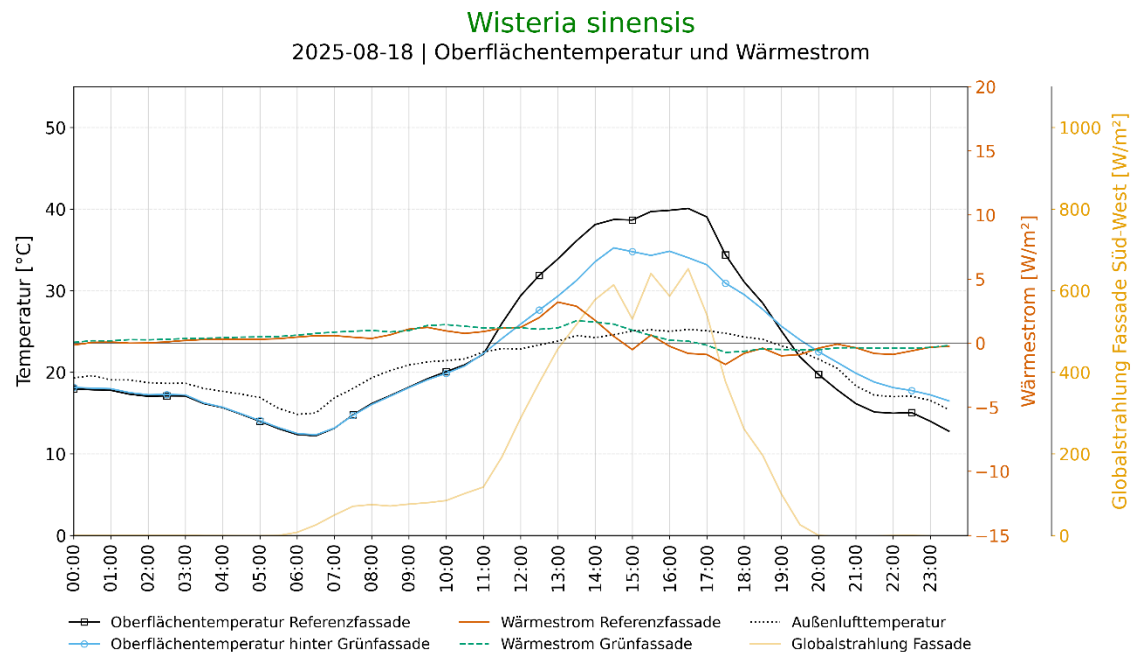


Abbildung 53: Oberflächentemperatur und Wärmestrom, Wisteria sinensis 18.8.2025

Thermischer Vergleich der Tagphase

Während der sommerlichen Einstrahlungsmaxima weisen alle Systeme eine Reduktion der Oberflächentemperaturen auf, wobei die Living Wall im Jahr 2025 die effektivste Abschirmung erzielt. Am 12. August 2025 senkte sie die Temperatur von 44,5 °C an der Referenz auf 31,3 °C hinter dem Paneel, was einer Differenz von 13,2 K entspricht. Dieser Effekt ist primär auf die Vegetationsträger aus EPS zurückzuführen, die als physischer Strahlungsschirm fungieren. Bei den bodengebundenen Systemen wird die Performance direkt durch die Blattdichte (WLAI) bestimmt. Parthenocissus quinquefolia erreichte im vitalen Zustand des Jahres 2024 eine Reduktion von 7,1 K (Referenz: 47,0 °C, Grün: 39,9 °C). Der vergleichende Blick auf die Pflanzendaten verdeutlicht den Leistungsabfall im Folgejahr. Während der WLAI in den relevanten Quadranten 1 und 2 im Jahr 2024 noch Werte von 3,6 bzw. 3,7 aufwies, sanken diese infolge eines Pilzbefalls im Jahr 2025 drastisch auf 1,3 bzw. 1,1. Infolgedessen reduzierte sich die Oberflächentemperaturreduktion am 19. August 2025 auf lediglich 4,0 K, da die geringere Blattdichte eine höhere Strahlungsabsorption an der Fassade zuließ. Wisteria sinensis erreichte am 18. August 2025 eine Reduktion von 6,1 K (Referenz: 40,1 °C, Grün: 34,0 °C). Hier zeigt der WLAI von 2,2 bis 2,4 in den unteren Quadranten, dass sich die Pflanze nach den Frostschäden von 2024 in einer Regenerationsphase mit deutlichem Biomassezuwachs befand. Allen Systemen ist gemeinsam, dass sie trotz der im Vergleich zur weißen Referenz (Albedo > 75 %) wesentlich höheren Strahlungsabsorption der Vegetation (Albedo 25 % bis 31 %) die solare Last auf der Wandoberfläche mindern.

Analyse der Nachtphase und Auskühlung

In der Nachtphase zeigen alle drei Systeme eine gegenüber der Referenzfassade verringerte Auskühlung, was physikalisch vorrangig auf eine eingeschränkte langwellige Abstrahlung zum kalten Nachthimmel zurückzuführen ist. Die Referenzfassade kühlt aufgrund ihrer ungestörten Sichtbeziehung am stärksten ab, während die Begrünung und der Vegetationsträger der Living Wall als

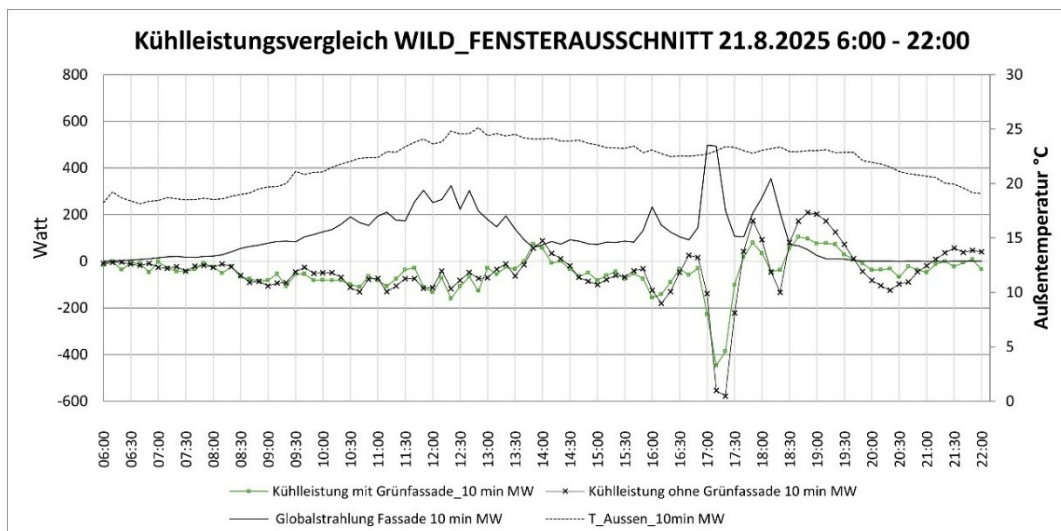
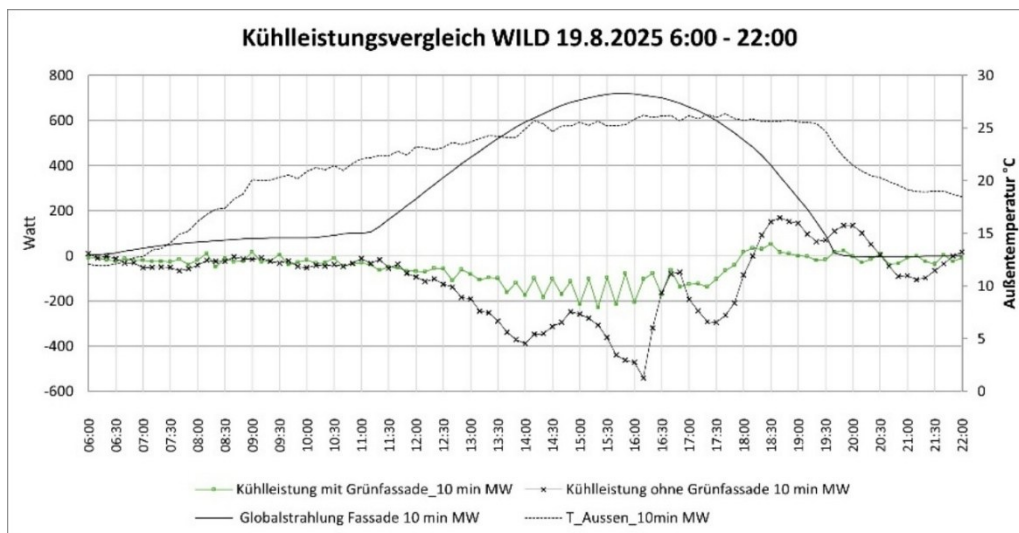
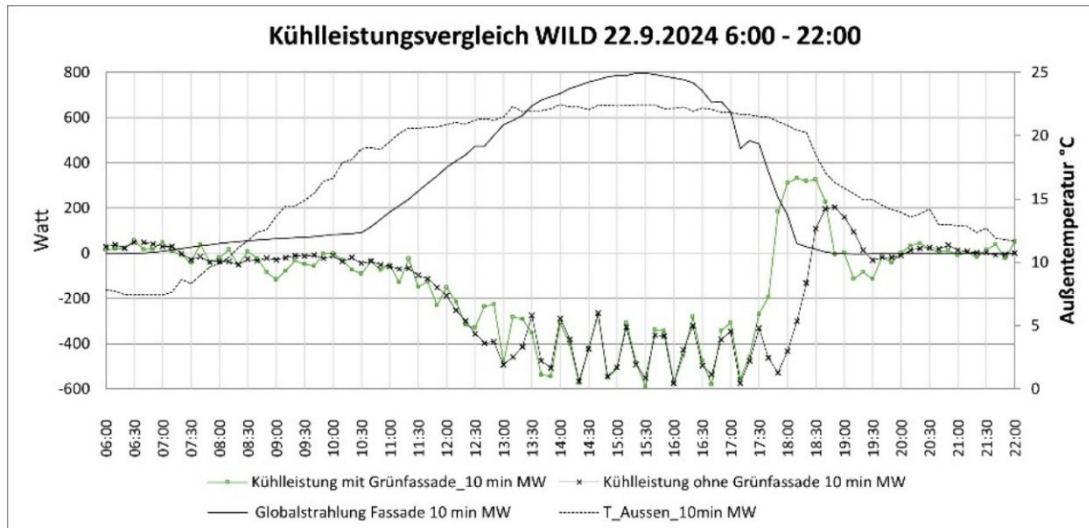
Strahlungshindernis wirken. Bei der Living Wall resultiert am 12. August um 03:30 Uhr eine gegenüber der Referenz um 3,8 K höhere Temperatur (Referenz: 13,0 °C, Grün: 16,8 °C), was zusätzlich durch die konstruktionsbedingt verringerte Konvektion im eingegengten Luftspalt verstärkt wird. Im Gegensatz dazu weisen Wisteria und Parthenocissus an allen Seiten einen Abstand von 20 cm zur Fassade auf, wodurch sich kein stabiles Luftpolster bildet, und ein kontinuierlicher Luftaustausch ermöglicht wird. Dennoch führt die Blockade der langwelligen Abstrahlung auch hier zu höheren nächtlichen Temperaturen. Parthenocissus lag in der Nacht zum 15. August 2024 um 2,2 K über der Referenz (Referenz: 15,6 °C, Grün: 17,8 °C). Bei Wisteria sinensis betrug die Differenz um Mitternacht am 18. August 2025 sogar 3,7 K (Referenz: 12,8 °C, Grün: 16,5 °C), was die isolierende Wirkung der Blattmatrix gegenüber der Wärmeabstrahlung verdeutlicht.

Fazit der energetischen Performance

Die kumulierten Wärmeströme spiegeln diese physikalischen Prozesse und den Einfluss des Pflanzenzustands wider. Bei der Living Wall führen die hohe Strahlungsabsorption am Tag und die gehemmte Auskühlung in der Nacht zu einem negativen Differenzwärmestrom von $-1,3 \text{ Wh/m}^2$. Ähnlich verhält es sich bei Wisteria sinensis mit einem Differenzwärmestrom von $-3,7 \text{ Wh/m}^2$, da die im Vergleich zu 2024 zwar regenerierte, aber noch unvollständige Biomasse (WLAI max. 2,4) den Nachteil der hohen Absorption noch nicht durch ausreichende Verschattung kompensieren konnte. Nur Parthenocissus quinquefolia konnte im dichten Zustand von 2024 (WLAI bis 3,7) einen positiven Differenzwärmestrom von $1,6 \text{ Wh/m}^2$ erzielen, da hier die Verschattungsleistung der vitalen Pflanzen den Wärmeeintrag trotz der Albedo-Nachteile und der behinderten nächtlichen Abstrahlung überwog. Dabei ist jedoch der Hinweis aus den im Kapitel 3.3.4 beschriebenen Nullmessungen vom 14. bis 17. August 2025 zu berücksichtigen. Diese zeigten bereits ohne Vertikalbegrünung geringfügige systemimmanente Abweichungen zwischen beiden Fassaden (geringere Einträge an Referenzfassade), weshalb die quantitativen Differenzwärmeströme als Tendenzen mit einer entsprechenden Unschärfe zu interpretieren sind.

4.1.8 Kühlbedarf Fassadenprüfbox

Im Rahmen des Projektes wurden auch die jeweiligen Kühlleistungen der Deckenkühlung im begrünten versus unbegrünten Raum aufgezeichnet. Ursprünglich sollten die Prüfboxen dauerhaft auf 22 Grad im Winter und 24 Grad im Sommer konditioniert werden. Im ersten Jahr 2024 konnten sinnvolle Auswertungen erst im Herbst, bei entsprechend angewachsener Begrünung getätigt werden. Aufgrund hydraulischer Umstellungen infolge anderweitiger Nutzung der Prüfbox in den Wintermonaten hat die Deckenkühlung im Referenzraum von Mai bis Juli leider nicht in beiden Räumen die ausreichende Leistung für eine vergleichbare Kühlung auf 24° erreicht. Nachdem der Fehler behoben werden konnte, ergab sich durch eine Schönwetterperiode jedoch noch eine gute Messperiode, in der die unterschiedlichen Fassadenprüflinge durchgetestet werden konnten. Folgende Leistungen der Deckenkühlung im Vergleich begrünte/unbegrünte Fassade wurden gemessen:



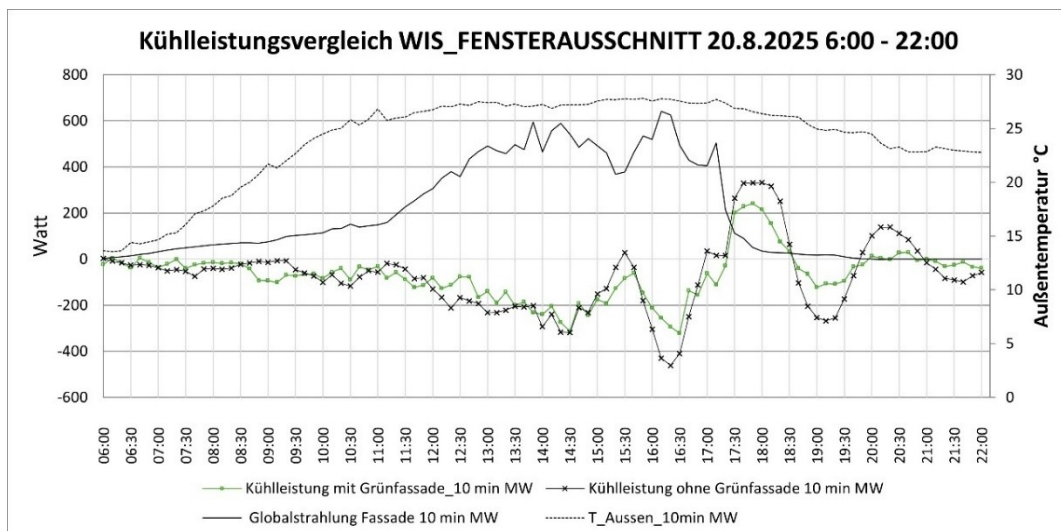
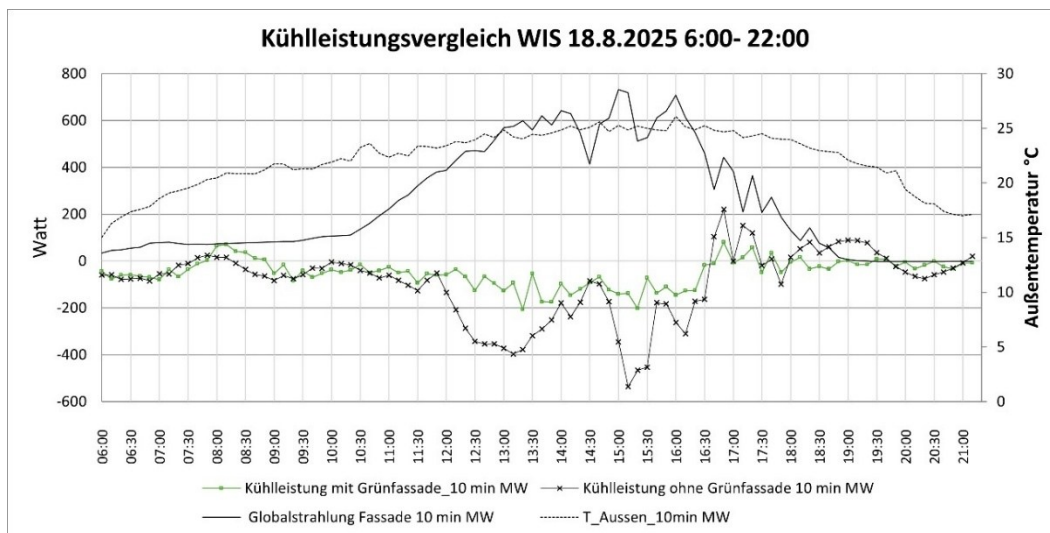
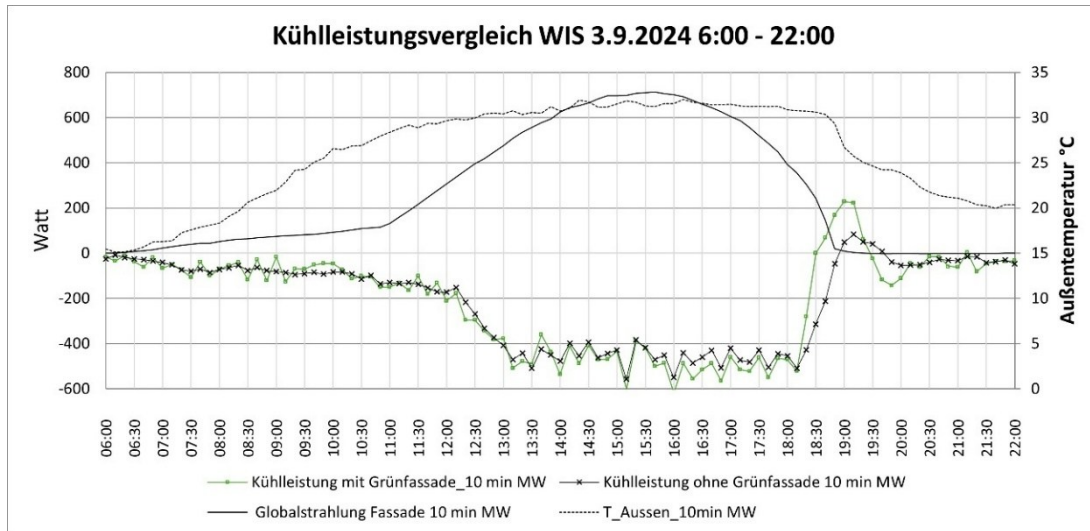


Abbildung 54: Kühlleistung Prüfboxen mit und ohne Grünfassaden

Tabelle 19: Gemessene Kühlleistungen und Rahmenparameter

	Datum	Kühlleistung mit Begrünung 24h-Mittel [W]	Kühlleistung ohne Begrünung 24h-Mittel [W]	Differenz [W]	Zieldeckungsgrad DG _{Ziel}	Deckungsgrad Fensterausschnitt	T Außen 24h-Mittel [°C]	T Außen Min [°C]	T Außen Max [°C]	R-global Fassade 24h-Mittel [W]	R-global Fassade Max [W]
Wilder Wein	22.09.2024	-85,0	-100,6	-15,6	55%	35%	15	7	23	180	800
Wilder Wein	19.08.2025	-39,3	-66,2	-26,9	54%	78%	19	12	26	187	725
Wilder Wein mit Fenster	21.08.2025	-37,4	-31,8	5,6	51%	-	22	18	25	71	742
Wisteria	03.09.2024	-152,8	-151,6	1,2	20%	5%	23	15	32	176	714
Wisteria	18.08.2025	-36,7	-60,7	-24,0	56%	55%	21	15	26	187	790
Wisteria mit Fenster	20.08.2025	-51,5	-48,2	3,3	59%	-	22	14	28	134	676

Im Anwuchsjahr 2024 zeigte nur die Begrünung mit Wildem Wein eine Reduktion der benötigten Kühlleistung. Das 24h Mittel wurde durch den Wilden Wein um 15% reduziert. Die fehlende Reduktion bei der Wisteria könnte einerseits auf den deutlich geringeren Zieldeckungsgrad von 20% versus bereits 55% beim Wilden Wein oder – noch naheliegender - die praktisch fehlende Deckung der Fensterfläche bei der Wisteria zurückzuführen sein. Das Fenster mit Wildem Wein war zu diesem Zeitpunkt bereits zu 35% bedeckt.

2025 wurde sowohl beim Wilden Wein als auch bei der Wisteria an den Prüftagen eine Reduktion des 24h Kühlleistungs-Mittels um 40% gemessen. Die Prüflinge derselben Pflanzenarten, jedoch mit Fensterausschnitt wiesen je einen Tag später keine Reduktion der Kühlleistung auf. Diese Daten bestätigen – in Zusammenschau mit den Ergebnissen der Wärmeströme – dass bei aktuellem Dämmstandard der Hauptwärmeeintrag über transparente Flächen erfolgt. Dies bedeutet, dass Gebäudebegrünung mit dem Ziel der Reduktion des Kühlbedarfes in modern gedämmten Gebäuden jedenfalls auch die Glasflächen beschatten muss, um wirksam zu sein.

4.2 Gründächer

Die Untersuchung der Gründachsysteme fokussiert sich auf die quantitative Erfassung der thermischen Schutzwirkung sowie der klimatischen Interaktion zwischen Vegetation, Substrat und Gebäudehülle. Da die Leistungsfähigkeit eines Gründachs untrennbar mit dem Wasserhaushalt verbunden ist, bildet die Analyse der Bewässerung den methodischen Ausgangspunkt. Die Verfügbarkeit von Wasser beeinflusst maßgeblich die Vitalität der Pflanzen und damit die aktive Kühlleistung durch Evapotranspiration. In enger Zusammenarbeit mit BOKU IBLB wurden hierzu die pflanzenspezifischen Parameter der Dachbegrünung erhoben, um den Biomassezuwachs und die Artensammensetzung als biologische Einflussgrößen auf das thermische Verhalten zu definieren. Ein wesentlicher Teil der Auswertung widmet sich dem mikroklimatischen Profil über der Dachfläche. Durch die Messung der Luft- und Oberflächentemperaturen wird aufgezeigt, wie effektiv die Begrünung die solare Einstrahlung absorbiert und die Aufheizung der Dachkonstruktion im Vergleich zu herkömmlichen Flachdachaufbauten dämpft. Den wissenschaftlichen Kern der Untersuchung stellt die Ermittlung der bautechnischen Kennwerte unter Realbedingungen dar. Durch die Analyse des Wärmedurchgangswiderstands und des dynamischen U-Werts wird quantifiziert, in welchem Maße der Gründachaufbau zur energetischen Effizienz des Gebäudes beiträgt.

4.2.1 Bewässerung Dachbegrünung

In Abbildung 4542 und Abbildung 4643 sind die Wassergaben am Dachteststand (Gesamtfläche $3,46 \text{ m}^2$) zu sehen. Im Mai 2024 wurde die Bewässerung mit 916 l ($264,74 \text{ l/m}^2$; täglicher Durchschnitt $8,54 \text{ l/m}^2$) sehr hoch eingestellt. Die Fläche wurde mit Sedumsprossen angesät und durch die hohe Bewässerungsmenge sollte eine möglichst hohe Anwuchsrate erzielt werden. Das Monitoring im Juni zeigte sich eine sehr gute Entwicklung der Fläche und somit wurde die Bewässerung stark zurückgesetzt (Gesamt 427 l .; $123,41 \text{ l/m}^2$; täglicher Durchschnitt $4,11 \text{ l/m}^2$). In den Sommermonaten Juli (Gesamt 745 l ; $215,32 \text{ l/m}^2$; täglicher Durchschnitt $6,95 \text{ l/m}^2$) und August (686 l ; $198,27 \text{ l/m}^2$; täglicher Durchschnitt $6,40 \text{ l/m}^2$) wurde witterungsbedingt in größeren Mengen bewässert, was im September (368 l ; $106,36 \text{ l/m}^2$; täglicher Durchschnitt $3,55 \text{ l/m}^2$) und Oktober (339 l ; $97,98 \text{ l/m}^2$; täglicher Durchschnitt $3,16 \text{ l/m}^2$) wieder stark reduziert werden konnte.

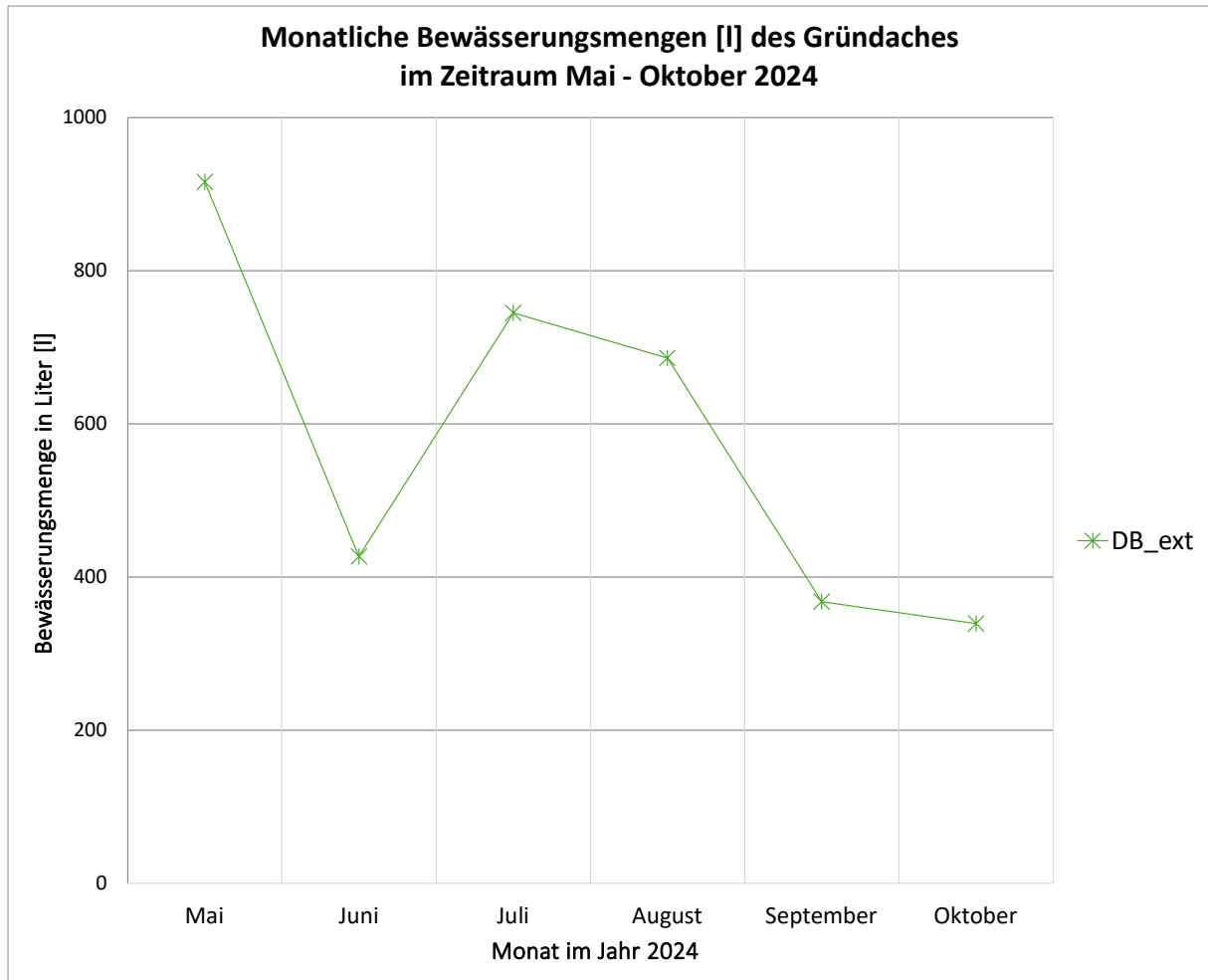


Abbildung 55: Monatliche Bewässerungsmenge in den Monaten Mai - Oktober 2024 am Teststand "reduziert intensive Dachbegrünung" (IBLB, BOKU University, 2026).

In der Vegetationsperiode 2025 wurde das Gründach deutlich weniger bewässert. Im Mai wurden lediglich 40 l bewässert. Im Juni ist ein Anstieg auf 183 l erkennbar. Die Wassergabe gipfelt bei 275 l im Juli und wurde im August wieder etwas auf 168 l reduziert. Diese monatlichen Gesamtwerte stehen für die gesamte Testfläche des Gründachs (3,46 m²). Die Durchschnittswerte je Quadratmeter und Monat sehen wie folgt aus – im Mai 11,56 l/m², im Juni 52,89 l/m², im Juli 79,48 l/m² und im August 48,55 l/m² bewässert. Täglich wurden demnach durchschnittlich 0,37 l/m² (Mai), 1,76 l/m² (Juni), 2,56 l/m² (Juli) und 1,62 l/m² (August), wobei vermerkt werden muss, dass laut Einstellungen nicht täglich gewässert wurde.

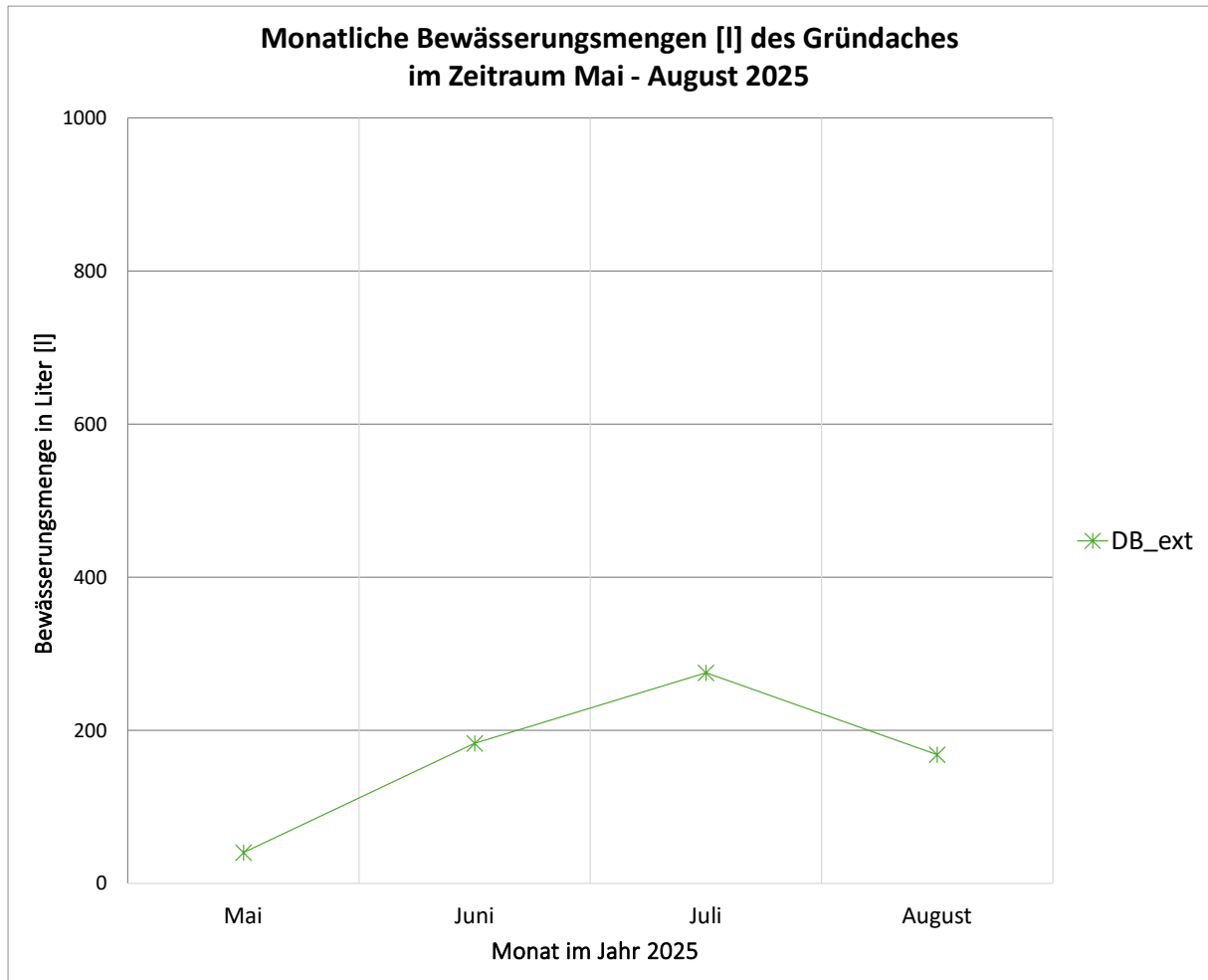


Abbildung 56: Monatliche Bewässerungsmenge in den Monaten Mai - August 2025 am Teststand "reduziert intensive Dachbegrünung" (IBLB, BOKU University, 2026).

