Bundesministerium
Innovation, Mobilität
und Infrastruktur

Projekt HEDWIG: Erhebung von Mess-Daten zur Wirkungsabschätzung von begrünten Gebäuden

Ergebnisbericht

Berichte aus Energie- und Umweltforschung 59a/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 (interimistisch): DI^{in} (FH) Isabella Warisch
Autorinnen und Autoren:
Univ.Prof. DI Dr. Rosemarie Stangl (Projektleitung), DI Nicole Jalits, BEng. Lars Mezger, DI Dr. Bernhard Scharf, DI Dr. Philipp Spörl, DI Maximillian Poiss, Priv.-Doz. DI Dr. Ulrike Pitha (Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau – IBLB, BOKU University)
Mag. (FH) Rudolf Bintinger (IBO – Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH)
DI Elisabeth Leitner, DI Susanne Formanek (Grünstattgrau Forschungs- und Innovations-GmbH)

Zitierweise:
Stangl R., Jalits N., Bintinger R., Mezger L., Spörl P., Scharf B., Poiss M., Pitha U., Leitner E., Formanek S. (2026). Projekt HEDWIG Erhebung von Mess-Daten zur Wirkungsabschätzung von begrünten Gebäuden. HEDWIG-Berichtsserie: Ergebnisbericht. Berichte aus Energie und Umweltforschung 59a/2026. Wien.

Wien 2026. Stand: August 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 Forschungs- und Technologieprogramm „Stadt der Zukunft“ des Bundesministeriums für Innovation, Mobilität und Infrastruktur (BMIMI). Dieses Programm baut auf dem langjährigen Programm „Haus der Zukunft“ auf und hat die Intention, Konzepte, Technologien und Lösungen für zukünftige Städte und Stadtquartiere zu entwickeln und bei der Umsetzung zu unterstützen. Damit soll eine Entwicklung in Richtung energieeffiziente und klimaverträgliche Stadt unterstützt werden, die auch dazu beiträgt, die Lebensqualität und die wirtschaftliche Standortattraktivität zu erhöhen. Eine integrierte Planung wie auch die Berücksichtigung aller betroffener Bereiche wie Energieerzeugung und -verteilung, gebaute Infrastruktur, Mobilität und Kommunikation sind dabei Voraussetzung.

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

Inhalt

1 Kurzfassung 10
Projektinhalt und -ziele 10
Methodik und Untersuchungsdesign 10
Zentrale Ergebnisse 11
Fazit und Ausblick 12
2 Abstract 13
Project Content and Objectives 13
Methodology and Research Design 13
Key Results 14
Conclusions and outlook 15
3 Ausgangslage 16
3.1 Projekthintergrund 16
3.2 Projektziele 17
3.3 Innovationsgehalt - Relevanter State of the Art 18
3.4 Projektstruktur und methodischer Zugang 20
4 Validierung und Selektion der Mess-Standorte 22
4.1 Vorselektierung und Auswahlkriterien 22
4.2 Räumlich-strukturelle Analyse | Dauermessobjekte Fassadenbegrünung [FB] 25
5 Dokumentation Methodik und Arbeitsanleitung zu Dauermonitoring und Messkampagnen 28
5.1 Messkonzept und Monitoring-Setup Außenraum 28
5.1.1 Messkonzept | Dauermessungen 28
5.1.2 Messkonzept | Messkampagnen 32
5.2 Messkonzept und Monitoring-Setup Innenraum 59
5.2.1 Messtechnische Erfassung und Qualitätssicherung 59
5.2.2 Sensorik, Datenübertragung und Monitoring 60
5.2.3 Bewertung thermischer Komfort 61
5.2.4 Methodik zur Ermittlung der systematischen Temperaturabweichung (Bias) 62
5.3 Methodik Simulation Innenraum 62
5.3.1 Methodik der Modellierung und thermischen Simulation 62
5.3.2 Modellvalidierung und statistische Gütekriterien 62
5.3.3 Randbedingungen und Modellierungsansatz 63

5.3.4 Modellierung Begrünung Fassade 64
5.3.5 Wechselwirkung von thermischer Trägheit und Fassadenbegrünung - Parameterstudie 65
5.3.6 Modellierung Gründachaufbauten 66
5.4 Datenmanagement 67
5.4.1 Messintervalle, Datenübertragung und Backup Außenraummonitoring 67
5.4.2 Datenübertragung, Datenmanagement und Validierung Innenraummonitoring 67
5.5 Datenprüfung und Datenanalyse Außenraum 67
5.5.1 Vorgehen Datenauswertung Dauermessobjekte 67
5.5.2 Vorgehen Datenauswertung Messkampagnen 69
5.5.3 Methodik PET Analyse 69
5.6 Datenüberprüfung 70
5.6.1 Statistische Valdierung 70
5.6.2 Messobjekt Steinbauer [DB1-e und DB1-i] 70
5.6.3 Messobjekt HTL St. Pölten [DB2-e und DB2-ri] 73
5.6.4 Globalstrahlung 77
5.7 Datenprüfung und Datenanalyse Innenraum 82
6 Vergleichende Ergebnisse Bauphysik und Innenraum 83
6.1 Übertemperatur – Intensität der Hitzeeinwirkung, alle Dauermessobjekte 83
6.2 Thermische Gebäudesimulation (IDA ICE) 84
6.2.1 Fassadenbegrünung troggebunden, Amtshaus Margareten 84
6.2.2 Dachbegrünung reduziert-intensiv, HTL ST. Pölten [DB-ri] 89
7 HEDWIG-Kennwertetabellen 99
7.1 Überblick über die HEDWIG-Messstandorte 99
7.2 Kennwertetabelle Vegetations- und mikroklimatische Parameter aus Tages-Messkampagnen für Fassadenbegrünung 101
7.3 Kennwertetabelle Vegetations- und mikroklimatische Parameter aus Tages-Messkampagnen für Dachbegrünungen 104
7.4 Kennwertetabellen Solarstrahlung und *Bioshading Coeffficient* BSC (Monatsmittelwerte) aus Dauermonitoring 107
7.5 Kennwertetabelle Wärmedurchfluss im Substrat und Substratfeuchte (Monatsmittel aus Dauermonitoring) für Dachbegrünungen 110
7.6 Kennwertetabelle Raumluft- und Oberflächentemperaturen aus Dauermessungen – Fassadenbegrünung 111

7.7 Kennwertetabelle Raumluft- und Oberflächentemperaturen aus Dauermessungen – Dachbegrünung 112
8 Synthese der Ergebnisse aus Dauermonitoring und Messkampagnen 113
8.1 Analyse und Interpretation der Monitoringdaten 113
8.1.1 Transmissivität, *Bioshading Coefficien*t BSC und Wechselwirkungen mit Deckungsgrad und Blattflächenindex LAI 113
8.1.2 Beziehungen zwischen WLAI und Deckungsgrad als potenzielle Vorhersagemodelle . 114
8.1.3 Stomatäre Leitfähigkeit und Transpiration 118
8.1.4 Luft- und Oberflächentemperatur im Außenraum 119
8.1.5 Reflexion und Absorption 121
8.1.6 Substratfeuchte und Wärmedurchfluss im Substrat 122
8.2 Bewertung der physiologischen Äquivalenztemperatur (PET): eine Näherungsanalyse und ihre Limitationen 123
8.3 Thermische Behaglichkeit Innenraum 126
8.4 Thermische Gebäudesimulation für ausgewählte, repräsentative Räume 128
8.4.1 Fassadenbegrünung am Beispiel Amtshaus Margareten 128
8.4.2 Dachbegrünung am Beispiel HTL St. Pölten 129
9 Reflexion zur Wirkungsabschätzung und zu relevanten Messwerten bzw. Kennwerten 131
9.1 Wirkungen im Außenraum 131
9.1.1 Lufttemperatur im Außenraum 131
9.1.2 Blatttemperatur, Oberflächentemperatur und Reflexion 132
9.2 Wirkungen im Innenraum 133
9.2.1 Oberflächentemperaturen im Innenraum 133
9.2.2 Thermische Gebäudesimulation Grünfassaden: Speichermassen 135
9.2.3 Thermische Gebäudesimulation Gründach: Ersatzparameter 135
9.3 Conclusio zum Stakeholder-Feedback (Workshop mit Stakeholder*innen und Expert*innen und Feedbackschleifen zur Wirkungsabschätzung und Kennwerten) 136
10 Empfehlungen für einfach anwendbare, standardisierte Prüfverfahren und Kennwerteerhebung 138
10.1 Empfehlungen für ein praxistaugliches Monitoring und Messkampagnen im Außenraum 138
10.2 Empfehlungen für ein praxistaugliches Monitoring und Messkampagnen im Innenraum 144
11 Herausforderungen und Limitationen 147
11.1 Realstandorte 147

11.2Messtechnik und Sensorik 148
11.2.1 Einschränkungen der Sensorinstallation und Limitierungen in der Datengenerierung 148
11.2.2 Datenoverload versus fehlende Messpunktwiederholungen 149
11.2.3 Limitationen der Lufttemperaturmessung bei der Erfassung komplexer thermischer Umgebungsbedingungen 150
11.2.4 Aussagekraft absolute versus relative Luftfeuchte 152
12 Fazit 154
12.1HEDWIG Key Findings 154
12.1.1 Unterscheidung Deckungsgrad der Zielfläche DG_{Ziel} und projektiver Deckungsgrad DG_{proj} 154
12.1.2 Korrelation zwischen (W)LAI und potenziellen Schätzgrößen 154
12.1.3 Einfluss von Pflanzenvitalität und Deckungsgrad auf die Strahlungsbilanz 155
12.1.4 Transpirationspotenzial von Grünfassaden 155
12.1.5 Wärmedurchfluss im Substrat 156
12.1.6 Verschattungswirkung der Fassadenbegrünung und solarer Energieeintrag 157
12.1.7 Energetische Bewertung fassadengebundener Begrünungssysteme 157
12.1.8 Synergieeffekte zwischen Dachbegrünung und thermischem Wärmeschutz 158
12.1.9 Transmission, Reflexion und Absorption 159
12.1.10Anregungen aus den Stakeholder Workshops 160
12.2Erreichung der Forschungsziele 161
12.3*Learnings* und Empfehlungen für weitere Feldstudien an Realobjekten zur Erhöhung/Erreichung der wissenschaftlichen Validität 165
13 Verzeichnisse 168
13.1Abbildungsverzeichnis 168
13.2Tabellenverzeichnis 172
13.3Literaturverzeichnis 174
14 Anhang 180
14.1Data Management Plan (DMP) 180
14.1.1 Datenerstellung und Dokumentation 180
14.1.2 Ethische, rechtliche und Sicherheitsaspekte 180
14.1.3 Datenspeicherung und -erhalt 180
14.1.4 Wiederverwendbarkeit der Daten 181
14.2Dokumentation Sensorinstallationen 181

14.3PET-Code aus der Python-Bibliothek pythermalcomfort 3.9.1 183

1 Kurzfassung

Projektinhalt und -ziele

Das Projekt HEDWIG zielte darauf ab, die Wirkungen von Bauwerksbegrünung im Innen- und im Außenraum zu erfassen und daraus fundierte und belastbare Leistungskennwerte zu berechnen. Die Erkenntnisse sollen ein weiteres Mainstreaming von Bauwerksbegrünungen befördern und Grundlage für Argumentarien bzw. Prüfprozesse sein. Angesichts des fortschreitenden Klimawandels und der zunehmenden Überhitzung urbaner Räume (Urban Heat Island Effekt) gewinnen Grüne Infrastrukturen (GI) als Strategie zur Klimawandelanpassung massiv an Bedeutung. Obwohl die positiven Wirkungen von Bauwerksbegrünungen – wie Verdunstungskälte, Beschattung und Biodiversität – qualitativ anerkannt sind, mangelt es in der Planungspraxis oft an belastbaren, standardisierten Messdaten zur quantitativen Wirkungsabschätzung.

Das Projekt **HEDWIG** adressierte diese Lücke, indem es über einen Zeitraum von zwei Jahren ein systematisches Dauermonitoring sowie ergänzende Messkampagnen an je 8 repräsentativen Dach- und Fassadenbegrünungsobjekten in Wien und Niederösterreich durchführte. Ziel war, die Wirkungen von normgerechten Bauwerksbegrünungen, repräsentative Vegetationsparameter und Leistungskennwerte zu ermitteln, die als Grundlage für thermische Gebäudesimulationen und zur Optimierung von Planungsprozessen dienen.