Die stark reduzierte Bewässerungsmenge lässt sich mit sehr hohen Sättigungswerten in der Vegetationsperiode 2024 begründen. In der Periode 2025 wurde eine deutlich reduzierte getestet. Bei Betrachtung der Parameter LAI und DG_p/DG_{Ziel} in Kapitel 4.2.1 ist erkennbar, dass nur geringfügige Unterscheidungen zwischen den beiden Vegetationsperioden erkennbar sind. Der Mittelwert des LAI liegt beispielsweise 2024 bei 4,33 und 2025 bei 4,12. Im Fall des Deckungsgrades sind mit 99,74 % (2024) und 99,70 % (2025) noch ähnlichere Mittelwerte erkennbar.

Bewässerungszyklen des Gründachteststandes in den Vegetationsperioden 2024 und 2025

Das Gründach wurde flächendeckend mit Kleinflächendüsen (Gardena, Husqvarna Austria GmbH, Linz, AT) beregnet, was zu einer hohen Wasserabgabe je Minute führte, nämlich ca. 13 l/min. Aus diesem Grund wird die Dachfläche im Jahr 2024 pro Zyklus für nur zwei Minuten bewässert. Die Zyklen wiederholen sich am Montag, Mittwoch und Freitag jeweils um 7:20 Uhr morgens und 18:05 Uhr abends. Zusätzlich wurde auch am Sonntag um 7:20 Uhr morgens bewässert. Dieser Zusatz diente zur Überbrückung der längeren Bewässerungspause von Freitag bis Montag. Von Mai bis Mitte Oktober wurde diese Bewässerungseinstellung beibehalten. Ab dem Monitoringtermin am 17. Oktober 2024 wurde reduziert und nur noch am Montag sowie Freitag ein Zyklus am Morgen durchgeführt (7:20 Uhr, zwei Minuten). Am 07.11.24 wurde die Bewässerung der Dachfläche für den Winterbetrieb eingestellt. Es wurden dieselben Bewässerungstrigger als auch bei den Vertikalbegrünungen verwendet. Aufgrund der kurzen Bewässerungszeiten ließen sich etwaige Reduzierungen oder Erhöhungen nicht in den Aufzeichnungen ablesen.

Tabelle 20: Übersicht Bewässerungszeiten der reduziert-intensiven Dachbegrünung 2024 (IBLB, BOKU University, 2024).

Modulcode	Zyklusbeginn	Zyklusende	Intervall	Wochentage	Anmerkung
DB_ext	01.05.2024	08.05.2024	3 min.	Mo/Mi/Fr - morgens und abends	-
DB_ext	09.05.2024	14.10.2024	2 min.	Mo/Mi/Fr/So – morgens Mo/Mi/Fr – abends	-
DB_ext	15.10.2024	30.10.2024	2 min.	Mo/Mi/Fr – morgens	-

Tabelle 20 zeigt die Bewässerungszyklen von Mai bis Oktober 2024. Begonnen wurde mit Intervallen von 3 Minuten. Diese wurden nach einer Woche auf 2 Minuten reduziert und die restliche Vegetationsperiode so beibehalten. Am 15.10.2024 wurden die abendlichen Beregnungsintervalle und auch das Intervall am Sonntagmorgen abgestellt. Bei Betrachtung von Abbildung 55 fällt auf, dass die monatliche Bewässerungsmenge im Juni sehr viel niedriger ist als im Juli/August, obwohl keine Änderung der Einstellungen vorgenommen wurde. In den Rohdaten ist zu erkennen, dass von 11.06.2024 und 18.06.2024 keine Bewässerung stattgefunden hat. Dies ist vermutlich auf eine Regenperiode mit einer hohen Niederschlagsvorhersage zurückzuführen.

Tabelle 21: Übersicht Bewässerungszeiten der reduziert-intensiven Dachbegrünung 2025 (IBLB, BOKU University, 2026).

Modulcode	Zyklusbeginn	Zyklusende	Intervall	Wochentage	Anmerkung
DB_ext	01.05.2025	30.05.2025	1 min.	Mi - morgens	-
DB_ext	02.06.2025	27.06.2025	1 min.	Mo/Mi/Fr – morgens	-
DB_ext	28.06.2025	18.07.2025	1 min.	Tägl. – morgens	-
DB_ext	21.07.2025	29.08.2025	1 min.	Mo/Mi/Fr – morgens	-

Wie bereits in Abbildung 56 ersichtlich, wurden die Bewässerungszeiten des Gründachteststandes im Jahr 2025 deutlich reduziert. Beginnend im Mai 2025 wurde bis zum Aufzeichnungsende im August 2025 jeweils nur eine Minute bewässert. Eine hitzebedingte Anpassung mit täglichen Intervallen erfolgte von 28.06.2025 bis 18.07.2025. Am 21.07.2025 wurde wieder auf ein Intervall an Montag, Mittwoch und Freitag gewechselt, weil dies auch als ausreichend erachtet wurde.

4.2.2 Pflanzenspezifische Parameter Dachbegrünung (Boku)

Pflanzenspezifische Parameter wurden am Gründachteststand in den Vegetationsperioden 2024 und 2025 gemonitort. Neben kubischen Pflanzenvolumen [m^3], Leaf Area Index [LAI] und projektiven Deckungsgrad [DB_p]/Zieldeckungsgrad [DG_{Ziel}] wurden auch Thermalaufnahmen zum Vergleich der Oberflächentemperatur zwischen Grün- und Kiesdach durchgeführt.

4.2.2.1 Kubisches Pflanzenvolumen [m^3]

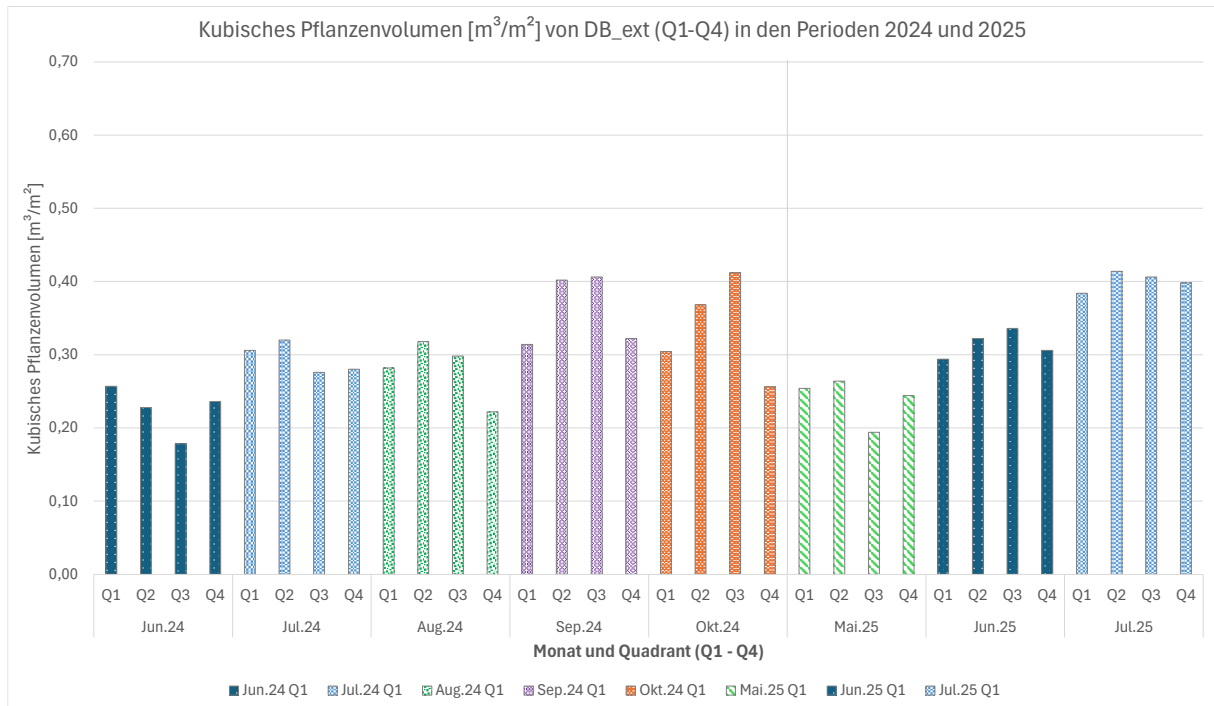


Abbildung 57: Entwicklung des kubischen Pflanzenvolumens am Gründachteststand in m^3 pro m^2 je Quadrant (Q1-Q4) in den Vegetationsperioden 2024 und 2025 (IBLB, BOKU University, 2025).

Wie Abbildung 57 zeigt erzielte der Gründachteststand im Vergleich die höchsten Pflanzenvolumina aller Systeme je m^2 . Bereits ab Juli liegen die Werte teilweise über $0,30 \text{ m}^3/\text{m}^2$ (Q1 $0,31 \text{ m}^3/\text{m}^2$; Q2 $0,32 \text{ m}^3/\text{m}^2$; Q3 $0,28 \text{ m}^3/\text{m}^2$; Q4 $0,28 \text{ m}^3/\text{m}^2$), mit einem kontinuierlichen Anstieg bis September, wo sie Spitzenwerte von über $0,41 \text{ m}^3/\text{m}^2$ erreichen (Q1 $0,31 \text{ m}^3/\text{m}^2$; Q2 $0,40 \text{ m}^3/\text{m}^2$; Q3 $0,41 \text{ m}^3/\text{m}^2$; Q4 $0,32 \text{ m}^3/\text{m}^2$). Im Oktober ist ein leichter Rückgang erkennbar, der auf den beginnenden saisonalen Vegetationsrückgang hinweist (Q1 $0,30 \text{ m}^3/\text{m}^2$; Q2 $0,37 \text{ m}^3/\text{m}^2$; Q3 $0,41 \text{ m}^3/\text{m}^2$; Q4 $0,26 \text{ m}^3/\text{m}^2$).

Die reduziert-intensive Dachbegrünung (DB_ext) zeigt im Vergleich, abgesehen von einzelnen Spitzenwerten (FB_trog_WS_oF und FB_trog_WS_mF), die höchsten Biomassewerte aller Systeme und eine gleichmäßige Zunahme über den gesamten Zeitraum. Bereits im Mai 2025 lagen die Werte bei $0,25 \text{ m}^3/\text{m}^2$ (Q1), $0,26 \text{ m}^3/\text{m}^2$ (Q2), $0,19 \text{ m}^3/\text{m}^2$ (Q3) und $0,24 \text{ m}^3/\text{m}^2$ (Q4). Im Juni stiegen alle Quadranten deutlich an, auf $0,29 \text{ m}^3/\text{m}^2$ (Q1), $0,32 \text{ m}^3/\text{m}^2$ (Q2), $0,34 \text{ m}^3/\text{m}^2$ (Q3) und $0,31 \text{ m}^3/\text{m}^2$ (Q4).

(Q4). Den stärksten Zuwachs verzeichnete der Juli mit Spitzenwerten in allen Quadranten (Q1 0,38 m³/m², Q2 0,41 m³/m², Q3 0,41 m³/m², Q4 0,40 m³/m²). Damit weist dieses System die gleichmäßigste und insgesamt höchste Biomasseentwicklung aller untersuchten Begrünungstypen auf.

4.2.2.2 Leaf Area Index [LAI]

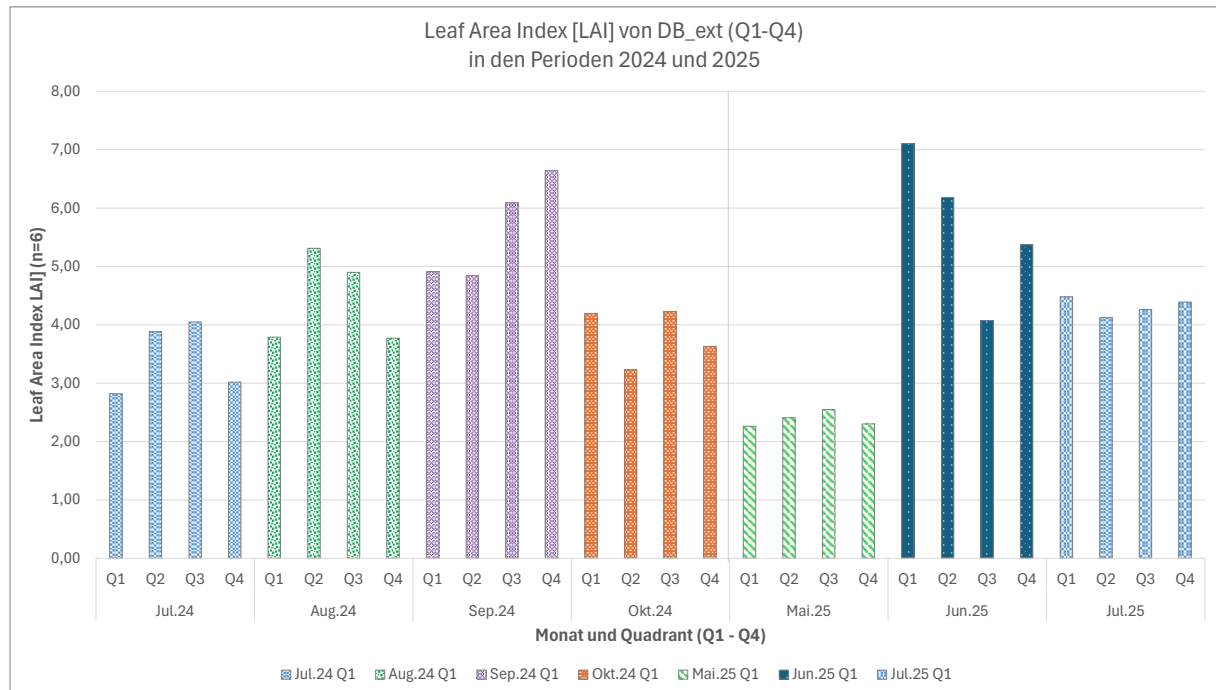


Abbildung 58: Entwicklung des LAI am Gründachteststand je Quadrant (Q1-Q4) in den Vegetationsperioden 2024 und 2025 (IBLB, BOKU University, 2025).

Am Beispiel der Dachbegrünung (DB_ext) konnten insgesamt die höchsten LAI-Werte verzeichnet werden (Abbildung 58). Bereits im Juli 2024 wurden mittlere Werte zwischen 2,82 und 4,05 erreicht. Im September 2024 stieg die Biomasse deutlich an und erreichte mit 4,84 bis 6,64 ihr Maximum, wobei der höchste Einzelwert (6,64) in Quadrant 4 gemessen wurde. Im Oktober 2024 war ein deutlicher Rückgang auf Werte zwischen 3,23 und 4,22 zu beobachten, was auf den beginnenden saisonalen Rückgang der Vegetation hinweist.

Auch im Gründach-System wurden in der Vegetationsperiode 2025 erneut hohe LAI-Werte erfasst. Auffällig ist der deutliche Anstieg der Werte von Mai auf Juni – von 2,26 (Q1), 2,41 (Q2), 2,55 (Q3) und 2,30 (Q4) im Mai auf 7,10 (Q1), 6,18 (Q2), 4,07 (Q3) und 5,37 (Q4) im Juni. Diese ausgeprägte Zunahme lässt sich vermutlich auf den vegetativen Entwicklungsfortschritt der Pflanzen in diesem Zeitraum zurückführen. Insgesamt zeigen die Werte eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen des Monitorings 2024; lediglich der Höchstwert von 7,10 im Juni 2025 hebt sich deutlich von den übrigen Messwerten ab.

4.2.2.3 Projektiver Deckungsgrad [DBp] und Zieldeckungsgrad [DGZiel]

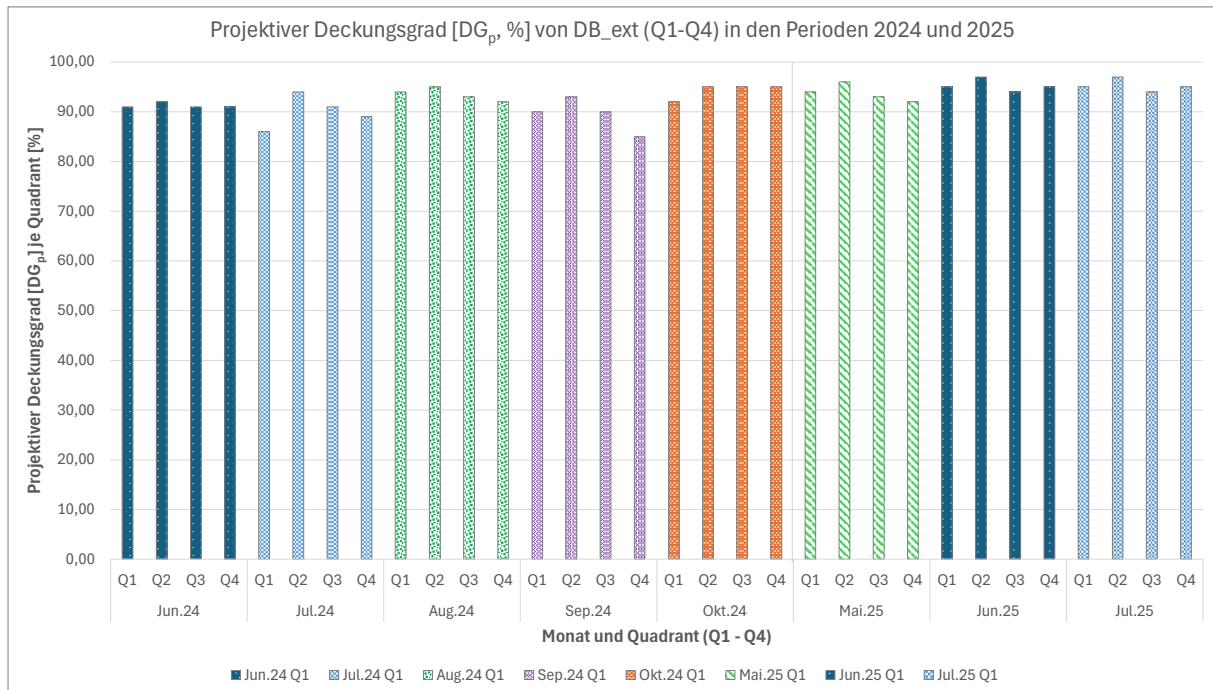


Abbildung 59: Entwicklung von DG_p [%] am Gründachteststand je Quadrant (Q1-Q4) in den Vegetationsperioden 2024 und 2025 (IBLB, BOKU University, 2025).

Der Prüfstand der reduziert-intensiven Dachbegrünung zeigte von Juni (Q1 91 %, Q2 92 %, Q3 91 %, Q4 91 %) bis Oktober (Q1 92 %, Q2 95 %, Q3 95 %, Q4 95 %) durchgehend sehr hohe Deckungsgrade (Abbildung 59). Die Werte schwankten geringfügig, wobei die Höchstwerte im Oktober 2024 gemessen werden konnten. Geringe Schwankungen können möglicherweise auf die Auswertungsmethode zurückgeführt werden. Diese Schwankungen zeigten sich auch im Zieldeckungsgrad [DG_{Ziel}] mit einer Betrachtungsfläche von 3,46 m²:

- Juni 91 %
- Juli 90 %
- August 93 %
- September 89 %
- Oktober 94 %

Wie bereits in der Vegetationsperiode 2024 zeigten sich auch bei den Messungen 2025 durchweg sehr hohe Deckungswerte bei der reduziert-intensiven Dachbegrünung. Die Werte im Mai (Q1 94 %, Q2 96 %, Q3 93 %, Q4 92 %) unterscheiden sich nur geringfügig von den Werten der Julimessung (Q1 95 %, Q2 97 %, Q3 94 %, Q4 95 %). Den LAI-Werten zu Folge, muss zwischen Mai und Juni ein

signifikanter Zuwachs an Biomasse erfolgt sein, dies lässt mit dem zweidimensionalen Wert des Deckungsgrades so nicht abbilden. Bei Betrachtung des Zieldeckungsgrad $[DG_{Ziel}]$ ergibt sich folgendes Bild (Fläche $3,46 \text{ m}^2$):

- Mai 93 %
- Juni 95 %
- Juli 95 %

Tabelle 22: Zusammenfassung der untersuchten pflanzenphysiologischen Parameter V_{cub} , LAI, DG_p und DG_{Ziel} an der reduziert-intensiven Dachbegrünung in den Vegetationsperioden 2024 und 2025 (IBLB, BOKU University, 2026).

Periode		Parameter	Begrünungssysteme			
Jahr	Monat		DB_ext			
			Q1	Q2	Q3	Q4
2024	Juni	Kubisches Pflanzenvolumen in $\text{m}^3/\text{m}^2 [V_{cub}]$	0,26	0,23	0,18	0,24
	Juli		0,31	0,32	0,28	0,28
	August		0,28	0,32	0,3	0,22
	September		31	0,4	0,41	0,32
	Oktober		0,3	0,37	0,41	0,26
	Juli	(Wall) Leaf Area Index $[WLAI/LAI]$	2,82	3,88	4,05	3,02
	August		3,79	5,31	4,9	3,77
	September		4,91	4,84	6,09	6,64
	Oktober		4,19	3,23	4,22	3,63
	Juni	Projektiver Deckungsgrad in % $[DG_p]$	91	92	91	91
	Juli		86	94	91	89
	August		94	95	93	92
	September		90	93	90	85
	Oktober		92	95	95	95
	Juni	Zieldeckungsgrad in % $[DG_{Ziel}]$	91			
	Juli		90			
	August		93			
	September		89			
	Oktober		94			
2025	Mai	Kubisches Pflanzenvolumen in $\text{m}^3/\text{m}^2 [V_{cub}]$	0,25	0,26	0,19	0,24
	Juni		0,29	0,32	0,34	0,31
	Juli		0,38	0,41	0,41	0,4
	Mai	(Wall) Leaf Area Index $[WLAI/LAI]$	2,26	2,41	2,55	2,3
	Juni		7,1	6,18	4,07	5,37
	Juli		4,48	4,12	4,26	4,39
	Mai	Projektiver Deckungsgrad in % $[DG_p]$	94	96	93	92
	Juni		95	97	94	95
	Juli		95	97	94	95
	Mai	Zieldeckungsgrad in % $[DG_{Ziel}]$	93			
	Juni		95			
	Juli		95			

Tabelle 22 zeigt durchgehend hohe Werte bei den Parametern DG_p und DG_{Ziel} in beiden Vegetationsperioden ohne erkennbaren saisonalen Einbruch im Herbst 2024. Dem gegenüber stehen moderat ansteigende Werte von V_{cub} bis max. $0,41 \text{ m}^3/\text{m}^2$ in beiden Vegetationsperioden und steigende, aber auch saisonal schwankende LAI-Werte in den einzelnen Quadranten. Insgesamt deutet der Zusammenhang darauf hin, dass aufgrund der spezifischen Begrünung des Gründachs keine ausgeprägten Korrelationen zwischen den Deckungsgradparametern und den dreidimensionalen Strukturparametern bestehen.

Die Mischbepflanzung aus *Sedum*-Arten in Kombination mit einzelnen Stauden und Gräsern führte zu einer schnellen, kontinuierlichen und sehr hohen Flächendeckung. Gleichzeitig resultierte die schichtartige Vegetationsstruktur in methodischen Herausforderungen für das Monitoring: Die flächig-niedrige Wuchsform der *Sedum*-Arten ist nur bedingt mit den dreidimensionalen Parametern V_{cub} und LAI in Beziehung zu setzen. In der Folge erscheinen die Deckungsgrade gegenüber den volumetrischen und LAI-basierten Messgrößen visuell entkoppelt.

4.2.2.4 Infrarot-Thermografie

Am Gründachteststand sowie am Referenzdach mit Kiesauflage wurden in den Vegetationsperioden 2024 und 2025 thermographische Messungen zur Ermittlung der Oberflächentemperaturen durchgeführt. Die Auswertung der Aufnahmen zeigt signifikante thermische Unterschiede zwischen den beiden Dachsystemen.

Am August 2024 wurden an einem Hitzetag um 14:20 Uhr thermographische Aufnahmen des sonnenexponierten Gründachs angefertigt (Abbildung 60). Die gemessenen Oberflächentemperaturen innerhalb der Vegetationsdecke lagen zwischen $29,3 \text{ }^\circ\text{C}$ und $38,7 \text{ }^\circ\text{C}$. Zum Zeitpunkt der Aufnahme betrug die Lufttemperatur $31,0 \text{ }^\circ\text{C}$. Daraus ergibt sich innerhalb der Vegetation eine Temperaturspanne von $9,4 \text{ }^\circ\text{C}$. Die niedrigste gemessene Oberflächentemperatur lag $1,7 \text{ }^\circ\text{C}$ unterhalb der Lufttemperatur, was auf eine ausgeprägte evaporative Kühlwirkung der Vegetation unter vollsonnigen Bedingungen hinweist. Die thermographischen Aufnahmen des Referenzdachs wurden um 14:27 Uhr bei einer Lufttemperatur von $31,1 \text{ }^\circ\text{C}$ durchgeführt. Die Oberflächentemperaturen der Kiesauflage variierten zwischen $34,0 \text{ }^\circ\text{C}$ und $62,2 \text{ }^\circ\text{C}$. Der niedrigste Temperaturwert wurde in einem verschatteten Bereich der Dachumrandung erfasst, lag jedoch dennoch $2,9 \text{ }^\circ\text{C}$ über der Lufttemperatur. Die sonnenexponierten Bereiche des Kiesdachs wiesen eine deutlich stärkere Erwärmung auf und erreichten Oberflächentemperaturen, die etwa dem Doppelten der umgebenden Lufttemperatur entsprachen. Im besonnten Bereich betrug der mittlere Temperaturunterschied zwischen Grün- und Kiesdach $20,19 \text{ }^\circ\text{C}$ (Mittelwert Gründach: $34,48 \text{ }^\circ\text{C}$; Mittelwert Kiesdach ohne verschattete Bereiche: $54,67 \text{ }^\circ\text{C}$).

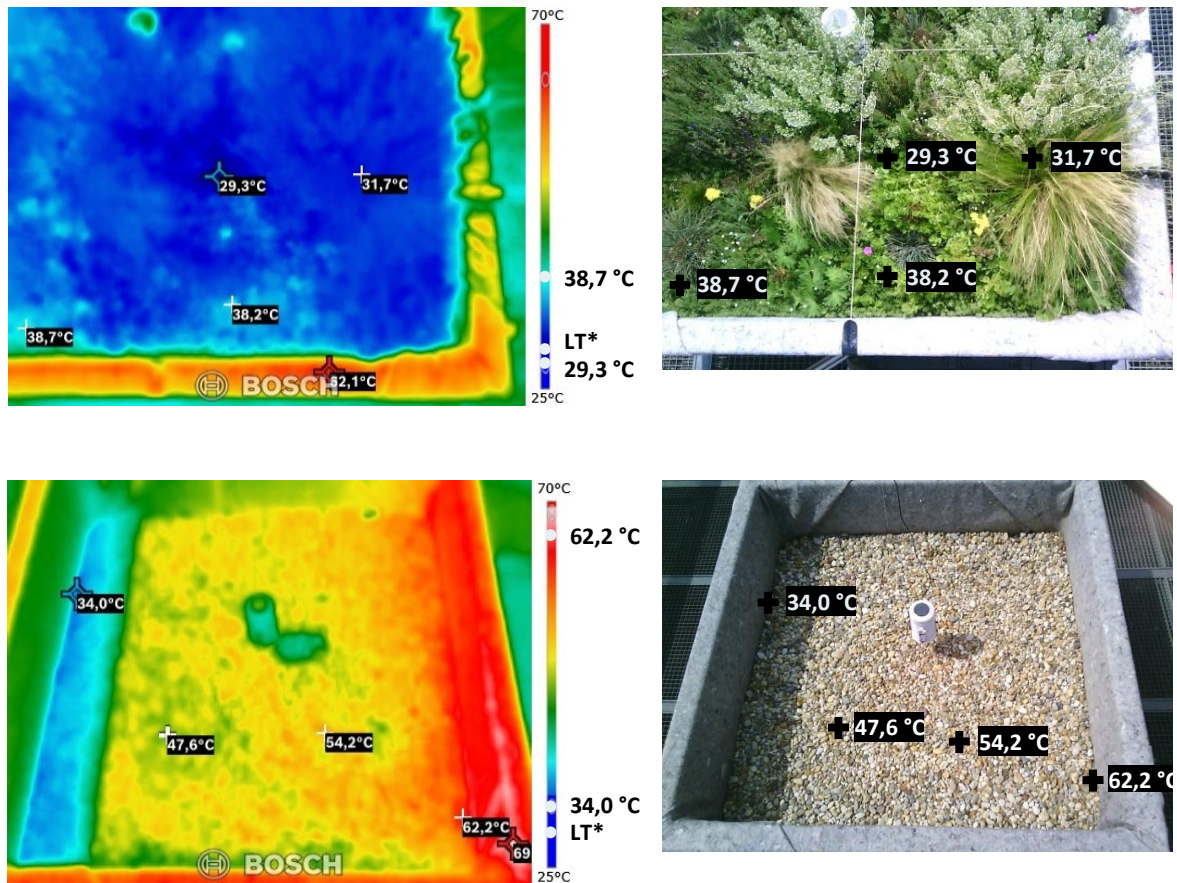


Abbildung 60: Darstellung der thermographischen Aufnahmen an Grün- und Referenzdach im August 2024 (IBLB, BOKU University, 2024).

In der Vegetationsperiode 2025 zeigte sich ein vergleichbares Temperaturverhalten. Die thermographischen Aufnahmen wurden im Juli 2025 durchgeführt (Abbildung 61). Die Lufttemperatur betrug zum Aufnahmezeitpunkt 27,4 °C um 15:57 Uhr am Kiesdach sowie 27,1 °C um 15:59 Uhr am Gründach. Die Oberflächentemperaturen innerhalb der Vegetation des Gründachs lagen zwischen 25,8 °C und 35,3 °C, was einer Temperaturspanne von 9,5 °C entspricht. Die niedrigste Oberflächentemperatur lag dabei 1,3 °C unterhalb der Lufttemperatur. Am Referenzdach mit Kiesauflage wurden Oberflächentemperaturen zwischen 30,0 °C und 51,7 °C gemessen. Der niedrigste Wert trat erneut in einem verschatteten Bereich auf und lag 2,6 °C über der Lufttemperatur. Die sonnenexponierten Bereiche zeigten wiederum eine deutliche Überhitzung gegenüber der Umgebungsluft. Der mittlere Temperaturunterschied zwischen Grün- und Kiesdach betrug im Jahr 2025 im besonnten Bereich 17,63 °C (Mittelwert Gründach: 29,38 °C; Mittelwert Kiesdach ohne verschattete Bereiche: 47,00 °C).

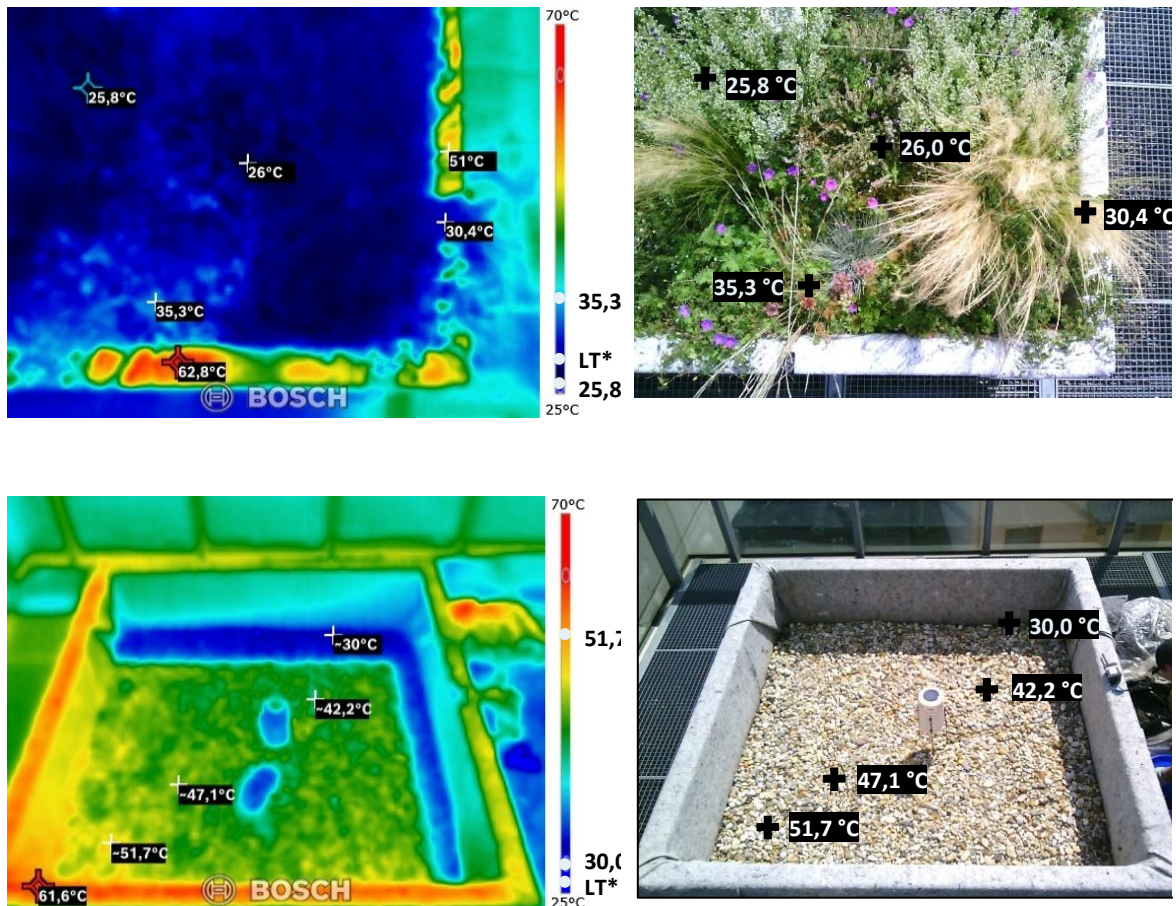


Abbildung 61: Darstellung der thermographischen Aufnahmen an Grün- und Referenzdach im Juli 2025 (IBLB, BOKU University, 2025).

4.2.3 Lufttemperatur

Die Lufttemperaturmessungen erfolgten durch strahlungsgeschützte Sensoren beim Kiesdach ca. 25 cm über der Kiesoberfläche, beim Gründach im selben Abstand über dem Substrat. Das zog nach sich, dass der Sensor beim Gründach zwar zu Beginn der Wachstumsphase noch über der Begrünung lag, mit zunehmender Dauer der Vegetationsperiode aber zumindest die höheren Gräser und Kräuter bereits um den Sensor emporragten. Ergänzt wurden die Messungen durch einen Lufttemperatursensor unter der Vegetationsschicht.



August 2024

August 2024

August 2025

Abbildung 62: Positionen der strahlungsgeschützten Lufttemperatursensoren beim Kiesdach bzw. Gründach.

Abbildung 63 und Abbildung 64 zeigen die Ergebnisse der Messungen in je einer Augustwoche 2024 und 2025. Obwohl der Maximale Lufttemperaturunterschied über Referenzdach bzw. Gründach in beiden Messperioden 9,2 Grad beträgt, unterscheiden sich die Muster doch in einigen Punkten. Im Jahr 2024 war die Lufttemperatur über dem Kiesdach über die gesamte 7 Tage Periode im Mittel 2,3 °C höher als beim Gründach, im darauffolgenden Jahr 2025 betrug der Temperaturunterschied, ebenfalls über 7 Tage gemittelt, 3,7 °C . Weiters lag die Lufttemperatur am Gründach 2025 durchgehend sehr nahe an der Außenlufttemperatur, während sie 2024 tagsüber noch deutlich darüber lag. Gründe dafür könnten neben der Lage des Sensors tiefer in der Begrünungsschicht vor allem die deutliche Zunahme des kubischen Pflanzenvolumens von 0,28 m³/m² im August 2024 auf 0,4m³/m² im Jahr 2025 sein. Dadurch kann ein höherer Anteil des solaren Eintrages durch Photosynthese und Evapotranspiration entzogen werden und wird nicht in Wärme umgewandelt.

Auch bei der Analyse der Lufttemperaturdifferenzen über Gründach und Referenzdach bzw. zwischen Gründach gibt es interessante Unterschiede zwischen den Messjahren. Gemeinsam ist bei den Messperioden, dass das ΔT Gründach oben – Gründach unten tagsüber positiv und nachts negativ ist, wobei die Lufttemperatur unter der Begrünung in beiden Jahren nachts etwa 2°C höher liegt als die Temperatur oben in/über der Begrünung. Dies konsolidiert den bereits in mehreren Studien nachgewiesenen Effekt, dass die nächtliche Auskühlung bei begrünten Dächern geringer ist da sich ein wärmeres Luftpolster unter der Vegetation bildet. Der deutlich höhere Temperaturunterschied im positiven Bereich tagsüber kompensiert diesen im Sommer nicht unbedingt erwünschten Effekt jedoch mehrfach. Ein deutlicher Unterschied zeigt sich zwischen den Messjahren vor allem im Tagesverlauf der Temperaturdifferenz zwischen Referenz- und Gründach, die Kühlwirkung setzt später ein und zeigt 2024 eher eine kurzfristige Spitze als das längerdauernde höhere Niveau im Jahr 2025, wofür ebenso das höhere Pflanzenvolumen verantwortlich sein könnte.

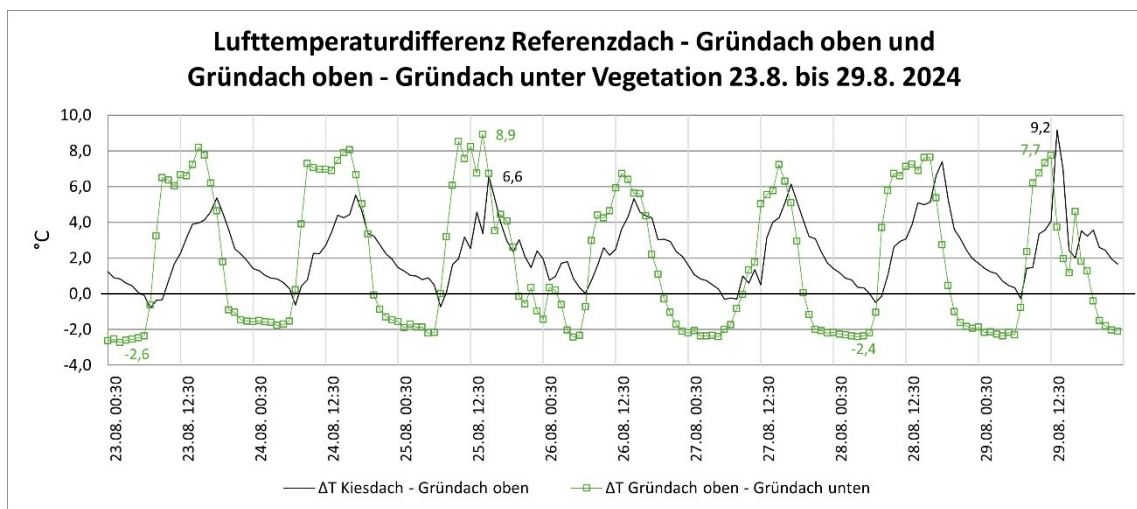
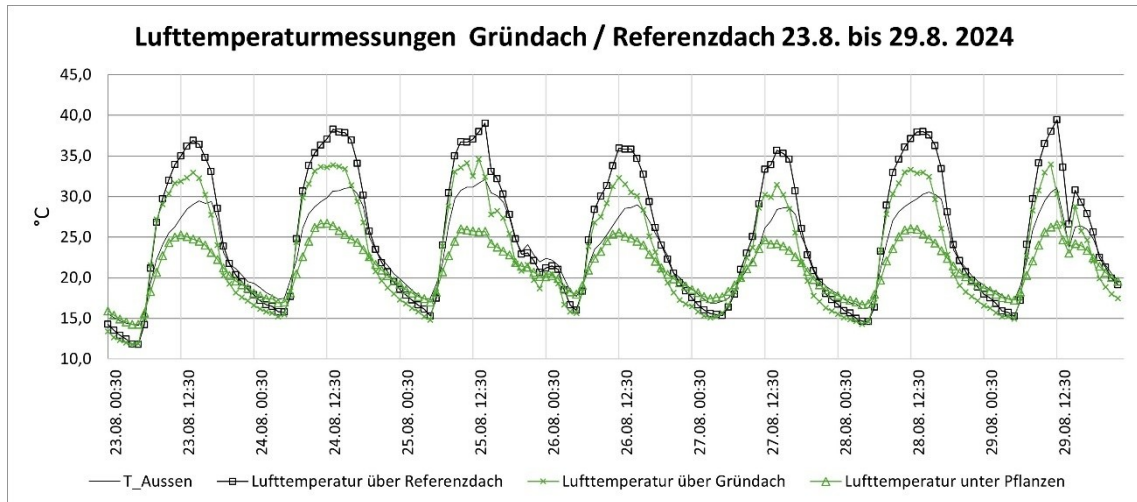
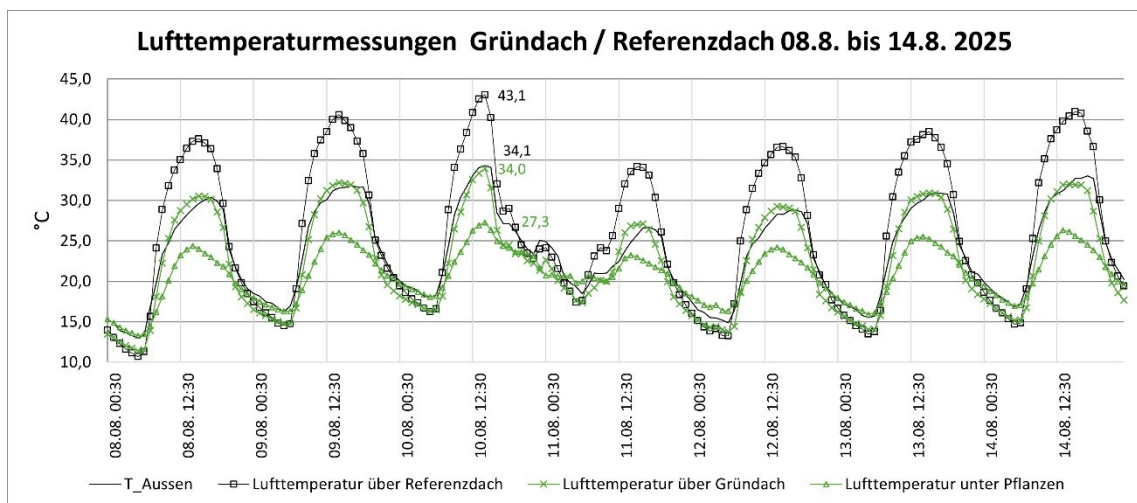


Abbildung 63: Lufttemperaturmessungen über dem Referenz-Kiesdach und Gründach im August 2024 (oben) und Darstellung der gemessenen Temperaturdifferenzen (unten).



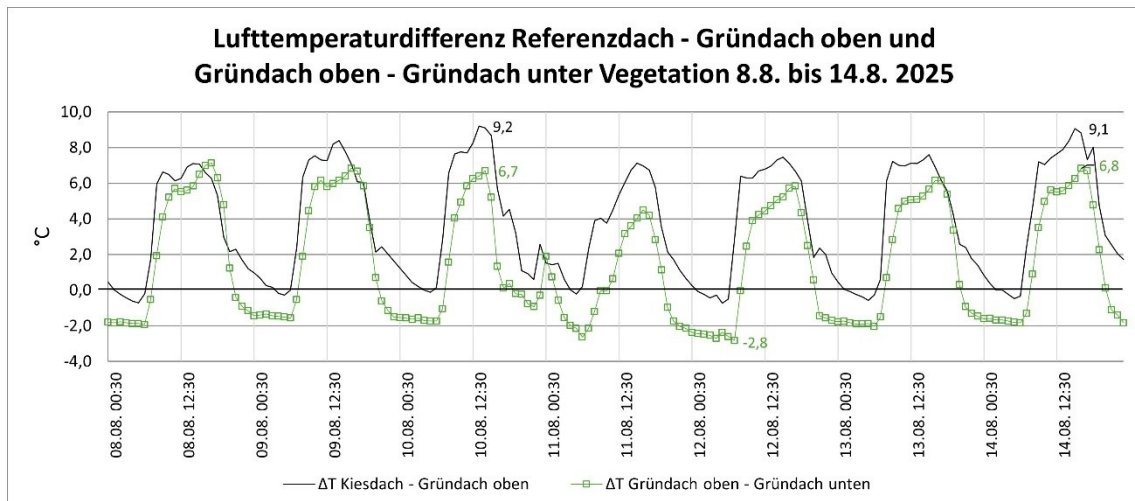


Abbildung 64: Lufttemperaturmessungen über dem Referenz-Kiesdach und Gründach im August 2025 (oben) und Darstellung der gemessenen Temperaturdifferenzen (unten).

4.2.4 Oberflächentemperatur

Die Thermografiedaten in Abschnitt 4.2.2 zeigten zwischen Kies- bzw. Blattoberfläche an einem Julitag 2025 einen mittleren Temperaturunterschied im besonnten Bereich von mehr als 17 °C. Diese Messungen wurden durch Oberflächentemperatursonden am Kies bzw. auf der Substratoberfläche unter der Begrünung ergänzt. Zur besseren Vergleichbarkeit mit den Lufttemperaturdaten wird in den folgenden Abbildungen derselbe Messzeitraum von 8.8. – 14.8. 2025 dargestellt.

Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Reduktion der Maximalwerte und wesentlich niedrigere Schwankungsbreite der Oberflächentemperaturen des begrünten Daches im Vergleich zum Kiesdach. Bei den Messungen betrug der maximale Unterschied der Oberflächentemperaturen im Tagesverlauf bis zu 19°C. Im Gegensatz zur Lufttemperatur unter der Begrünung (s. Abschnitt 4.2.3) blieb die Oberflächentemperatur auf dem Substrat jedoch im Tagesmaximum noch etwa 4°C über der Außenlufttemperatur. Die Differenz zwischen Kiesdachoberflächentemperatur und Außenluft betrug jedoch bis zu 21°C. Nachts blieb die Oberfläche des Gründach-Substrates wiederum etwas wärmer als die Außenlufttemperatur. Der Unterschied betrug maximal 3,8 Grad, im Durchschnitt aller negativen Differenzen über die Messperiode jedoch nur 0,4 °C.

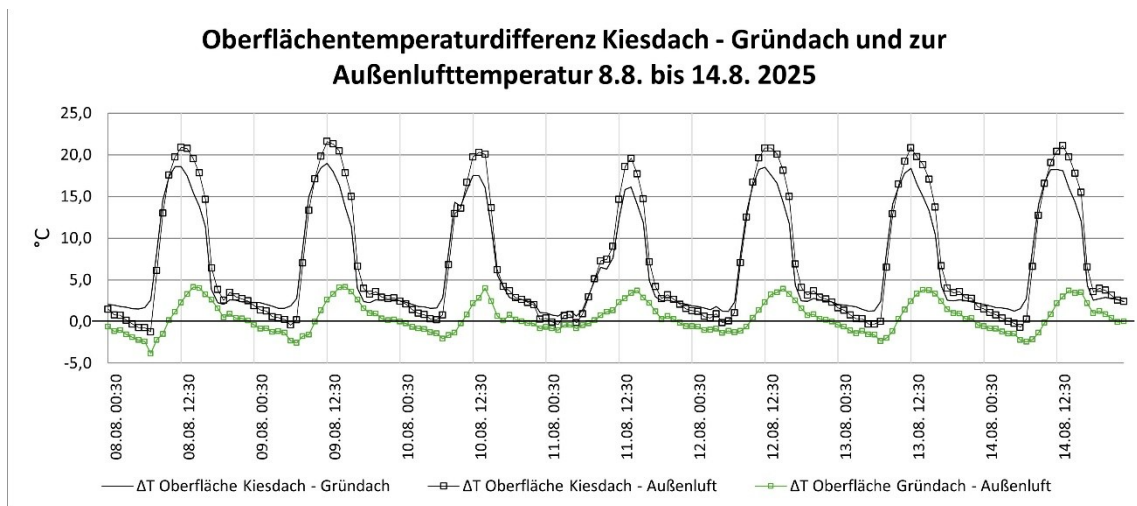
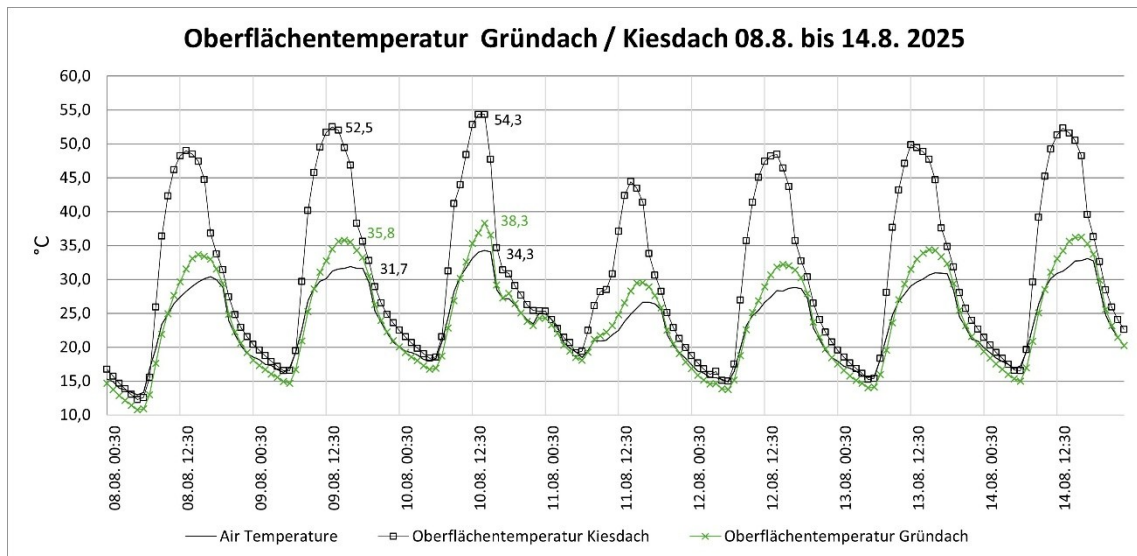
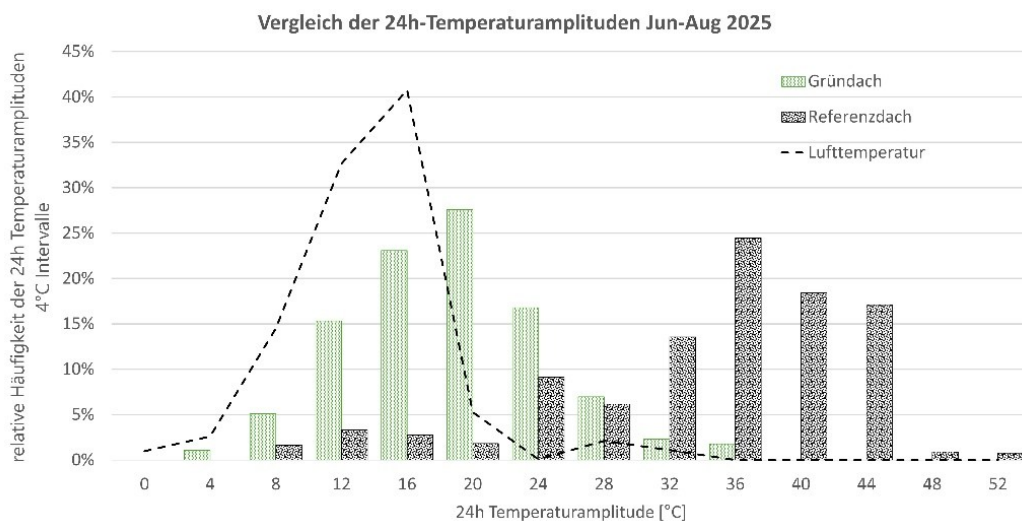
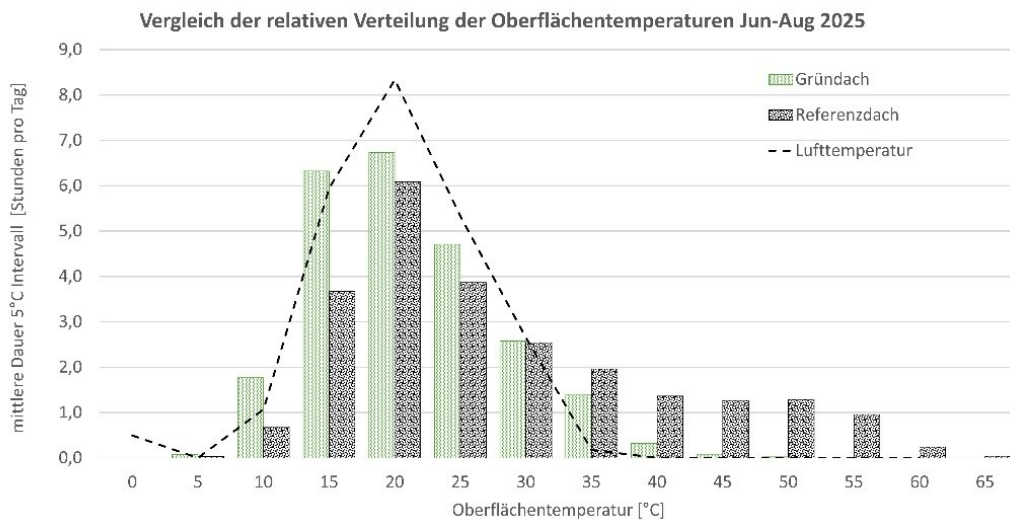


Abbildung 65: Oberflächentemperaturmessungen am Referenz-Kieddach und am Substrat des Gründaches im August 2025 (oben) und Darstellung der gemessenen Temperaturdifferenzen (unten).

Eine statistische Analyse der Oberflächentemperaturen und ihrer Schwankungsbreiten bestätigte die These, dass sowohl die Dauer von hohen Oberflächentemperaturen als auch die 24h Temperaturamplituden beim Kiesdach deutlich höher waren als beim reduziert intensiv begrünten Dach. Das trifft in der Folge auch auf die darunterliegenden Schichten wie Abdichtungen zu, was auf eine höhere Beanspruchung und damit kürzere Lebensdauer bei konventionellen Flachdächern schließen lässt.



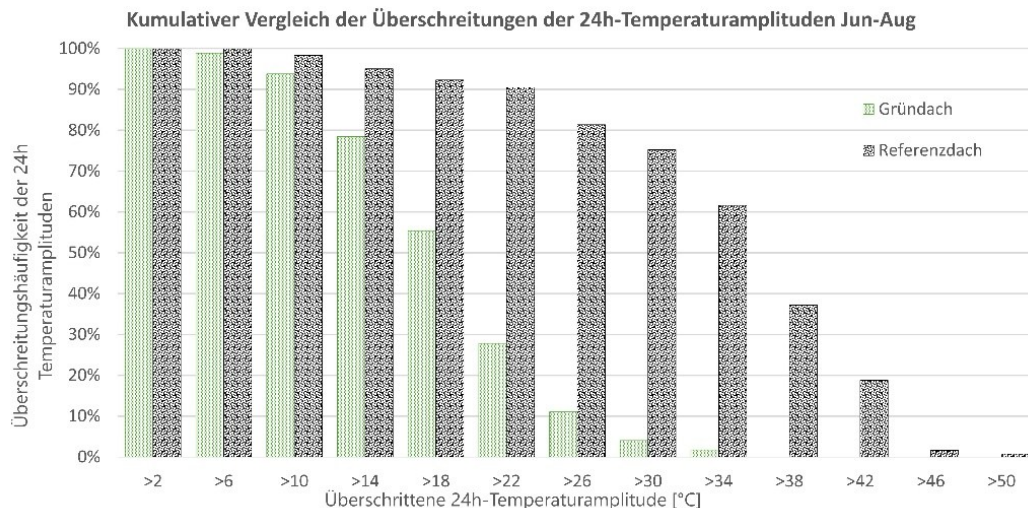


Abbildung 66: Vergleich der Verteilung der Oberflächentemperaturen und Oberflächentemperaturamplituden des reduziert-intensiven Gründaches und des Referenzdaches (Kiesdach).

4.2.5 Wärmestrom und Wärmeeintrag

Die Wärmeströme durch die Dachteststände, die ohne Begrünung bereits einen U-Wert von 0,199 aufweisen, sind absolut gesehen erwartungsgemäß gering. Trotzdem konnte ein deutlicher Unterschied zwischen dem reduziert-intensiv begrünten Dach und dem Referenz-Kiesdach festgestellt werden. Wie Abbildung 67 über eine 14-tägige Messperiode zeigt, bewegen sich die Wärmeströme am Gründach fast ausschließlich im negativen Bereich (es wird also Wärme vom Innenraum nach außen abgegeben), während die Ströme am Kiesdach deutlich weiter im positiven Bereich liegen und fast 3W/m^2 erreichen, also Wärme in den Innenraum strömt. Die zirkadianen Schwankungen fallen analog zur Oberflächentemperatur (siehe voriges Kapitel) am Kiesdach deutlich höher aus. Die Ergebnisse sind mit dem Wissen zu betrachten, dass die Räume unter dem Gründach- bzw. Referenzdach zum Messzeitpunkt nicht ausreichend konditioniert waren. Da zu erwarten ist, dass der Raum unter dem Kiesdach unter diesen Umständen sogar noch wärmer war als unter dem Gründach, sind die deutlich höheren Wärmeverluste des Gründaches jedoch als gesichert anzunehmen. Aus der Grafik ist auch abzulesen, dass in längeren Schönwetterperioden der maximale Wärmeeintrag durch das Kiesdach analog zur Lufttemperatur täglich zunimmt, während dies beim Gründach wesentlich weniger der Fall ist, sondern im Gegenteil die negativen Maximalwerte sogar höher werden.

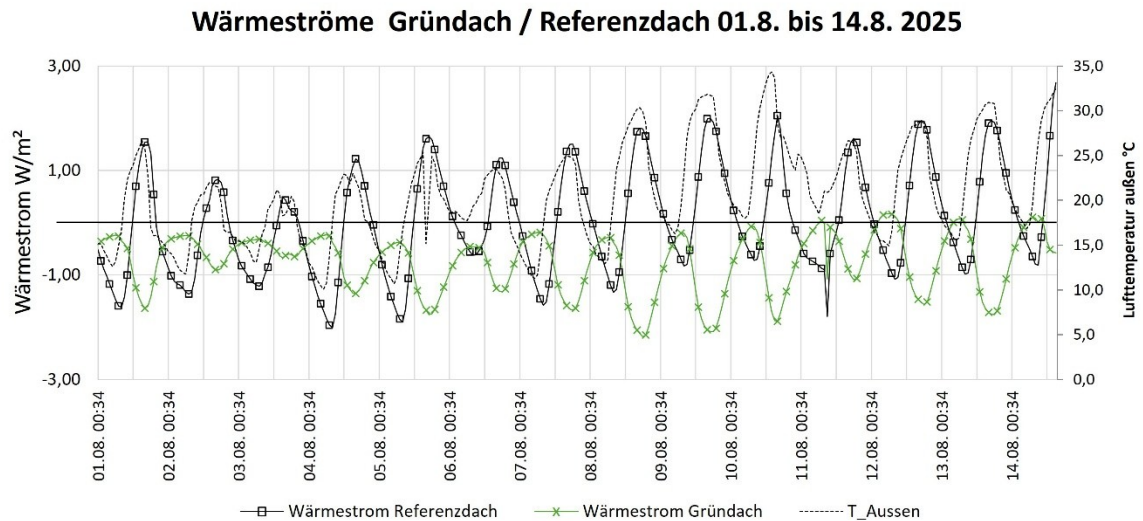


Abbildung 67: Wärmeströme durch das Gründach und Referenzdach in Bezug zur Außenlufttemperatur während einer 14 Tage Sommerperiode. Die Nulllinie des Wärmestromes ist markiert.

Abbildung 68 zeigt die 24h Mittelwerte der Wärmestrommessungen. Eindeutig ist das deutliche Überwiegen der negativen Mittelwerte beim Gründach im Vergleich zum Referenzdach. Bei ansteigenden Außenlufttemperaturen (8.8 – 11.8.) zeigt das Gründach sogar einen zunehmenden durchschnittlichen Wärmeverlust, während das Referenzdach mit zunehmendem Wärmeeintrag reagiert. Im Messzeitraum war die Bodenfeuchte anfangs recht gleichmäßig hoch um die 37Vol% und begann dann ab 7.8. zu sinken. Bei höheren Außenlufttemperaturen scheint also eine höhere Verdunstungsleistung des Gründaches vorzuliegen, sodass speziell in Hitzeperioden die Kühlleistung von Gründächern sogar noch ansteigt, während bei konventionellen Flachdächern der Wärmeeintrag zunimmt.

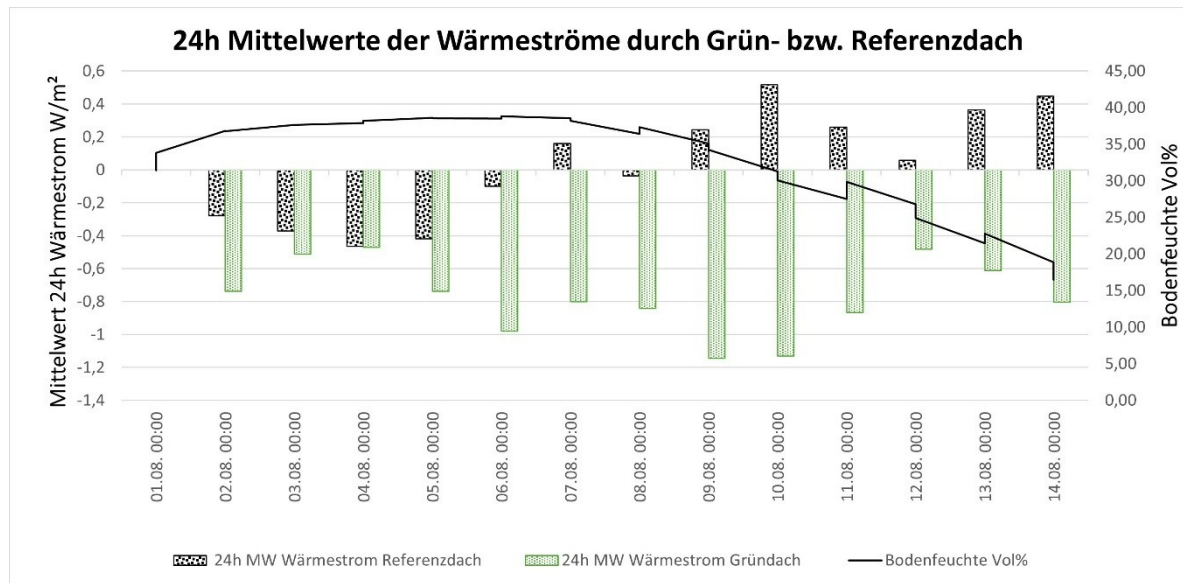


Abbildung 68: 24h Mittelwerte der Wärmeströme durch Gründach und Referenzdach. Parallelle Bodenfeuchte-messung des Gründaches.

Der Ausschnitt von 8.8. bis 14.8. in Abbildung 69 macht ein weiteres Detail der Gründachwirkung sichtbar. Während das Kiesdach aufsteigende Außentemperaturen nach etwa 4 Stunden mit einem Anstieg des Wärmestromes reagiert, zeigt die Reaktion des Gründaches eine wesentlich höhere Trägheit, indem der Anstieg erst 14 Stunden später erfolgt. Das bedeutet in der Praxis, dass das Gründach in den heißen Tagesstunden immer noch Wärme aus den Innenräumen abzuleiten, während beim Kiesdach bereits ab den Mittagsstunden ein positiver Wärmeeintrag zu verzeichnen ist. Die solare Globalstrahlung auf das Dach zeigt an den gemessenen Tagen nur geringe Schwankungen, sodass der Zusammenhang der Wärmeströme mit der Außenlufttemperatur deutlicher

erscheint als der mit der Globalstrahlung. In diesem Punkt sind weitere Messreihen und statistische Untersuchungen im Folgeprojekt geplant.

Wärmeströme Gründach / Referenzdach 08.8. bis 14.8. 2025

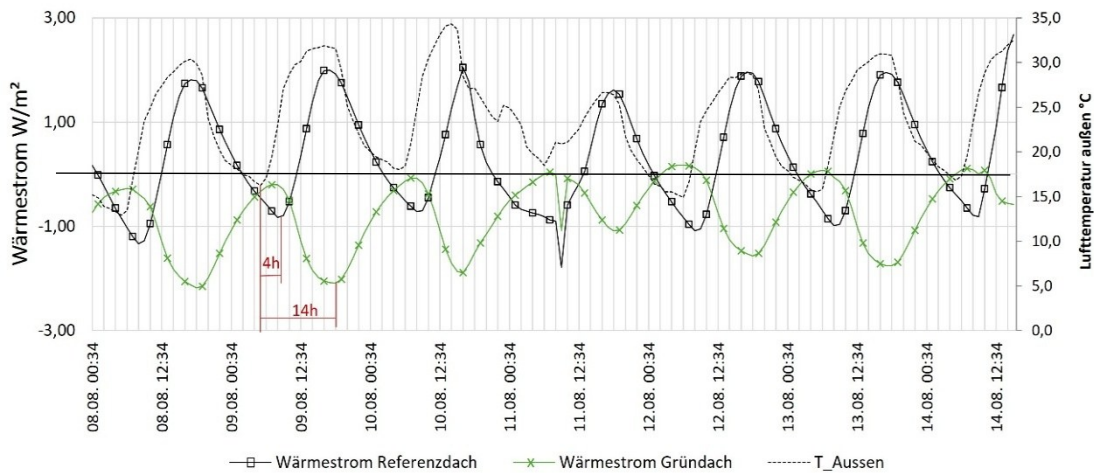


Abbildung 69: Detail: Wärmeströme durch das Gründach und Referenzdach in Bezug zur Außenlufttemperatur von 8.8. bis 14.8. 2025. Die Nulllinie des Wärmestromes ist markiert.

Im nächsten Schritt wurden die Stundenmittelwerte der Wärmeströme über jeweils 24h aufsummiert, sodass man den täglichen Wärmeeintrag bzw. -verlust durch das Gründach mit dem Referenzdach vergleichen kann. Abbildung 70 zeigt die entsprechenden Ergebnisse. Dieselben Werte können auch aus Abbildung 68 durch Multiplikation der 24h Mittelwerte mit 24 abgeleitet werden. Wie bereits oben beschrieben zeigt das Gründach über 24h einen zunehmenden Wärmeverlust bei steigenden Außenlufttemperaturen, während das Referenzdach mit zunehmendem Wärmeeintrag reagiert. Für diesen Effekt scheint eine Kombination aus mehreren der gemessenen Einflussfaktoren verantwortlich: wesentlich niedrigerer Temperatur unter der Begrünung als am Kies, höhere Trägheit des Gründachsubstrates und damit deutlich späterer Umschlag der Wärmestromkurve sowie die „Wattvernichtung“ durch Wasserverdunstung, Photosynthese und Evapotranspiration.