Die **HEDWIG-Berichtsserie** umfasst insgesamt 4 eigenständige Publikationen in der Schriftenreihe „*Berichte aus Energie- und Umweltforschung*“: Der vorliegende Ergebnisbericht umfasst die Dokumentation der Methodik samt Arbeitsanleitung, und die **HEDWIG-Kennwertetabellen**, die Synthese sowie Empfehlungen für ein praxistaugliches Monitoring (Stangl et al. 2026). Der **HEDWIG-Datenkatalog** enthält sämtliche Standort- und Messdaten an den HEDWIG-Messobjekten sowohl aus dem Dauermonitoring als auch aus den Messkampagnen im Aussen- und im Innenraum (Jalits et al. 2026). Weiters stehen in derselben Schriftenreihe die **Studie zur Erhebung des internationalen Stands des Wissens** (Jalits et Stangl 2026) sowie die **Dokumentation der Stakeholder*inneneinbindung** (Leitner et al. 2026) als eigenständige Publikationen zur Verfügung.

Methodik und Untersuchungsdesign

Die Untersuchung basierte auf einem multidimensionalen Ansatz, der mikroklimatische, bauphysikalische und pflanzenphysiologische Parameter verknüpft. Ergänzend wurden Stakeholder*innen und Fachexpert*innen aus dem Netzwerk von GRÜNSTATTGRAU miteinbezogen, um die transdisziplinäre Nutzbarkeit und Nachvollziehbarkeit der Daten zu gewährleisten.

Mess-Setup und Sensorik

HEDWIG entwickelte und verifizierte ein Mess-Setup, das zur Sammlung von validen Messdaten, deren Vergleichbarkeit und zur Evaluierung von Demonstrationsprojekten mit Begrünungen geeignet ist. Die Dokumentation der Methodik steht als Arbeitsanleitung zur Verfügung.

Außenraum: Einsatz von Wetterstationen und Dauersensorik zur Erfassung von Globalstrahlung, Lufttemperatur und Feuchtigkeit vor sowie hinter der Vegetation sowie Wärmedurchfluss im Substrat. Vegetationstechnisch relevante pflanzenphysiologische Parameter (Deckungsgrade, (Wand)Blattflächenindex, elektrische Leitfähigkeit u.a.) wurden in Messkampagnen erhoben. Zusätzlich wurde Sensorik zur Ermittlung der kurzwelligen Strahlungsbilanz eingesetzt und mittels Thermografie gestützt.

Bauphysik und Innenraum: Zur Erfassung der Raumluftkonditionen und thermischen Interaktion mit der Gebäudehülle kam ein hybrides Messnetzwerk zum Einsatz. Zur Bewertung des thermischen Komforts kamen 2 komplementäre Ansätze zur Anwendung (adaptives Komfortmodell nach ÖNORM EN 16798-1 sowie Behaglichkeitsmodell nach Freymark und Leusden). Die energetische Bewertung und Quantifizierung der Kühlleistung durch die Bauwerksbegrünungen erfolgte exemplarisch mittels numerischer Simulation (IDA ICE). Ziel war, die realen physikalischen Effekte der Vegetation – insbesondere die Reduktion des solaren Eintrags und die thermische Pufferwirkung – in ein energetisches Rechenmodell zu übersetzen.

Zentrale Ergebnisse

Mikroklima, Strahlungsreduktion und *Bioshading Coefficient*

Ein wesentlicher Effekt der Begrünungen ist die natürliche Beschattung. Messungen zeigten, dass dichte Pflanzenkörper (z.B. beim Objekt MA48 Gürtel mit einem WLAI von bis zu 6,5) die Solarstrahlung massiv reduzieren können. In Hitzewellenphasen wurde eine **Reduktion der Solarstrahlung hinter dem Grünkörper von bis zu 97 %** gemessen. Der **Grünverschattungsfaktor F_{bs}** (*Bioshading Coefficient* BSC) dient hierbei als **Schlüsselkennwert** und solide Vergleichsgrundlage für technischen Sonnenschutz.

Oberflächentemperaturen und Verdunstung

Infrarotaufnahmen verdeutlichen die thermische Entlastung der Fassaden. Während konventionelle Bauteile (z.B. Blechattiken oder verputzte Wände) Oberflächentemperaturen bis 60 °C erreichten, blieben begrünte Flächen bis **20 °C kühler**. Diese Kühlleistung resultiert primär aus der Transpiration der Pflanzen, messbar durch die stomatäre Leitfähigkeit. Vitale Kletterpflanzen verdunsten hier **1,3 l/h/m²**. Transparent wurde, dass diese Wirkungen bei extensiven Sedum-Gründächern oder bei fehlender Deckung massiv eingeschränkt sind.

Strahlungsbilanz: Transmission, Reflexion und Absorption

Auf Basis der Messkampagnen konnten näherungsweise kurzwellige Strahlungbilanzen an allen HEDWIG-Objekten ermittelt werden. Daraus geht hervor, dass die Grünkörper **bis 59 % der eintreffenden Strahlung absorbieren** und bei ausreichender Wasserversorgung in nicht fühlbare (latente) Wärme umwandeln**.** Die Bilanzkomponenten sowie Albedo-Werte von allen Objekten stehen in den HEDWIG Kennwertetabellen zur Verfügung.

Bauphysikalische Wirkungen und thermischer Innenraumkomfort

Nach dem **adaptiven Komfortmodell** lagen die operativen Raumtemperaturen während der Sommermonate fast ausschließlich in den **Komfortkategorien I (hohes Komfortniveau) und II**

(Normalstandard). Kritische Überhitzungsstunden (Kategorie III oder schlechter) traten kaum auf. Die Wirkung der Fassadenbegrünungen auf die opaken Fassadenbauteile wurde maßgeblich beeinflusst durch die ungedämmten Wandstärken und der damit verbundenen thermischen Speichermasse.

Wärmestrom und Feuchte im Substrat

Die Untersuchung der Dach- und Fassadenaufbauten zeigte, dass Begrünungen bzw. die Substratschichten den Wärmeeintrag in das Gebäude im Sommer signifikant puffern. An heißen Tagen wurden bei wandgebundenen Systemen mit Bewässerung negative Wärmeströme **(Wärmeabgabe von der Gebäudehülle nach außen)** gemessen, was auf eine aktive Kühlwirkung durch die feuchte Substratschicht und die Evapotranspiration der Vegetation hindeutet.

Bei *Living Walls* mit automatisch bewässerten Vegetationsträgern verstärkt sich der Wärmestrom vom Gebäude nach außen. Eine hohe Substratsättigung der Gründächer (z.B. nach Regenereignissen) erhöht die thermische Trägheit des Aufbaus massiv und verhindert Temperaturspitzen im Bauteil.

Fazit und Ausblick

Die HEDWIG-Ergebnisse bestätigen die hohe Wirksamkeit von Begrünungen als natürliche Kühlsysteme und Strahlungsschilder, wie sie auch in zahlreichen internationalen Publikationen berichtet werden (Jalits et Stangl 2026). Die im Projekt erhobenen Daten dienten zur Validierung von thermischen Gebäudesimulationen. Es wurde eine hohe Korrelation zwischen den Messdaten und den Modellen festgestellt (z.B. $R^2 > 0{,}99$ für Temperaturdaten). Parameterstudien zeigten, dass die Kombination aus thermischer Trägheit der Gebäudemasse und der kühlenden Wirkung der Fassadenbegrünung die effektivste Strategie gegen sommerliche Überhitzung darstellt.

Das Projekt HEDWIG liefert erstmals eine breite, empirisch abgesicherte Datenbasis für verschiedene Bauwerksbegrünungstypen unter realen Standortbedingungen. Die entwickelten Kennwerte ermöglichen eine präzisere Integration von grünen Infrastrukturen in Simulationswerkzeuge. Sämtlicher HEDWIG-Output steht open access zur Verfügung, um das *Mainstreaming* von Bauwerksbegrünungen in der Architektur und Stadtplanung zu fördern und die Grundlage für künftige Zertifizierungs- und Genehmigungsprozesse zu schaffen.

2 Abstract

Project Content and Objectives

The **HEDWIG project** aimed to record the effects of building greenery on the indoor and outdoor environment and to calculate well-founded and reliable performance parameters. The findings are intended to promote further mainstreaming of building greening and to be the basis for argumentation and review processes. In view of advancing climate change and the increasing overheating of urban areas (Urban Heat Island Effect), green infrastructures (GI) are becoming especially important as a strategy for climate change adaptation. Although the positive effects of building greenery – such as evaporative cooling, shading and biodiversity – are qualitatively recognised, there is often a lack of reliable, standardised measurement data for quantitative impact assessment in planning practice.

The HEDWIG project addressed this gap by carrying out systematic continuous monitoring over a period of two years as well as supplementary measurement campaigns on 16 representative roof and façade greening objects in Vienna and Lower Austria. The aim was to determine the effects of standard-compliant greening of buildings, representative vegetation and performance parameters, which serve as a basis for thermal building simulations and for the optimisation of planning processes.

The HEDWIG report series comprises 4 stand-alone reports in the same publication series „*Berichte aus Energie- und Umweltforschung*“: The here presented Report of Results includes the full documentation of the applied methodologies and instructions, the **HEDWIG-Parameter Tables**, the synthesis and recommendations for a practical monitoring concept (Stangl et al. 2026). The **HEDWIG-Data Catalogue** (Jalits et al. 2026) presents all object and outdoor and indoor measurement data of all HEDWIG-sites collected during the permanent monitoring and during measurement campaigns. Additionally, the **Study on the International State-of-Knowledge** (Jalits et Stangl 2026) and the **Documentation on the Stakeholder-Engagement** (Leitner et al. 2026) are available as stand-alone-publications.

Methodology and Research Design

The study was based on a multi-dimensional approach linking microclimatic, building-physical and plant physiological parameters. In addition, stakeholders and experts from the GRÜNSTATTGRAU network were involved to ensure the transdisciplinary usability and traceability of the data.

Measurement setup and sensors

HEDWIG developed and verified a measurement setup that is suitable for the collection of valid measurement data, their comparability and for the evaluation of demonstration projects in the building greenery sector. The documentation of the methodology is considered a working manual.

Outdoor conditions: A measurement-setup was developed and verified based on permanent monitoring and on measurement campaigns. It included the use of weather stations and permanent sensors to record global radiation, air temperature and humidity in front of and behind vegetation as well as substrate heat flow. Vegetation-related plant physiological parameters (coverage ratios, (wall) leaf area index, electrical conductivity, etc.) were collected in measurement campaigns. A sensor-based registration of the short-wave radiation balance was supported by thermography.

Building physics and interior conditions: A hybrid measurement network was used to record the indoor air conditions and thermal interaction with the building envelope. For the evaluation of thermal comfort, 2 complementary approaches were used (adaptive comfort model according to ÖNORM EN 16798-1 and comfort model according to Freymark and Leusden). The exemplary energy assessment and quantification of the cooling capacity by the building greening was carried out using numerical simulation (IDA ICE). The aim was to translate the real physical effects of vegetation – in particular the reduction of the solar input and the thermal buffering effect – into an energetic calculation model.

Key Results

Microclimate, Reduction of Radiation and Bioshading Coefficient

A major effect of greening is natural shading. Measurements showed that dense plant bodies (e.g. in the case of the object MA48 Gürtel with a WLAI of up to 6.5) can massively reduce solar input. In heat wave phases, a **reduction of up to 97% in solar radiation** behind the green body was measured. The Bioshading Coefficient BSC serves as a key characteristic value and solid basis for comparison for technical sun protection.

Surface temperatures and evaporation

Infrared images illustrate the thermal relief of façades. While conventional components (e.g. sheet metal attics or plastered walls) reached surface temperatures of up to 60 °C, greened areas remained up to **20 °C coole**r. This cooling capacity results primarily from the transpiration of the plants, measurable by the stomatal conductivity. Vital climbing plants evaporate up to **1.3 l/h/m²** here. It became apparent that these effects are massively limited in the case of extensive sedum green roofs or in the case of lack in coverage.

Radiation balance: transmission, reflection and absorption

On basis of the measurement campaigns, approximate short-wave radiation balances could be determined at all HEDWIG objects. This revealed that the leaf bodies **absorb up to 59 %** of the incoming radiation and convert it into non-perceptible (latent) heat if there is sufficient water supply. The balance component and albedo values of all objects are available in the HEDWIG Parameter Tables.

Building Physics Effects and Indoor Thermal Comfort

According to the adaptive comfort model, the operating room temperatures during the summer months were almost exclusively in **comfort categories I (high comfort level) and II (normal**

standard). Critical overheating hours (category III or worse) hardly occurred. The effect of the façade greening on the opaque façade components was significantly influenced by uninsulated wall thicknesses and the associated thermal storage mass.

Heat Flux and Soil Moisture in the Substrate

The examination of the roof and façade structures showed that greenery or the substrate layers significantly buffer the heat flow towards the building envelope during summer. On hot days, **negative heat fluxes** were measured in wall-based, irrigated systems. This indicates **outward heat emission from the building envelope** and an active cooling effect due to the moist substrate and the vegetation layer.

In the case of living walls with automatic irrigation, the heat flow from the building envelop outwards is amplified. A high substrate saturation of the green roofs (e.g. after rain events) particularly increases the thermal inertia of the structure and prevents temperature peaks in the component.

Conclusions and outlook

The HEDWIG results confirm the high effectiveness of building greenery as natural cooling systems and radiation shields as reported in many international studies (Jalits et Stangl 2026). The data collected were used to validate thermal building simulations. A high correlation between the measurement data and the models was found (e.g. $R^2 > 0.99$ for temperature data). Parameter studies showed that the combination of thermal inertia of the building mass and the cooling effect of the façade greening is the most effective strategy against summer overheating.

The HEDWIG project provides a novel and broad, empirically validated database for different types of building greening under real site conditions. The derived parameters enable a more precise integration of building greenery into simulation tools. All HEDWIG output is available open access to promote the mainstreaming of building greening in architecture and urban planning and to create the basis for future certification and approval processes.

3 Ausgangslage

3.1 Projekthintergrund

Die physikalischen und gesellschaftsrelevanten Wirkungen von Grünen Infrastrukturen (GI) sind vielfach beschrieben und weitläufig anerkannt (Europäische Union 2014, John et al. 2019, European Commission 2021). Zu ihnen zählen beispielsweise Beschattungsleistung, Transpiration, Verdunstungskälte, Temperaturminderung, Beitrag zur Klima- und Naturgefahrenresilienz, Beitrag zum Regenwassermanagement, Biodiversitätserhöhung sowie positive Auswirkungen auf psychische und physische Gesundheit. Aufgrund ihrer hohen Bedeutung besteht ein internationaler Konsens hinsichtlich Notwendigkeit der Erweiterung von GI zur Klimawandelanpassung (Nakamura 2022, European Commission 2021, Estreguil et al. 2019,). Die Europäische Kommission hat GI 2013 mit ihrer Strategie auf die politische Agenda gehoben und in verschiedenen Rahmenplänen und Policy Papers inkludiert, die in unterschiedlicher Intensität und Geschwindigkeit von den Mitgliedstaaten aufgegriffen wurden (Europäische Union 2014, Europäische Kommission 2019, UK Green Building Council 2020, Marot et al. 2021). Viele Städte verpflichteten sich zur Erhöhung des Grünanteils und zu GI-Maßnahmenplänen (Magistrat der Stadt Wien 2009, MA22 2015, Ville de Paris 2025, Ellen MacArthur Foundation 2014).

Obgleich sich weltweit zahlreiche Forschungsarbeiten mit den Effekten von Grüner Infrastruktur auf unterschiedlichen Ebenen und aus unterschiedlichen Perspektiven auseinandergesetzt haben (Navarrete-Hernandez et Laffan 2019, Europäische Union 2014, John et al. 2019,), sind gesicherte Datenlagen zu den Wirkungen – insbesondere von Bauwerksbegrünungen – nach wie vor nicht verfügbar. Die Studie „Wirkungen der grünen Stadt“ (Stangl et al. 2019) hat einen Überblick zum internationalen Stand des Wissens hinsichtlich messbarer Wirkungen und Parameter von Begrünungen aufgezeigt. Hierbei konnte aufgezeigt werden, dass Kühleffekte und die damit verbundenen Energieeinsparungen häufig Schwerpunkte wissenschaftlicher Arbeiten sind. Die in der Literaturstudie erhobenen Parameter weisen ein breites Spektrum auf, sind jedoch oftmals durch ungenaue Darstellungen und Angaben von zugrunde liegenden Daten oder Mess-Setups, der Nicht-Vergleichbarkeit der Parameter sowie fehlenden Kausalzusammenhängen als nicht repräsentativ oder reproduzierbar zu bezeichnen. Der Wissensstand per se bleibt nach wie vor fragmentiert und teilweise widersprüchlich, worunter die Aussagekraft auch neuerer Studien stark leidet. Weiters sind Investitionen in GI umstritten, was vor allem auf die fehlende Nachweisbarkeit von Kosten-Nutzen-Rechnungen zurückzuführen ist.

Um einen ersten Schritt zur Schließung der Wissenslücke zu setzen, wurde im Rahmen vom Projekt HEDWIG eine erweiterte Studie zum Update des internationalen Stands des Wissens durchgeführt (Jalits et Stangl 2026). Darauf aufbauend wurden durch HEDWIG Messdaten an normgerecht ausgeführten, etablierten Bauwerksbegrünungen (Dach sowie Fassade) mit adulten Grünstrukturen an 16 ausgewählten Standorten erhoben. Durch den Einsatz von etablierten und standardisierten Messverfahren sowie der Verknüpfung von Dauermessungen mit Messkampagnen wurden Vegetationskennwerte und mikroklimatisch sowie bauphysikalisch relevante Kennwerte im Zeitraum von zwei Jahren (2024-2025) gesammelt und ausgewertet. HEDWIG

generierte damit fundierte und reproduzierbare Daten an realen Gebäudestrukturen. Das Ziel war, an heimischen Standorten aussagekräftige Messdaten zu erheben, um eine Argumentations- und Entscheidungsgrundlage für städtebauliche Prozesse und Planungen zu schaffen. Die erhobenen Kennwerte dienen der Beurteilung der Wirkungen im Innenraum (Raumklima) sowie im Außenraum (Mikroklima) an Gründächern und -fassaden und werden als Open Content für künftige Forschungs- und Demonstrationsprojekte zur Verfügung gestellt werden. Komplementiert wurden diese durch Empfehlungen zu relevanten Erhebungsparametern, der Darlegung eines detaillierten Ablaufschemas für ein standardisierbares Mess- und Analyseverfahrens sowie der Entwicklung von Standardkennwerten für Gebäude-begrünungstypen.

3.2 Projektziele

HEDWIG zielte darauf ab, die Wirkungen von Bauwerksbegrünung im Innen- und im Außenraum zu erfassen und daraus fundierte und belastbare Leistungskennwerte zu berechnen. Die Erkenntnisse sollen ein weiteres Mainstreaming von Bauwerksbegrünungen befördern und Grundlage für Argumentarien bzw. Prüfprozesse sein. Das hier vorgeschlagene Messkonzept generiert die erforderlichen wissenschaftlichen Grundlagen auf effiziente und wirtschaftliche Weise. Als wesentliche Vorgabe dienten dabei der Leitfaden „*Ergänzende Vorgaben für das Monitoring von Demonstrationsgebäuden und -quartieren*“, Erfahrungen und Wissen aus Vorprojekten (s. e-call „Ergebnisse aus anderen Projekten“, Stangl et al. 2019) sowie die Verbindung bestmöglicher Kompetenzen in allen relevanten Aspekten in der Projektgruppe. Das HEDWIG-Messkonzept umfasst relevante Komponenten der Vegetationsstrukturen, des Mikroklimas, des Energiehaushaltes und der Bauphysik, welche in ihrem Zusammenwirken ein bestmögliches Verständnis über die Wirkungsleistungen, zu Grunde liegenden Prozesse, Kausalzusammenhänge sowie Rahmenbedingungen erlaubt.

HEDWIG verfolgte folgende Ziele:

Ziel 01: Generierung von Messdaten im Außenraum

- 01.1 Anwendung und Validierung des HEDWIG-Messkonzepts an 15 Standorten: Dauermessungen und Messkampagnen zur Erfassung von Vegetationsparametern und energiehaushaltsrelevanten Parametern;
- 01.2 Bewertung des Mikroklimas, thermische Behaglichkeit im Außenraum und ihre Zusammenhänge mit den vorhandenen Grünstrukturen an Dach und Fassade sowie den klimatischen Bedingungen.

Ziel 02: Generierung von Messdaten im Innenraum

- 02.1 Anwendung und Validierung des HEDWIG-Messkonzepts im Innenraum: Messkampagnen mit Dauermessungen zur Erfassung des Innenraummikroklimas und Bewertung der thermischen Behaglichkeit;
- 02.2 Thermische Gebäudesimulation für Referenzszenarien und zur Wirkungsabschätzung mit und ohne Begrünung (Wärmeeinträge, Wärmeverluste).

Ziel 03: Schaffung einer standardisierten Datenbasis

- 03.1 Entwicklung und Anwendung eines standardisierbaren HEDWIG-Analysekonzepts;
- 03.2 Ableitung eines HEDWIG-Datenkatalogs zu mikroklima- und energiehaushaltsrelevanten Vegetationsparametern;
- 03.3 Ableitung eines HEDWIG-Datenkatalogs zu Messelementen zur Wirkungsabschätzung von Bauwerksbegrünungen für den Gebäudeinnen- und -außenraum.

Ziel 04: Standardisier-, reproduzier- und übertragbare Messmethodik und Analyseverfahren

- 04.1 Validierung und Optimierung des HEDWIG-Mess- und Analysekonzepts für die Übertragbarkeit und Reproduzierbarkeit;
- 04.2 dokumentierte Arbeitsanleitung zum HEDWIG-Mess- und Analyseverfahren zur Wirkungsabschätzung für den gesamten Prozess: Mess-Setup, Datengenerierung, Datenmanagement, Datendarstellung, Interpretation, Ableitung und Bewertung der Kennwerte.

Ziel 05: Ableitung von Kennwerten zur Wirkungsabschätzung von Gründächern und -fassaden

- 05.1: Generierung vergleichbarer, standortunabhängig gültiger Kennwerte zur mikroklimatischen Performanz im Innen- und im Außenraum als Open-Content-Verfügbarkeit;
- 05. Ableitung von wirkungsrelevanten Kenngrößen und Wechselwirkungen von Grünstrukturen im Außenraum;
- 05.3 Rückschlüsse auf die Verringerung von Wärmeeinträgen oder Wärmeverlusten durch Gründächer und -fassaden im Innenraum;
- 05.4 Empfehlungen für standardisierte Kenngrößen, für ihre praxistaugliche Erhebung (indirekte Verfahren) und Bewertungsansätze sowie zur Weiterentwicklung bzw. Integration in bestehende Modelle und Bewertungsverfahren (z.B. Energieausweis, Passivhaus-Standard, div. Nachhaltigkeitsstrategien).

3.3 Innovationsgehalt - Relevanter State of the Art

Bretschneider et Scharf (2018) entwickelten ein Verfahrensmodell zur Optimierung mikroklimawirksamer Umgestaltung und Begrünung eines Straßenraumes (Aspangstraße) samt angrenzender Bebauung. Dies zeigte, dass Begrünungen, insbes. an Fassaden, eine wesentliche Rolle für den Energiehaushalt von Städten spielen. Die Beschattungsleistung gilt als die wesentlichste Funktion von GI zur Verbesserung des thermischen Komforts und des urbanen Energiehaushalts (Kuttler 2013). Ähnlich wie Bäume mit hoher Kronendichte weisen Gebäudebegrünungen mit hoher Blattbedeckung optimale Beschattungsleistung und großes Energieeinsparungspotenzial auf (Stangl et al. 2019), was aus mikroklimatischer Sicht sowie für den Gebäudeenergieeintrag von Bedeutung ist (Scharf et Stangl 2021). Die Wirkung hängt von mehreren spezifischen Eigenschaften der Pflanzen ab: Blattflächen (LAI), Blattanordnung zueinander, Winkel zur Sonne, Lichtstärke und Frequenzen, Reflektionsgrad, Absorptionsgrad, Transmissivität ua. Eine zunehmende Anzahl an Arbeiten im erweiterten Themenfeld bieten wichtige Grundlagen über Effekte und ihre Erfassung (Überblick in Stangl et al. 2019, Schmidt 2010, Pfoser et al. 2013, Schmauck 2019, Scharf 2020). Standardkennwerte (z.B. Wärmedurch-

fluss) für bauphysikalische Berechnungen von energietechnisch relevanten Baumaterialien sind dokumentiert für gängige Materialien (Putz, Dämmstoffe, Ziegel, Dachabdichtungen, Kiesschüttungen, Blech etc.; Kresser et al. 2021, Österreichisches Institut für Bautechnik 2023). Wirkungen von Gründächern und Living Walls auf energetisch relevante Prozesse wurden aufgezeigt (z.B. Wärmeflussreduktion durch Gründächer in Abhängigkeit ihrer spezifischen Materialien und Aufbauhöhen von +10 bis-20 W/m2; Scharf 2020, Scharf et Stangl 2021). Tudiwer (2019) stellte bei fassadengebundenen Systemen Verbesserungen des Wärmedurchlasswiderstandes von 0,39 m²K/W fest. Eine 20 cm starke Wärmedämmplatte weist üblicherweise einen Wert von 4-5 m²K/W auf. Daher wird der Effekt bei Neubauten minimal und auch bei Altbauten nicht sehr hoch eingeschätzt. In Kresser et al. (2021) wurde untersucht, inwiefern gebäudeintegrierte Begrünungen in der Energieausweisberechnung implementiert werden könnten, der neben dem Energieverbrauch auch den Sommerkomfort berücksichtigt. Verschattung, verbessertes Mikroklima und erhöhter Wärmedurchgangswiderstand durch Begrünungen kann den thermischen Komfort erhöhen und Energieverbrauch (Heizen, Kühlen) verringern. Luftqualität, Lichtverhältnisse, Raumakustik und Raumtemperaturen sind maßgebliche physikalische Größen (Voss et al. 2016, Austrian Standards International 2024).