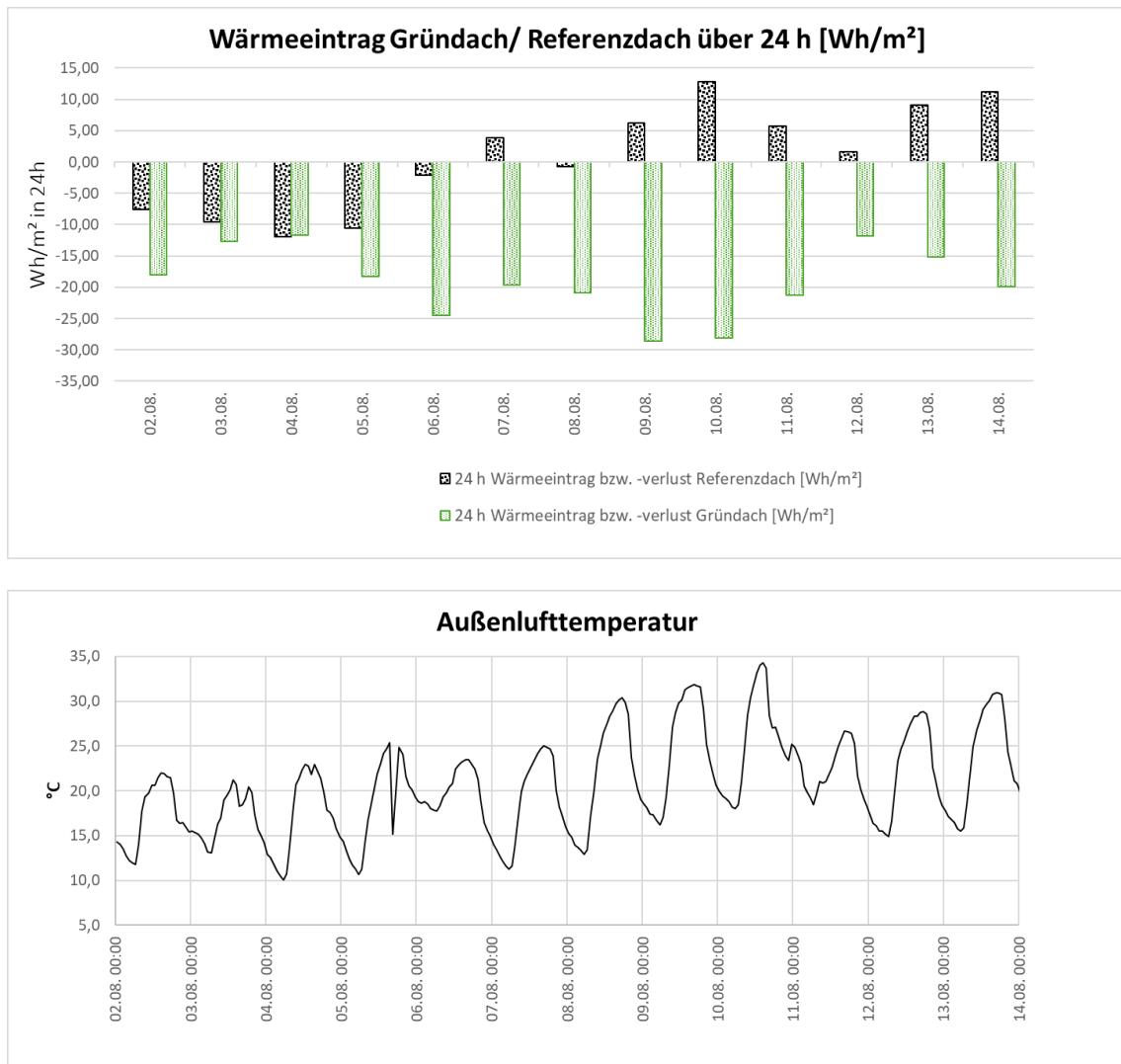


Abbildung 70: Oben: Wärmeeintrag bzw. -verluste durch das Gründach bzw. Referenzdach. Werte jeweils in Wh/m² in 24h. Unten: zugehöriger Verlauf der Außenlufttemperatur.

4.2.6 Wärmedurchgangswiderstand und U-Wert

Eine zentrale Frage zu Dachbegrünungen ist immer wieder, wie sich der U-Wert durch Dachbegrünungen verändert und ob sich durch Dachbegrünungen Dämmstoff einsparen lässt. Da im vorliegenden Projekt unter Realbedingungen und nicht unter den standardisierten Bedingungen zur U-Wert Ermittlung von Baustoffen gemessen wurde, haben wir einen näherungsweisen Weg zur Beantwortung dieser Frage eingeschlagen.

Aus den gemessenen Werten zur Temperaturdifferenz innen/außen des Grün- bzw. Referenzdaches wurde im ersten Schritt der Wärmedurchgangswiderstand R von Grün- bzw. Referenzdach nach folgender Formel ermittelt:

$$R = \frac{\Delta T}{q} = \frac{T_a - T_i}{q}$$

R Wärmedurchgangswiderstand [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$]

ΔT Temperaturdifferenz [$^{\circ}\text{C}$]

q Wärmestrom [W/m^2]

T_a Temperatur außen (Oberflächentemperatur Gründach bzw. Referenzdach [$^{\circ}\text{C}$])

T_i Temperatur innen (Temperatur an der Wärmestromplatte unter der Dämmebene von Gründach bzw. Referenzdach [$^{\circ}\text{C}$])

Bei den Temperaturmesswerten und Wärmeströmen wurde zur Glättung der dynamischen Schwankungen in der 5-Minuten-Messreihe ein nachlaufender gleitender Mittelwert mit einer Fensterbreite von 7 Tagen berechnet ($n = 2016$ Werte). Für jeden Zeitpunkt t wurde der arithmetische Mittelwert der Messwerte der vorangegangenen 7 Tage (inkl. Zeitpunkt t) gebildet; das Fenster wurde dabei jeweils um einen 5-Minuten-Zeitschritt weitergeschoben.

Anschließend wurde die Differenz der Wärmedurchgangswiderstände von Gründach und Referenzdach berechnet:

$$\Delta R_{GD} = R_{GD} - R_{Ref}$$

ΔR_{GD} Wärmedurchgangswiderstandszuschlag Gründach - Referenzdach [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$]

R_{GD} Wärmedurchgangswiderstand Gründach [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$]

R_{Ref} Wärmedurchgangswiderstand Referenzdach [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$]

Abbildung 71 zeigt die entsprechenden Werte aus zwei Messperioden im Winter und Frühling 2025. Je geringer die zirkadianen Temperaturschwankungen ausfallen – und je näher das Messsetting damit statischen Bedingungen kommt, desto stabiler und damit auch aussagekräftiger sind die berechneten Unterschiede im Wärmedurchgangswiderstand.

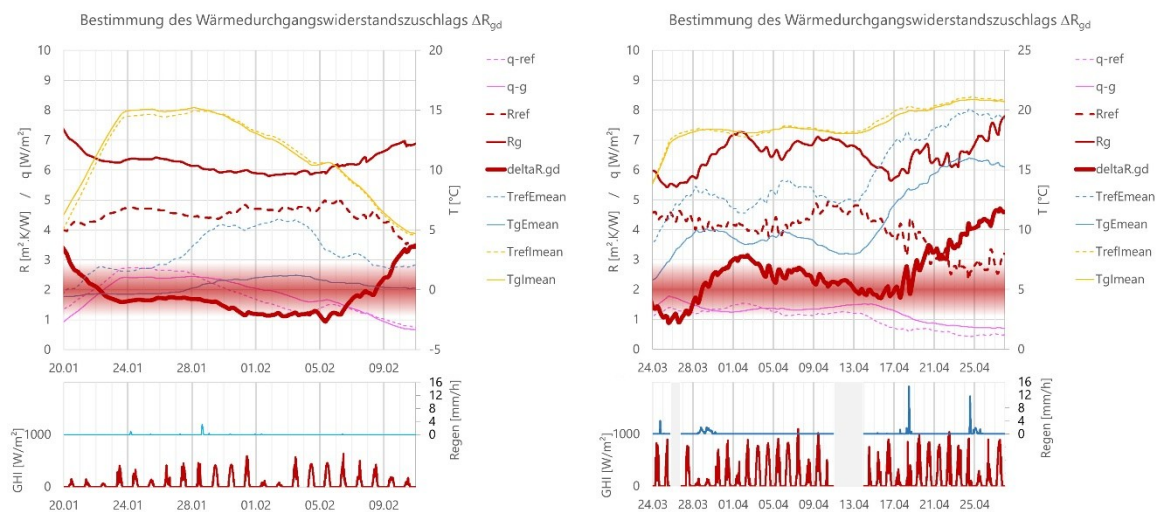


Abbildung 71: Temperaturen, Wärmeströme und Wärmedurchgangswiderstände von Grün- bzw. Referenzdach in zwei Messperioden 2025. Jan – Feb (links) bzw. März-April (rechts). Die dicke Linie zeigt den Wärmedurchgangswiderstandszuschlag, den das Gründach im Vergleich zum Referenzdach aufwies. Der markierte Bereich entspricht etwa $2\text{ m}^2\text{K/W}$.

Nach folgender Formel lässt sich nun auch die Wärmeleitfähigkeit des Gründaches berechnen:

$$R = \frac{d}{\lambda} \text{ bzw. folgend } \lambda = \frac{d}{R}$$

R Wärmedurchgangswiderstand [$\text{m}^2\text{K/W}$]

d Schichtdicke in m

λ Wärmeleitfähigkeit W/(mK)

Beim vorliegenden Gründachaufbau mit einer Substratschicht von 15 cm und einem dichten Bewuchs aus Sedum und Gräsern/ Kräutern als zusätzliche „dämmende“ Schicht würde bei einem durchschnittlichen ΔR_{GD} von $2\text{ m}^2\text{K/W}$ die Wärmeleitfähigkeit bezogen auf 15cm Substrat etwa $0,08\text{ W/(mK)}$ entsprechen. Da dieser Wert in etwa dem von Blähton-Leichtbeton oder stark porierten Hochlochziegeln entspricht, ist davon auszugehen, dass insbesondere auch der Perlite-Anteil im verwendeten Dachsubstrat wesentlich für die Dämmwirkung verantwortlich ist. Ob und welchen Anteil die Pflanzendecke selbst an der zusätzlichen Dämmwirkung des Gründaches hat, kann durch fehlende Vergleichsversuche aus der untersuchten Anordnung nicht abgeleitet werden. Wählt man die Schichtdicke höher, da auch ein Teil der Vegetation als wirksam angenommen wird, erhält man bei 20cm Annahme eine Wärmeleitfähigkeit von $0,10$. In einer ähnlichen Studie (CAE 2025) wurden geringere Dämmstoffeinsparungen kolportiert und auch Substrate mit und ohne Begrünung vermessen. Bei diesen Versuchen wurde eine deutliche Verringerung der Wärmeleitfähigkeit ca. auf die Hälfte – und damit ein ebenso deutlicher Anstieg des R-Wertes des Substrates festgestellt, wenn es einen Pflanzenbewuchs aufwies. Hier besteht in Zukunft noch Forschungsbedarf.

Mittels valider Werte für das ΔR_{GD} aus Versuchsaufbauten kann durch Umformung der Formel für die U-Wert Berechnung

$$U = \frac{1}{R_{si} + R + R_{se}}$$

für jedes beliebige Standarddach der neue U-Wert berechnet werden, der sich durch Ersatz der Kiesdecke ein entsprechendes Gründach ergibt. Die Formel ist unter der Voraussetzung gültig, dass sich der angesetzte innere (R_{si}) und äußere (R_{se}) Wärmeübergangswiderstand zwischen Referenz- und Gründach nicht unterscheiden. Da für R_{si} bzw. R_{se} meist Normwerte verwendet werden, kann jedoch im Allgemeinen von der Gültigkeit ausgegangen werden.

$$U_{GD} = \frac{1}{\frac{1}{U_{Ref}} + \Delta R_{GD}}$$

U_{GD} U-Wert (Wärmedurchgangskoeffizient) Gründach [W/(m²K)]

U_{Ref} U-Wert (Wärmedurchgangskoeffizient) Referenzdach ohne Begrünung [W/(m²K)]

ΔR_{GD} Wärmedurchgangswiderstandszuschlag Gründach - Referenzdach [m²K/W]

Für den untersuchten Standardaufbau mit $U_{Ref} = 0,2 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ lt. OIB würde sich somit rechnerisch der U-Wert mit dem reduziert-intensiven Gründach mit 15 cm Substrat und einem ΔR_{GD} von 2 m²K/W auf $U_{GD} = 0,14 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ reduzieren. Selbst wenn das ΔR_{GD} nur mit 1,5 angenommen wird, reduziert sich der U-Wert um fast 25 % auf $U_{GD} = 0,154 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Umgerechnet in einen konventionellen XPS Dämmstoff mit einer Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,035 \text{ W/(mK)}$ könnte man sich mit dem untersuchten Gründachaufbau etwa 5 cm Dämmstoff einsparen und z.B. nur 15 statt 20 cm Dämmung verwenden. In der bereits erwähnten U-Green Studie fiel das Einsparungspotential eines beispielhaften Dämmstoffes mit einem λ von 0,04 W/(mK) mit max. 3,49 cm geringer aus als in unseren Berechnungen. Allerdings wurde in U-Green für die Messungen ein Grün- bzw. Referenzdach mit nur 10cm Dämmung verwendet, anstatt des zeitgemäß gedämmten Daches mit 18cm EPS-F Dämmung in der vorliegenden Studie. Auswirkungen einer ev. Dämmstoffreduktion auf weitere bauphysikalische Effekte wie z.B. Taupunktverschiebungen blieben in der vorliegenden Arbeit wie auch ähnlichen Studien noch unberücksichtigt.

4.3 Stakeholder-Dialog: Formate & Ergebnisse

Im Verlauf des Forschungsprojekts MARGRET wurden unterschiedliche Formate eingesetzt und gezielt ausgestaltet, um Projektergebnisse sichtbar zu machen, deren Qualität zu sichern und durch den Austausch mit anderen laufenden sowie abgeschlossenen Forschungsprojekten zusätzliches Wissen für die Bearbeitung des Forschungsauftrags zu gewinnen. Der kontinuierliche fachliche Dialog trug wesentlich zur inhaltlichen Fundierung und methodischen Absicherung der Arbeiten bei. Insgesamt wurden bisher im Rahmen von MARGRET sieben Artikel veröffentlicht, 3 Konferenzbeiträge und 36 Präsentationen durchgeführt sowie zwölf Workshops und Austauschveranstaltungen mit Fachexpert:innen organisiert. Ergänzend wurde die Austauschgruppe UGreen eingerichtet, um einen dauerhaften Wissens-transfer mit weiteren Forschungsprojekten zu ermöglichen.

Die nachfolgenden Unterkapitel fassen die zentralen Erkenntnisse des Forschungsprojekts MARGRET zusammen und geben einen strukturierten Überblick über die wesentlichen Arbeitsschritte und Ergebnisse

4.3.1 UGreen Austauschgruppe

Bereits zu Beginn des Forschungsprojekts MARGRET zeigte sich im Zuge der Literaturrecherche, dass neben publizierten Studien auch Erkenntnisse aus aktuell laufenden Forschungsprojekten von hoher Relevanz sind. Vor diesem Hintergrund wurde die Austauschgruppe UGreen initiiert. Seit November 2023 dient sie als Plattform für den fachlichen Dialog zu derzeit angewandten Methoden zur Erhebung messbarer und berechenbarer Daten im Bereich der Dach- und Fassadenbegrünung.

Die Treffen der Austauschgruppe fanden vierteljährlich statt und umfassten jeweils ein bis zwei Fachpräsentationen zu aktuellen Fragestellungen, die im Anschluss gemeinsam diskutiert wurden. Während der Laufzeit des Projekts MARGRET und darüber hinaus wuchs die Gruppe auf insgesamt 55 Interessent:innen aus unterschiedlichen Fachdisziplinen an.

Der regelmäßige Austausch aktueller Forschungsergebnisse förderte ein kritisches Hinterfragen bestehender methodischer Ansätze zur präzisen Mess- und Berechenbarkeit von Gebäudebegrünung. Diese Impulse flossen auch in das Projekt MARGRET ein, indem sie Anpassungen des Messkonzepts sowie eine gezielte Auswahl geeigneter abgeleiteter Kennwerte unterstützten.

4.3.2 MARGRET Fachdiskussion am 26.11.2024

Nach dem Abschluss der ersten Messphase im Forschungsprojekt MARGRET wurde im November 2024 eine fachliche Austauschveranstaltung zum Thema „Einbindung von Bauwerksbegrünung in den Energieausweis“ durchgeführt. Die Veranstaltung fand in hybrider Form statt und ermöglichte sowohl eine persönliche als auch eine digitale Teilnahme. Insgesamt beteiligten sich neun externe

Fachexpert:innen, die ihre praktischen Erfahrungen und ihr Fachwissen in die Diskussion einbrachten. Ein Großteil dieser Personen konnte in weiterer Folge auch für gemeinsame Veranstaltungen der Forschungsprojekte HEDWIG und MARGRET gewonnen werden.

Im Mittelpunkt der Diskussion standen folgende Themenbereiche:

- Das Messkonzept zur Vorbereitung einer Abbildung im Energieausweis
- Mögliche Anpassungen bestehender Berechnungsansätze sowie
- Relevante Normen und technische Regelwerke.

Diskussion des Messkonzepts

Im ersten Teil der fachlichen Auseinandersetzung wurde das im Projekt eingesetzte Messkonzept im Hinblick auf die Ableitung praxisnaher Kennwerte für den Energieausweis erörtert. Dabei wurden mehrere zentrale Aspekte hervorgehoben.

Der derzeitige Energieausweis berücksichtigt vorrangig den stationären Winterfall. Bauwerksbegrünungen unterliegen jedoch ausgeprägten jahreszeitlichen Veränderungen und entfalten insbesondere in den Sommermonaten positive Wirkungen, etwa durch die Verringerung von Überwärmung in Innenräumen sowie im unmittelbaren Umfeld von Gebäuden. Diese Effekte finden in der aktuellen Systematik des Energieausweises bislang keine Berücksichtigung. Zusätzlich wurde darauf hingewiesen, dass der Feuchtegehalt des Substrats die wärmedämmenden Eigenschaften von Begrünungen im Winter beeinflussen kann.

Darüber hinaus wurde diskutiert, welche bauphysikalischen Kennwerte durch Dach- und Fassadenbegrünungen verändert werden. Dazu zählen unter anderem der Wärmedurchgangskoeffizient, die Wärmetransmission opaker Bauteile, die Oberflächenreflexion (Albedo), Verschattungseffekte vor transparenten Bauteilen sowie die evapotranspirative Leistung der Vegetation.

Ein Energieausweis, der die Wirkungen von Gebäudebegrünungen umfassend abbilden soll, müsste entweder als dynamische Ganzjahresbetrachtung ausgelegt sein oder zumindest eine getrennte Bewertung von Sommer- und Winterfall ermöglichen. Nur auf diese Weise lassen sich die positiven Effekte von Dach- und Fassadenbegrünungen als passive Maßnahmen realistisch darstellen.

Diskussion zu Berechnungsansätzen und Normen

Im zweiten Teil der Fachdiskussion lag der Fokus auf der Frage, wie bestehende Berechnungsformeln angepasst und normative Vorgaben berücksichtigt werden können.

Vertikale Fassadenbegrünungen bewirken eine Verschattung sowohl transparenter als auch opaker Bauteile. Im Energieausweis könnten diese Effekte beispielsweise durch die Abbildung eines außenliegenden, dynamischen Sonnenschutzes vor Fenstern oder durch eine horizontale Verschattung, vergleichbar mit der Wirkung eines Balkons, berücksichtigt werden.

Unabhängig von der Ausführungsform – ob als Kletterpflanzen oder als wandgebundene Vegetationssysteme mit teil- oder vollflächigen Trägerelementen – tragen vertikale Begrünungen zusätzlich

zur Reduktion der solaren Wärmeeinträge an opaken Fassadenflächen bei.

Im Rahmen der Diskussion wurde zudem auf einschlägige ÖNORMEN verwiesen, die für die Berechnung des Heiz- und Kühlbedarfs im Energieausweis relevant sind. Dazu zählen insbesondere die ÖNORM B 8110-3 (Wärmeschutz im Hochbau – operative Temperatur im Sommerfall) sowie die ÖNORM B 8110-6-1 (Wärmeschutz im Hochbau – Grundlagen zur Ermittlung des Heiz- und Kühlbedarfs).

Ergänzend wurde erläutert, dass vertikale Fassadenbegrünungen die Temperatur direkt an der Gebäudeoberfläche senken, während Gründächer zu einer Abkühlung der Luftschicht unmittelbar über der Dachfläche führen. Diese Effekte können insbesondere im Sommer zu einer Reduktion der Außenlufttemperatur beitragen, etwa bei der Fensterlüftung, wie auch in bisherigen Studien beschrieben wurde (Harlaß, 2008; Korjenic et al., 2019).

4.3.3 Präsentation Projektstand, Verband für Bauwerksbegrünung

Im Rahmen der Präsentation vom 18.03.2025 wurde empfohlen, auf Grundlage der bestehenden Normen einen Überarbeitungsvorschlag zu erarbeiten. Dieser soll die im Projekt MARGRET neu generierten Kennwerte für die relevanten ÖNORMEN berücksichtigen. Dieser Vorschlag sollte anschließend dem zuständigen österreichischen Normungskomitee, beispielsweise dem Komitee 175 – Wärmeschutz von Gebäuden und Bauteilen, vorgelegt werden. Dort kann geklärt werden, welche Ansprechpartner:innen zuständig sind oder ob eine direkte Weiterleitung an ein geeignetes Gremium erfolgt. Dabei ist es wesentlich, die Bedeutung der gewonnenen Erkenntnisse klar darzustellen, die Inhalte strukturiert aufzubereiten und zugleich die Bereitschaft zur aktiven Mitarbeit in den Normenausschüssen zu signalisieren.

Ergänzend zu einer Überarbeitung der Normen kann geprüft werden, inwieweit die Ergebnisse von MARGRET direkt in die OIB-Richtlinien eingebracht werden können. Voraussetzung dafür sind belastbare, nachvollziehbare Ergebnisse sowie ein konkret ausgearbeiteter Vorschlag zur aktuell gültigen OIB-Richtlinie oder – sofern sich diese gerade in Überarbeitung befindet – eine frühzeitige Integration in den Entwurf.

Darüber hinaus können die im Projekt MARGRET gewonnenen Erkenntnisse in unterschiedlichen Fach- und Diskussionsforen zu themenspezifischen Fragestellungen, etwa zu Substrataufbau und Wasserrückhalt oder zu den Auswirkungen von Bauwerksbegrünungen auf das Gebäude, vorgestellt werden. Ein solcher Austausch ermöglicht sowohl die Diskussion der Ergebnisse als auch die Identifikation noch fehlender Prüf- und Bewertungsverfahren für weiterführende Analysen.

Im Bereich der Bauwerksbegrünung besteht zudem Bedarf an direkten Vergleichsstudien zwischen etablierten, bereits in Normen berücksichtigten Systemen und alternativen Lösungen. Dazu zählen beispielsweise Vergleiche mit bestehenden Sonnenschutzsystemen hinsichtlich Verschattungseffekten oder Untersuchungen zur Wärmedämmwirkung von Gebäuden mit und ohne Gründach, etwa in Form von Wärmedämm-Äquivalenten.

Abschließend wurde die Frage diskutiert, ob Messtechnik standardmäßig in Gebäudebegrünungen

integriert ist. Dies wurde verneint. In der Regel wird Messtechnik nur dann installiert, wenn im Rahmen eines Forschungsprojekts ein Monitoring vorgesehen ist und die Auswertung der Messdaten organisatorisch und finanziell abgesichert wird. Eine Ausnahme stellen beispielsweise Frostsensoren dar, die für den sicheren Betrieb bestimmter Systeme, etwa von Living-Wall-Konstruktionen, erforderlich sind, um Schäden zu vermeiden. Teilweise erfolgt die Beurteilung des Systemzustands auch durch Sichtkontrollen der Pflanzenvitalität durch Personen vor Ort, wobei diese Kontrollen nicht in allen Fällen regelmäßig durchgeführt werden.

4.3.4 HEDWIG und MARGRET Workshop am 03.07.2025

Am 3. Juli 2025 wurde an der Universität für Bodenkultur Wien (BOKU) ein dreistündiger Workshop in hybrider Form durchgeführt, der im Rahmen der Forschungsprojekte HEDWIG und MARGRET stattfand. Sowohl die Teilnehmenden vor Ort als auch die online zugeschalteten Interessent:innen beteiligten sich aktiv an einem intensiven fachlichen Austausch. In den Diskussionen wurden zahlreiche Anregungen gesammelt, welche Themenfelder innerhalb der beiden Projekte künftig ergänzt, vertieft oder weiterentwickelt werden könnten. Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der Frage, welche fachlichen und methodischen Voraussetzungen in der Bau- und Immobilienwirtschaft erforderlich sind, um Gebäudebegrünungen systematisch in Planungsprozesse zu integrieren und deren Wirkungen zuverlässig quantifizieren zu können.

Zum Abschluss der Veranstaltung wurden die zentralen Ergebnisse aus den Gesprächen an den Thementischen zusammengefasst. Dabei kristallisierten sich mehrere übergeordnete Handlungsfelder heraus.

Bedarf an belastbaren Referenzkennwerten

Für die praktische Anwendung in der Bauwirtschaft besteht ein klarer Bedarf an nachvollziehbaren und standardisierten Referenzkennwerten. Diese sind notwendig, um unterschiedliche Formen der Gebäudebegrünung vergleichbar zu bewerten und in Planungs- und Simulationsprozesse einbinden zu können. Die im Rahmen der Forschungsprojekte HEDWIG und MARGRET bereits erarbeiteten Kennwerte bilden hierfür eine wichtige fachliche Grundlage.

Darüber hinaus wurden weitere Kennwerte identifiziert, die insbesondere für Gebäudesimulationen von hoher Relevanz sind und im weiteren Projektverlauf teilweise noch abgeleitet werden können. Dazu zählen unter anderem:

- Kenngrößen zu Transmission und Volumen zur Berechnung von Verschattungseffekten, beispielsweise in Abhängigkeit vom jeweiligen Sonnenstand und der Wirkung auf Fensterflächen
- Die langwellige und kurzwellige Strahlungsbilanz unter Berücksichtigung von Reflexion, Absorption und Transmission
- Der Albedo-Wert
- Oberflächentemperaturen auf Höhe des Substrats sowie an der Blattoberfläche

- Zeitlich aufgelöste Darstellungen in Form von Monatswerten oder Jahresverläufen, etwa als Funktionsgraphen, zur Abbildung der saisonalen Entwicklung der Begrünung
- Die Darstellung von Wirkungen unter Extremwetterbedingungen wie Hitzeperioden, Trockenphasen oder Starkregenereignissen, beispielsweise anhand veränderter R-Werte oder modifizierter Wärmeflüsse.

Zusammenhang zwischen Pflanzenvitalität und Kennwerten

Um die dynamischen Prozesse von Gebäudebegrünungen wissenschaftlich fundiert abzubilden, wurde die Notwendigkeit betont, die Vitalität der Pflanzen systematisch mit den ermittelten Kennwerten zu verknüpfen. Eine solche Korrelation trägt dazu bei, die Ergebnisse besser vergleichbar zu machen und zugleich ein vertieftes Verständnis der natürlichen Entwicklungsprozesse der Begrünung zu gewinnen.

Anschauliche Vermittlung der Wirkungsmechanismen

Für die verständliche Aufbereitung der Forschungsergebnisse ist es wesentlich, die Wirkungsweise von Gebäudebegrünungen transparent darzustellen. Insbesondere der Vergleich von Wärme- und Energieströmen durch opake und transparente Bauteile – jeweils mit und ohne Begrünung – ermöglicht es, die Effekte in unterschiedlichen Wachstums- und Entwicklungsphasen der Pflanzen nachvollziehbar zu machen.

Bedeutung für Planung, Verwaltung und Auftraggeber:innen

Aus Sicht von Planer:innen, Behörden und Auftraggeber:innen besteht ein besonderes Interesse daran, die energetischen Vorteile von Gebäudebegrünungen klar zu erfassen. Von zentraler Bedeutung sind hierbei vor allem:

- Die Reduktion des Kühlenergiebedarfs infolge geringerer Wärmeeinträge über Fassaden- und Dachflächen
- Die zusätzliche wärmedämmende Wirkung des Substrats bei begrünten Dachkonstruktionen.

4.3.5 HEDWIG und MARGRET Ergebnispräsentation am 19.09.2025

Gegen Ende der Laufzeiten der Forschungsprojekte HEDWIG und MARGRET wurde am Freitag, dem 19. September 2025, eine gemeinsame dreistündige Online-Ergebnispräsentation durchgeführt. An der Veranstaltung nahmen insgesamt 45 Personen teil, darunter 36 externe Partner:innen aus Forschung, Planung, Verwaltung und Praxis. Ziel der Präsentation war es, die zentralen neuen Erkenntnisse beider Projekte systematisch darzustellen und gemeinsam zu reflektieren. Den teilnehmenden Partner:innen wurden die wesentlichen Ergebnisse aus den Forschungsarbeiten präsentiert, die sich in mehrere thematische Schwerpunkte gliederten. Im Bereich der Wirkungsabschätzung wurden Kennwerte zur Reduktion der solaren Einstrahlung vorgestellt. Ergänzend dazu wurden Messergebnisse zur Veränderung der Lufttemperatur vor und hinter begrünten

Bauteilen sowie Auswertungen zu Albedo-Werten und Oberflächentemperaturen erläutert. Ein weiterer Fokus lag auf dem Vergleich unterschiedlicher Begrünungssysteme. Dabei wurden verschiedene Fassadenbegrünungen – unter anderem mit Kletterpflanzen wie *Wisteria sinensis* und *Parthenocissus quinquefolia* – Living-Wall-Systeme sowie extensive, reduziert intensive und intensive Dachbegrünungen gegenübergestellt.

Darüber hinaus wurden Ergebnisse zur wärmedämmenden Wirkung präsentiert. Diese umfassten Abschätzungen möglicher Einsparpotenziale bei konventionellen Dämmmaterialien sowie die Auswertung gemessener Wärmeströme. Ergänzend wurden pflanzenphysiologische Erkenntnisse dargestellt, darunter Ergebnisse zum Leaf Area Index (LAI) beziehungsweise Wall Leaf Area Index (WLAI), zum Deckungsgrad, zur stomatären Leitfähigkeit, zum kubischen Pflanzenvolumen sowie zur allgemeinen Pflanzenvitalität. Abschließend wurde aufgezeigt, in welchen Anwendungsbereichen die erhobenen Kennwerte künftig genutzt werden können, insbesondere im Zusammenhang mit Energieausweisberechnungen und Gebäudesimulationen.

In der anschließenden Frage- und Diskussionsrunde wurden die Messergebnisse zur Wirkung von Fassaden- und Dachbegrünungen intensiv erörtert. Die Rückmeldungen der Partner:innen bezogen sich sowohl auf den Umfang der präsentierten Forschungsergebnisse als auch auf die praktische Verwendbarkeit der daraus abgeleiteten Kennwerte. Dabei wurde deutlich, dass die vorhandene Datenbasis grundsätzlich als umfangreich eingeschätzt wird, in vielen Details jedoch als methodisch herausfordernd gilt.

Auch die Abhängigkeit der Messergebnisse von Standort- und Wetterbedingungen wurde ausführlich diskutiert. Die Partner:innen waren sich einig, dass stark unterschiedliche Rahmenbedingungen – etwa Innenhoflagen im Vergleich zu freistehenden Gebäuden, unterschiedliche Verschattungssituationen oder variierende Windverhältnisse – einen direkten Einfluss auf die Ergebnisse haben. Mehrfach wurde hervorgehoben, dass Messwerte nicht ohne Weiteres auf andere Standorte übertragbar sind.

Ein weiterer Diskussionsschwerpunkt betraf die Vitalität der Pflanzen. Der dokumentierte Pilzbefall einzelner Begrünungssysteme führte zu deutlich reduzierten Blattflächen und damit zu messbar geringeren Kühl- und Beschattungseffekten. Diese Unterschiede waren im Datenmaterial klar erkennbar. Daraus ergab sich die Frage, wie junge Pflanzen in der Etablierungsphase besser geschützt werden können, um von Beginn an stabile Messwerte zu erzielen. In diesem Zusammenhang wurde mehrfach auf die Bedeutung einer ausreichenden Pflegephase hingewiesen. Die ÖNORM L 1136 wurde dabei als zentrale Referenz genannt, da sie Pflegekonzepte ausdrücklich als verpflichtenden Bestandteil von Planung und Ausführung definiert.

Die Übertragbarkeit der Ergebnisse wurde unter den Partner:innen unterschiedlich bewertet. Während einige die Resultate bereits als gut nutzbar einschätzten, warnten andere vor einer zu raschen Generalisierung.

Ein wesentlicher Diskussionspunkt betraf die Bewertung der Beschattungswirkung. Der häufig verwendete Verschattungsfaktor wurde von mehreren Partner:innen als nicht ausreichend angesehen, da er die komplexe Wirkung von Pflanzen nur vereinfacht abbildet. Als Alternative wurde der LAI als robusterer Parameter diskutiert, jedoch auch hier wurden Einschränkungen benannt. Die Diskussion mündete in der gemeinsamen Einschätzung, dass künftig ein neuer, dynamischer Bewertungsparameter erforderlich ist, der sowohl das Pflanzenwachstum als auch die räumliche

Struktur des Pflanzenkörpers besser berücksichtigt.

Auch die Berechnung der Dämmwirkung von Dachbegrünungen wurde ausführlich diskutiert. Kritisch angemerkt wurde, dass die Messergebnisse sehr sensibel auf Faktoren wie Feuchtegehalt, Substrattyp und Oberflächenfarbe reagieren.

Ein großer Teil der Diskussion bezog sich auf konkrete Messergebnisse, die wiederholt kommentiert und einander gegenübergestellt wurden. Besonders intensiv diskutiert wurden dabei:

- Sehr hohe Reduktionen der solaren Strahlung im Bereich von 70 bis 90 Prozent
- Temperaturunterschiede von bis zu 0,5 °C hinter begrünten Bauteilen
- Unterschiede in den Verdunstungsraten, insbesondere bei Living-Wall-Systemen
- Deutliche Schwankungen der LAI-Werte in Abhängigkeit von Pflanzenart, Vitalität und Jahreszeit
- Saisonale Unterschiede im Bioshading-Faktor, beispielsweise rund 23 % bei Wisteria und bis zu 65 % bei wildem Wein im Herbst.