Es ergeben sich folgende Defizite:

1. Daten für vergleichbare Maße für Grünverschattung (z.B. Beschattungsindex, Transmissivität) lagen vor Projektbeginn nicht vor.
2. Pflanzeneigenschaften und -prozesse im Zusammenhang mit Sonnenstrahlung sind wenig erforscht oder reproduzierbar belegt.
3. Allgemeingültige Ableitungen sind aufgrund der starken Baukörper- und Standortabhängigkeit und abweichender Methoden nicht möglich.
4. Für relevante Grünsysteme, Systembestandteile inkl. Pflanzenkomponenten liegen keine Standardkennwerte vor.
5. Standortübergreifende Verknüpfungen von Innen- und Außenwirkungen wurden bisher nicht angestellt.

Neu- und Mehrwert durch HEDWIG

HEDWIG hat standardmäßig mikroklimatische Daten und zu Pflanzen- und Systemkomponenten erhoben und den Zusammenhang zw. Vegetations- und bauphysikalischen Parametern geprüft. Daraus entstehen eine valide Datenbasis, und Kennwerte für thermischen Komfort und Energieausweis können abgeleitet werden. Ein Fokus lag auf der durch Begrünung verbesserten thermischen Behaglichkeit. Mittels Referenzszenarien aus Simulationen sollte die Wirkung auf den Innenraum mit und ohne Begrünung abgeschätzt werden (Steiner 2021). Die standortübergreifende Messung, Aufbereitung, Interpretation und Vergleich wurden bisher in keiner bekannten Studie oder in größerem Umfang durchgeführt und stellen einen besonderen Mehrwert von HEDWIG dar. Erwartet wurde ein Einblick darüber, ob sich Muster wiederholen bzw. welche gebäude- und materialspezifischen Abhängigkeiten auftreten.

3.4 Projektstruktur und methodischer Zugang

Abbildung 1 zeigt den methodischen Ansatz von HEDWIG auf. An insgesamt 16 Objekten wurden Messungen im Außenraum an der Begrünungsstruktur und im Innenraum durchgeführt. Dies inkludierte ein Dauermonitoring an 8 Standorten sowie zusätzliche Messkampagnen (an insgesamt 16 Objekten). Die gewonnenen Daten wurden als Eingangsdaten für thermische Gebäude-simulationen verwendet. Das Ziel war, auf Basis der Erhebungen an Realstandorten ein einfach anwendbares, brauchbares und valides Mess- und Analyseverfahren abzuleiten und Kennwerte zu den Vegetationsstrukturen und Leistungsparametern zu gewinnen. In Abbildung 2 sowie Abbildung 3 sind die Messkonzepte beispielhaft anhand einer modularen Fassadenbegrünung sowie einer extensiven Dachbegrünung schematisch dargelegt.

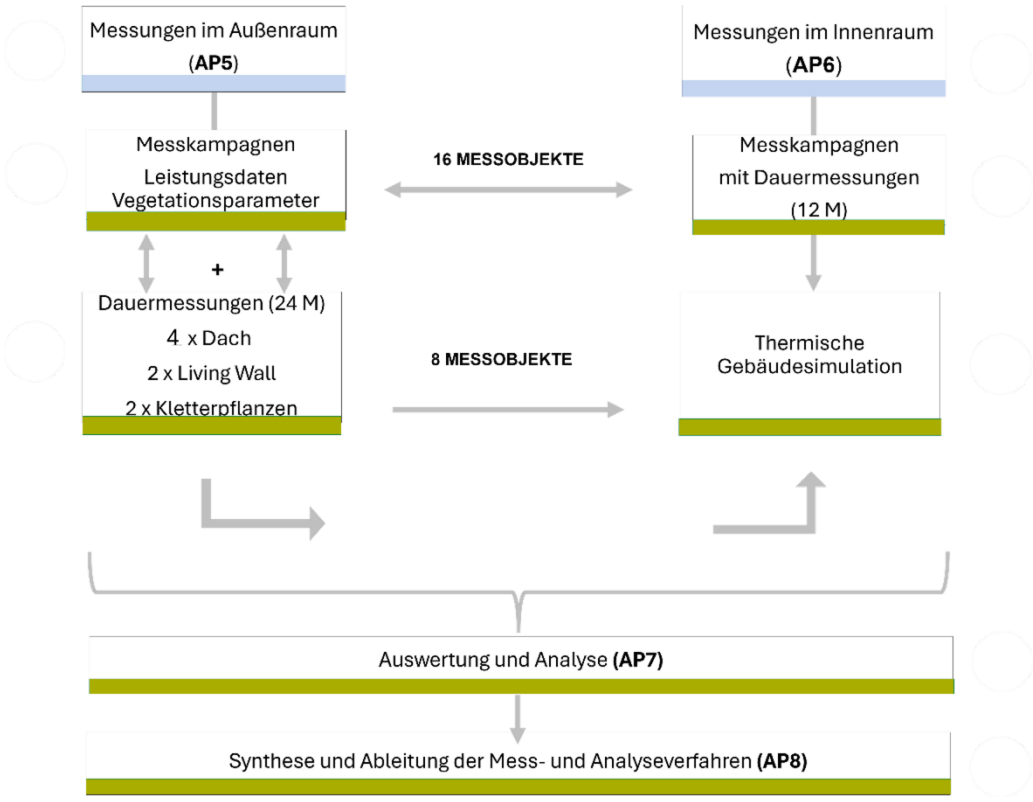


Abbildung 1: Prozessgrafik Projekt HEDWIG (© IBLB).

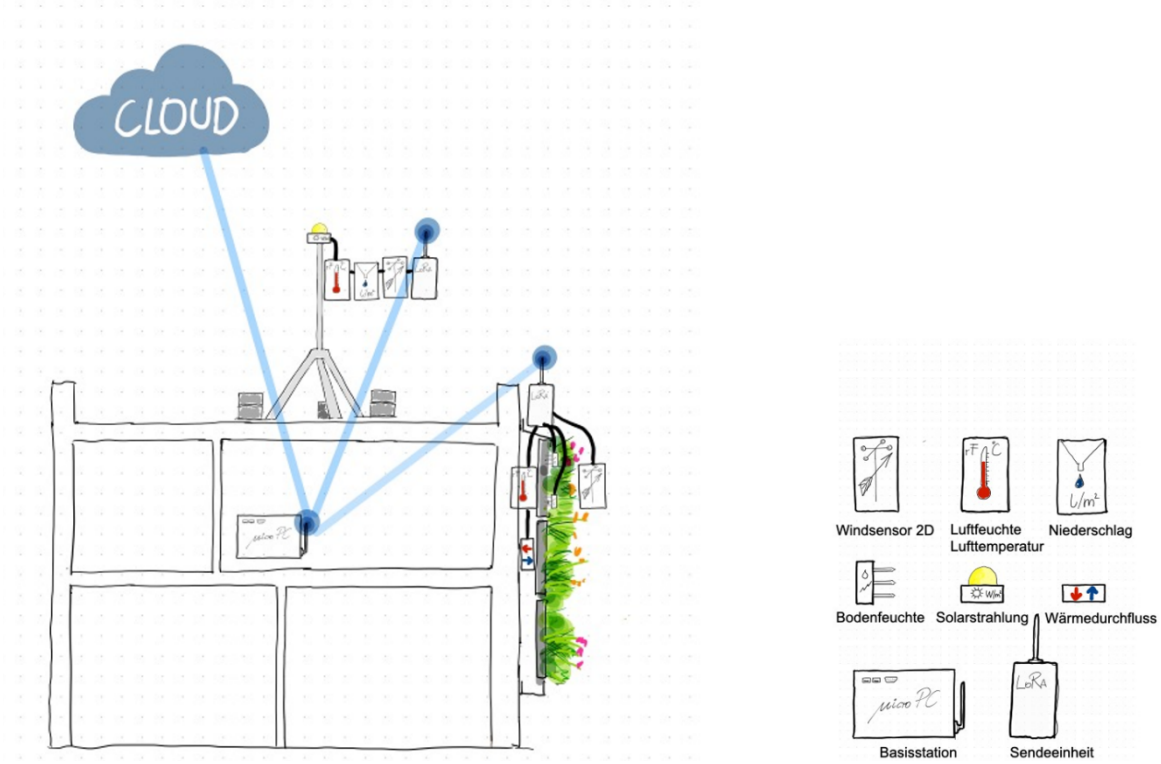


Abbildung 2: Messkonzept Fassadenbegrünungen, Beispiel modulares Begrünungssystem (© IBLB).

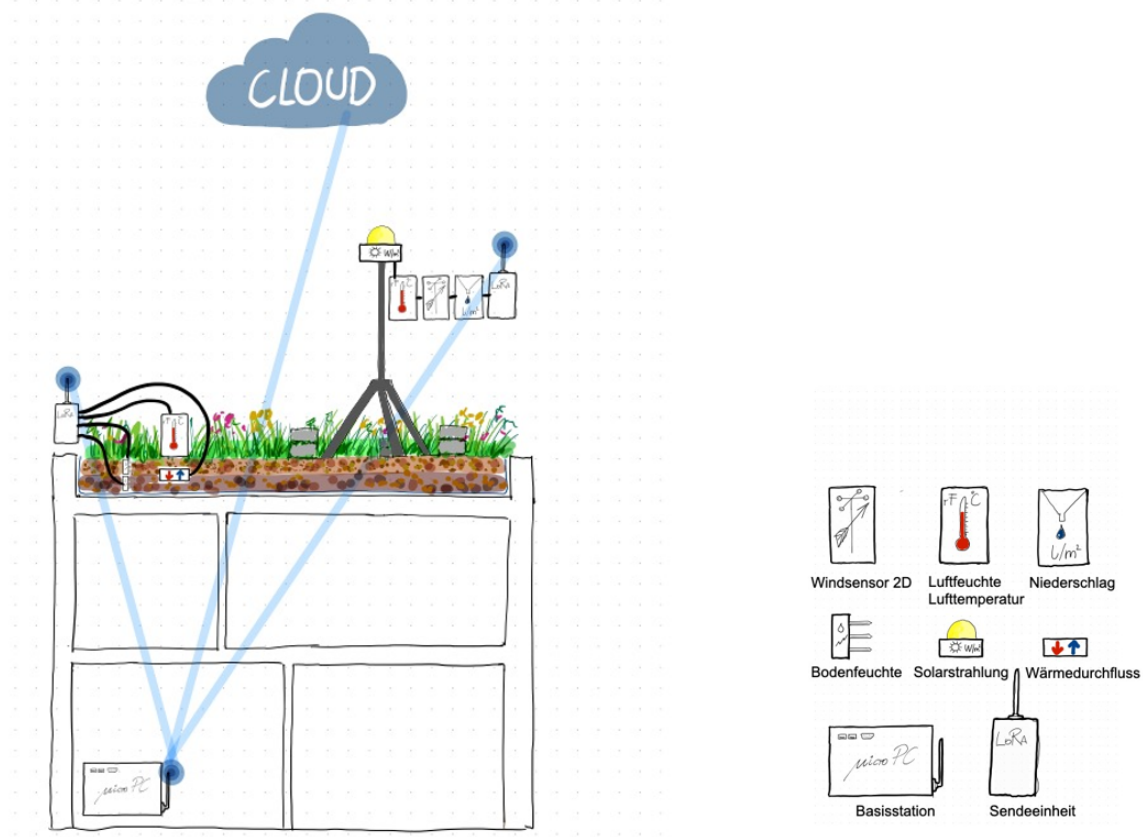


Abbildung 3: Messkonzept Fassadenbegrünungen, Beispiel extensives Gründach (© IBLB).

4 Validierung und Selektion der Mess-Standorte

4.1 Vorselektierung und Auswahlkriterien

Auf Basis der für das Forschungsangebot eingeholten *Letters of Interest* (LoI) und eines ersten *Brain Stormings in der Projektgruppe* zu potenziell geeigneten Messobjekten wurde eine Kontaktliste zu den Besitzer*innen und/oder jeweilig zuständigen Betreiber*innen erstellt. Darauf aufbauend wurde eine vorläufige Liste mit möglichen Objekten abgeleitet, in der insgesamt 27 Fassadenbegrünungsobjekte und 24 Dachbegrünungsobjekte identifiziert und vermerkt wurden. Diese Liste wurden in einem nächsten Schritt einer *Desk Research* zugeführt, bei welcher relevante Kriterien wie etwa die Exposition bereits online abgefragt wurden. Aufbauend auf den gesammelten Informationen wurden 19 potenzielle Fassaden- und 16 mögliche Dachbegrünungsobjekte aus folgenden Gründen ausgeschlossen:

- unzureichende räumliche Gegebenheiten;
- problematische Eigentumsverhältnisse;
- keine Rückmeldung bzw. Erreichbarkeit der Betreiber*innen;
- LoI nicht mehr aufrecht;
- fehlende Realisierung der Begrünungen;
- unzureichende Vegetationsstruktur, Deckung und/oder Pflanzenvitalität;
- andauernde Renovierungsarbeiten;
- bereits erfolgter Abbau bzw. Entfernung der Begrünung.

Um im nächsten Schritt weitere relevante Informationen noch vor einer Standortbegehung abfragen zu können, wurden *Factsheets* erstellt und den Besitzer*innen bzw. Betreiber*innen des jeweiligen Standortes übermittelt. Dieses diente einer vorläufigen Bewertung der Standorte zur Koordination der Standortbesichtigungen (Abbildung 4) dar. Folgende Kriterien wurden zur Bewertung herangezogen:

- gebäudebezogene Kriterien;
- begrünungsbezogene Kriterien;
- technische Kriterien (Außenraum);
- technische Kriterien (Innenraum);
- technische Kriterien zur Installation von Sensorik mit Basisstation.

Die nachfolgende Übersichtsmatrix veranschaulicht die Kategorisierung und Reihung der potenziellen Standorte nach Anwendung der Kriterienbewertung (Abbildung 4). Für diese wurden die Inhalte aus den *Factsheets* digital übertragen, Punkte vergeben („trifft zu“ – 1 Punkt, „trifft tlws. zu“ – 0,5 Punkte, „trifft nicht zu“ – 0 Punkte) und anschließend in ein erstes Ranking (Tischbewertung) überführt.

HEDWIG	Eignungskategorien	Dauermessung	Dauermessung	Dauermessung	Dauermessung	Dauermessung
	Codierung	DB-1e	DB-1i	DB-2e	DB-2ri	DB-2ze
Dachbegrünung		**Steinbauer Development GmbH**	**Steinbauer Development GmbH**	**BIG HTL St. Pölten I/III**	**BIG HTL St. Pölten II/III**	**BIG HTL St. Pölten III/III**
	Charakterisierung Begrünung	**extensiv** [Errichtung: 1980/90]	**intensiv** [Errichtung: 1980/90]	**extensiv** [Errichtung: 2018]	**reduziert intensiv** [Errichtung: 2018]	**Ziegelrecyclingdach extensiv + Kiesdach** [Errichtung: 2018]
	Adresse	Favoritenstr 50, 1040 Wien	Favoritenstr 50, 1040 Wien	Waldstraße 3, 3101 St. Pölten	Waldstraße 3, 3101 St. Pölten	Waldstraße 3, 3101 St. Pölten
	Gebäudekategorie	Gewerbe, Büro	Gewerbe, Büro	Ausbildungsstätte	Ausbildungsstätte	Ausbildungsstätte

Rahmenbedingungen | Auswahlkriterien | Standortwahl

Nr.	K.O.-Kriterium	Bezeichnung Kriterium	Bewertung (trifft zu | trifft tlws. Zu | trifft nicht	Bewertung (Punkte)	Bewertung (trifft zu | trifft tlws. Zu | trifft nicht	Bewertung (Punkte)	Bewertung (trifft zu | trifft tlws. Zu | trifft nicht	Bewertung (Punkte)	Bewertung (trifft zu | trifft tlws. Zu | trifft nicht	Bewertung (Punkte)	Bewertung (trifft zu | trifft tlws. Zu | trifft nicht	Bewertung (Punkte)
1.		**Gebäudebezogene Kriterien**										
1		keine Verschattung durch Nachbargebäude	trifft tlws. Zu	0,5	trifft tlws. Zu	0,5	trifft zu	1	trifft zu	1	trifft zu	1
2.		**Begrünungsbezogene Kriterien**										
1	x	guter Zustand der Begrünung	trifft zu	1	trifft zu	1	trifft zu	1	trifft zu	1	trifft zu	1
2	x	Exposition (Süden oder Westen)	trifft zu	1	trifft zu	1	trifft zu	1	trifft zu	1	trifft zu	1
3.		**Technische Kriterien I/III (Außenraum)**										
1	x	Berechtigung für notwendige Klebungen bzw. Bohrungen der Messsensoren gegeben	trifft tlws. zu	0,5	trifft tlws. zu	0,5	trifft zu	1	trifft zu	1	trifft zu	1
2	x	Begehbarkeit Dach zur Errichtung Klimastation gegeben	trifft zu	1	trifft zu	1	trifft zu	1	trifft zu	1	trifft zu	1
3		ungedämmte bzw. nur wenig gedämmt	trifft zu	1	trifft zu	1	trifft tlws. zu	0,5	trifft tlws. zu	0,5	trifft tlws. zu	0,5
4.		**Technische Kriterien II/III (Innenraum)**										
1		keine abgehängten Decken	trifft zu	1	trifft zu	1	trifft zu	1	trifft zu	1	trifft zu	1
2		ungedämmtes oder wenig gedämmtes Dach	trifft zu	1	trifft zu	1	trifft zu	1	trifft zu	1	trifft zu	1
3	x	darunterliegender Raum in geschlosser Form vorhanden	trif zu	0	trif zu	0	trifft tlws. zu	0,5	trifft tlws. zu	0,5	trifft tlws. zu	0,5
4	x	keine großflächige Glasflächen [Fassaden]	trifft tlws. Zu	0,5	trifft tlws. Zu	0,5	trifft zu	1	trifft zu	1	trifft zu	1
5	x	keine Glasstrukturen im Dach	trifft zu	1	trifft zu	1	trifft nicht zu	0	trifft nicht zu	0	trifft nicht zu	0
6	x	Stabile Stromversorgung (230 V) gegeben	trifft zu	1	trifft zu	1	trifft tlws. zu	0,5	trifft tlws. zu	0,5	trifft tlws. zu	0,5
7	x	Mobilfunkempfang für Logger gegeben	trifft zu	1	trifft zu	1	trifft zu	1	trifft zu	1	trifft zu	1
8		Referenzraum (angrenzender unbegrünter Innenraum mit gleicher Exposition) vorhanden	trifft zu	1	trifft nicht zu	0	?	0	?	0	?	0
5.		**Technische Kriterien III/III (Basisstation)**										
1	x	Stabile Stromversorgung (230 V) der Basisstation gegeben	trifft zu	1	trifft zu	1	trifft tlws. zu	0,5	trifft tlws. zu	0,5	trifft tlws. zu	0,5
2	x	Mobilfunkempfang für Basisstation gegeben	trifft zu	1	trifft zu	1	trifft zu	1	trifft zu	1	trifft zu	1
		Platzierung	1		2		4		4		4	

Abbildung 4: Auszug Übersichtsmatrix für die Standortbewertung (© IBLB).

Auf Basis dieser Tischbewertung konnten die Standorte vorselektiert werden, was zu einem effizienten Umgang bei den Standortbesichtigungen geführt hat. Die Ränge wurden zu Beginn ex-äquo geführt, was sich als unpraktikabel erwies, daher wurden sie in eine einfache Aufzählung überführt. Im nächsten Schritt bzw. parallel dazu wurden Standortbesichtigungen vor Ort durchgeführt, um ein konkretes Bild von der Realsituation zu erhalten. Insgesamt wurden 12 Objekte mit Fassadenbegrünung und weitere 10 Dachbegrünungsobjekte besichtigt. Durch die genannte Vorarbeit konnten insgesamt 4 Fassadenbegrünungsobjekte als geeignet für die

Dauermessungen sowie weitere 4 für die Messkampagnen identifiziert werden. Bei den Dachbegrünungsobjekten wurden ebenfalls 4 Objekte für das Anbringen von Dauermesssensorik sowie 4 für Messkampagnen ausgewählt, wobei sich jeweils 2 der Dauermessobjekte am selben Standort befinden. Sowohl beim Messstandort Steinbauer Development GmbH [DB1-e und DB1-i] sowie bei der HTL St. Pölten [DB2-e und DB2-ri] existieren je ein Extensiv- und Intensivgründach und lieferten daher jeweils 2 Messobjekte für das Projekt HEDWIG. Dieser Umstand erwies sich als vorteilhaft für einen direkten Vergleich der Messdaten an unterschiedlichen Begrünungssystemen bei identen Witterungsbedingungen. Ein weiterer Vorteil ergab sich durch die Reduktion der Anfahrtszeit bei der Installation bzw. Wartung von Sensorik sowie der Durchführung der Messkampagnen. Damit konnten 2 zusätzliche Messobjekte in das Dauermonitoringprogramm aufgenommen werden.

Der Prozess der Auswahl der Fassaden- sowie Dachbegrünungsobjekte ist in Abbildung 5 und Abbildung 6 grafisch aufbereitet.

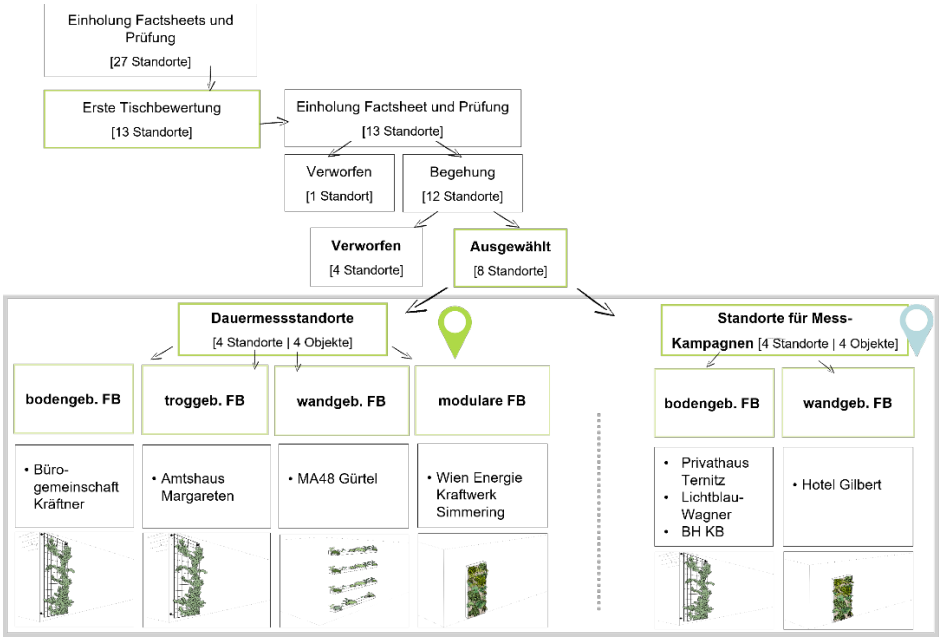


Abbildung 5: Prozessbaum zur Auswahl der Fassadenbegrünungsobjekte (© IBLB).