Besonders aufmerksam diskutiert wurde der Befund, dass eine etwa 15 cm starke Dachbegrünung einer vergleichsweise hohen Reduktion des erforderlichen Dämmstoffs entsprechen kann. Während einige Partner:innen diesen Wert als sehr vielversprechend einschätzten, betonten andere den Bedarf an weiterführenden Untersuchungen, da insbesondere das Feuchteverhalten und die Qualität des Substrats einen erheblichen Einfluss ausüben.

Abschließend bestand unter den Teilnehmer:innen Einigkeit darüber, dass Gebäudebegrünungen eine nachweislich signifikante Reduktion der solaren Einstrahlung bewirken, das thermische Verhalten der Gebäudehülle positiv beeinflussen und maßgeblich zur Steigerung des allgemeinen Wohlbefindens beitragen. Gleichzeitig zeigte die intensive Diskussion deutlich, wie komplex die fachliche Bewertung dieser Effekte ist. Einflussfaktoren wie Pflanzenvitalität, Pflegequalität, Materialwahl, Nutzer:innenverhalten, Standortbedingungen und Sensorik wirken in hohem Maße auf die Ergebnisse ein. Für zukünftige Forschungsvorhaben wurde daher der Bedarf an standardisierten Messmethoden, dynamischen Wachstumsmodellen und einer verbesserten Dokumentation hervorgehoben, um die Vergleichbarkeit weiter zu erhöhen. Insbesondere im Bereich der Beschattung und der Dämmwirkung wurde deutlich, dass neue, präzisere Bewertungsparameter notwendig sind.

4.4 Empfehlungen zu Adaptierungen in den Berechnungsmodellen bzw. Normen

4.4.1 Stakeholder: zentrale Aussagen

Im Rahmen des Forschungsprojektes MARGRET wurden Expert:innen und Stakeholder:innen im Rahmen von Fachdiskussionen, Workshops und Austauschgruppen in Kooperation mit dem Netzwerks des Innovationslabors GRÜNSTATTGRAU durchgeführt. Dies ermöglichte eine laufende Präsentation und Diskussion der Herangehensweisen, des Messverfahrens, sowie den abgeleiteten Kennwerten und trug so wesentlich zur Weiterentwicklung und Optimierung des Projektes bzw. der Projektergebnisse bei.

Zentrale Aussagen bzw. Erkenntnisse waren, wie in Kapitel 4.3 näher dargestellt:

- Der derzeitige Energieausweis betrachtet vorrangig den stationären Winterfall, während Gebäudebegrünung ganzjährig und dynamisch eine Wirkung aufs Gebäude darstellt.
- Die wesentlichen Einflüsse stellt die Gebäudebegrünung durch die Verschattung von transparenten Oberflächen (Reduktion der ankommenden Solarstrahlung), sowie die wärmedämmenden (Heizwärmebedarf senkenden) Eigenschaften dar.
- Zur Einbindung in z.B. österreichische Normen / Richtlinien sollten die generierten/abgeleiteten Kennwerte mit entsprechenden Adaptierungsvorschlägen als Diskussionsgrundlage für potentielle Veränderungen genutzt werden. Voraussetzung wären hierfür belastbare und nachvollziehbare Ergebnisse mit konkreten Vorschlägen.
- Es besteht ein Bedarf für nachvollziehbare und standardisierte Referenzkennwerte. Diese ermöglichen Gebäudebegrünung vergleichbar bewerten und auch in Planungs- und Simulationsprozesse einbinden zu können.
- Für Gebäudesimulationen wären unter anderem folgende Kennwerte von hoher Relevanz:
 - Kenngrößen zu Transmission und Volumen zur Berechnung von Verschattungseffekten, beispielsweise in Abhängigkeit vom jeweiligen Sonnenstand und der Wirkung auf Fensterflächen
 - Die langwellige und kurzwellige Strahlungsbilanz von Fassaden- und Dachbegrünungen
 - Albedo von Fassaden- und Dachbegrünungen
 - Oberflächentemperaturen auf Höhe des Substrats sowie an der Blattoberfläche
 - Zeitlich aufgelöste Darstellungen in Form von Monatswerten oder Jahresverläufen, etwa als Funktionsgraphen, zur Abbildung der saisonalen Entwicklung der Begrünung
 - Die Darstellung von Wirkungen unter Extremwetterbedingungen wie Hitzeperioden, Trockenphasen oder Starkregenereignissen, beispielsweise anhand veränderter R-Werte oder modifizierter Wärmeflüsse.

- Zur Abbildung der dynamischen Veränderung von Gebäudebegrünung ist eine Korrelation zwischen der Vitalität der Pflanzen und den ermittelten Kennwerten herzustellen.

Zusammenfassend herrschte unter den Workshop-Teilnehmenden Einigkeit darüber, dass Gebäudebegrünungen nachweislich positive Effekte erzielen. Dies betrifft insbesondere die Reduktion des Strahlungsdurchgangs, die Optimierung des Temperaturverhaltens sowie die Verringerung des Wärmedurchgangs in das Gebäudeinnere.

4.4.2 Ableitung geeigneter Kennwerte

Die Ableitung belastbarer Kennwerte auf Basis der ausgewerteten Messergebnisse bildet die Schnittstelle zwischen der physikalischen Datenerhebung und der praktischen Anwendung in der Gebäudeplanung. Ziel war es, die Auswirkungen von Bauwerksbegrünungen an Fassade und Dach auf das thermische Verhalten des Gebäudes sowie auf die Behaglichkeit im Innenraum quantifizierbar zu machen. Hierbei flossen neben den Messdaten auch die Erkenntnisse aus dem Expertinnen- und Experten-Feedback ein, um Parameter zu definieren, die in der Planungspraxis direkt verwertbar sind.

Im Zuge der Auswertung mussten jedoch spezifische Störgrößen berücksichtigt werden, welche die Kennwertermittlung beeinflussten. Da die Grünstrukturen zum Teil noch sehr jung waren und durch äußere Faktoren wie Spätfröste, Pilzbefall sowie notwendige Modulwechsel beeinträchtigt wurden, war der Bewuchs nicht vollständig ausgeprägt. Dennoch wurden umfangreiche Messergebnisse erfasst und innovative Messmethoden angewendet, die es ermöglichen, trotz dieser Unwägbarkeiten Kennwerte zu generieren. Für den Dachbereich wurden hierbei die Varianten Kiesdach und reduziert-intensive Begrünung gegenübergestellt, wobei auch Kennwerte für die Substrate durch Daten aus ergänzenden Forschungsprojekten betrachtet wurden.

Für das Gründach stehen vor allem die verringerten Wärmeverluste und die zusätzliche Dämmwirkung und Phasenverschiebung im Vordergrund.

Zusätzlich zu bereits in Vorprojekten wie GLASGrün (Stangl et al. 2025) etablierten Kennwerten wurden im Rahmen von MARGRET neue Parameter wie die Albedo und detaillierte Profile des solaren Eintrags auf transparente Flächen erhoben.

4.4.2.1 Vertikalbegrünungen

In der folgenden Zusammenfassung werden ausgewählte Messergebnisse und daraus abgeleitete Kennwerte vorgestellt, welche die physikalische Performance der untersuchten Fassadenbegrünungssysteme quantifizieren. Die Daten basieren auf den Messperioden der Jahre 2024 und 2025 und stellen die Systeme *Wisteria sinensis*, *Parthenocissus quinquefolia* sowie die Living Wall der unbegrünzten Referenzfassade gegenüber. Diese Kennwerte bilden die wesentliche Grundlage für die energetische Bewertung des Bioshadings und die Validierung der thermischen Schutzwirkung an der Gebäudehülle. Wie zuvor erwähnt sind die Kennwerte in Kontext zur Ausbildung des Grünkörpers zu betrachten. Der WLAI gilt als guter Indikator bezüglich der Verschattungsleistung der Begrünung, dessen Bandbreite in der folgenden Tabelle angeführt ist. Es ist folglich durch Biomassezuwachs von einer deutlichen Steigerung der Verschattungs- und Kühlleistung auszugehen. Beispielsweise wurden beim Projekt GLASGrün (Stangl et al. 2025) im dritten Standjahr bei der Transmission durch die Vertikalbegrünung (*Wisteria sinensis*) Werte von 11% erzielt.

Tabelle 23: Fassadenbegrünung, ausgewählte Kennwerte auf Basis der Messergebnisse.

Parameter	Wisteria sinensis	Parthenocissus q.	Living Wall	Referenzfassade
Bewässerung Sommer 2025 [l/m ² Tag]	1,4	1,4	3,6	-
Leaf Area Index (WLAI) (Mai–Juli)	0,6–2,3	0,8–2,4	0,8–3,5	-
Albedo [%]	30 (SD 0,11)	26 (SD 0,04)	27,3 (SD 0,08)	75,8
Transmission Begrünung [%]	23	21	0	-
Absorption Begrünung [%]	54	53	69	-
Transmission Fenster (Pyroscanner) [%]	46 (DG 55%)	59 (DG 78%)	-	-
Oberflächentemperaturen ΔT [°C]	8–11	7–14	~ 13	42–47
Wärmestrom [Wh/m ² Tag]	-10 bis +12	-10 bis +12	-10 bis +12	-10 bis +12
Reduktion Kühlleistung (24h-Mittel)	~ 40% (DG 56%)*	~ 40% (DG 54%)*	-	

* Werte für Vertikalbegrünung mit Überdeckung der Fensterfläche. Wird diese nicht begrünt, ist keine relevante Reduktion der Kühlleistung messbar.

DG... Spezifischer Verschattungsgrad der Vegetationsschicht in %

4.4.2.2 Dachbegrünungen

Die Ergebnisse der bewässerten, reduziert-intensiven Dachbegrünung verdeutlichen insbesondere das Potenzial zur Kappung von Temperaturspitzen sowie die Verbesserung des Wärmedurchgangswiderstands.

Tabelle 24: Dachbegrünung, ausgewählte Kennwerte auf Basis der Messergebnisse

Parameter Dachbegrünung	red. int. Dach	Referenzdach
Bewässerung, Sommer 2025, pro Tag [l/m ²]	2,0	-
Leaf Area Index, LAI (Bandbreite Mai – Juli 2025)	2-7	-
Differenz Lufttemperatur 20 cm über Dach (2025, 7 Tage Mittel) [°C]	3,7	-
Max. Oberflächentemperatur (T_o), Thermografie [°C]	35,3	51,7
Max. T_o Gründachsubstrat/Kies Sondenmessung [°C]	38,3	54,3
T_o Gründachsubstrat/Kies – 24h Mittelwert über 7 Tage [°C], August 2025	23,9	30,6
Differenz T_o Gründachsubstrat /Kies zu Außenlufttemperatur – 24h Mittelwert über 7 Tage [°C], August 2025	+0,4	+7,1
Max Differenz T_o Gründachsubstrat /Kies zu Außenlufttemperatur [°C]	+4,1	+21,6
Max. 24h Schwankungsbreite T_o Gründachsubstrat / Kies [°C]	36,2	50,46
Mittlere 24h Schwankungsbreite T_o Gründachsubstrat / Kies [°C]	18,9	31,1
Mittelwert 24h Wärmestrom von 8.8. bis 14.8. 2025 [Wh/m ²]	-20,8	+6,6
Phasenverschiebung [h]	14	4
Wärmedurchgangswiderstand [m ² K/W]	6-7	4-5
T_o ... Oberflächentemperatur		

4.4.3 Empfehlungen für standardisierte Mess- und Prüfverfahren

Die in Kapitel 3 beschriebenen Mess- und Prüfverfahren bilden die methodische Grundlage für die vorliegenden Optimierungsvorschläge, welche eine Brücke zwischen experimenteller Datenerhebung und einer zukünftigen Standardisierung schlagen. Da Bauwerksbegrünungen als lebende Systeme einer hohen Dynamik unterliegen, erfordert die Ableitung valider Kennwerte eine präzise Abstimmung zwischen Sensorik, Messanordnung und den zu erfassenden Pflanzenparametern. Die nachfolgenden Ausführungen konzentrieren sich darauf, Fehlerquellen früherer Messreihen zu eliminieren und die Effizienz künftiger Untersuchungen zu steigern, um eine Vergleichbarkeit unterschiedlicher Begrünungsvarianten auf einer objektiven Datenbasis zu ermöglichen.

Dabei steht die kritische Evaluierung der eingesetzten Methodik im Vordergrund, wobei insbesondere die Relevanz einzelner Messpunkte sowie die Präzision der verwendeten Instrumente hinterfragt werden. Eine Standardisierung der Prüfverfahren ist unerlässlich, um belastbare Kenngrößen wie Verschattungsfaktoren oder Evapotranspirationsraten für die energetische Gebäudemodellierung bereitzustellen und gleichzeitig den messtechnischen Aufwand an jenen Stellen zu reduzieren, die keinen signifikanten Erkenntnisgewinn liefern. In diesem Zusammenhang werden sowohl technische Anpassungen am Versuchsaufbau als auch verfeinerte Protokolle für die Erhebung biologischer Merkmale definiert, die für Folgeprojekte wie MARGRET Bioshade dienen. Die folgende detaillierte Betrachtung der einzelnen Messbereiche zeigt auf, wie durch gezielte Modifikationen der Sensorebene und der zeitlichen Erfassungsintervalle eine Steigerung der Datenqualität erreicht werden kann.

Lufttemperaturmessungen

Die im Messsetting verwendete Lufttemperaturmessung in drei unterschiedlichen Höhen vor und hinter der Fassadenbegrünung erbrachte keine unterschiedlichen Werte und kann in künftigen Messverfahren entfallen. Eine Messung jeweils vor und hinter der Begrünung ist ausreichend.

Transmissionsmessung mittels stationärem Pyranometer

Diese Art der Transmissionsmessung ist aufgrund des ortsfesten Charakters für Vertikalbegrünungen nur bedingt geeignet. Obwohl das Pyranometer einen weiten Erfassungswinkel besitzt, wird das Messergebnis durch die unmittelbare Nähe zur inhomogenen Pflanzenstruktur (lokale Lücken oder Verdichtungen) sowie durch Blattbewegungen so stark dominiert, dass die Messung nicht ohne Weiteres als repräsentativ für die gesamte Fassadenfläche gelten kann. Sie kann jedoch vor allem bei längerfristiger Dauermessung gute und einfach zu gewinnende Daten zur Einschätzung liefern. Wenn ausschließlich die Pyranometer zur Verfügung stehen, sollten zumindest mehrere Messpunkte an der Fassade untersucht werden, um eine Durchschnittsbildung zu ermöglichen.

Transmissionsmessungen mittels Pyroscanner

Dieses Prüfverfahren ist vor allem für die Messung von Verschattungsfaktoren vor transparenten Bauteilen zu empfehlen. Insbesondere wenn genaue Messdaten für Vergleiche mit anderen Beschattungstechniken gefragt sind. Aktuell ist noch die Frage offen, welcher Pflanzenparameter (Deckungsgrad, LAI oder Pflanzenvolumen) am besten mit der Verschattungsleistung korreliert, um hier Kennwerte für unterschiedliche Pflanzenkonfigurationen berechnen zu können. Der Deckungsgrad allein hat sich dabei als nicht ausreichend herausgestellt.

Aufbau und Konditionierung der Dachbegrünungsprüfstände

Mit dem vorgestellten Aufbau der Prüfstände konnte die Konditionierung über Heiz- bzw. Kühlschlangen unter dem „Testraum“ und der aktuell verwendeten Regelungstechnik die gewünschten Temperaturen nicht erreichen. Gründe dafür waren die für die Stabilität erforderliche OSB-Platte über den Kühlschlangen, die trotz eingesetzter metallischer Verteilfolie unter der Platte die Wärme bzw. Kälte nicht ausreichend schnell in die Kammer weiterleiten konnte. Die statisch erforderlichen Holzstege, die die Kammer unterteilen (s. Abbildung 9) behinderten die Luftzirkulation und damit Temperaturverteilung zusätzlich. Eine fehlende Randdämmung der Luftkammer und ein zu geringer Temperaturunterschied (ΔT) zwischen Vorlauftemperatur und gewünschter Kammer-temperatur trugen ebenfalls zum suboptimalen Konditionierungsergebnis bei. Im Folgeprojekt werden diese Schwächen gezielt durch eine Perforierung der Stege, Randdämmung der Luftkammer und Innentemperaturbasierte Regelung der Vorlauftemperatur behoben.

Albedomessungen und nächtliche (langwellige) Abstrahlung

Der eingesetzte Albedometer umfasste nur die kurzwellige einfallende bzw. reflektierte Solarstrahlung. Es wurde auch nur die Vertikalbegrünung vermessen. Für eine detaillierte energetische Modellierung von Bauwerksbegrünungen wäre zusätzlich die Erfassung der langwelligen Abstrahlung, vor allem nachts, empfehlenswert. Diese Messung ist zum Beispiel mit einem kombinierten Albedometer für kurzwellige und langwellige Strahlung (4 Kameras) möglich. Alternativ können für die Messung der langwelligen Abstrahlung (nächtliche) Erfassungen der Oberflächentemperatur mittels Thermografie durchgeführt werden und die Abstrahlung anschließend mit Hilfe der Stefan-Boltzmann Gleichung berechnet werden. Dieses Verfahren wird im Folgeprojekt MARGRET Bioshade zur Anwendung kommen und mittels eines kombinierten Pyranometers überprüft werden.

Wärmeleitfähigkeit – Dachsubstrate

Die Messung von Wärmeleitfähigkeiten unter in situ-Bedingungen ist herausfordernd, da die Temperaturen und die solare Einstrahlung im Gegensatz zu Messungen in einer Prüfkammer mit standardisierten Bedingungen ständig schwanken. Die Auswertung konzentriert sich auf die Wintermonate, da die geringere solare Einstrahlung zu konstanteren Temperaturgradienten führt und somit verlässlichere Kennwerte ermöglicht. Eine Einschränkung besteht auch dahingehend, dass ein U-Wert nicht generell für Dachbegrünungen bestimmter Schichtdicke angegeben werden kann, sondern darüber hinaus wesentliche Abhängigkeiten von Substratzusammensetzung, Bodenfeuchte, Bewuchsart und -dichte und ev. auch Art der Dränschicht bestehen. Hier werden in Zukunft weitere Messreihen mit unterschiedlichen Dachbegrünungsarten und Substraten erforderlich sein, um solide Kennwerte zu erhalten.

Wasserbilanz und Verdunstungsleistung

Mittels der verwendeten Messverfahren ist zwar die litergenaue Erfassung von Bewässerungsmengen möglich, eine genaue Wasserbilanz zur Berechnung der Verdunstungsleistung ist jedoch nicht möglich. Folgende Optimierungen können in Zukunft eingesetzt werden:

Wägezellen – Wägezellen ermöglichen die hochauflösende Erfassung von Bewässerungsereignissen und der Evapotranspiration, insbesondere zur Analyse dynamischer Prozesse während Hitzeperioden. Eine Kombination mit Kippsensoren zur Messung von Abflusswasser ist zur Vervollständigung der Wasserbilanz empfehlenswert. Beim hier vorgestellten Messaufbau mit meterhohen, mobilen Fassadenprüflingen ist die Platzierung auf Wägezellen jedoch technisch kaum durchführbar. Im Allgemeinen sind bei solchen Feldtests auch externe Störungen der Wägungen, verursacht durch windbedingte Lastschwankungen (Windsegel Pflanzenkörper) und dem häufigen Standortwechsel der Module, miteinzubeziehen. **Folgende Optimierungen zur Erfassung der Wasserbilanz werden vorgeschlagen:** Der Abfluss sollte gesammelt und mit einem Kippzähler erfasst werden, während für den Zufluss ein höher auflösender Wasserzähler erforderlich ist. Der Wasserzähler mit einer Auflösung von 1 Liter lieferte keine ausreichend präzisen Zeitreihen zur Analyse kurzzeitiger Bewässerungsereignisse (Tropfbewässerung, Wassergaben von wenigen Minuten). Daher wäre eine Aufrüstung auf feinauflösende Durchflussmesssysteme ratsam, um eine valide Wasserbilanz zu gewährleisten.

Kubisches Pflanzenvolumen – Messpunkte sollten noch exakter verortet und mithilfe standardisierter Schablonen je Begrünungstyp festgelegt werden. Zur Vergleichbarkeit empfiehlt sich eine Vereinheitlichung der Betrachtungstiefe am Pflanzenbestand z.B. ein definierter Mittelwert zwischen kompakten Pflanzenkörper und einzelnen hervorstehenden Pflanzenteilen (z. B. Blüten, Pflanzentriebe). Dies reduziert die Variabilität zwischen Maximal- und Minimalwerten und erhöht die Reproduzierbarkeit der Messungen.

Kubisches Pflanzenvolumen – Messpunkte sollten noch exakter verortet und mithilfe standardisierter Schablonen je Begrünungstyp festgelegt werden. Zur Vergleichbarkeit empfiehlt sich eine Vereinheitlichung der Betrachtungstiefe am Pflanzenbestand z.B. ein definierter Mittelwert zwischen kompakten Pflanzenkörper und einzelnen hervorstehenden Pflanzenteilen (z. B. Blüten, Pflanzentriebe). Dies reduziert die Variabilität zwischen Maximal- und Minimalwerten und erhöht die Reproduzierbarkeit der Messungen.

Deckungsgrad – Bei der Deckungsgraderhebung sollte noch standardisierter vorgegangen werden. Vor allem, wenn anhand von Bildern eine Pixelauszählung zur Deckungsgraderhebung gemacht wird: Eine fixe Kameraposition mit Stativ, Verwendung des selbes Kameramodell bei jeder Fotodokumentation, definierte Wandabstände und Kamerahöhe zur nachvollziehbaren und gleichwertigen Fotoaufnahme. Außerdem hat sich gezeigt, dass Tageszeit und Witterungsbedingungen erhebliche Einflüsse auf das Bildmaterial haben, weswegen auch hier weitere Vereinheitlichungen und Schärfungen in der Methode ratsam sind.

(Wall) Leaf Area Index – Die Erfassung des WLAI/LAI sollte mit klar definierten und wiederauffindbaren Messpositionen in Höhe und Tiefe des Pflanzenbestands weiter optimiert und möglicherweise auf drei Positionen je Quadrant intensiviert werden. Die Messfrequenz könnte durch intensivierte Feldstudien, beispielsweise anhand des Entwicklungsstandes der Pflanzen evaluiert und so Rückschlüsse zur weiteren Anwendbarkeit getroffen werden. Die Mehrschichtigkeit und Layerstruktur des Pflanzenbestandes ist explizit zu berücksichtigen, um strukturelle Veränderungen adäquat abzubilden.

Stomatäre Leitfähigkeit – Die Messdaten der stomatären Leitfähigkeit könnten zusammen mit Wägezellendaten und der Wasserbilanz in einen Kontext gestellt werden, um pflanzenphysiologische Aktivitäten unter bestimmten Bewässerungsszenarien ableiten zu können. Eine groß angelegte Feldstudie mit Messungen an Blättern unterschiedlicher Entwicklungsstadien ermöglicht die Abschätzung der Gesamtaktivität über prozentuale Anteile dieser Pflanzenentwicklungsstadien. Dabei ist beispielsweise zwischen beschatteten und sonnenexponierten Blättern zu differenzieren, da sie maßgeblich unterschiedliche Leitfähigkeiten aufweisen.

Pflege – Pflegemaßnahmen wie Rückschnitt und Trieblenkung verändern den Pflanzenkörper als dynamisches Objekt und wirken sich in Abhängigkeit von Jahreszeit und Entwicklungsphase (z. B. Blüte) deutlich auf die Messgrößen aus. Eine systematische Optimierung und lückenlose Dokumentation dieser Eingriffe ist daher erforderlich, bietet aber auch eine Chance zur Formung eines optimalen Bioshades. Die Biomasse von möglichen Beiwuchs sollte z. B. durch Wiegen bestimmt werden, um dessen Einfluss auf Deckungsgrad und weitere Parameter zu bewerten (besonders bei Gründachflächen).

4.4.4 Empfehlungen zur Adaptierung in Berechnungsmodellen bzw. Normen.

Auf Basis des Projektes GREENergieausweis wurden für das vorliegende Projekt relevante Normen näher ausgeführt auf Basis der durchgeführten Messungen und gewonnenen Erkenntnisse und Literaturrecherchen. Die energetische Bewertung von Gebäuden erfolgt in Österreich auf Basis der ÖNORM B 8110-6, welche für die Ermittlung des Heizwärme- und Kühlbedarfs unterschiedliche methodische Ansätze zulässt. Grundsätzlich wird zwischen dynamischen Verfahren – wie der ausführlichen Gebäudesimulation oder dem vereinfachten Stunden-Berechnungsverfahren – und quasi-stationären Verfahren, namentlich dem Monatsbilanzverfahren, unterschieden. Da die Genauigkeit der Ergebnisse mit zunehmender Abstraktion abnimmt, stellt das Monatsbilanzverfahren zwar die niedrigste Genauigkeitsstufe dar, fungiert jedoch als regulatorischer Standard für die Erstellung von Energieausweisen.

4.4.4.1 Kurzwellige Strahlungsbilanz von Vertikalbegrünungen

Die folgende Grafik veranschaulicht die Strahlungsbilanz einer Fassade mit und ohne Vertikalbegrünung auf Basis der Messwerte, um das Zusammenspiel der einzelnen Ergebnisse zu den Vertikalbegrünungen zu veranschaulichen. Dargestellt ist beispielhaft die Situation zum Zeitpunkt der maximalen solaren Einstrahlung im Tagesverlauf.

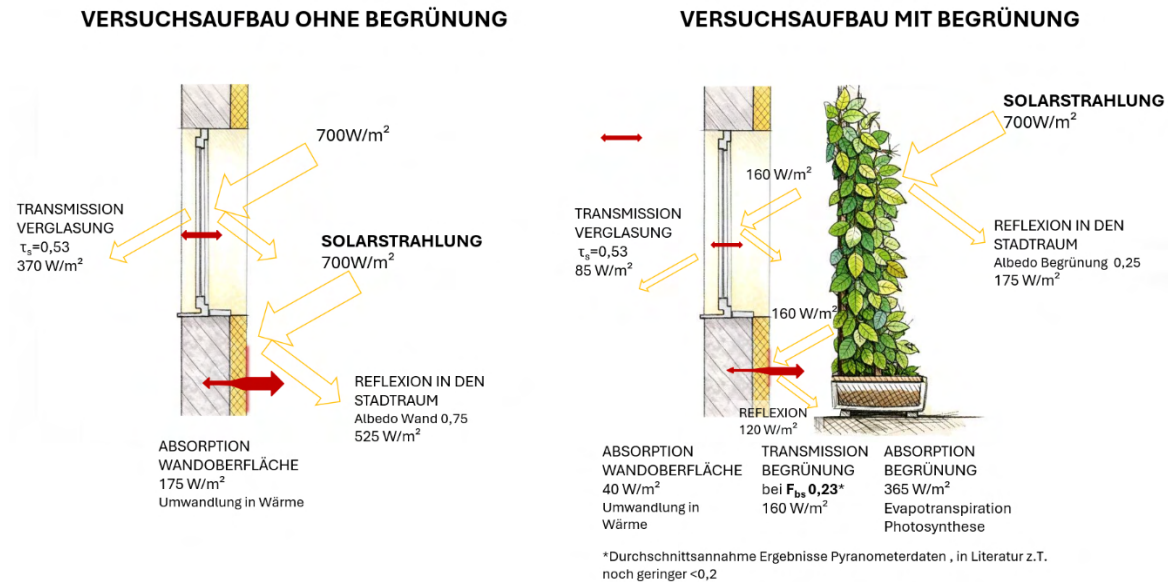


Abbildung 72: Skizze zur Strahlungsenergiebilanz von Vertikalbegrünungen auf Basis der Projektergebnisse. Grafik: M.Majcen, AEE INTEC

Die Begrünung führt zu einer deutlichen Reduktion der auf Wand- und Fensterflächen eintreffenden Solarstrahlung und damit des potenziellen Wärmeeintrages ins Gebäude. Zudem fungiert sie als „Wattvernichter“ der mehr als die Hälfte der auf Begrünung treffenden Einstrahlung durch Evapotranspiration und Photosynthese aus dem Stadtraum nimmt und dadurch der Hitzeinselentwicklung entgegenwirkt. Sowohl für transparente als auch opake Bauteile ist der Verschattungsfaktor der Begrünung (F_{bs}) relevant, der im Projekt mit $0,23$ gemessen wurde, wobei von der real noch nicht vollständige Deckung auf eine vollständige interpoliert wurde.

4.4.4.2 Abbildung solarer Einträge auf transparente Flächen unter Berücksichtigung von Fassadenbegrünungen

Die Ermittlung der solaren Gewinne auf Glasflächen erfolgt nach ÖNORM B 8110-6 Kapitel 8.3 über eine detaillierte geometrische Analyse des Verschattungsfaktors F_s . Dieser Faktor ist ein Produkt aus den Teilfaktoren für die Horizontverschattung ($F_{h,x}$), horizontale Überhänge ($F_{o,x}$) und seitliche Überstände ($F_{f,x}$). In der detaillierten Berechnung werden diese Faktoren über spezifische Verschattungswinkel bestimmt, um die reale Umgebungssituation (Nachbarbebauung, Topografie und bauliche Eigenverschattung) präzise abzubilden. Ziel ist es, den Anteil der Strahlung zu definieren, der die Fassade tatsächlich erreicht.

Für die energetische Wirksamkeit an der Glasfläche selbst tritt an die Stelle des früheren Abminderungsfaktors F_c nun der Gesamtenergiedurchlassgrad g_{tot} . Dieser beschreibt gemäß Abschnitt 8.4.2 das Zusammenwirken von Verglasung und Sonnenschutzvorrichtungen (Abschlüssen). Die Norm legt hierbei fest, dass g_{tot} auf Basis der ÖNORM EN ISO 52022-1 oder ÖNORM EN ISO 52022-3 zu ermitteln ist. Dabei spielt bei den Sonnenschutzvorrichtungen der Reflexionsgrad eine entscheidende Rolle, wobei die Abschlüsse in vier Reflexionsklassen (von "sehr hell" bis "sehr dunkel") eingeteilt werden, um die thermische Last im Kühlfall sowie die Lichttransmission korrekt zu bilanzieren.

4.4.4.2.1 Geometrische Verschattung durch Umgebung und Bauteile

Dieser Abschnitt behandelt die Reduktion der Einstrahlung durch die Lage des Fensters im Verhältnis zu seiner Umgebung auf Basis der ÖNORM B 8110-6 Kapitel 8.3. Wird die Begrünung als fixes, vorgelagertes Element (z. B. bodengebundene Pflanzen an distanzierten Rankgerüsten oder massive Pflanztröge) ausgeführt, kann sie als geometrisches Hindernis gewertet werden.

- Methodik: Die Wirkung kann dabei über den Verschattungsfaktor F_s erfasst werden. Dieser bildet das Produkt der Teilfaktoren für die Horizontverschattung ($F_{h,x}$), horizontale Überhänge ($F_{o,x}$) und seitliche Überstände ($F_{f,x}$) ab.
- Anwendung: In dieser Modellierung definiert die Begrünung lediglich die Verschattungswinkel. Der g-Wert der Verglasung bleibt hierbei unberührt.

Die Formel zur Ermittlung des Verschattungsfaktors im Sommer lautet wie folgt, die Teilfaktoren wurden zuvor beschrieben:

$$F_{s,c} = F_{h,x} \cdot F_{o,x} \cdot F_{f,x} \quad (1)$$

Der Verschattungsfaktor kann, wie auch in den Energieausweisprogrammen bereits möglich, auch monatlich angegeben werden. Im Fall der Horizontüberhöhung sind je nach Neigung des Fensters, Horizontwinkel und Exposition getrennt nach Nord, Ost/West und Süd jeweils für Winter und Sommer unterschiedliche Verschattungsfaktoren aus den in der Norm hinterlegten Tabellen zu entnehmen. Die differenzierte Entnahme der Verschattungsfaktoren ist notwendig, um der variablen Sönnengeometrie und der Verteilung von Direkt- und Diffusstrahlung Rechnung zu tragen. Während die tiefstehende Wintersonne bereits durch geringe Horizonte blockiert wird, strahlt die Sommer-sonne häufig über dieselben Hindernisse hinweg, wobei dieser Effekt in Ost- und Westexpositionen aufgrund der flachen Einstrahlungswinkel besonders kritisch ist.

Diese jahreszeitliche Dynamik wird bei einer Fassadenbegrünung durch ihr biologisches Wachstum nochmals signifikant verstärkt, da sich neben dem Sonnenstand auch die Balaubung selbst verän-

dert. Während die Norm lediglich zwischen Sommer und Winter unterscheidet, ermöglichen Monatsmittelwerte eine weitaus präzisere Abbildung dieser Wechselwirkung zwischen solarer Einstrahlung und pflanzenspezifischer Phänologie. Die Grundlage für diese monatliche Bilanzierung der Verschattung bildet die empirische Ermittlung der kurzwelligen Transmission durch das Blätterwerk (Grünverschattungsfaktor) und findet eine Fortsetzung in der Darstellung in Formeln die die Verschattungswirkung für jeden Tag des Jahres errechnen lassen (vgl. IP et al. 2009, Poiss et al. 2025). Im Projekt GLASGrün wurden empirische Messwerte für den Grünverschattungsfaktor (F_{bs}) ermittelt (Expositionen SO und NW) der sich aus monatlichen Mittelwerten zusammensetzt (Stangl et al. 2025).

Der Grünverschattungsfaktor F_{bs} kann z.B. alternativ zur Horizontverschattung ($F_{h,x}$) angewendet werden. Die Formel kann dann sinngemäß für z.B. den Monat Juli (hier mit dem Index 7 gekennzeichnet) lauten:

$$F_{s,c} = F_{o,7} \cdot F_{f,7} \cdot F_{bs,7} \quad (2)$$

4.4.4.2.2 Gesamtenergiedurchlassgrad von Sonnenschutzeinrichtungen

Dieser Abschnitt betrifft die energetischen Eigenschaften von Abschlüssen nach der ÖNORM B 8110-6 Kapitel 8.4.2 und der ÖNORM EN ISO 52022-1. Handelt es sich um eine fassadengebundene Begrünung, die unmittelbar vor der Glasscheibe liegt, kann sie analog zu einer Sonnenschutz-einrichtung betrachtet werden.

- Methodik (gtot): Gemäß Abschnitt 8.4.2 kann für das System aus Verglasung und Sonnenschutzvorrichtung ein individueller gtot-Wert (auf Basis der ÖNORM EN ISO 52022-1 oder -3) herangezogen werden.
- Einteilung nach Reflexionsklassen: Die in der Norm definierten Reflexionsklassen (1 bis 4) lassen sich nicht auf Vegetation übertragen, da Pflanzen einen Großteil der absorbierten Strahlung in latente Wärme umwandeln. Die aufgenommene Energie wird für biologische Prozesse und für die Verdunstung genutzt. Dadurch wird die fühlbare Wärmeabgabe an die Umgebung und das Gebäude minimiert.

Um die Wirksamkeit einer Fassadenbegrünung im Rahmen der ÖNORM B 8110-6 abzubilden, wird in einem zweistufigen Verfahren vorgegangen. Zunächst erfolgt die Definition der physikalischen Grundgleichung, gefolgt von der spezifischen Anpassung an biologische Prozesse.

Physikalische Grundgleichung und Termbeschreibung

Die Basis für die Ermittlung des Gesamtenergiedurchlassgrades eines Systems aus Verglasung und Abschluss bildet die vereinfachte Gleichung nach ÖNORM EN ISO 52022-1:

Die Formel zur Ermittlung des g_{tot} lautet wie folgt:

$$g_{tot} = \tau_{e,B} \cdot g + \alpha_{e,B} \cdot \frac{G_{ext}}{G_2} + \tau_{e,B} (1 - g) \frac{G_{ext}}{G_1} \quad (3)$$

Tabelle 25: Parameter Berechnung des Gesamtenergiedurchlassgrades nach ÖNORM EN ISO 52022-1

$\tau_{e,B}$	Solartransmissionsgrad
$\rho_{e,B}$	Solarreflexionsgrad der Seite der Sonnenschutzvorrichtung, die der einfallenden Strahlung zugewandt ist
g	Gesamtenergiedurchlassgrad
Absorptionsgrad Sonnenschutzvorrichtung	
$\alpha_{e,B}$	$1 - \tau_{e,B} - \rho_{e,B}$
Wärmeleitwerte	
G_1 - Wärmeübergangskoeffizient des (belüfteten) Zwischenraums zwischen dem Sonnenschutz und der Verglasung	5 W/(m²K)
G_2 - Wärmeübergangskoeffizient der raumseitigen Systemoberfläche zur Raumluft	10 W/(m²K)
G_{ext} - effektiver Gesamtwärmeleitwert des kombinierten Systems (Sonnenschutz + Verglasung) von der Ebene der Energieaufnahme bis zur Raumluft	$\left(\frac{1}{U_g} + \frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2} \right)^{-1}$

Diese Grundgleichung setzt sich aus 3 wesentlichen Termen zusammen.

Term 1: fbs Dieser Term beschreibt den Anteil der kurzwelligeren Solarstrahlung, der das System aus Sonnenschutzvorrichtung und Verglasung durch direkte Transmission passiert. Die Strahlung tritt durch die Materialtransparenz oder Perforation des Sonnenschutzes ($\tau_{e,B}$) aus und wird anschließend durch den Gesamtenergiedurchlassgrad des Glases (g) gewichtet. Diese Energie trifft als Strahlung direkt auf die inneren Oberflächen des Raumes und wird dort in Wärme umgewandelt.

Term 2: Sekundäre Wärmeabgabe infolge Absorption im Sonnenschutz ($\alpha_{e,B} \cdot G_{ext}/G_2$) Dieser Term repräsentiert den nach innen gerichteten Anteil des sekundären Wärmestroms, der durch Energieabsorption ($\alpha_{e,B}$) in der Sonnenschutzvorrichtung entsteht. Die absorbierte Strahlung erhöht die Temperatur des Sonnenschutzes, der daraufhin als thermische Last wirkt. Das Verhältnis G_{ext}/G_2 fungiert als bauphysikalischer „Verteilschlüssel“. Er bestimmt nach den Gesetzen des Wärmedurchgangs, welcher Teil dieser thermischen Energie durch Konvektion und langwellige Strahlung an den Innenraum abgegeben wird, anstatt über die Verglasung nach außen abzufließen.

Term 3: Sekundäre Wärmeabgabe infolge Absorption in der Verglasung ($\tau_{e,B} \cdot (1-g) \cdot G_{ext}/G_1$) Hierbei handelt es sich um die sekundäre Wärmeabgabe, die aus der Restabsorption innerhalb des Verglasungspakets resultiert. Ein Teil der Strahlung, die den Sonnenschutz passiert hat ($\tau_{e,B}$), wird nicht

direkt in den Raum transmittiert, sondern von den Glasscheiben absorbiert – dargestellt durch den Term $(1-g)$. Die dadurch erwärmten Scheiben geben die Energie zeitverzögert wieder ab. Das Verhältnis G_{ext}/G_2 definiert hierbei den thermischen Kopplungsgrad zwischen der Verglasung und dem Innenraum über den thermischen Widerstand des Zwischenraums (G_1).

Definition der Leitwerte G_2 (Innerer Wärmeübergangskoeffizient): Entspricht in etwa dem Kehrwert des inneren Wärmeübergangswiderstandes R_{si} . Er beschreibt die energetische Kopplung der innersten Systemoberfläche (in der Regel die raumseitige Glasscheibe) an die Raumluft. G_1 (Leitwert des Zwischenraums), beschreibt den Wärmedurchlasswiderstand der Luftschicht zwischen Sonnenschutz und Verglasung. Er ist aufgrund der eingeschränkten Konvektion im Spalt meist niedriger als der freie Übergangswert G_2 . Der resultierende Leitwert G_{ext} der seriellen Kette aus Verglasung (U_g), Zwischenraum (G_1) und innerem Übergang (G_2). Er bildet die physikalische Grundlage für die Aufteilung der absorbierten Wärmeströme.

Berechnungsadaption zur Berücksichtigung der Fassadenbegrünung vor Fenstern, - Glasfassaden

Um das vereinfachte Verfahren für Sonnenschutz in Kombination mit Verglasungen an eine Verschattung durch Pflanzen anzupassen, muss die Fähigkeit der Pflanzen Solarstrahlung in latente Wärme durch Transpiration umzuwandeln berücksichtigt werden. Zudem ist auch der Abstand zwischen Begrünung zumindest im hier angewandten Versuchsaufbau deutlich größer als jener von technischem Sonnenschutz was zusätzlich eine sehr gute Belüftung und damit Konvektion ermöglicht. Folgende Adaptierungen werden dazu vorgeschlagen.

Anpassung Term 2: Sekundäre Wärmeabgabe unter Berücksichtigung der Evapotranspiration ($\alpha_{e,B} \cdot (1-f_{\text{latent}}) \cdot G_{\text{ext}}/G_2$): Dieser Term repräsentiert den nach innen gerichteten Anteil des sekundären Wärmestroms, der durch Energieabsorption ($\alpha_{e,B}$) im Pflanzenkörper entsteht. Im Gegensatz zu konventionellen Sonnenschutzsystemen wird hier der ein biogener Kühlfaktor f_{latent} angenommen. Dieser berücksichtigt, dass ein Großteil der absorbierten Strahlung (ca. 70–95 %) durch Evapotranspiration (Verdunstungskühlung) und Photosynthese in latente Wärme umgewandelt wird. Nur der verbleibende sensible Anteil führt zu einer tatsächlichen Temperaturerhöhung der Blattoberflächen. Das Verhältnis G_{ext}/G_2 bestimmt, welcher Restanteil dieser fühlbaren Wärme aufgrund des thermischen Widerstands der Systemkette schließlich an den Innenraum abgegeben wird.

Anpassung der Leitwerte für begrünte Fassadensysteme G_1 (Leitwert des belüfteten Zwischenraums): Bei einem Abstand von 20 cm zwischen Pflanzebene und Verglasung sowie der aktiven Kühlung der Luft durch Verdunstung muss der Leitwert des Zwischenraums (G_1) deutlich höher angesetzt werden als bei flach anliegenden, technischen Systemen. Eine gute Belüftung (Konvektion) sorgt dafür, dass die thermische Kopplung zwischen Pflanze und Glas gering bleibt und absorbierte Wärme effizient an die Außenluft abgeführt wird. Der resultierende Leitwert (G_{ext}) wird somit maßgeblich durch den erhöhten Abstand (G_1) und die thermische Qualität der Verglasung (U_g) dominiert. In Kombination mit dem hohen latenten Wärmeanteil der Vegetation führt dies dazu, dass

der sekundäre Wärmeeintrag im Vergleich zu technischem Sonnenschutz fast vollständig eliminiert wird. Die Herleitung dieses Wertes orientiert sich an der ÖNORM EN ISO 6946. Diese Norm wurde für klassische Fassadenkonstruktionen entwickelt, die sich über ganze Gebäudefronten erstrecken. Da dieses Szenario bei Begrünungen vorrangig auf *Living Walls* zutrifft, erfordern kleinteiligere oder distanzierte Systeme eine spezifische thermische Betrachtung. Für den vorliegenden Fall wird daher ein G_1 von $20 \text{ W/m}^2\text{K}$ angenommen. Dieser Wert nähert sich der maximal möglichen konvektiven Abfuhr an, da ein normativer R_{se} -Wert von $0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$ (für Oberflächen an der Außenluft) vergleichsweise einem Leitwert von $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ entspricht. Die Wahl von $20 \text{ W/m}^2\text{K}$ berücksichtigt dabei konservativ die windberuhigende Wirkung der Laubschicht gegenüber der völlig freien Außenluft.

$$g_{tot} = \tau_{e,B} \cdot g + \alpha_{e,B} \cdot (1 - f_{latent}) \cdot \frac{G_{ext}}{G_2} + \tau_{e,B} (1 - g) \frac{G_{ext}}{G_1} \quad (4)$$

Berechnungsbeispiel:

Für die Begrünung wurde ein Transmissionsgrad von 20 % herangezogen. Fassadenbegrünungen können, wie im Projekt GLASGrün (Stangl et al. 2025) gemessen, noch deutlich niedrigere Transmissionraten erzielen. Vergleicht man nun mit den getroffenen Änderungen den so ermittelten g_{tot} bei einer solaren Transmission von 10 % für einen technischen Sonnenschutz und 20 % bei einer Begrünung so ergibt sich für das durch Begrünung verschattete Fenster ein g_{tot} von 0,113 und für das Fenster mit einem konventionellen Sonnenschutz (Reflexionsgrad 50 %) von 0,094. Es wurde von einem g -Wert von 0,53 und einem U_g von 1,1 ausgegangen. Der Solarreflexionsgrad ($\rho_{e,B}$) wird mit einer Albedo von 0,25 (25 %) angesetzt. Im folgenden Diagramm ist greifbar dargestellt, wie sich die einzelnen Terme aufgrund der getroffenen Annahmen unterschiedlich ausprägen. Bei der Begrünung ist aufgrund der geringeren Verschattungswirkung die direkte Transmission deutlich höher dafür aber durch die Transpirationsleistung und die gute Belüftung der sekundäre Wärmeeintrag deutlich geringer.

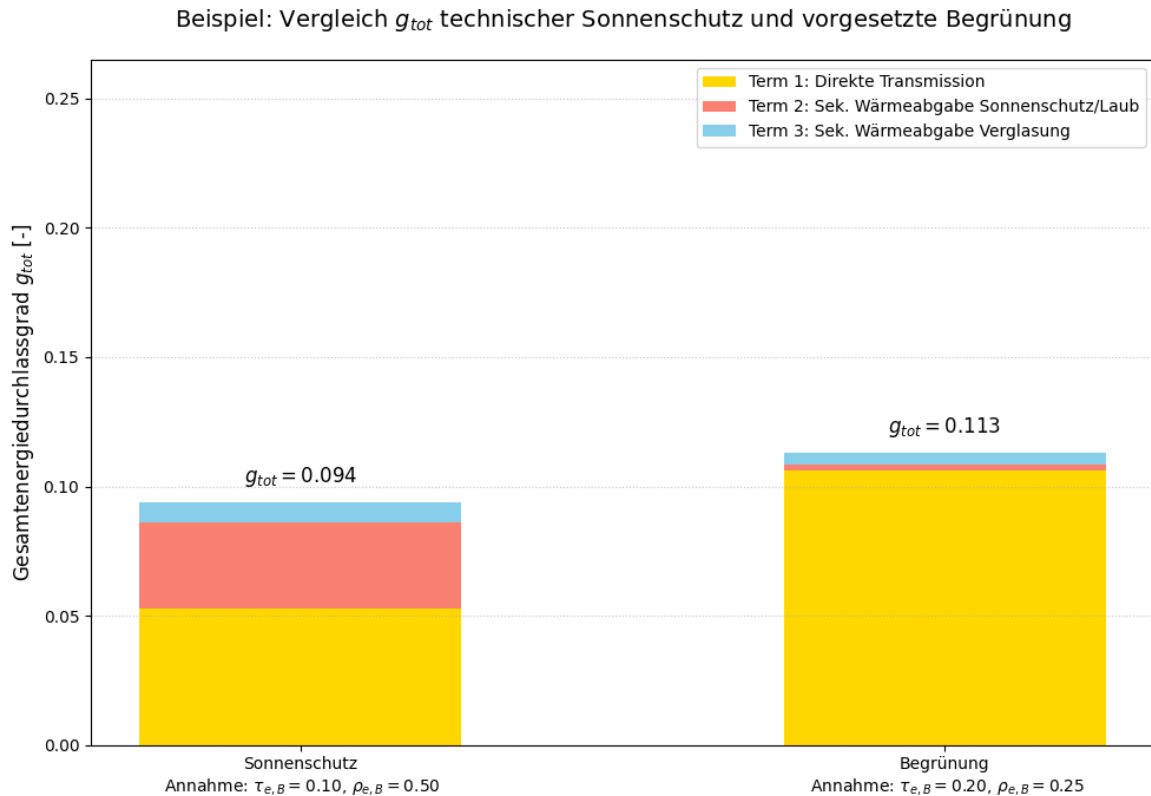


Abbildung 73: Beispiel, Vergleich g_{tot} technischer Sonnenschutz und vorgesetzte Begrünung

4.4.4.3 Abbildung solarer Einträge auf opake Flächen

In der ÖNORM B 8110-6-1 werden die solaren Wärmeeinträge über opake Bauteile ausschließlich bei Nichtwohngebäuden berücksichtigt. Bei Wohngebäuden legt die Norm fest, dass die solaren Wärmegewinne allein aus der Sonneneinstrahlung auf die transparenten Kollektorflächen, also im Wesentlichen auf die Fenster- und Glasflächen, resultieren. Opake Bauteile fließen hier nicht in die solare Gewinnbilanz ein. Im Gegensatz dazu wird bei Nichtwohngebäuden in der spezifischen Gleichung zur Berechnung der solaren Gesamtwärmegewinne im Kühlfall ausdrücklich ein eigener Summand für den solaren Wärmeeintrag über opake Bauteile hinzugefügt. Die abweichende Methodik für die Gebäudetypen wird nicht begründet.

Wärmeströme über opake Bauteile sind lt. Norm in geringem Maße von Solarstrahlung (kurzwellige Strahlung) und Wärmestrahlung (langwellige Strahlung) abhängig. Um diese Effekte in der Bilanz korrekt berücksichtigen zu können, müssten die Strahlungsmengen mindestens stündlich berechnet werden. Für die Bilanzierung von Gebäuden ist jedoch ein vereinfachtes Verfahren ausreichend.

4.4.4.3.1 Methodische Einordnung der Bauwerksbegrünung in die energetische Bilanzierung, ÖNORM B 8110-6

Die Integration von Begrünungsmaßnahmen an Dächern und Fassaden stellt eine besondere Herausforderung dar. Während dynamische Modelle die komplexen thermophysikalischen Prozesse von Vegetation und Substrat – wie die zeitverzögerte Wärmeleitung und die Evapotranspiration – detailliert erfassen können, erzwingt das Monatsbilanzverfahren eine methodische Vereinfachung. Die Berücksichtigung dieser ökologischen Puffer- und Schutzschichten könnte innerhalb der normativen Struktur primär im Kapitel 8 zur Ermittlung der Gesamtwärmegewinne erfolgen.

Speziell das Unterkapitel 8.3.3.2 befasst sich mit den Wärmeeinträgen über opake Bauteile. Hier könnte man die energetischen Vorteile der Bauwerksbegrünung durch spezifische Parameter abbilden. Dabei müssen die veränderten Strahlungseigenschaften der Oberfläche so in das stationäre Modell übersetzt werden, dass sie trotz der systembedingten Abstraktion die realitätsnahe Entlastung der Gebäudehülle im Energieausweis abbilden.

Der solare Wärmeeintrag über ein opakes Bauteil erfolgt monatsweise mit der folgenden Formel:

$$Q_{opak} = U \cdot A_{op} \cdot Z_{ON} \cdot f_{op} \quad (5)$$

In dieser Gleichung repräsentiert U den Wärmedurchgangskoeffizienten des opaken Bauteils, A dessen Fläche und Z_{ON} den dimensionslosen Orientierungs- und Neigungsfaktor. Der entscheidende Parameter für die Berücksichtigung der Oberflächenbeschaffenheit ist der Strahlungswirkungskorrekturwert f_{op} , der in der Einheit kKh (Kilo-Kelvin-Stunden) angegeben wird. Der Absorptionsgrad α tritt dabei nicht als eigenständige Variable auf, sondern ist bereits als integraler Bestandteil in den Tabellenwerten für f_{op} (gemäß Tabelle 16 der ÖNORM B 8110-6) enthalten. Die Werte für f_{op} liegen dabei zwischen 0 kKh für ideal reflektierende weiße Flächen ($\alpha=0,05$) bis zu 2,5 kKh für schwarze Oberflächen ($\alpha=1,0$).

Obwohl der physikalische Absorptionsgrad von dichter Vegetation mit etwa $\alpha \approx 0,70$ im Bereich dunkler Oberflächen liegt, führt dies aufgrund der pflanzlichen Schutzmechanismen zu keiner vergleichbaren Bauteilaufheizung. Ein Großteil der kurzwelligigen Strahlung wird durch das Blattwerk absorbiert, in latente Wärme umgewandelt und vor Erreichen der eigentlichen Dach- bzw. Fassadenkonstruktion konvektiv an die Außenluft abgeführt.

Unter Verwendung des in dieser und anderen Arbeiten messtechnisch ermittelten solaren Transmissionsgrads der Vegetation, ergibt sich der effektive Absorptionsgrad des Gesamtsystems näherungsweise über den Verbund aus transmittierter Reststrahlung und der Absorption des dahinterliegenden Substrats/Bauteils.

$$\alpha_{eff} \approx \tau_{veg} \cdot \alpha_{Bauteil} \quad (6)$$

Hierbei beschreibt τ_{veg} den gemessenen Transmissionsgrad des Blattwerks (abhängig von Pflanzenart, Belaubungsdichte und Deckungsgrad) und α_{Bauteil} den Absorptionsgrad des Substrats bzw. der Wandoberfläche. Bei einem beispielhaft gemessenen Transmissionsgrad von $\tau_{\text{veg}} = 0,20$ und einem Substrat mit 0,85 sinkt der effektive Absorptionsgrad auf:

$$\alpha_{\text{eff}} \approx 0,20 \cdot 0,85 = 0,17$$

Damit ist das begrünte Bauteil strahlungsphysikalisch nicht mehr als dunkle Fläche einzustufen, sondern fällt in die Kategorie heller, hochreflektierender Oberflächen ($\alpha \leq 0,30$). Die Begrünung wirkt im normativen Rechengang somit realitätsnah wie ein vorgeschalteter Strahlungsschirm.

Über den Jahresverlauf ergeben sich monatlich differenzierte Eingangsgrößen. In den Sommermonaten führt die dichte Vegetationsdecke zu minimalen Transmissionsgraden, wodurch das Bauteil rechnerisch der Kategorie sehr heller, hochreflektierender Oberflächen mit stark reduziertem f_{op} -Wert zugeordnet wird. In den Übergangszeiten und den Wintermonaten steigt der Transmissionsgrad durch die abnehmende Vegetationsdichte bzw. Entlaubung sukzessive an, was eine Annäherung an die thermischen Eigenschaften des unbegrünten Substrats bzw. Bauteils bewirkt. Für die Einbindung in das Monatsbilanzverfahren sind daher monatliche Mittelwerte des effektiven Absorptionsgrads erforderlich, um diese dynamischen Effekte im Energieausweis methodisch korrekt abbilden zu können.

4.4.4.3.2 Randbedingungen, Verdunstung und langwellige Abstrahlung

Die Abbildung über monatlich differenzierte $\alpha_{\text{eff},m}$ -Werte setzt bauphysikalische Randbedingungen voraus, die bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden müssen.

- **Quantitative Einordnung bei gedämmter Hülle (OIB-RL 6).**

Trotz der deutlichen Reduktion des f_{op} -Werts ist der absolute Einfluss auf den rechnerischen Kühlbedarf des Gesamtgebäudes als gering einzustufen. Da opake Bauteile gemäß OIB-Richtlinie 6 strengen Wärmeschutzanforderungen unterliegen (z. B. $U \leq 0,20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ für Dächer bzw. $\leq 0,35 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ für Außenwände), ist der Wärmestrom nach innen ohnehin stark begrenzt. Anders als bei den zuvor behandelten transparenten Flächen (Fenster), die den Kühlbedarf dominieren, dient die Begrünung an opaken Bauteilen im Berechnungsmodell primär der realitätsnahen Schirmung verbleibender Restgewinne sowie bauphysikalisch dem Schutz der Konstruktion vor extremen Temperaturspitzen. Speziell bei Fassadenbegrünungen greift die reine Strahlungsbetrachtung zudem zu kurz, da aerodynamische Wechselwirkungen im Wandabstand hinzutreten. Dichtes Blattwerk bremst die windinduzierte Luftströmung entlang der Fassade und reduziert so die erzwungene konvektive Wärmeabfuhr im Vergleich zu einer freistehenden, unbegrünten Wand. Die reale thermische Wirkung hängt daher maßgeblich von der Tiefe der Hinterlüf-

tungsebene ab. Diese mikroskaligen Konvektionseffekte lassen sich im stationären Monatsbilanzverfahren der ÖNORM B 8110-6 jedoch nicht auflösen und bleiben dynamischen Strömungs- sowie Gebäudesimulationen vorbehalten.

- **Evapotranspiration als Wirksamkeitsbedingung.**

Die Annahme, dass das Blattwerk nicht als überhitzter Sekundärstrahler auf das Substrat wirkt, basiert auf der pflanzlichen Verdunstungskühlung. Bei bewässerten Intensiv- oder Retentionsbegrünungen bleibt dieser Kühlmechanismus über den gesamten Sommer hinweg stabil. Bei unbewässerten Extensivbegrünungen kann extremer Trockenstress hingegen zum Vertrocknen der Pflanzen führen. Die vertrocknete Biomasse heizt sich unter Sonneneinstrahlung stark auf und gibt diese Wärmeenergie sekundär an das Substrat ab. Dazu werden weitere Untersuchungen im Folgeprojekt MARGRET Bioshade erfolgen.

- **Gedämpfte nächtliche Wärmeabfuhr.**

In den Versuchen zeigte sich, dass in den Nachtstunden sich das Strahlungsverhalten im Vergleich zu konventionellen unbegrünten Dächern (z. B. Bekiesungen oder nackten Dachbahnen) umkehrt. Während unbegrünte Oberflächen infolge ungehinderter langwelliger Abstrahlung gegen die kalte Hemisphäre stark unterkühlen, behindert das Blattwerk diese Himmelsabstrahlung. In der 24-Stunden-Gesamtbilanz überwiegt der Nutzen der Begrünung diesen Nachteil jedoch.

4.4.4.3.3 Dachsubstrate

Die ÖNORM B 8110-7 liefert die energetischen Basisdaten für Bauprodukte, die für bauphysikalische Nachweise wie die U-Wert-Berechnung nach ÖNORM EN ISO 6946 essenziell sind. Diese Kennwerte umfassen bauphysikalische Größen wie Rohdichte, Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität und den Wasserdampfdiffusionswiderstand. Um Gebäudebegrünungen korrekt in die Energieausweisberechnung zu integrieren, ist primär die Wärmeleitfähigkeit entscheidend.

Aktuell fehlen jedoch in den Tabellen der ÖNORM standardisierte Werte für Substrate von Dachbegrünungen. Eine Erweiterung der Norm – etwa durch eine spezifische Tabelle für Substrate und Vegetation im Abschnitt der sonstigen Baustoffe – würde die Verwendung von gesicherten Standardwerten für Gründach-Berechnungen erst ermöglichen.

Die Grundlage hierfür bildet jedoch die Entwicklung eines standardisierten Prüfverfahrens, um diese wärmeschutztechnischen Kennwerte einheitlich und verlässlich zu ermitteln. Auf softwareseitiger Ebene ist für die Energieausweis-Berechnung lediglich die Aufnahme dieser neu generierten Daten in die bestehenden Materialdatenbanken erforderlich.

Eine besondere Herausforderung für das Monatsbilanzverfahren stellt die Dynamik der Gründach-Komponenten dar. Da z.B. üppige Grünmasse den Wärmeübergangswiderstand maßgeblich beeinflussen kann und die variierende Substratfeuchte im Jahresverlauf sowohl die Wärmeleitfähigkeit (λ) als auch die spezifische Wärmekapazität (c) verändert, sind für eine realitätsnahe Energieausweisberechnung zumindest differenzierte Kennwerte für Sommer- und Wintermonate erforderlich. Während im Winter die höhere Sättigung des Substrats die Dämmwirkung mindert, bietet das feuchtere Substrat im Sommer durch die höhere thermische Masse und Verdunstungskälte einen energetischen Vorteil.

Ermittelte Wärmeleitfähigkeiten Schafaczek et al. (2013)

In den Untersuchungen von Schafaczek et al. (2013) erfolgte die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit durch ein iteratives Anpassungsverfahren mithilfe der hygrothermischen Simulationssoftware WUFI®, wobei die Berechnungsergebnisse kontinuierlich mit detaillierten Temperaturmessungen aus Freilandversuchen abgeglichen wurden. Erst bei angepassten Werten von 0,4 W/mK für trockenes und 1,0 W/mK für gesättigtes Substrat ergab sich eine gute Übereinstimmung zwischen den simulierten und den gemessenen Temperaturverläufen. Diese Kennwerte wurden daraufhin für verschiedene spezifische Produkttypen (wie Optigrün-Einschicht- und Mehrschichtsubstrate) validiert und in die finalen Berechnungsmodelle übernommen.

Messtechnisch ermittelte Wärmeleitfähigkeiten nach Häusler et al. (2025)

Zur Einschätzung der substratspezifischen Wirkungen auf die Konduktion, wurden Daten aus dem Datenregister Häusler et al. (2025) herangezogen. Die Wärmeleitfähigkeit der Dachbegrünungssubstrate wurde mithilfe des in der Bodenkunde etablierten Nadelsondenverfahrens (gemäß ASTM D5334-14) bestimmt. Zur Vorbereitung wurden die Substrate in speziellen Prüfzylindern in drei Schichten eingebracht und mit einer Proctorapparatur definiert verdichtet. Die eigentlichen Messungen der Wärmeleitfähigkeit erfolgten anschließend bei verschiedenen, stufenweise eingestellten Wassergehalten bis hin zur Feldkapazität (maximale Wasserspeichermenge Substrat), wobei sowohl unbepflanzte als auch bepflanzte Substratproben (mit Rasen und Feuerbohne) analysiert wurden.

Die Auswertung konzentriert sich dabei spezifisch auf das Intensivsubstrat „OPTIGRÜN i“. Zur Analyse der thermischen Sensitivität wurden die Kennwerte des Substrats in drei verschiedenen Feuchtestufen gegenübergestellt. Als Referenzszenario für die bauphysikalische Performance dient ein mittlerer Feuchtezustand (20 % Wassergehalt) mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0,218 W/mK. Dieser Wert wurde den beiden Extremzuständen gegenübergestellt. Einer trockenen Variante mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0,153 W/mK und dem wassergesättigten Zustand (30 % Wassergehalt), der eine Wärmeleitfähigkeit von 0,423 W/mK aufweist.

Tabelle 26: Eigenauswertung IBO GmbH, Vergleich Substrat Optigrün i, intensiv-Substrat; Datenquelle: Häusler et al. (2025)

Parameter	Einheit	Substrat trocken	Substrat feucht	Substrat gesättigt
Schichtdicke	m	0,15	0,15	0,15
Rohdichte (*berechnet)	kg/m ³	900	1080*	1170*
Substratfeuchte (gravimetrischer Wassergehalt)	%	5	20	30
Wärmeleitfähigkeit	W/mK	0,153	0,218	0,423
Spez. Wärmekapazität	J/kgK	961	1.363	1.580
Wärmedurchlasswiderstand	m ² K/W	0,98	0,69	0,35
Äquivalente Dämmdicke (Lambda 0,035)	mm	34,3	24,1	12,4

Bei einer Schichtdicke des Substrats von 15 cm ist allein durch dieses spezifische Substrat bspw. eine Einsparung von 1,2 bis 3,4 cm Dämmstoff (Lambda 0,035) möglich. Beim Vergleich der Lasten weist ein herkömmliches 6 cm Kiesdach ein Flächengewicht von rund 108 kg/m² auf. Im Gegensatz dazu erreicht das 15 cm Substratdach bei einem gravimetrischen Wassergehalt von 30 % ein Gewicht von etwa 176 kg/m².

Ermittelte Wärmeleitfähigkeit im Projekt

Die Messergebnisse und Berechnungswege wurden detailliert im Kapitel 4.2.6 beschrieben. Für den untersuchten Gründachaufbau mit 40 mm Festkörperdrainage, 150 mm Optigrün-Extensivsubstrat M-Leicht und reduziert- intensiver Bepflanzung wurde ein durchschnittlicher Wärmedurchgangswiderstandszuschlag (ΔR_{GD}) von 2 m²K/W im Vergleich zum Kiesdach gemessen. Die Messungen erfolgten in der kühlen Jahreszeit, da hier weniger tägliche Temperaturschwankungen auftraten. Das Dach wurde zu diesem Zeitpunkt (Winter) nicht bewässert, die gemessene Bodenfeuchte lag zwischen 20 und 30%.

Mittels dem Wärmedurchgangswiderstandszuschlag (ΔR_{GD}) kann für jedes beliebige Standarddach der neue U-Wert berechnet werden, der sich durch Ersatz der Kiesdecke durch ein entsprechendes Gründach ergibt. Die Formel ist unter der Voraussetzung gültig, dass sich der angesetzte innere (R_{Si}) und äußere (R_{Se}) Wärmeübergangswiderstand zwischen Referenz- und Gründach nicht unterscheiden. Da für R_{Si} bzw. R_{Se} meist Normwerte verwendet werden, kann jedoch im Allgemeinen von der Gültigkeit ausgegangen werden.

$$U_{GD} = \frac{1}{\frac{1}{U_{Ref}} + \Delta R_{GD}}$$

Die Beispielrechnungen findet sich im Kapitel 4.2.6.

Selbst wenn das ΔR_{GD} des Gründachaufbaus sehr konservativ nur mit 1,5 angenommen wird, reduziert sich der U-Wert um fast 25 % auf $U_{GD} = 0,154 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Umgerechnet in einen konventionellen XPS Dämmstoff mit einer Wärmeleitfähigkeit von $\lambda=0,035 \text{ W/(mK)}$ könnte man mit dem untersuchten Gründachaufbau etwa 50 mm Dämmstoff einsparen und z.B. nur 150 statt 200 mm Dämmung verwenden. Im Vergleich dazu wurde für ein intensiv begrüntes Versuchsdach (25 cm ohne Retention) in einer Messreihe des Projekts U-green beispielsweise eine äquivalente Dämmstoffstärke (WLG 040) von rund 27 mm ermittelt (CAE e.V. 2025).

4.4.4.4 Zusammenfassung

Die energetische Bewertung von Gebäuden in Österreich stützt sich primär auf das Monatsbilanzverfahren nach ÖNORM B 8110-6. Da dieses Modell mit einem hohen Abstraktionsgrad arbeitet, müssen die komplexen thermophysikalischen Prozesse von Fassaden- und Dachbegrünungen gezielt für die normative Anwendung adaptiert werden. Die Ergebnisse aus den Projekten GREENERgieausweis und GLASGrün zeigen, dass Begrünungsmaßnahmen nicht nur als passive Verschattung, sondern als aktive thermische Puffer wirken, die sowohl die solaren Gewinne als auch den Wärmedurchgang maßgeblich beeinflussen. Da der Großteil der eingesetzten Pflanzensysteme sommergrün ist, konzentrieren sich die vorliegenden Empfehlungen vorrangig auf die Optimierung der Berechnungsmodelle für den Sommerfall, um die Reduktion von Kühllasten und urbanen Hitzeeinseln korrekt abzubilden.

Im Bereich der transparenten Bauteile fungiert die Vegetation als selektiver StrahlungsfILTER. Während die aktuelle Normung Verschattung oft statisch betrachtet, ermöglicht die Einführung monatlich differenzierter Verschattungsfaktoren eine präzise Abbildung der pflanzlichen Phänologie, etwa des Laubwechsels. Ein wesentlicher bauphysikalischer Vorteil gegenüber technischem Sonnenschutz liegt in der Umwandlung von Strahlungsenergie in latente Wärme durch Evapotranspiration. Durch die Berücksichtigung dieser Verdunstungskühlung und einer verbesserten konvektiven Wärmeabfuhr im belüfteten Zwischenraum verringert sich die sekundäre Wärmeabgabe nach innen erheblich. Mit dem angeführten Berechnungsbeispiel wurde versucht zu zeigen, dass begrünte Systeme einen Gesamtenergiedurchlassgrad erreichen, der mit hocheffizienten technischen Systemen vergleichbar ist.