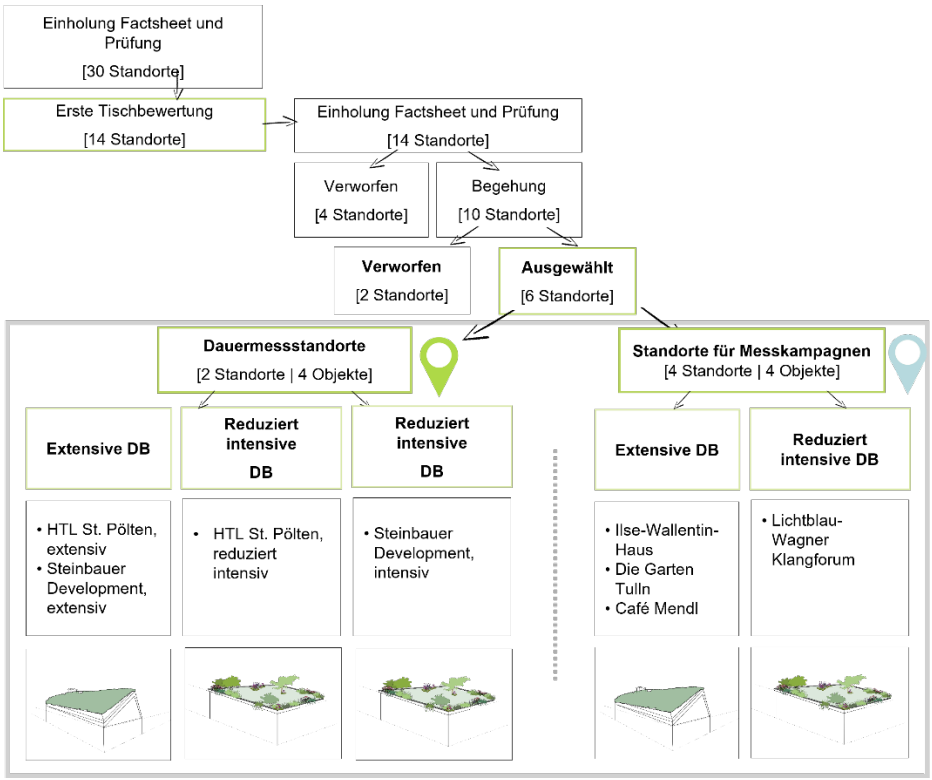


Abbildung 6: Prozessbaum zur Auswahl der Dachbegrünungsobjekte (© IBLB).

4.2 Räumlich-strukturelle Analyse | Dauermessobjekte Fassadenbegrünung [FB]

Die Verortung der Dauermessobjekte und der Objekte für Messkampagnen ist Abbildung 7 zu entnehmen, wobei der Codierungsschlüssel in Tabelle 1 dargelegt wird.

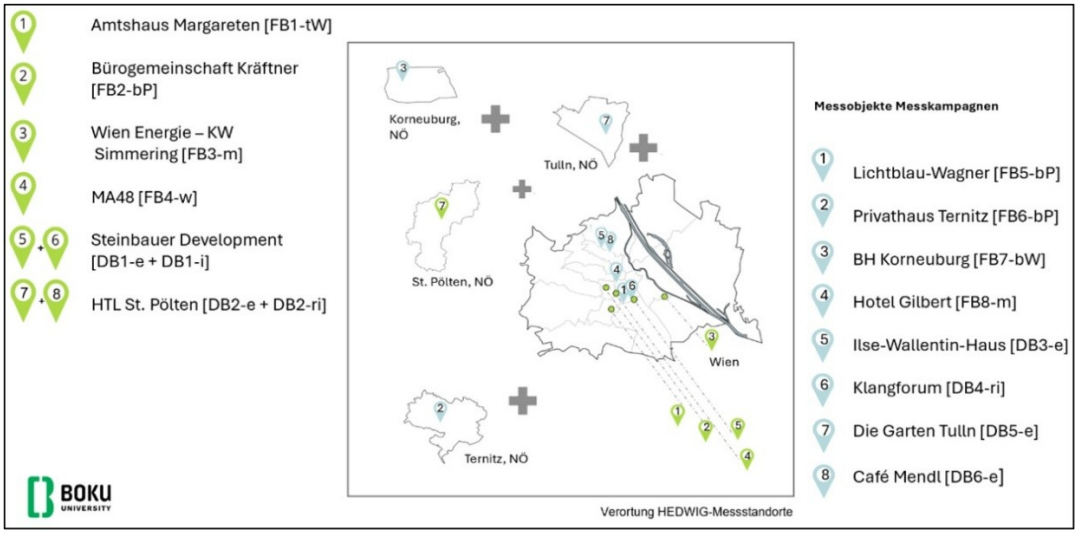


Abbildung 7: Schematische Verortung der Messobjekte für Dauermessung (grün) sowie Messkampagnen (blau) (© IBLB).

Tabelle 1 fasst die wesentlichen Informationen der Dauermessobjekte zusammen (in Abbildung 7 grün hinterlegt und verortet).

Tabelle 1: Kerninformationen aller Dauermessobjekte (Fassade sowie Dach).

Nummer Messobjekt	Name Messobjekt	Codierung	Begrünungstyp	Lage Messobjekt
Fassadenbegrünung 1 FB	Amtshaus Margareten	FB1-tW	troggebundene FB (*W. sinensis*)	Wien
Fassadenbegrünung 2 FB	Bürogemeinschaft Kräftner	FB2-bP	bodengebunde FB (*P. tricuspidata*)	Wien
Fassadenbegrünung 3 FB	Wien Energie – Kraftwerk Simmering	FB3-m	modulare FB (biodivers)	Wien
Fassadenbegrünung 4 FB	MA48 Gürtel	FB4-w	wandgebundene FB (biodivers)	Wien
Dachbegrünung 5 DB	Steinbauer Development, extensiv	DB1-e	Extensive Dachbegrünung (*Sedum sp.)*	Wien
Dachbegrünung 6 DB	Steinbauer Development, extensiv	DB1-i	Intensive Dachbegrünung (inkl. Baumbestand)	Wien
Dachbegrünung 7 DB	HTL St. Pölten, extensiv	DB2-e	Extensive Dachbegrünung (*Sedum*)	St. Pölten (NÖ)
Dachbegrünung 8 DB	HTL St. Pölten, reduziert-intensiv	DB2-ri	reduziert-intensive Dachbegrünung (Gräser, Kräuter)	St. Pölten (NÖ)

Tabelle 2 zeigt die wesentlichen Informationen zu den Objekten für Messkampagnen (in Abbildung 7 blau hinterlegt und verortet) auf.

Tabelle 2: Kerninformationen aller Objekte für Messkampagnen (Fassade sowie Dach).

Nummer Messobjekt	Name Messobjekt	Codierung	Begrünungstyp		Lage Messobjekt
Fassadenbegrünung 5 FB	Lichtblau Wagner	FB5-bP	bodengebundene FB (*P. tricuspidata*)		Wien
Fassadenbegrünung 6 FB	Privathaus Ternitz	FB6-bP	bodengebundene FB (*P. tricuspidata*)		Ternitz (NÖ)
Fassadenbegrünung 7 FB	BH Korneuburg	FB7-bW	bodengebundene FB (*W. sinensis*)		Korneuburg (NÖ)
Fassadenbegrünung 8 FB	Hotel Gilbert	FB8-m	modulare FB (biodivers)		Wien

Dachbegrünung 3 DB	Ilse-Wallentin-Haus BOKU University	DB3-e	extensive DB (*Sedum sp.)*		Wien
Dachbegrünung 4 DB	Klangforum Wien	DB4-ri	Reduziert-intensive DB (inkl. Sträuchern)		Wien
Dachbegrünung 5 DB	Die Garten Tulln	DB5-e	extensive DB (*Sedum sp*.)		Tulln (NÖ)
Dachbegrünung 6 DB	Café Mendl BOKU University	DB6-e	extensive DB (*Sedum sp*.)		Wien

Die individuellen Standortinformationen stehen im Teilbericht Datenkatalog (Jalits et al. 2026) zur Verfügung.

5 Dokumentation Methodik und Arbeitsanleitung zu Dauermonitoring und Messkampagnen

5.1 Messkonzept und Monitoring-Setup Außenraum

Das HEDWIG Messkonzept beinhaltet abgestimmte Komponenten im Bereich Außenraum, welche in ihrem Zusammenwirken ein umfassendes Verständnis über die Wirkungsleistungen sowie die diesen zugrunde liegenden Prozesse sowie die Rahmenbedingungen erlauben. Es handelt sich dabei um:

- einheitliche Dauermessungen der wesentlichen Rahmenbedingungen und Wirkungen im Außenraum an 8 Objekten auf 6 Standorten;
- ein vertiefendes Mess-Setup in Abhängigkeit der spezifischen Pflanzenkörpertypen an Gründächern, Living Walls und Grünfassaden mit Kletterpflanzen;
- zusätzliche Messkampagnen an den Dauermessobjekten sowie an weiteren 8 HEDWIG-Objekten:
- zur Erfassung pflanzenspezifischer Eigenschaften mit Relevanz zu ihrer Wirkungsleistung (z.B. Transmissivität bzw. Strahlungsreduktion, Temperatur- und Luftfeuchteverhältnisse vor und hinter dem Pflanzenkörper im jahreszeitlichen Verlauf und bei unterschiedlicher Umwitterung, langwelliger Strahlungseintrag und -abgabe;
- eine umfassende Erhebung der bauphysikalischen Rahmenbedingungen der Gebäude bzw. im Gebäudeinneren.

5.1.1 Messkonzept | Dauermessungen

5.1.1.1 Erfassung meteorologische Daten und Sensorik

Die HEDWIG-Dauermessungen im Außenraum der ausgewählten Fassadenbegrünungsobjekte inkludierten die in Tabelle 3 gelisteten Parameter. Die dafür eingesetzte Sensorik wurde vom Drittleister RED Bernard GmbH, ein Unternehmen der BERNARD Gruppe für Monitoring und Messtechnik, zur Verfügung gestellt, installiert und gewartet.

Tabelle 3:Dauermesssensorik Fassadenbegrünungen.

Parameter	Abkürzung	Einheit	Sensortyp
Lufttemperatur, vor Begrünung	Luft-T_v	°C	MS WTS305 All-in-One LoRaWAN® IoT-Wetterstation (Milesight)

Lufttemperatur, hinter Begrünung	Luft-T_h	°C	SenseCAP S2101 LoRaWAN Sensor (Seeed Studio)
Luftfeuchte, vor Begrünung	Luft-F_v	%	MS WTS305 All-in-One LoRaWAN® IoT-Wetterstation (Milesight)
Luftfeuchte, hinter Begrünung	Luft-F_h	%	SenseCAP S2101 LoRaWAN Sensor (Seeed Studio)
Solarstrahlung, vor Begrünung	$Solar_v$	W/m^2	EKO ML-02-5P pyranometer (EKO Instruments) All-in-One LoRaWAN® IoT-Wetterstation (Milesight)
Solarstrahlung, hinter Begrünung	$Solar_h$	W/m^2	EKO ML-02-5P LoRaWAN Sensor (Seeed Studio)
Windgeschwindigkeit	Wind-G	km/h	MS WTS305 All-in-One LoRaWAN® IoT-Wetterstation (Milesight)
Windrichtung	Wind-R	dimensionslos	MS WTS305 All-in-One LoRaWAN® IoT-Wetterstation (Milesight)
Atmosphärischer Luftdruck	Luft-Dr	Pa	MS WTS305 All-in-One LoRaWAN® IoT-Wetterstation (Milesight)
Wärmedurchfluss (hinter dem Modul)*	Wärme-D	W/m^2	Hukseflux HPF01 soil heat flux sensor plate (Hukseflux)

* Der Parameter Wärmedurchfluss wurde ergänzend nur bei den wandgebundenen Fassadenbegrünungen Wien Energie – Kraftwerk Simmering [FB3-m] sowie MA48 Gürtel [FB4-w] erhoben.

Tabelle 4 listet die Parameter und Sensorik, die für die Dauermessungen der ausgewählten Dachbegrünungen im Außenraum eingesetzt wurden.

Tabelle 4: Dauermesssensorik Dachbegrünung.

Parameter	**Einheit**	**Einheit**	**Sensortyp**
Lufttemperatur, oberhalb Begrünung	Luft-T_o	°C	MS WTS305 All-in-One LoRaWAN® IoT-Wetterstation (Milesight)
Lufttemperatur, unterhalb Begrünung	Luft-T_u	°C	SenseCAP S2101 LoRaWAN Sensor (Seeed Studio)
Luftfeuchte, oberhalb Begrünung	Luft-F_o	%	MS WTS305 All-in-One LoRaWAN® IoT-Wetterstation (Milesight)
Luftfeuchte, unterhalb Begrünung	Luft-F_u	%	SenseCAP S2101 LoRaWAN Sensor (Seeed Studio)

Solarstrahlung, oberhalb Begrünung	$Solar_o$	W/m^2	EKO ML-02-5P All-in-One LoRaWAN® IoT-Wetterstation (Milesight)
Solarstrahlung, unterhalb Begrünung	$Solar_u$	W/m^2	EKO ML-02-5P LoRaWAN Sensor (Seeed Studio)
Windgeschwindigkeit	Wind-G	km/h	MS WTS305 All-in-One LoRaWAN® IoT-Wetterstation (Milesight)
Windrichtung	Wind-R	dimensionslos	MS WTS305 All-in-One LoRaWAN® IoT-Wetterstation (Milesight)
Atmosphärischer Luftdruck	Luft-Dr	Pa	MS WTS305 All-in-One LoRaWAN® IoT-Wetterstation (Milesight)
Wärmedurchfluss, unter Substrat	Wärme-D	W/m^2	Hukseflux HPF01 soil heat flux sensor plate (Hukseflux)
Bodentemperatur, im Substrat	Boden-T	°C	SenseCAP S2104
Bodenfeuchte, im Substrat	Boden-F	%	SenseCAP S2104

5.1.1.2 Mess-Setup, Installation und Inbetriebnahme

Die Messsensoren wurden vom Projektdrittleister RED Bernard vor Ort an den Untersuchungsobjekten angebracht. Neben den Messdaten der Sensoren wurde ergänzend auf die Lufttemperaturwerte der GeoSphere Austria in 2 Meter Höhe, zurückgegriffen, welche über die Website der Geosphere Austria monatlich abgerufen werden können. Die relevanten Vergleichswerte stammen von 2 ausgewählten Wetterstationen, von denen sich eine in Wien und eine weitere in St. Pölten, Niederösterreich befindet (Tabelle 5).