Eine Sonderstellung nimmt die im Projekt untersuchte Living Wall ein. Aufgrund ihres spezifischen Schichtaufbaus mit integrierten EPS-Elementen und signifikanter Speichermasse wirkt sie nicht nur als vollflächige Verschattung, sondern muss bauphysikalisch als hinterlüftete Fassade betrachtet

werden. Diese Konstruktion kombiniert die thermische Entkopplung durch die Hinterlüftungsebene mit der dämmenden Wirkung des Trägersystems, was sie deutlich von rein vorgesetzten Rankstrukturen abhebt.

Bei opaken Bauteilen wird für das Monatsbilanzverfahren eine methodische Anpassung über den Strahlungswirkungskorrekturfaktor (f_{op}) vorgeschlagen. Da Pflanzen und Substrate den Großteil der eingestrahnten Energie durch Evapotranspiration und Konvektion abführen, bevor diese die eigentliche Bauteiloberfläche erreicht, wirkt die Begrünung im Berechnungsmodell wie ein vorgestellter Strahlungsschirm. Dieser Effekt lässt sich im vereinfachten Rechengang der ÖNORM B 8110-6 realitätsnah abbilden, indem dem begründeten Bauteil in den Sommermonaten ein stark reduzierter f_{op} -Wert zugewiesen wird, der dem einer sehr hellen, hochreflektierenden Oberfläche entspricht.

Ergänzend dazu zeigt die messtechnische Evaluierung der Substrate, dass diese auch im Winter einen nennenswerten Wärmedurchlasswiderstand aufweisen. Die Integration dieser feuchteabhängigen Kennwerte in die Materialdatenbanken der Energieausweis-Software ist daher eine Empfehlung für die zukünftige Normungspraxis, um ein mögliches Einsparpotenzial von Dämmstoffen durch Substrate zu quantifizieren.

5 Schlussfolgerungen

5.1 Was sind die in dem Projekt gewonnenen Erkenntnisse für das Projektteam (fachliche Einschätzung)?

Die im Projekt MARGRET gewonnenen Erkenntnisse basieren auf der Untersuchung einer thermischen Gebäudehülle, die dem aktuellen Stand der Technik entspricht. Da das Projektteam auf die bestehende bauliche Substanz und das vorgegebene Budget angewiesen war, erfolgte die Untersuchung zur Vertikalbegrünung an einem hocheffizienten Fassadenaufbau mit einem U-Wert von $0,155 \text{ W/m}^2\text{K}$. Dieser Wert unterschreitet die Mindestanforderungen der OIB-Richtlinie 6 ($U \leq 0,35 \text{ W/m}^2\text{K}$) deutlich. Aufgrund dieser hohen thermischen Qualität der opaken Bauteile sind die verbleibenden Wärmeströme physikalisch bereits weitestgehend minimiert. Die Untersuchungen im Rahmen des vorliegenden Aufbaus zeigen, dass der Wärmeeintrag über die Wandflächen im Vergleich zu Glasflächen generell gering ausfällt. Der maßgebliche Hebel für energetische Optimierungen durch Vertikalbegrünungen bei zeitgemäßen Gebäudestandards liegt daher primär im Bereich der transparenten Bauteile.

Zusätzlich identifizierte das Team ein signifikantes Potenzial durch den Einsatz von Gründächern, da deren hohes Wasserrückhaltevermögen und die damit verbundene Verdunstungskühle einen passiven Beitrag zum sommerlichen Überhitzungsschutz leisteten und gleichzeitig das Kanalsystem bei Starkregenereignissen entlasten können. Es wurde auch ein erhebliches Potential für die Reduktion von Dämmstoffen an Dachflächen durch Dachbegrünungen berechnet. Eine wesentliche Erkenntnis war zudem, dass Bauwerksbegrünung erheblichen Einfluss auf den Außenraum hat, vor allem durch die Umwandlung solarer Energie von sensibler in latente Wärme durch Photosynthese und Evapotranspiration. Dieser Energieanteil steht anschließend für einen Beitrag zur städtischen Überwärmung nicht mehr zur Verfügung.

Dennoch gelang es während der Projektlaufzeit nicht, die komplexe Energiebilanz der begrünten Fassaden und Dächer in allen Details rechnerisch abzubilden. Eine zentrale Erfahrung betraf die Dynamik der Vegetation, da sich der gewählte Standort als äußerst fordernd und exponiert für die Pflanzen erwies. Trotz der professionellen Pflege und intensiven Monitorings durch das IBLB, BOKU University blieb der Biomassezuwachs hinter den Erwartungen zurück, was dazu führte, dass die geplanten Prüfungen und Messungen nicht im ursprünglich vorgesehenen Ausmaß durchgeführt werden konnten. Durch den dynamischen Charakter des „Bauteils Pflanze“ ist immer auch der Bezug von thermisch-energetischen Kennwerten auf Pflanzenkennwerte wie Deckungsgrad, LAI oder Pflanzenvolumen erforderlich, wobei die exakten Zusammenhänge hier noch weiterer Untersuchungen bedürfen.

5.2 Wie arbeitet das Projektteam mit den erarbeiteten Ergebnissen weiter?

Aufbauend auf den bisherigen Erkenntnissen wurde bereits das Folgeprojekt *MARGRET Bioshade* initiiert, in dem das bestehende Projektteam die erarbeiteten Ergebnisse gezielt aufgreift und systematisch bei fortgeschrittenem Pflanzenwachstum weiterführt. Ein wesentlicher Schwerpunkt der weiteren Arbeit liegt in der Quantifizierung des sogenannten Bioshadings. Dabei wird die Reduktion der solaren Einstrahlung durch verschiedene Pflanzenarten untersucht und diese mit morphologischen Merkmalen wie dem Blattflächenindex und der Pflanzenmorphologie korreliert. Es sollen saisonal differenzierte Kennwerte zu definiert werden, die über rein empirische Annahmen hinausgehen. Aktuell wird die thermisch-energetische Wirkung von Fassadenbegrünungen bereits im Folge-Demonstrationsprojekt *HeinrichBiCool* durch eine umfassende Gebäudebegrünung mit Vorher-Nachher Monitoring von Temperaturverläufen und solarer Einstrahlung untersucht. Das Studiendesign und die Begrünungsplanung bauten auf den Ergebnissen von MARGRET auf. Parallel dazu werden in *MARGRET Bioshade* die hydrologischen Erkenntnisse vertieft, indem die Verdunstungskühlung und die Regenwasserretention im direkten Vergleich zwischen intensiven und neu errichteten extensiven Gründachsystemen gemessen werden. Ziel ist die Entwicklung für die Praxis relevanter Daten wie etwa normfähige Kennwerte und saisonale Faktoren, die eine weitere Integration von Begrünungsmaßnahmen in Energieausweise und offizielle Berechnungsmodelle ermöglichen. Damit leistet das Vorhaben einen entscheidenden Beitrag zur Etablierung naturbasierter Kühllösungen als technisch anerkannte und ökologisch nachhaltige Ergänzung bzw. Alternative zu konventionellen Kühl- und Hitzeschutzmaßnahmen im urbanen Raum.

Für welche Zielgruppen sind die Projektergebnisse relevant und interessant und wer kann damit wie weiterarbeiten?

Die Projektergebnisse sind für eine breite Palette an AkteurInnen aus dem Normungswesen, Bau- und Immobilienwirtschaft sowie der Stadtplanung von hoher Relevanz, da sie die Lücke zwischen ökologischer Zielsetzung und technischer Nachweisbarkeit schließen.

Wissenschaft und Forschung

Die Veröffentlichung der generierten Rohdatensätze erlaubt es anderen Forschungseinrichtungen, auf den Messreihen unmittelbar aufzubauen. Ein besonderer Mehrwert für die wissenschaftliche Community liegt, in der im Projekt entwickelten und validierten Messtechnik. Hierzu zählen innovative Ansätze wie der Einsatz von Pyroscannern zur Bestimmung der Lichttransmission. Darüber hinaus stellt die detaillierte Methodik zur Erstellung und Vorkultivierung standardisierter Prüfkörper und der Aufbau der Dachbegrünungsteststände einen wertvollen prozessualen Standard dar. Andere Forschungsteams können diese Methodik eins zu eins übernehmen, um vergleichbare Datenreihen an unterschiedlichen geografischen Standorten oder mit anderen Pflanzenarten zu generieren. Damit liefert das Projekt nicht nur Daten, sondern auch das technische und methodische Werkzeugset für die zukünftige Forschung im Bereich der Bauwerksbegrünung.

Verbände für Bauwerksbegrünung und Industrievertretungen

Nationale Verbände (wie z.B. GRÜNSTATTGRAU) fungieren als Brückenbauer zwischen Forschung und Markt. Sie können die generierten Kennwerte nutzen, um ihre Qualitätsrichtlinien und Zertifizierungen zu schärfen. Diese Verbände nutzen die Daten zudem zur Interessenvertretung, um die Gleichstellung von naturbasierten Lösungen mit technischen Systemen in der Bauordnung voranzutreiben.

Normungsgremien und politische Entscheidungstragende

Die Erkenntnisse aus dem Projekt können als direkte Arbeitsgrundlage für die Weiterentwicklung der OIB-Richtlinien und nationaler Normen dienen. Diese Institutionen können die Erkenntnisse nutzen, um Begrünungsmaßnahmen offiziell in Energieausweise zu integrieren und somit rechtssichere Anreize für naturbasierte Verschattungs-, Kühllösungen zu schaffen.

5.3 Mögliche rechtlichen Hürden, welche in Zusammenhang mit den ausgearbeiteten Konzepten bzw. Technologien bestehen.

Im Zusammenhang mit den im Projekt MARGRET entwickelten Technologien und Konzepten ergeben sich spezifische rechtliche Hürden, da naturbasierte Lösungen oft auf ein starres und auf technische Standardbauteile ausgerichtetes Regelwerk treffen.

Fehlende Normung und Anerkennung als Bauteil

Die größte Hürde liegt in der derzeit mangelnden Integration von Begrünungssystem in die nationalen und europäischen Normen zur energetischen Berechnung von Gebäuden. Da Begrünungen lebende Organismen sind, die sich saisonal und über Jahre hinweg verändern, entsprechen sie nicht den statischen Anforderungen herkömmlicher Baustoffe. Ohne die Aufnahme in die OIB-Richtlinien oder entsprechende ÖNORMen können die erzielten Kühl- und Verschattungsleistungen im Energieausweis oft nicht rechtsverbindlich angerechnet werden. Dies führt dazu, dass Bauherrschaft und Planende trotz nachgewiesener Wirksamkeit rechtlich dazu verpflichtet sein könnten, zusätzliche konventionelle Kühlsysteme zu installieren, um die gesetzlichen Anforderungen zu erfüllen.

Gewährleistung und Haftung bei biologischen Systemen

Im Gegensatz zu technischen Sonnenschutzeinrichtungen unterliegt die Leistungsfähigkeit einer Fassadenbegrünung biologischen Schwankungen. Rechtliche Fragestellungen ergeben sich hier insbesondere bei der Mängelhaftung, wenn die Begrünung aufgrund von Witterungsverhältnissen, Schädlingsbefall oder mangelnder Pflege nicht den berechneten Verschattungsgrad erreicht. Die Abgrenzung zwischen Planungsfehlern und Wartungsversäumnissen ist juristisch komplex und erfordert neue Vertragsmodelle für die Langzeitpflege sowie Funktionsgarantien auf Basis der ÖNORM L 1122.

5.4 Beschreiben Sie auch bisherige Verwertungs- und Verbreitungsaktivitäten und stellen Sie das weitere (Markt-/ Verbreitungs-) Potenzial dar.

Bisherige Verwertungs- und Verbreitungsaktivitäten

Obwohl es sich primär um ein Forschungsprojekt handelt, konnte das Team bereits eine beachtliche Reichweite in der Fachwelt erzielen. Die Dissemination der Zwischen- und Endergebnisse erfolgte systematisch über etliche Artikel in Fachzeitschriften sowie durch Präsentationen auf nationalen und internationalen Tagungen, die in diesem Bericht detailliert dokumentiert sind. Diese Aktivitäten dienten dazu, die wissenschaftliche Validität der Messmethodik unter Beweis zu stellen und die Fachcommunity frühzeitig über die Potenziale des Bioshadings zu informieren. Durch den direkten Austausch mit Expert*innen auf Kongressen wurden die Messmethoden, Versuchsaufbauten bereits einer ersten fachlichen Prüfung unterzogen.

Markt- und Verbreitungspotenzial

Das nun erfolgreich abgeschlossene Projekt MARGRET schuf die notwendige Basis, um Begrünungssysteme umfangreich zu testen und wertvolle Potenziale zu lokalisieren. Auf diesen fundierten Erkenntnissen aufbauend können Systemhersteller nun Begrünungslösungen anbieten, welche die Planungssicherheit in Bauprojekten deutlich erhöhen. Da die im Projekt untersuchten Strukturen noch keine ausreichende Reife für die Generierung saisonaler Faktoren aufwiesen startete Anfang 2026 das Folgeprojekt MARGRET BioShade.

Dieses neue Vorhaben soll die Datenbasis ausbauen um eine realitätsnahe Abbildung der Verschattungsleistung sowie der Tageslichtversorgung zu gewährleisten. Zudem wird die technische Leistungsfähigkeit von extensiven und reduziert-intensiven Begrünungsformen weiter untersucht. Die enge Zusammenarbeit mit Verbänden wie VfB und Kompetenzzentrum GRÜNSTATTGRAU stellen sicher, dass die Ergebnisse aus MARGRET und die neuen Effizienzstandards aus BioShade unmittelbar in die Breite der Bauwirtschaft getragen werden

6 Ausblick und Empfehlungen

Die Ergebnisse des Forschungsprojekts MARGRET bilden das Fundament für eine notwendige Neubewertung grüner Infrastruktur in der modernen Stadtplanung. Obwohl grüne Infrastruktur als Schlüsselmaßnahme zur Klimaanpassung gilt, fehlen bisher belastbare, standardisierte Kennwerte zur Wirkung auf Kühlung, Solarstrahlungsreduktion und Wasserhaushalt. Im Gegensatz zu statischen Bauteilen ist die Quantifizierung dynamischer, organischer Pflanzenbauteile ungleich schwieriger, da insbesondere die Entwicklung der Funktionalität in den ersten Wachstumsjahren zeitlich begrenzte Forschungsprojekte vor große Herausforderungen stellt. Das Projekt MARGRET schuf mit mobilen Begrünungsprüflingen, einer hochsensorgestützten Fassadenprüfbox sowie einem begrünten Dachteststand eine europaweit außergewöhnliche Prüfinfrastruktur.

Diese Erkenntnisse sowie der Versuchsaufbau werden im Nachfolgeprojekt MARGRET Bioshade gezielt weiter genutzt, um die technologische Reife der Systeme zu erhöhen und die methodische Grundlage für die Integration in die energetische Gebäudebewertung zu schaffen. Das Projekt verfolgt dabei drei zentrale Ziele, wobei an erster Stelle die systematische Quantifizierung der Verschattungswirkung von Vertikalbegrünungen auf Fensterflächen zur Ableitung von Transmissionsgraden und g-Werten steht. Ein weiterer Fokus liegt auf der Untersuchung der Wasserbilanz sowie der energetischen Effekte unterschiedlicher Dachbegrünungssysteme unter besonderer Berücksichtigung des Abflussverhaltens bei Starkregen und der Verdunstungskühlung. Als drittes Kernziel wird die Entwicklung übertragbarer Kennwerte für Energieausweise, technische Richtlinien und Simulationsmodelle angestrebt. Zur Umsetzung dieser Vorhaben kommen innovative Methoden wie Pyroscanner, kamerabasierte Strahlungsmessung, Wägezellensysteme und ein digitaler Zwilling mit Echtzeit-Messdatenvisualisierung zum Einsatz.

Empfehlungen für weiterführende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten

Bioshading

Ein zentraler Bereich für zukünftige Forschungsarbeiten liegt in der tiefergehenden Analyse des Bioshadings, insbesondere im Hinblick auf die Dynamik der Strahlungsabschirmung im Tagesverlauf bei transparenten Bauteilen. Die Beobachtung, dass die Abschirmung der Solarstrahlung durch die Begrünung erst mit zunehmender Tageszeit signifikant ansteigt und am Vormittag bei einem relativen Azimutwinkel unter -40 Grad kaum ausgeprägt ist, stellt ein wichtiges Forschungsergebnis dar. Dies deutet auf eine teilweise Kompensation der Beschattungswirkung durch zusätzliche Diffusstrahlung über das Blattwerk hin, was dem gängigen Vorurteil widerspricht, Begrünungen würden Innenräume übermäßig verdunkeln und den Beleuchtungsenergieverbrauch erhöhen. Zukünftige Studien sollten diese selektive Lichtführung genauer untersuchen, um Pflanzenarten zu identifizieren, die ein optimales Verhältnis zwischen sommerlichem Hitzeschutz und winterlicher Lichtausbeute bieten.

Um diese Effekte rechtssicher in der Planung zu verankern, wird empfohlen, die Ergebnisse in Form von Tabellenkennwerten für verschiedene Pflanzenmorphologien aufzubereiten. Diese Kennwerte könnten den jahreszeitlich schwankenden g-Wert (Gesamtenergiedurchlassgrad) des kombinierten Systems aus Verglasung und Vegetation abbilden.

Gründachsysteme

Ein wesentlicher Fokus künftiger Arbeiten liegt in der methodischen Vereinfachung der energetischen Bewertung von Gründächern. Bisher erfordert die exakte Berechnung der thermischen Wirkung von Dachbegrünungen die Berücksichtigung einer Vielzahl komplexer und variabler Parameter wie die Wärmeleitfähigkeit des Substrats im trockenen und nassen Zustand, die zusätzliche Dämmfähigkeit der Pflanzschicht, den verringerten äußeren Wärmeübergangswiderstand sowie die Effekte von Verschattung und Albedo. Diese Detailtiefe ist in der täglichen Planungspraxis oft kaum handhabbar. Daher wird empfohlen, diese Einzelparameter durch einen validierten äquivalenten Wärmedämmwert zu ersetzen. Ein solcher pauschaler Kennwert würde die energetische Performance des gesamten Gründachaufbaus in einer einzigen normfähigen Größe zusammenfassen und damit die Integration in Energieausweise massiv erleichtern. In der praktischen Anwendung könnte dies durch übersichtliche Tabellenkennwerte abgebildet werden, die Architektur-schaffenden und Energieplanenden eine rechtssichere Grundlage ohne aufwendige Individualberechnungen bieten.

Um diese Kennwerte wissenschaftlich abzusichern, ist der Einsatz spezialisierter Prüfstände erforderlich. Eine geeignete Methodik wäre die Nutzung einer kontrollierten Prüfkammer, in der mehrere Systeme parallel unter definierten Bedingungen auf ihre effektive Wärmeleitfähigkeit getestet werden könnten. Dies würde einen direkten, objektiven Vergleich verschiedener Substrat- und Pflanzenkombinationen ermöglichen und die Datenbasis für die vorgeschlagenen Tabellenwerte validieren.

Die wissenschaftliche Untermauerung eines pauschalen Dämmstoff-Bonus für Gründächer ist insbesondere vor dem Hintergrund der aktuellen Baustandards sinnvoll. Da die Wärmestromdichte bei steigender Dämmstoffdicke reziprok abnimmt, erzielt jeder zusätzliche Zentimeter herkömmlicher Dämmung bei den bereits anspruchsvollen Grenzwerten der OIB-Richtlinie 6 nur noch einen geringen energetischen Grenznutzen. Ein Aufbau mit 15 cm Substrat könnte beispielsweise mit einer Gutschrift von 5 cm Dämmstoffdicke bei einer Wärmeleitfähigkeit von 0,035 W/mK angerechnet werden. Diese Honorierung rechtfertigt sich nicht nur durch die thermische Leistung, sondern auch durch die vielfältigen ökologischen Zusatzfunktionen wie die effektive Wasserrückhaltung zur Entlastung der Kanalisation sowie den Schutz der Bausubstanz vor thermischen Extremen. Die Reduktion des Einsatzes von konventionellen Dämmstoffen ist ebenfalls ein ökologischer Bonus.

Außenraum

Ein weiterer Forschungsfokus muss auf der systemischen Betrachtung der Fassadenbegrünung im Außenraum liegen. Während konventionelle Strategien oft auf eine Maximierung der Reflexion setzen, zeigt die Begrünung eine differenziertere Wirkungsweise. Mit einer Albedo von etwa 0,20 bis 0,30 reduziert die Vegetation die Blendwirkung und die sekundäre Strahlungsbelastung im Straßenraum im Vergleich zu hochreflektierenden weißen Fassaden erheblich. Die Umwandlung

von sensibler Wärme in latente Wärme durch Evapotranspiration muss künftig noch präziser über thermische Indizes wie die Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) oder den Universal Thermal Climate Index (UTCI) erfasst werden, um die bioklimatische Qualität beschatteter Freiräume objektiv mess- und planbar zu machen.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Literaturanalyse Fassadenbegrünung: Testsettings und Messparameter Teil A	15
Tabelle 2- Literaturanalyse Fassadenbegrünung: Testsettings und Messparameter Teil B.....	16
Tabelle 3- Literaturanalyse Fassadenbegrünung: Testsettings und Messparameter Teil C.....	17
Tabelle 4 – Prüfaufbauten, Klimata, Referenzaufbauten und Bepflanzungsparameter der analysierten Fassadenbegrünungsstudien Teil A	18
Tabelle 5 - Prüfaufbauten, Klimata, Referenzaufbauten und Bepflanzungsparameter der analysierten Fassadenbegrünungsstudien Teil B	19
Tabelle 6 - Prüfaufbauten, Klimata, Referenzaufbauten und Bepflanzungsparameter der analysierten Fassadenbegrünungsstudien Teil C.....	20
Tabelle 7 Literaturanalyse Messtechnik Dachbegrünungen. Standorte, Aufbauten und Sensoren ..	22
Tabelle 8: Gegenüberstellung internationaler Hersteller:innen von wandgebundenen Begrünungssystemen (Vertiko GmbH, 2025a, 2025b; Terapia Urbana, 2022; Sempergreen Group, o.J.; NatureBase GmbH, 2023).	34
Tabelle 9: Ausgewählte vegetationstechnische und pflanzenphysiologische Parameter (Bezeichnung deutsch/englisch) mit jeweiligen Abkürzungen und SI-Einheiten.	36
Tabelle 10: Begrünungstypen, Auswertung des Deckungsgrades und dazugehöriger Graustufen-Betrachtungsbereich und begrünbare Flächen für DG_p und DG_{Ziel} (IBLB, BOKU University, 2026). ..	41
Tabelle 11: Übersicht Bewässerungszeiten der wandgebundenen Vertikalbegrünungen 2024 (IBLB, BOKU University, 2024).....	57
Tabelle 12: Übersicht Bewässerungszeiten der wandgebundenen Vertikalbegrünungen 2025 (IBLB, BOKU University, 2026).....	58
Tabelle 13: Wuchsverhalten am Beispiel FB_trog_PQ_oF in den Vegetationsperioden 2024 und 2025 (IBLB, BOKU University, 2024/2025).	59
Tabelle 14: Wuchsverhalten am Beispiel FB_trog_WS_oF in den Vegetationsperioden 2024 und 2025 (IBLB, BOKU University, 2024/2025).	60
Tabelle 15: Wuchsverhalten am Beispiel FB_LW_mF in den Vegetationsperioden 2024 und 2025 (IBLB, BOKU University, 2024/2025; M. Majcen, 2024).....	61
Tabelle 16: Zusammenfassung der untersuchten pflanzenphysiologischen Parameter V_{cub} , $WLAI/LAI$, DG_p und DG_{Ziel} an den vertikalen Begrünungssystemen in den Vegetationsperioden 2024 und 2025 (IBLB, BOKU University, 2026).....	80
Tabelle 17: Transmission Tagesmittel, Vertikalbegrünung	89
Tabelle 18: Transmissionsgrad und Pflanzenparameter zum Zeitpunkt der Pyroscannermessungen am 23 Juli 2025.	92
Tabelle 19: Gemessene Kühlleistungen und Rahmenparameter	104
Tabelle 20: Übersicht Bewässerungszeiten der reduziert-intensiven Dachbegrünung 2024 (IBLB, BOKU University, 2024).....	108
Tabelle 21: Übersicht Bewässerungszeiten der reduziert-intensiven Dachbegrünung 2025 (IBLB, BOKU University, 2026).....	109

Tabelle 22: Zusammenfassung der untersuchten pflanzenphysiologischen Parameter V_{cub} , LAI, DG_p und DG_{Ziel} an der reduziert-intensiven Dachbegrünung in den Vegetationsperioden 2024 und 2025 (IBLB, BOKU University, 2026).	113
Tabelle 23: Fassadenbegrünung, ausgewählte Kennwerte auf Basis der Messergebnisse.	140
Tabelle 24: Dachbegrünung, ausgewählte Kennwerte auf Basis der Messergebnisse.....	140
Tabelle 25: Parameter Berechnung des Gesamtenergiedurchlassgrades nach ÖNORM EN ISO 52022-1	148
Tabelle 26: Eigenauswertung IBO GmbH, Vergleich Substrat Optigrün i, intensiv-Substrat; Datenquelle: Häusler et al. (2025)	156

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Fassadenprüflinge und Dachteststände aus dem Projekt MARGRET. Fotos: M.Majcen, AEE INTEC.	10
Abbildung 2: Drei der fünf Probenwagen: Living Wall (links), Wisteria sinensis mit Rohren als Rankhilfe und Fensterausschnitt (Mitte) und Parthenocissus q. mit Rankgitter ohne Fensterausschnitt (rechts). Fotos: M.Majcen, AEE INTEC.	24
Abbildung 3: Aufbau der mobilen Probewagen: Wagen ohne Tröge (li.), mit Rankgitter und Trögen bei der Bepflanzung (Mitte) und die Montage der Rankhilfen für die Wisteria (re.).	25
Abbildung 4: Aufbau der AEE INTEC Fassadenprüfbox. Grafik: T. Weiss, AEE INTEC	25
Abbildung 5: Aufbau des Fassadenprüflings und Detailschnitt des verwendeten Fensters im Prüfaufbau. Grafik: AEE-INTEC (links) bzw. Fa. Katzbeck (rechts).	26
Abbildung 6: Prüfbox mit Grünfassadenprüfling im Grundriss. Positionierung der Sensorik inkl. Legende. Grafik: W. Wagner und M. Majcen, AEE INTEC	27
Abbildung 7: Ansicht der Prüfbox mit Fassadenprüfling und Darstellung der vertikalen Positionierung der Sensorik. Grafik: M. Majcen, AEE INTEC	27
Abbildung 8: Der Pyroscanner (links) und eine grafische Darstellung der erfassten Messpunkte in einem Scandurchgang (rechts). Bilder: M. Majcen (links), D. Rüdiger (rechts), AEE INTEC.....	29
Abbildung 9: Schnitt durch den Dachbegrünungsteststand mit Aufbauten und Sensoren. Maßangaben in Zentimetern. Grafik: M.Majcen.....	30
Abbildung 10: Dachteststände: reduziert-intensive Begrünung 4 Monate nach Anlage (links) und Referenz-Kiesdach (rechts). Fotos: M.Majcen	31
Abbildung 11: Screenshot des digitalen Zwillings des Versuchsaufbaus mit Echtzeit-Messdaten im Webviewer buildingTwin. Grafik: M.Majcen, AEE INTEC.....	33
Abbildung 12: Konzeptionelle Darstellung zur Aufnahme des kubischen Pflanzenvolumens an der wandgebundenen Vertikalbegrünungsvariante mit Fensteraussparung (IBLB, BOKU University, 2024).	37
Abbildung 13: Konzeptionelle Darstellung zur Aufnahme des kubischen Pflanzenvolumens an troggebundenen Begrünungsarten ohne Fensteraussparung (IBLB, BOKU University, 2024).	37
Abbildung 14: Konzeptionelle Darstellung zur Aufnahme des LAI am Prüfstand der Dachbegrünung (IBLB, BOKU University, 2024).	38
Abbildung 15: Konzeptionelle Darstellung zur Aufnahme des WLAI an der Living Wall (IBLB, BOKU University, 2025).....	39
Abbildung 16: Konzeptionelle Darstellung zur Aufnahme des WLAI an den troggebundenen Begrünungsarten (IBLB, BOKU University, 2024).	39
Abbildung 17: Auswertung am Beispiel eines Quadranten von <i>Wisteria sinensis</i> mit weißem Hintergrund – Biomasse ist schwarz eingefärbt (IBLB, BOKU University, 2025).	40
Abbildung 18: Auswertung am Beispiel eines Quadranten der Dachbegrünung – Biomasse ist weiß eingefärbt (IBLB, BOKU University, 2025).	40
Abbildung 19: Konzeptionelle Darstellung zur Aufnahme der Wärmebilder am Teststand „Gründach“ (IBLB, BOKU University, 2024).	42

Abbildung 20: <i>P. quinquefolia</i> und <i>W. sinensis</i> bevor (15.04.2024, oben) und nach (29.04.2024, unten) den Frostnächten im April 2024 (M. Majcen, AEE Intec, 2024).	44
Abbildung 21: Zustand <i>Parthenocissus quinquefolia</i> (FB_PQ_oF) im August 2024 (links) und im Juli 2025 (rechts) (IBLB, BOKU University, 2024/2025).	45
Abbildung 22: Monatliche Bewässerungsmenge in den Monaten Mai - Oktober 2024 an den fünf vertikalen Begrünungsarten (IBLB, BOKU University, 2026).	54
Abbildung 23: Monatliche Bewässerungsmenge in den Monaten Mai - August 2025 an den fünf vertikalen Begrünungsarten (IBLB, BOKU University, 2026).	55
Abbildung 24: Entwicklung des kubischen Pflanzenvolumens in m^3/m^2 je Quadrant (Q1-Q4) an FB_trog_PQ_oF in den Vegetationsperioden 2024 und 2025 (IBLB, BOKU University, 2025).	62
Abbildung 25: Entwicklung des kubischen Pflanzenvolumens in m^3/m^2 je Quadrant (Q1-Q4) an FB_trog_PQ_mF in den Vegetationsperioden 2024 und 2025 (IBLB, BOKU University, 2025).	63
Abbildung 26: Entwicklung des kubischen Pflanzenvolumens in m^3/m^2 je Quadrant (Q1-Q4) an FB_trog_WS_oF in den Vegetationsperioden 2024 und 2025 (IBLB, BOKU University, 2025).	64
Abbildung 27: Entwicklung des kubischen Pflanzenvolumens in m^3/m^2 je Quadrant (Q1-Q4) an FB_trog_WS_mF in den Vegetationsperioden 2024 und 2025 (IBLB, BOKU University, 2025).	65
Abbildung 28: Entwicklung des kubischen Pflanzenvolumens in m^3/m^2 je Quadrant (Q1-Q4) an FB_LW_mF in den Vegetationsperioden 2024 und 2025 (IBLB, BOKU University, 2025).	66
Abbildung 29: Entwicklung des WLAI je Quadrant (Q1-Q4) an FB_trog_PQ_oF in den Vegetationsperioden 2024 und 2025 (IBLB, BOKU University, 2025).	67
Abbildung 30: Entwicklung des WLAI je Quadrant (Q1-Q4) an FB_trog_PQ_mF in den Vegetationsperioden 2024 und 2025 (IBLB, BOKU University, 2025).	68
Abbildung 31: Entwicklung des WLAI je Quadrant (Q1-Q4) an FB_trog_WS_oF in den Vegetationsperioden 2024 und 2025 (IBLB, BOKU University, 2025).	69
Abbildung 32: Entwicklung des WLAI je Quadrant (Q1-Q4) an FB_trog_WS_mF in den Vegetationsperioden 2024 und 2025 (IBLB, BOKU University, 2025).	70
Abbildung 33: Entwicklung des WLAI je Quadrant (Q1-Q4) an FB_LW_mF in den Vegetationsperioden 2024 und 2025 (IBLB, BOKU University, 2025).	71
Abbildung 34: Projektiver Deckungsgrad [DGp] in % je Quadrant (Q1-Q4) an FB_trog_PQ_oF in den Vegetationsperioden 2024 und 2025 (IBLB, BOKU University, 2025).	72
Abbildung 35: Projektiver Deckungsgrad [DGp] in % je Quadrant (Q1-Q4) an FB_trog_PQ_mF in den Vegetationsperioden 2024 und 2025 (IBLB, BOKU University, 2025).	74
Abbildung 36: Projektiver Deckungsgrad [DGp] in % je Quadrant (Q1-Q4) an FB_trog_WS_oF in den Vegetationsperioden 2024 und 2025 (IBLB, BOKU University, 2025).	75
Abbildung 37: Projektiver Deckungsgrad [DGp] in % je Quadrant (Q1-Q4) an FB_trog_WS_mF in den Vegetationsperioden 2024 und 2025 (IBLB, BOKU University, 2025).	77
Abbildung 38: Projektiver Deckungsgrad [DGp] in % je Quadrant (Q1-Q4) an FB_LW_mF in den Vegetationsperioden 2024 und 2025 (IBLB, BOKU University, 2025).	78
Abbildung 39: Klimatische Bedingungen während der Messzeiträume für die unterschiedlichen Fassadenprüflinge 2024 und 2025.	82
Abbildung 40: Albedomessungen, Tagesverläufe	83

Abbildung 41: Fotodokumentation der vermessenen Elemente im Aufzeichnungszeitraum. Die Messpunkte sind gelb markiert. Grafik/ Fotos: AEE INTEC	84
Abbildung 42: Globalstrahlung in Fassadenebene und transmittierte Strahlung hinter der Vertikalbegrünung. Verlauf mit zunehmenden Pflanzenwachstum. Rechts: Werte für je einen repräsentativen Tag und zugehörige Pflanzenparameter als Durchschnittswerte für Quadrant 1 und 2, die vor dem Pyranometer liegen.	86
Abbildung 43: Strahlungstransmission im Tagesverlauf durch die Begrünung mit chinesischem Blauregen.	87
Abbildung 44: Globalstrahlung in Fassadenebene und transmittierte Strahlung hinter der Vertikalbegrünung mit Wildem Wein 2024 und 2025. Rechts: Werte für je einen repräsentativen Tag und zugehörige Pflanzenparameter als Durchschnittswerte für Quadrant 1 und 2.	89
Abbildung 45: Strahlungstransmission im Tagesverlauf durch die Begrünung mit Wildem Wein....	89
Abbildung 46: Messung des effektiven Transmissionsgrades durch die Verglasung mittels Pyroscanner und Umrechnung in den Bioshading coefficient F_{bs} . Messzeitraum Sept./Okt. 2024. Es wurden nur Messpunkte mit Diffusstrahlungsanteil unter 50% (keine starke Bewölkung) berücksichtigt.	91
Abbildung 47: Messzeitraum Juni/Juli 2025. Messung des effektiven Transmissionsgrades durch die Verglasung mittels Pyroscanner und Umrechnung in den Bioshading coefficient F_{bs} . Es wurden nur Messpunkte mit Diffusstrahlungsanteil unter 50% berücksichtigt.	92
Abbildung 48: Oberflächentemperatur und Wärmestrom, Living Wall 12.8.2025	95
Abbildung 49: Oberflächentemperatur und Wärmestrom, Living Wall 13.8.2025	96
Abbildung 50: Oberflächentemperatur und Wärmestrom, Parthenocissus q. 15.8.2025.....	97
Abbildung 51: Oberflächentemperatur und Wärmestrom, Parthenocissus q. 19.8.2025.....	98
Abbildung 52: Oberflächentemperatur und Wärmestrom, Parthenocissus q. mit Fensterausschnitt 23.8.2024	99
Abbildung 53: Oberflächentemperatur und Wärmestrom, Wisteria sinensis 18.8.2025	100
Abbildung 54: Kühlleistung Prüfboxen mit und ohne Grünfassaden	103
Abbildung 55: Monatliche Bewässerungsmenge in den Monaten Mai - Oktober 2024 am Teststand "reduziert intensive Dachbegrünung" (IBLB, BOKU University, 2026).....	106
Abbildung 56: Monatliche Bewässerungsmenge in den Monaten Mai - August 2025 am Teststand "reduziert intensive Dachbegrünung" (IBLB, BOKU University, 2026).....	107
Abbildung 57: Entwicklung des kubischen Pflanzenvolumens am Gründachteststand in m^3 pro m^2 je Quadrant (Q1-Q4) in den Vegetationsperioden 2024 und 2025 (IBLB, BOKU University, 2025).	110
Abbildung 58: Entwicklung des LAI am Gründachteststand je Quadrant (Q1-Q4) in den Vegetationsperioden 2024 und 2025 (IBLB, BOKU University, 2025).....	111
Abbildung 59: Entwicklung von DG_p [%] am Gründachteststand je Quadrant (Q1-Q4) in den Vegetationsperioden 2024 und 2025 (IBLB, BOKU University, 2025).....	112
Abbildung 60: Darstellung der thermographischen Aufnahmen an Grün- und Referenzdach im August 2024 (IBLB, BOKU University, 2024).....	115
Abbildung 61: Darstellung der thermographischen Aufnahmen an Grün- und Referenzdach im Juli 2025 (IBLB, BOKU University, 2025).	116

Abbildung 62: Positionen der strahlungsgeschützten Lufttemperatursensoren beim Kiesdach bzw. Gründach.....	117
Abbildung 63: Lufttemperaturmessungen über dem Referenz-Kiesdach und Gründach im August 2024 (oben) und Darstellung der gemessenen Temperaturdifferenzen (unten).....	118
Abbildung 64: Lufttemperaturmessungen über dem Referenz-Kiesdach und Gründach im August 2025 (oben) und Darstellung der gemessenen Temperaturdifferenzen (unten).....	119
Abbildung 65: Oberflächentemperaturmessungen am Referenz-Kiesdach und am Substrat des Gründaches im August 2025 (oben) und Darstellung der gemessenen Temperaturdifferenzen (unten).	120
Abbildung 66: Vergleich der Verteilung der Oberflächentemperaturen und Oberflächentemperaturamplituden des reduziert-intensiven Gründaches und des Referenzdaches (Kiesdach).....	122
Abbildung 67: Wärmeströme durch das Gründach und Referenzdach in Bezug zur Außenlufttemperatur während einer 14 Tage Sommerperiode. Die Nulllinie des Wärmestromes ist markiert.....	123
Abbildung 68: 24h Mittelwerte der Wärmeströme durch Gründach und Referenzdach. Parallele Bodenfeuchte-messung des Gründaches.	124
Abbildung 69: Detail: Wärmeströme durch das Gründach und Referenzdach in Bezug zur Außenlufttemperatur von 8.8. bis 14.8. 2025. Die Nulllinie des Wärmestromes ist markiert.	125
Abbildung 70: Oben: Wärmeeintrag bzw. -verluste durch das Gründach bzw. Referenzdach. Werte jeweils in Wh/m ² in 24h. Unten: zugehöriger Verlauf der Außenlufttemperatur.....	126
Abbildung 71: Temperaturen, Wärmeströme und Wärmedurchgangswiderstände von Grün- bzw. Referenzdach in zwei Messperioden 2025. Jan – Feb (links) bzw. März-April (rechts). Die dicke Linie zeigt den Wärmedurchgangswiderstandszuschlag, den das Gründach im Vergleich zum Referenzdach aufwies. Der markierte Bereich entspricht etwa 2m ² K/W.....	128
Abbildung 72: Skizze zur Strahlungsenergiebilanz von Vertikalbegrünungen auf Basis der Projektergebnisse. Grafik: M.Majcen, AEE INTEC	145
Abbildung 73: Beispiel, Vergleich g _{tot} technischer Sonnenschutz und vorgesetzte Begrünung	151

Literaturverzeichnis

- Austrian Standards International (2010): ÖNORM L 1120 – Begrünung von Dächern und Decken auf Bauwerken - Anforderungen an Planung, Ausführung und Erhaltung. Ausgabe 2010-06-01. Wien.
- Austrian Standards International (2013): ÖNORM B 8110-7 – Wärmeschutz im Hochbau - Teil 7: Tabellierte wärmeschutztechnische Bemessungswerte. Ausgabe 2013-03-15. Wien.
- Austrian Standards International (2018): ÖNORM EN ISO 52022-1 – Energieeffizienz von Gebäuden - Wärmetechnische, solare und tageslichtbezogene Eigenschaften von Bauteilen und Bauelementen - Teil 1: Vereinfachtes Berechnungsverfahren zur Ermittlung der solaren und tageslichtbezogenen Eigenschaften von Sonnenschutz in Kombination mit Verglasungen (ISO 52022-1:2017). Ausgabe 2018-01-01. Wien.
- Austrian Standards International (2021a): ÖNORM EN 14500 – Abschlüsse - Thermischer und visueller Komfort - Prüf- und Berechnungsverfahren. Ausgabe 2021-08-15. Wien.
- Austrian Standards International (2021b): ÖNORM L 1136 – Vertikalbegrünung im Außenraum - Anforderungen an Planung, Ausführung, Pflege und Kontrolle. Ausgabe 2021-04-01. Wien.
- Austrian Standards International (2024): ÖNORM B 8110-6-1 – Wärmeschutz im Hochbau - Teil 6-1: Grundlagen und Ermittlung des Heizwärmebedarfs und des Kühlbedarfs. Ausgabe 2024-03-01. Wien.
- CAE e.V. (2025). U-green – Bauphysikalische Bewertung von Fassaden- und Dachbegrünungen. Würzburg: Center for Applied Energy Research. Online verfügbar unter: https://cae-zero-carbon.de/assets/files/2025-U-green_Info_Website.pdf, [abgerufen am 15.12.2025, 09:30].
- Chen, Q., Li, B., Liu, X. (2013). *An experimental evaluation of the living wall system in hot and humid climate*. Energy Build. 61, 298-307, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.02.030>.
- Coma, J., Perez, G., de Gracia, A., Bures, S., Urrestarazu, M., Cabeza, L.F. (2017). *Vertical greenery systems for energy savings in buildings: a comparative study between green walls and green façades*. Build. Environ. 111, 228 - 237, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.014>.
- Convertino, F., Vox, G., Schettini, E (2021). *Evaluation of the cooling effect provided by a green façade as nature-based system for buildings*. Build. Environ. 203, 108099, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108099>
- De Bock, A., Belmans, B., Vanlanduit, S., Blom, J., Alvarado-Alvarado, A. A., Audenaert, A. (2023). *A review on the leaf area index (LAI) in vertical greening systems*. In *Building and Environment* (Vol. 229). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109926>.
- Harlaß, R. (2008). *Verdunstung in bebauten Gebieten*. <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-ds-1223146119806-27644>
- Häusler, L., Hoffmann, K., Körner, W., Nehls, T., Reim, M., Schwartengräber, R., Stark, C., Ullerich, L., Weber, K., Weiglein, C., & Weinläder, H. (2025). *Bauphysikalische Bewertung von Fassaden- und Dachbegrünungen: Messdatenregister des Verbundvorhabens U-green (FKZ:*

- 03EN1045 A,B,C). DepositOnce, Technische Universität Berlin. Online verfügbar unter: <https://depositonce.tu-berlin.de/items/69c6b9e0-a054-4572-84c5-f6f278d4d0b3>
- Huang, Y.-Y., Chen, C.-T., Liu, W.-T. (2018). *Thermal performance of extensive green roofs in a sub-tropical metropolitan area*. *Energy and Buildings* 159, 39–53. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.039>.
- Ip, K., Lam, M., & Miller, A. (2009). Shading performance of a vertical deciduous climbing plant canopy. *Building and Environment*, 45, 81–88. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.05.003>
- Jim, C.Y., Peng L.L.H. (2012). *Weather effect on thermal and energy performance of an extensive tropical green roof*. *Urban Forestry et Urban Greening* 11, 73 – 85.
- Konsortium des Forschungsprojektes HEDWIG. (2022-2026). *HEDWIG: Erhebung von MessDaten zur Wirkungsabschätzung von begrünten Gebäuden*. <https://nachhaltigwirtschaften.at/de/sdz/projekte/hedwig-erhebung-von-mess-daten-zur-wirkungsabschaetzung-von-begruenten-gebaeuden.php>
- Korjenic, A., Tudiwer, D., Penaranda, M. S., Hollands, J., Salonen, T., Mitterböck, M., Pitha, U., Zluwa, I., Stangl, R., Kräftner, J., Gump, K. & Becker, G. (2019). *Hocheffiziente Fassaden- und Dachbegrünung mit Photovoltaik-Kombination: Optimale Lösung für die Energieeffizienz in gesamtökologischer Betrachtung*. GrünPlusSchule@Ballungszentrum (27/2019). https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/sdz_pdf/schriftenreihe_2019-27-gruenplus-schule.pdf
- Koch, K., Wuyts, K., Denys, S., Samson, R. (2023). The influence of plant species, leaf morphology, height and season on PM capture efficiency in living wall systems. *Science of the Total Environment*, 905. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167808>.
- Kresser, C., Schriefl, E., Schöberl, H., Mühlbauer, I., Formanek, S., Scharf, B., Fröhvirt, G. (2021). *Integration von Begrünung in den österreichischen Energieausweis. GREENergieausweis*. Berichte aus Energie- und Umweltforschung 43/2021. Online verfügbar unter: https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/sdz_pdf/schriftenreihe-2021-43-GREENergie-ausweis.pdf (zuletzt aufgerufen 27.3.2026).
- Mayring, P. & Fenzl, T. (2019). Qualitative Inhaltsanalyse. In N. Baur & J. Blasius (Hrsg.), *Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung* (S. 633–648). Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-21308-4_42
- Mazzali, U., Peron, F., Romagnoni, P., Pulselli, R.M., Bastianoni, S. (2013). *Experimental investigation on the energy performance of living walls in a temperate climate*, *Build. Environ.* 64, 57-66, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.03.005>.
- Niederberger, M. & Wassermann, S. (2015). *Methoden der Experten- und Stakeholdereinbindung in der sozialwissenschaftlichen Forschung*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-01687-6>
- Olivieri, F., Olivieri, L., Neila, J. (2014). *Experimental study of the thermal-energy performance of an insulated vegetal façade under summer conditions in a continental mediterranean climate*. *Build. Environ.* 77 61e76, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.03.019>.
- Poiss, M., Briefer, A., Scharf, B., Spörl, P., & Stangl, R. (2025). Vertical greenery as natural shading of glass facades: Bioshading coefficients for 4 climbing plant species for assessment of

- shading performance. *Building and Environment*, 283, 113399.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.113399>
- Rüdisser, D., Pertschy, R., Wagner, W. (2022). *PyroScanner -efficient measurement of solar transmission of windows and complex fenestration systems relying on a moving pyranometer*. Konferenzband e-nova 2022, Pinkafeld. Online verfügbar unter: <https://www.researchgate.net/publication/357577582>
- Stangl, Rosemarie; Briefer, Anna; Poiss, Maximilian; Wultsch, Thomas, Scharf, Bernhard, Pitha, Ulrike; Smetschka, Barbara; Wang, Juliane; Haas, Willi; Baumgart André, Sebastian; Binting, Rudolf; Lipp, Bernhard; Huber, Gerhard; Wagner, Susanna, Mauss, Katharina; Formanek, Susanne; Auer, Martin; Obkircher, Leo; Posch, Jerome (2025): GLASGrün: Regulierung von Klima, Energiebedarf und Wohlbefinden in Glasverbauten durch bautechnisch integriertes, vertikales Grün Berichte aus Energie- und Umweltforschung 60a/2025, Online verfügbar unter: https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/sdz_pdf/schriftenreihe-2025-60a-glasgruen.pdf, [abgerufen am 20.12.2025, 15:30].
- Solcerova, A., van de Ven, F., Wang, M., Rijdsdijk, M., van de Giesen, N. (2017). *Do green roofs cool the air?* Build. Environ. 111, 249-255. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.10.021>
- Scharf, B., Zluwa, I. (2017): Case study investigation of the building physical properties of seven different green roof systems. *Energy and Buildings* 151: 564-573.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.050>.
- Watson, D.T. (1947): Comparative Physiological Studies on the Growth of Field Crops: I. Variation in Net Assimilation Rate and Leaf Area between Species and Varieties, and within and between Years, *Annals of Botany*, Volume 11, Issue 1, January 1947, Pages 41
- Werner, M. (2021): *Digitale Bildverarbeitung: Grundkurs mit neuronalen Netzen und MATLAB-Praktikum*, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Springer Nature, Wiesbaden.
- Wong, N.H., Kwan Tan, A.Y., Chen, Y., Sekar, K., Tan, P.Y., Chand, D., Chiang, K., Wong, N.C. (2010). *Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls*. Build. Environ. 45, 663-672, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.08.005>.
- Zhang, L., Deng, Z., Liang, L., Zhang, Y., Meng, Q., Wang, J., Santamouris, M. (2019). *Thermal behavior of a vertical green facade and its impact on the indoor and outdoor thermal environment*. *Energy Build.* 204, 109502, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109502>.

7 Anhang

7.1 Anhang 1: Data Management Plan (DMP)

7.1.1 Datenerstellung und Dokumentation

Für sämtliche erhobenen Daten am Fassadenprüfstand Gleisdorf ist die AEE INTEC verantwortlich. Die Hauptverantwortliche für die Daten ist unter der E-Mail-Adresse m.majcen@aee.at erreichbar. Für sämtliche erhobene wachstumsspezifische Daten der Pflanzen und deren Bewässerung ist die BOKU UNIVERSITY IBLB verantwortlich. Die Hauptverantwortliche für die Daten ist unter der E-Mail-Adresse ulrike.pitha@boku.ac.at erreichbar.

7.1.2 Ethische, rechtliche und Sicherheitsaspekte

Alle erhobenen Daten am Fassadenprüfstand sind Eigentum der AEE INTEC, AEE – Institut für Nachhaltige Technologien, Feldgasse 19, 8200 Gleisdorf. Alle erhobenen wachstumsspezifische Daten der Pflanzen und der Bewässerung sind Eigentum der BOKU UNIVERSITY IBLB.

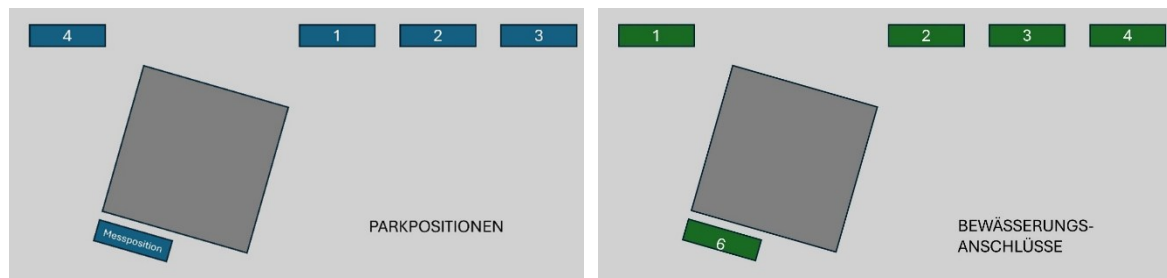
7.1.3 Datenspeicherung und -erhalt

Die Messdaten und Parameterbeschreibungen zu dieser Studie sind öffentlich über Zenodo unter <https://doi.org/10.5281/zenodo.19357657> verfügbar.

7.1.4 Wiederverwendbarkeit der Daten

Die Open-Access-Veröffentlichung der Messdaten gewährleisten die Wiederverwendbarkeit der Daten.

7.2 Anhang 2: Fassadenwechsel und Prüfpositionenverlauf



Kürzel oder Symbol	Prüfling
LV	Living Wall
Wild	Wilder Wein
Wild_F	Wilder Wein mit Fensterausschnitt
Wis	Wisteria
Wis_F	Wisteria mit Fensterausschnitt

7.2.1 Messpositionenverlauf 2024

Kalenderwoche		1_LV	2_Wild	4_Wild_F	3_Wis	5_Wis_F	Wechseldatum	Zählerstand Wasser m³
KW33_2024	Datum Wechsel		12.08.2024					
	Uhrzeit Wechsel							
	Parkposition	4	Messposition	2	1	3		
	Bewässerungsanschluss	1	6	3	2	4		
KW34_2024	Datum Wechsel		19.08.2024	19.08.2024			19.08.2024	6,084
	Uhrzeit Wechsel						9:00 - 9:25	
	Parkposition	4	2	Messposition	1	3		
	Bewässerungsanschluss	1	3	6	2	4		
KW35_2024	Datum Wechsel			26.08.2024		26.08.2024	26.08.2024	6,351
	Uhrzeit Wechsel						10:10 - 10:30	
	Parkposition	4	2	3	1	Messposition		
	Bewässerungsanschluss	1	3	4	2	6		
KW36_2024	Datum Wechsel				02.09.2024	02.09.2024	02.09.2024	6,699
	Uhrzeit Wechsel						9:00 - 9:45	
	Parkposition	4	2	3	Messposition	1		
	Bewässerungsanschluss	1	3	4	6	2		
KW37_2024	Datum Wechsel	10.09.2024			10.09.2024		10.09.2024	7,049
	Uhrzeit Wechsel						9:15-10:00	
	Parkposition	Messposition	2	3	4	1		
	Bewässerungsanschluss	6	3	4	1	2		
KW38_2024	Datum Wechsel	16.09.2024	16.09.2024		16.09.2024		16.09.2024	7,158
	Uhrzeit Wechsel						9:15 - 10:00	
	Parkposition	4	Messposition	3	2	1		
	Bewässerungsanschluss	1	6	4	3	2		
KW39_2024	Datum Wechsel		24.09.2024	24.09.2024			24.09.2024	7,158
	Uhrzeit Wechsel						11:30 - 12:00	
	Parkposition	4	3	Messposition	2	1		
	Bewässerungsanschluss	1	4	6	3	2		
KW40_2024	Datum Wechsel			30.09.2024		30.09.2024	30.09.2024	7,536
	Uhrzeit Wechsel						9:00 - 10:00	
	Parkposition	4	3	1	2	Messposition		
	Bewässerungsanschluss	1	4	2	3	6		
KW41_2024	Datum Wechsel				07.10.2024	07.10.2024	07.10.2024	7,702
	Uhrzeit Wechsel	Umstellung Temperatur auf 22 Grad Winterbetrieb					10:00 - 10:30	
	Parkposition	4	3	1	Messposition	2		
	Bewässerungsanschluss	1	4	2	6	3		
KW42_2024	Datum Wechsel	14.10.2024			14.10.2024		14.10.2024	8,176
	Uhrzeit Wechsel						9:00 - 9:30	
	Parkposition	Messposition	3	1	4	2		
	Bewässerungsanschluss	6	4	2	1	3		
	Ende Wechsel 2024 - Living Wall bleibt in Messposition stehen							

	Position wechselt
	Position bleibt gleich

7.2.2 Messpositionenverlauf 2025

Kalenderwoche		1 LV	2 Wild	4 Wild_F	3 Wis	5 Wis_F	Wechseldatum	Zählerstand Wasser m³
KW19_2025	Datum Wechsel						05.05.2025	
	Uhrzeit Wechsel							
	Parkposition	4	Messposition	1	3	2		
	Bewässerungsanschluss	1	6	2	4	3		
KW20_2025	Datum Wechsel	12.05.2025	12.05.2025				12.05.2025	9,507
	Uhrzeit Wechsel							
	Parkposition	Messposition	4	1	3	2		
	Bewässerungsanschluss	6	1	2	4	3		
KW21_2025	Datum Wechsel	19.05.2025	19.05.2025	19.05.2025			19.05.2025	9,657
	Uhrzeit Wechsel							09:00:00
	Parkposition	4	1	Messposition	3	2		
	Bewässerungsanschluss	1	2	6	4	3		
KW22_2025	Datum Wechsel			26.05.2025		26.05.2025	26.05.2025	9,676
	Uhrzeit Wechsel							
	Parkposition	4	1	2	3	Messposition		
	Bewässerungsanschluss	1	2	3	4	6		
KW23_2025	Datum Wechsel				02.06.2025	02.06.2025	02.06.2025	9,892
	Uhrzeit Wechsel	3.6.2025 um 9:00 Umstellung auf Sommerbetrieb Soll-Temperatur 24 Grad						
	Parkposition	4	1	2	Messposition	3		
	Bewässerungsanschluss	1	2	3	6	4		
KW24_2025	Datum Wechsel		10.6.2025 (Mo Feiertag)		10.06.2025		10.06.2025	10,177
	Uhrzeit Wechsel							
	Parkposition	4	Messposition	2	1	3		
	Bewässerungsanschluss	1	6	3	2	4		
KW25_2025 und KW26	Datum Wechsel	16.06.2025	16.06.2025				16.06.2025	10,436
	Uhrzeit Wechsel							
	Parkposition	Messposition	4	2	1	3		
	Bewässerungsanschluss	6	1	3	2	4		
KW27_2025	Datum Wechsel	Di 1.7.2025	Di 1.7.2025	Di 1.7.2025	Di 1.7.2025 (Mo int. Konferenz)			11,510
	Uhrzeit Wechsel							
	Parkposition	4	2	Messposition	1	3		
	Bewässerungsanschluss	1	3	6	2	4		
KW28_2025	Datum Wechsel			Mo 7.7.2025		Mo 7.7.2025	Mo 7.7.2025	11,940
	Uhrzeit Wechsel							
	Parkposition	4	2	3	1	Messposition		
	Bewässerungsanschluss	1	3	4	2	6		
KW29_2025	Datum Wechsel				14.07.2025	14.07.2025	14.07.2025	12,355
	Uhrzeit Wechsel							
	Parkposition	4	2	3	Messposition	1		
	Bewässerungsanschluss	1	3	4	6	2		
KW30_2025	Datum Wechsel		21.07.2025		21.07.2025		21.07.2025	12,811
	Uhrzeit Wechsel							
	Parkposition	4	Messposition	3	2	1		
	Bewässerungsanschluss	1	6	4	3	2		
KW31_2025	Datum Wechsel	28.07.2025	28.07.2025				28.07.2025	13,189
	Uhrzeit Wechsel	30.7.2025 - Albedomessgerät von Grün- auf Referenzwand verschoben						
	Parkposition	4	2	3	Messposition	1		
	Bewässerungsanschluss	1	3	4	6	2		
KW32_2025	Datum Wechsel						28.07.2025	13,586
	Uhrzeit Wechsel							
	Parkposition	4	3	Messposition	2	1		
	Bewässerungsanschluss	1	4	6	3	2		
KW33_2025	Datum Wechsel			04.08.2025		04.08.2025	04.08.2025	
	Uhrzeit Wechsel							
	Parkposition	Messposition	3	4	2	1		
	Bewässerungsanschluss	6	4	1	3	2		

Position wechselt
 Position bleibt gleich

7.2.3 Zusatzmessungen Fassade, August 2025

Die 2025 unzureichende Zirkulation im Kühlkreislauf an der Fassadenprüfbox wurde am 12.8.2025 repariert, danach noch ein Messdurchgang mit folgenden Fassaden gemacht:

12.8. - 13.8.2025	Living Wall
14.8. - 17.8.2025	Null Messung ohne Begrünung
18.08.2025	Wisteria
19.08.2025	Wilder Wein
20.08.2025	Wisteria mit Fensterausschnitt
21.08.2025	Wilder Wein mit Fensterausschnitt

7.3 Anhang 3: Bewässerungszeiten troggebundene Vertikalbegrünung

7.3.1 Bewässerungszeiten trogebundene Vertikalbegrünung 2024

Modulcode	Zyklusbeginn	Zyklusende	Intervall	Wochentage	Anmerkung
FB_trog_PQ_oF	01.05.2024	08.05.2024	5 min.	Mo/Mi/Fr/So - morgens Mo/Mi/Fr - abends	-
	09.05.2024	13.05.2024	10 min.		-
	14.05.2024	19.06.2024	15 min.		-
	20.06.2024	03.07.2024	10 min.		Reduktion - zu feucht
	04.07.2024	24.07.2024	7 min.		-
	25.07.2024	26.08.2024	10 min.		-
	27.08.2024	08.09.2024	15 min.		-
	09.09.2024	11.09.2024	10 min.		-
	12.09.2024	16.09.2024	7 min.		Prognose <20°C
	17.09.2024	19.09.2024	5 min.		Ungültig
	20.09.2024	20.09.2024	7 min.		Prognose <20°C
	21.09.2024	25.09.2024	10 min.		-
	26.09.2024	16.10.2024	7 min.		Prognose <20°C
	17.10.2024	30.10.2024	3 min.	Mo/Fr - morgens Mi - abends	-
FB_trog_PQ_mF	01.05.2024	08.05.2024	5 min.	Mo/Mi/Fr/So - morgens Mo/Mi/Fr - abends	-
	09.05.2024	13.05.2024	10 min.		-
	14.05.2024	19.06.2024	15 min.		-
	20.06.2024	03.07.2024	10 min.		Reduktion - zu feucht
	04.07.2024	24.07.2024	7 min.		-
	25.07.2024	26.08.2024	10 min.		-
	27.08.2024	08.09.2024	15 min.		-
	09.09.2024	11.09.2024	10 min.		-
	12.09.2024	16.09.2024	7 min.		Prognose <20°C
	17.09.2024	19.09.2024	5 min.		Ungültig
	20.09.2024	20.09.2024	7 min.		Prognose <20°C
	21.09.2024	25.09.2024	10 min.		-
	26.09.2024	16.10.2024	7 min.		Prognose <20°C
	17.10.2024	30.10.2024	3 min.	Mo/Fr - morgens Mi - abends	-
FB_trog_WS_oF	01.05.2024	08.05.2024	5 min.	Mo/Mi/Fr/So - morgens Mo/Mi/Fr - abends	-
	09.05.2024	13.05.2024	10 min.		-
	14.05.2024	19.06.2024	15 min.		-
	20.06.2024	24.06.2024	5 min.		Reduktion - zu feucht
	25.06.2024	29.07.2024	2 min.		-
	30.07.2024	13.08.2024	4 min.		-
	14.08.2024	26.08.2024	8 min.		-
	27.08.2024	28.08.2024	10 min.		-
	29.08.2024	08.09.2024	15 min.		-
	09.09.2024	11.09.2024	5 min.		-
	12.09.2024	18.09.2024	4 min.		Prognose <20°C
	19.09.2024	19.09.2024	5 min.		Ungültig
	20.09.2024	20.09.2024	4 min.		Prognose <20°C
	21.09.2024	25.09.2024	5 min.		-
	26.09.2024	16.10.2024	4 min.		Prognose <20°C
	17.10.2024	30.10.2024	3 min.	Mo/Fr - morgens Mi - abends	-
FB_trog_WS_mF	01.05.2024	08.05.2024	5 min.	Mo/Mi/Fr/So - morgens Mo/Mi/Fr - abends	-
	09.05.2024	13.05.2024	10 min.		-
	14.05.2024	19.06.2024	15 min.		-
	20.06.2024	24.06.2024	5 min.		Reduktion - zu feucht
	25.06.2024	29.07.2024	2 min.		-
	30.07.2024	13.08.2024	4 min.		-
	14.08.2024	26.08.2024	8 min.		-
	27.08.2024	28.08.2024	10 min.		-
	29.08.2024	08.09.2024	15 min.		-
	09.09.2024	11.09.2024	5 min.		-
	12.09.2024	18.09.2024	4 min.		Prognose <20°C
	19.09.2024	19.09.2024	5 min.		Ungültig
	20.09.2024	20.09.2024	4 min.		Prognose <20°C
	21.09.2024	25.09.2024	5 min.		-
	26.09.2024	16.10.2024	4 min.		Prognose <20°C
	17.10.2024	30.10.2024	3 min.	Mo/Fr - morgens Mi - abends	-

7.3.2 Bewässerungszeiten trogebundene Vertikalbegrünung 2025

Modulcode	Zyklusbeginn	Zyklusende	Intervall	Wochentage	Anmerkung
FB_trog_PQ_of	02.05.2025	02.05.2025	5 min.	Mo/Mi/Fr - morgens	-
	09.05.2025	12.05.2025	4 min.		Prognose <20°C
	14.05.2025	14.05.2025	5 min.		-
	16.05.2025	16.05.2025	4 min.		Prognose <20°C
	19.05.2025	26.05.2025	5 min.		-
	27.05.2025	06.06.2025	10 min.	Mo/Mi/Fr – morgens und abends	-
	09.06.2025	09.06.2025	7 min.		Prognose <20°C
	11.06.2025	15.06.2025	10 min.	Tägl. – morgens und abends	-
	16.06.2025	18.06.2025	6 min.		Fehler Standortwechsel
	19.06.2025	19.06.2025	7 min.		Prognose >30 °C
	20.06.2025	22.06.2025	6 min.		-
	23.06.2025	23.06.2025	7 min.		Prognose >30 °C
	24.06.2025	24.06.2025	6 min.		-
	25.06.2025	26.06.2025	7 min.		Prognose >30 °C
	27.06.2025	28.06.2025	6 min.	Tägl. – morgens, mittags, abends	-
	29.06.2025	01.07.2025	7 min.		Prognose >30 °C
	01.07.2025	17.07.2025	15 min.	Tägl. – morgens und abends	-
	17.07.2025	21.07.2025	10 min.		-
	21.07.2025	23.08.2025	15 min.		-
	23.08.2025	24.08.2025	11 min.		Prognose <20°C
	25.08.2025	31.08.2025	15 min.		-
FB_trog_PQ_mF	02.05.2025	02.05.2025	5 min.	Mo/Mi/Fr - morgens	-
	09.05.2025	12.05.2025	4 min.		Prognose <20°C
	14.05.2025	14.05.2025	5 min.		-
	16.05.2025	16.05.2025	4 min.		Prognose <20°C
	19.05.2025	26.05.2025	5 min.		-
	27.05.2025	06.06.2025	10 min.	Mo/Mi/Fr – morgens und abends	-
	09.06.2025	09.06.2025	7 min.		Prognose <20°C
	11.06.2025	27.06.2025	10 min.	Tägl. – morgens und abends	-
	28.06.2025	17.07.2025	15 min.		-
	17.07.2025	21.07.2025	10 min.		-
	21.07.2025	22.08.2025	15 min.		-
	23.08.2025	24.08.2025	11 min.		Prognose <20°C
	25.08.2025	31.08.2025	15 min.		-
FB_trog_WS_of	02.05.2025	02.05.2025	5 min.	Mo/Mi/Fr - morgens	-
	09.05.2025	12.05.2025	4 min.		Prognose <20°C
	14.05.2025	14.05.2025	5 min.		-
	16.05.2025	16.05.2025	4 min.		Prognose <20°C
	19.05.2025	26.05.2025	5 min.		-
	27.05.2025	06.06.2025	10 min.	Mo/Mi/Fr – morgens und abends	-
	09.06.2025	09.06.2025	7 min.		Prognose <20°C
	11.06.2025	27.06.2025	10 min.	Tägl. – morgens und abends	-
	28.06.2025	17.07.2025	15 min.		-
	17.07.2025	21.07.2025	10 min.		-
	21.07.2025	08.08.2025	15 min.		-
	09.08.2025	10.08.2025	19 min.		Prognose >30°C
	11.08.2025	12.08.2025	15 min.		-
	13.08.2025	14.08.2025	19 min.		Prognose >30°C
	15.08.2025	18.08.2025	5 min.		Fehler Standortwechsel
	19.08.2025	22.08.2025	15 min.		-
	23.08.2025	24.08.2025	11 min.		Prognose <20°C
	25.08.2025	31.08.2025	15 min.		-
FB_trog_WS_mF	02.05.2025	02.05.2025	5 min.	Mo/Mi/Fr - morgens	-
	09.05.2025	12.05.2025	4 min.		Prognose <20°C
	14.05.2025	14.05.2025	5 min.		-
	16.05.2025	16.05.2025	4 min.		Prognose <20°C
	19.05.2025	26.05.2025	5 min.		-
	27.05.2025	06.06.2025	10 min.	Mo/Mi/Fr – morgens und abends	-
	09.06.2025	09.06.2025	7 min.		Prognose <20°C
	11.06.2025	27.06.2025	10 min.	Tägl. – morgens und abends	-
	28.06.2025	17.07.2025	15 min.		-
	17.07.2025	21.07.2025	10 min.		-
	21.07.2025	22.08.2025	15 min.		-
	23.08.2025	24.08.2025	11 min.		Prognose <20°C
	25.08.2025	31.08.2025	15 min.		-