Tabelle 5: Übersicht der berücksichtigten ZAMG-Stationen in Wien und Umgebung.

Stations-ID	Stationsname	Länge	Breite	Stationshöhe
5925	Wien [Innere Stadt]	162201	481154	177
5609	St. Pölten/Landhaus	153752	481159	274

Bei der Positionierung der vor Ort angebrachten Sensoren wurde standortübergreifend auf einheitliche Anbringung geachtet. Dies sollte zwischen den verschiedenen Messobjekten Vergleichbarkeit ermöglichen. Aufgrund räumlicher Gegebenheiten, der Exposition der Begrünungen, des Begrünungstyps sowie Eigentümer*innenverhältnisse und -zustimmungen war dies nicht immer möglich, teilweise mussten Abweichungen von der „Standardpositionierung“ in Kauf genommen werden. Im Folgenden wird näher auf die Sensorpositionierung eingegangen.

Die Wetterstation [MS WTS305] sowie das Pyranometer [EKO ML-02-5P] wurden einheitlich mittels Traverse in einem Abstand von 1,5 m zum Pflanzenkörper vor der Begrünung angebracht (Abbildung 8).



Abbildung 8: MS WRS305 [Wetterstation] und EKO ML-02-5P [Pyranometer], in 1,5m von Pflanzkörper entfernt (©IBLB).

Der Sensor für Luft-T und -F [SenseCAP S2101] befindet sich jeweils vor sowie hinter dem Pflanzenkörper. Bodentemperatur und -feuchte wurden mittels SenseCAP S2104 direkt im Trog bzw. der Pflanzwanne gemessen. Der Wärmedurchfluss, welcher mittels Hukseflux HPF01 bestimmt wurde, ist einheitlich direkt an der Außenfassade angebracht (Abbildung 9). Die selbstklebenden Hukseflux-Sensor-Plates wurden nur bei den modularen Fassadensystemen hinter dem Modul an der Fassade angebracht.



Abbildung 9: links: Luft-T und Luft-F-Sensor: SenseCAP S2101, Mitte: Boden-T und Boden-F-Sensor: SenseCAP S2104, rechts: Wärmedurchflusssensor Hukseflx HPF01 (©IBLB).

Zusätzlich wurde die Sensorik bei allen Messobjekten mit Ausnahme von [FB1-tW] [Amtshaus Margareten], welches bereits mit Messsensorik der Stadt Wien aus einem Vorprojekt ausgestattet

war (Blecha et Stangl 2022) – im Messjahr 2024 um ein weiteres Pyranometer ergänzt. Dieses befindet sich jeweils hinter dem Pflanzkörper (Abbildung 10).



Abbildung 10: Sensorergänzung (2024): Pyranometer hinter dem Pflanzenkörper (©IBLB).

In Kapitel 14.2 (Anhang) ist die Dokumentation der Sensorinstallationen an den HEDWIG-Messobjekten dargelegt.

5.1.2 Messkonzept | Messkampagnen

5.1.2.1 Allgemeine Erläuterungen

Die HEDWIG-Messkampagnen im Außenraum dienten zur Vervollständigung der Dauermessungen, um die Charakteristik der Begrünungsobjekte zu erfassen und zu dokumentieren. Dies bezieht sich auf die Vegetationskörper, ihre Ausprägung und Dimensionen, Vitalität und relevante Laubinformationen, um die Messwerte in Beziehung zur Grünstruktur setzen zu können. Ergänzend wurden zusätzliche Messungen mit Handmessgeräten und -Sensorik durchgeführt, die zusätzliche pflanzenphysiologische und klimatischen Daten lieferten.

Die Messkampagnen wurden an jedem Standort jeweils einmal im Sommer 2023 und 2024 durchgeführt. Die Messkampagnen haben alle einheitlich zwischen 09:00 und 17:00 Uhr stattgefunden. Limitationen liegen in den unterschiedlichen Standortbedingungen der Messobjekte, die teilweise die Erhebung von manchen Parametern verhinderte (z.B. Hotel Gilbert [FB7-m]). Die Messkampagnen wurde nur an Tagen mit sehr guten Sommerwetterverhältnissen durchgeführt, wobei jedoch nicht an allen Standorten unter wolkenfreien Bedingungen gemessen werden konnte.

Die ermittelten Parameter sowie Pflanzencharakteristika dienen der Dokumentation des physiologischen Verhaltens der unterschiedlichen Pflanzenarten und der vorherrschenden klimatischen Parameter. Je nach örtlichen Gegebenheiten wurden zusätzliche Hilfsmittel wie ein Hubsteiger benötigt, um die Begrünungen ganz zu erfassen. An jedem Standort wurden 5

Messpunkte mithilfe eines quadratischen Aluminiumrahmen (0,71 x 0,71 m) repräsentativ über die Zielstruktur verteilt festgelegt. Die vorhandene Vegetation wurde auf Basis von Fachkenntnissen sowie ergänzender Literatur vor Ort bestimmt. Durch die unterschiedlichen Standortbedingungen und Vegetationstypen konnten nicht alle Messungen durchgeführt werden. Beispielsweise wird für die stomatäre Leitfähigkeit und die Transpirationsrate eine gewisse Blattgröße vorausgesetzt, da die Messgerätekammer komplett mit dem Blatt bedeckt sein muss. Bei extensiven Gründächern sind diese Blattgrößen an Sukkulenten oder Gräsern teilweise nicht gegeben.

5.1.2.2 Erfassung der Vegetations- und mikroklimatischen Parameter

(1) Übersicht über die erhobenen Parameter und die erforderlichen Mess-/Sensortechnik

Zur Durchführung der Messkampagnen bei den Fassadenbegrünungen wurden die in Tabelle 6 genannten Parameter mit Hilfe von Handmessgeräten und -sensortechnik erhoben. Angezeigt werden zusätzlich die Standardabkürzung, die Einheit, die Anzahl der Messpunkte [n], Sensortyp und die Beschreibung der Messmethoden

Tabelle 6: Übersicht Erhebung und Sensorik der Vegetationsparameter und mikroklimatische Parameter während der Messkampagnen an Fassadenbegrünungen.

Vegetations-parameter	**Abkürzung**	**Einheit**	**Anzahl Messpunkte**	**Sensortyp**	**Beschreibung Messmethode**
Pflanzenvitalität	Vit	1-9	5	Messrahmen (0,5 m²)	Visuelle Beurteilung von Parametern mit 5 Kategorien: Erscheinungsbild, Blattanzahl, -größe und -gesundheit. Die Beurteilung erfolgt mittels Punktesystem 1-9 (Weiss et al. 2021, Pucher et al. 2022);
Deckungsgrad der Zielfläche	DG_{Ziel}	%	1	ImageJ (National Institutes of Health)	Aufnahme vor Ort und Schätzungen;
Projektiver Deckungsgrad	DG_{proj}	%	5	Messrahmen (0,5 m²)	Visuelle Erfassung mittels digitaler Bildaufnahme und Pixelauswertung mit ImageJ;
Kubisches Pflanzvolumen	V_{kub}	m³	5	Messrahmen (0,5 m²)	5 Tiefenmessungen pro Messpunkt;

Blattflächenindex / Wand-Blattflächenindex	LAI / WLAI		15	ACCUPAR LP-80 (Meter Group)	Pro MP werden je 3 Messungen mit der Messlanze durchgeführt. Der Referenzsensor ist vor der Begrünung in identischer Ausrichtung positioniert;
Stomatäre Leitfähigkeit	g_s	mmol m^{-2} s^{-1}	25	AP4 Porometer (Delta-T Devices)	Pro MP werden je 5 adulte, vitale Blätter in sonniger Exposition untersucht. Die Messung erfolgt über die Blattkammer an Einzelblättern.
Transpirationsrate mittels Photosynthesemessgerät	E	mmol m^{-2} s^{-1}	25	LCiT (ADC BioScientifitc Ltd.)	Pro MP werden je 5 adulte, vitale Blätter in sonniger Exposition untersucht. Die Messung erfolgt über die Blattkammer an Einzelblättern.
Infrarot-Thermographie	IR_T	°C	5	Testo 885 (Testo GmbH)	Pro MP wird eine Aufnahme erstellt und mit Luft-T, Oberflächen-T von Vegetation und anderen Oberflächenmaterialien ergänzt.
Blatttemperatur	T_{leaf}	°C	25	LCiT (ADC BioScientifitc Ltd.) und Laserliner ThermoSpot, UMAREX GmbH & Co KG	Die Blatttemperatur wird an 25 Blättern gemessen und je nach Vegetationstyp mit dem LCiT Photosynthesemesser mitgemessen oder mit einem Infrarot-Temperaturmessgerät erfasst.
Mikroklimatische Parameter	**Abkürzung**	**Einheit**	**Anzahl Messpunkte**	**Sensortyp**	**Beschreibung Messmethode**
Lufttemperatur, vor Begrünung	Luft-T_v	°C	1	ATMOS 14 (Meter Group)	1,5 m über Boden, Stativmontage;

Lufttemperatur, hinter Begrünung	Luft-Th	°C	1	ATMOS 14 (Meter Group)	1,5 m über Boden, Stativmontage;
Luftfeuchte, vor Begrünung	Luft-F_v	%	1	ATMOS 14 (Meter Group)	1,5 m über Boden, Stativmontage;
Luftfeuchte, hinter Begrünung	Luft-F_h	%	1	ATMOS 14 (Meter Group)	1,5 m über Boden, Stativmontage;
Solarstrahlung, hinter und vor Begrünung	I_{sol}	W m^{-2}	2	Pyranometer SP-110 (apogee instruments)	1,5 m über Boden, Stativmontage; hinter und vor der Begrünung
Bioshading Coefficient (Grünverschattungsfaktor)	BSC (F_{bs})	dimen-sionslos	1	Formel siehe Kap. 5.1.1.2	Errechnet mittels Quotient aus I_{sol} hinter und vor dem Laubkörper
Strahlungsbilanz	I_{NR}	W m^{-2}	1	Netradiometer SN-500 (apogee instruments)	1,5 m über Boden, Stativmontage; vor der Begrünung
Reflexion	R	%	1	Netradiometer SN-500 (apogee instruments)	Errechnet aus I_{NR}
Transmission	T	%	1	Pyranometer SP-110 (apogee instruments)	Errechnet aus Differenz I_{sol} vor und hinter dem Laubkörper
Absorption	A	%	1		Errechnet aus Reflexion und Transmission
Vedampfungsenthalpie	(ΔH_v)	W m^{-2}	1	LCiT (ADC BioScientifitc Ltd.)	Errechnet aus Transpirationsrate

In Tabelle 7 sind die Erhebungsparameter sowie Methodik und Sensorik für die Messkampagnen für die Dachbegrünungen gelistet.

Tabelle 7: Übersicht Erhebung und Sensorik der Vegetationsparameter und mikroklimatischen Parameter während der Messkampagnen an Dachbegrünungen.

Vegetations-parameter	**Abkürzung**	**Einheit**	**Anzahl Mess-punkte**	**Sensortyp**	**Beschreibung Messmethode**
Pflanzenvitalität		1-9	5	Messrahmen (0,5 m^2)	Visuelle Beurteilung anhand Parameter mit 5 Kategorien: Erscheinungs-bild, Blattanzahl, -größe und -gesundheit. Die Beurteilung erfolgt mittels Punktesystem 1-9 (Weiss

					et al. 2021, Pucher et al. 2022).
Deckungsgrad der Zielfläche	DG_{Ziel}	%	1	ImageJ (National Institutes of Health)	Visuelle Erfassung vor Ort, Orthofotos;
Projektiver Deckungsgrad	DG_{proj}	%	5	Messrahmen (0,5 m²)	Erfassung mittels digitaler Bildaufnahme; Pixelauswertung mit ImageJ;
Kubisches Pflanzvolumen	V_{kub}	m³	5	Messrahmen (0,5 m²)	5 Tiefenmessungen pro Messpunkt;
Blattflächenindex / Wand-Blatt-flächenindex	LAI / WLAI		15	ACCUPAR LP-80 (Meter Group)	Pro MP werden je 3 Messungen mit der Messlanze durchgeführt. Der Referenzsensor ist vor der Begrünung in identischer Ausrichtung positioniert.
Stomatäre Leitfähigkeit	g_s	mmol m^{-2} s^{-1}	25	AP4 Porometer (Delta-T Devices)	Pro MP werden je 5 adulte, vitale Blätter in sonniger Exposition untersucht. Die Messung erfolgt über die Blattkammer an Einzel-blättern.
Transpirationsrate mittels Photo-synthesemessgerät	E	mmol m^{-2} s^{-1}	25	LCiT (ADC BioScientifitc Ltd.)	Pro MP werden je 5 adulte, vitale Blätter in sonniger Exposition untersucht. Die Messung erfolgt über die Blattkammer an Einzel-blättern.
Infrarot-Thermographie	IR_T	°C	5	Testo 885 (Testo GmbH)	Pro MP wird eine Aufnahme erstellt und mit Luft-T, Oberflächen-T von Vegetation und anderen Baumaterialien ergänzt.
Blatttemperatur	T_{leaf}	°C	25	LCiT (ADC BioScientifitc Ltd.) und Laserliner ThermoSpot, UMAREX GmbH & Co KG	Die Blatttemperatur wird an 25 Blättern gemessen und je nach Vegetationstyp mit dem LCiT Photosynthesemesser mitgemessen oder mit einem Infrarot-Temperaturmessgerät erfasst.
Mikroklimatische Parameter	**Abkürzung**	**Einheit**	**Anzahl Mess-punkte**	**Sensortyp**	**Beschreibung Messmethode**

Solarstrahlung, ober bzw. unter der Begrünung	I_{sol}	W m^{-2}	1	Pyranometer SP-110 (Apogee Instruments)	1 Sensor wird an der Substratoberfläche unter der Begrünung und 1 Sensor über der Begrünung auf einem Stativ in 1,5 m Höhe installiert und horizontal ausgerichtet.
Bioshading Coefficient (Grünverschattungsfaktor)	BSC (F_{bs})	dimen-sionslos	1	Pyranometer SP-110 (Apogee Instruments)	Errechnet mittels Quotient aus I_{sol} unter und über der Vegetationsschicht
Strahlungsbilanz	I_{NR}	W m^{-2}	1	Netradiometer SN-500 (apogee instruments)	1,5 m über Boden, Stativmontage; oberhalb der Begrünung
Reflexion	R	%	1	Netradiometer SN-500 (apogee instruments)	Errechnet aus I_{NR}
Transmission	T	%	1	Pyranometer SP-110 (apogee instruments)	Errechnet aus Differenz I_{sol} über und unter der Vegetationsschicht
Absorption	A	%	1	-	Errechnet aus Reflexion und Transmission
Verdampfungsenthalpie	(ΔH_v)	W m^{-2}	1	LCiT (ADC BioScientifitc Ltd.)	Errechnet aus Transpirationsrate

(2) Pflanzenvitalität

Die Pflanzenvitalität wurde nach dem Beurteilungsschema „*Monitoring der visuellen Parameter*“ (Weiss et al. 2021, Pucher et al. 2022) bewertet. Dieses gliedert sich in die Kategorien Erscheinungsbild, Blattanzahl, Blattgröße sowie Blattgesundheit. Die Vitalität der Pflanzen wurde anhand einer neunstufigen Skala von 0 (abgestorbene Pflanze) bis 9 (höchste Vitalität) bewertet:

- Ein Vitalitätswert von 9 kennzeichnet gesunde, vitale Pflanzen mit dichtem Wuchs und kräftigem Wachstum.
- Werte von 7 beschreiben ebenfalls vitale Pflanzen mit normalem Wuchs und nur geringfügigen oder kaum erkennbaren Beeinträchtigungen.
- Ein Wert von 5 wird bei geschwächten Pflanzen mit stagnierendem Wachstum, lockerem Wuchs sowie sichtbaren geschädigten oder abgestorbenen Pflanzenteilen vergeben.
- Stark geschwächte Pflanzen mit gehemmtem Wachstum, deutlich aufgelockertem Wuchs, zahlreichen abgestorbenen Pflanzenteilen sowie ausgeprägtem Schädlingsbefall, Krankheiten, Nährstoffmangel oder mechanischen Schäden werden mit 3 bewertet.
- Ein Wert von 1 kennzeichnet absterbende Pflanzen mit skelettartiger Struktur und überwiegend abgestorbenen Pflanzenteilen.
- Der Wert 0 wird vollständig abgestorbenen Pflanzen zugeordnet.

- Ein möglicher Schädlings- oder Krankheitsbefall wird ergänzend notiert.

(3) Deckungsgrad der Zielfläche DG_{Ziel}

Für die Bestimmung von DG_{Ziel} ist diejenige Gebäudefläche zu berücksichtigen, die potenziell von den Pflanzen bewachsen sein kann. Für Schlinger bzw. Arten, die Kletterhilfen benötigen, ist das jener Bereich, in dem die Kletterhilfen angebracht sind. Bei wandgebundenen oder modularen Systemen ergibt das selbstredend die Fläche der Vegetationsträger, bei Selbstkletterern ist das die Fläche, die von der Pflanze prinzipiell erreicht u bewachsen werden kann. ÖNORM L 1136 (Austrian Standards International 2021) gibt für Fassadenbegrünungen 95 % nach 10 Standjahren vor, das entspricht auch den Anforderungen der FLL (2018). Für Dachbegrünungen ist die Zielfläche ebenfalls diejenige Fläche, die mit Dachsubstrat und Pflanzen/Samen ausgestattet ist. Der Deckungsgrad ist stark abhängig von der Pflanzenart, soll jedoch so hoch wie möglich sein, Ziel einer Begrünung ist, dass die Deckung annähernd 100 % ergibt. Laut ÖNORM L 1131 (Austrian Standards International 2010) sind mind. 75 % Deckung vor Nutzung zu erreichen.

Zur Erhebung von DG_{Ziel} werden die begrünbaren Flächen vor Ort abgemessen und in ein Raster eingeteilt oder mit einer digitalen Bildanalyse ausgewertet. Dazu wurden hochauflösende Fotos der Fassadenbegrünung aufgenommen und in Binärbilder überführt, in denen die vegetationsbedeckten Bereiche als schwarze Pixel markiert wurden. Die Flächenanteile wurden anschließend mit ImageJ quantitativ ausgewertet und in m² bzw. in Prozent angegeben (Stangl et al. 2025). Zusätzlich wurde die Zielfläche, also jener Anteil der zu begrünbaren Fassade, vor Ort bestimmt, etwa durch die Feststellung der Kletterhilfen an der Fassade, oder der Fläche des Gründachs. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine schnelle und verlässliche Quantifizierung des Vegetationsanteils. Der Zieldeckungsgrad errechnet sich wie folgt:

$$DG_{Ziel}\ [\%] = \frac{\text{bewachsene Fläche}}{\text{Zielfläche}} x\ 100$$

(4) Projektiver Deckungsgrad DG_{proj}

DG_{proj} bezieht sich auf eine projizierte Fläche hinter dem Laubkörper und gibt an, wie viel dieser Fläche durch Laub bedeckt ist (Stangl et al. 2025). Um DG_{proj} an den einzelnen MP zu bestimmen, wurde ein schwarzer quadratischer Messrahmen aus Aluminium (0,71 m x 0,71 m; Fläche: 0,50 m²) vor dem Laubkörper platziert und mit einer hochauflösenden Digitalkamera frontal abgelichtet. Die Fotos wurden in einem nächsten Schritt in einem Bildbearbeitungsprogramm (Affinity Photo, Serif Europe Ltd) in Binärbilder umgewandelt, wobei die schwarzen Pixel die von Vegetation bedeckte Fläche repräsentieren. Im Anschluss konnte das bearbeitet Bild der Pixel-Auswertung mit ImageJ (Version 1.54g National Institutes of Health) zugeführt werden.

Der Messrahmen dient für die Digitalauswertung als Referenzlänge. Damit ergeben sich zuverlässige Aussagen über den flächenmäßigen Anteil der Vegetationsbedeckung.

(5) Kubisches Pflanzvolumen (Vkub)

Bei allen Messkampagnen wurde das kubische Pflanzenvolumen [m³] erfasst (Stangl et al. 2025). Hierfür wurden an den Messpunkten Tiefenmessungen durchgeführt, um die Heterogenität der vorhandenen Vegetation zu berücksichtigen. Das kubische Pflanzenvolumen pro MP errechnet

sich aus dem Mittelwert der Tiefenmessungen multipliziert mit der Fläche des Messpunktes (0,5 m²).

(6) (Wand-)Blattflächenindex (W)LAI

Beim Blattflächenindex (Leaf Area Index, LAI) handelt es sich um eine dimensionslose Größe, welche das Verhältnis der Blattfläche einer Vegetation zur darunter liegenden Boden- (LAI) oder dahinter liegenden Wandfläche (WLAI) angibt (Stangl et al. 2025). Ein höherer Wert als 1 zeigt an, dass mehr Blattfläche als Grundfläche vorhanden ist. Liegt der LAI beispielsweise bei 2, ist die Blattfläche doppelt so hoch wie die dahinterliegende Fassade bzw. das darunterliegende Substrat (De Bock et al. 2023, Fang et al. 2019).

Für die Messkampagnen wurde (W)LAI mit einem ACCUPAR LP-80 (Meter Group) ermittelt. Das Messgerät besitzt eine Messlanze mit 8 PAR Sensoren (*photosynthetically active radiation*, 400 – 700 nm) sowie einem Referenzsensor. Pro MP wurden je 3 horizontale Messungen hinter bzw. unter der Vegetation - innerhalb des Messrahmens - gespeichert und anschließend gemittelt. Wichtig ist, auf die idente Ausrichtung der Sensoren sowie des Referenzsensors zu achten. Aus den genannten Messungen ergaben sich pro Standort eine Anzahl von 15 Messungen (n=15) aus 120 PAR Werten (n=120) entlang der Messlanze.

(7) Stomatäre Leitfähigkeit (gs)

Die stomatäre Leitfähigkeit g_s [mmol m^{-2} s^{-1}] ist ein Indikator für den Öffnungsgrad der Spaltöffnungen (Stomata) an Laubblättern, wobei eine Reduktion der Leitfähigkeit eine typische Reaktion von Pflanzen auf Stress, meist Trockenstress, darstellt. Durch das Verschließen der Stomata werden Transpiration und Gasaustausch vermindert, wodurch einem Wasserverlust entgegengewirkt wird (Jones 1998). Die stomatäre Leitfähigkeit wurde mit einem AP 4 Porometer (Delta-T Devices) gemessen. Es wurden pro MP je 5 Messungen und damit insgesamt 25 Messungen pro Standort durchgeführt. Die Messungen, die mittels Clip an Einzelblättern erfolgen, wurden zu einem Zeitpunkt durchgeführt, an dem es sonnig und der Himmel möglichst wolkenfrei war. Weiters wurde darauf geachtet, den zeitlichen Abstand zwischen den Einzelmessungen so kurz wie möglich zu halten.

(8) Transpirationsrate (E)

Die Transpirationsrate [mmol m^{-2} s^{-1}], welche auf die Verdunstungsleistung einer Pflanze hinweisen kann (Nobel 2020), wurde im Rahmen der HEDWIG-Messkampagnen mit einem LCi T (von ADC BioScientific Ltd.) ermittelt (Buttinger 2024). Dies ist ein portables Photosynthese-Sensorsystem zur Einschätzung der Karbondioxid-Assimilation und Pflanzenwasser-Wasser-Beziehungen.

Dabei wurden pro MP je 5 Messungen innerhalb des Messrahmens gespeichert, wodurch sich 25 Messungen pro Standort ergaben. Die Messungen an den Blättern erfolgen bei direkter Sonneneinstrahlung auf das Blattwerk. Die Messungen per se sollen innerhalb eines kurzen Zeitintervalls erfolgen. Bei den ausgewählten Blättern muss es sich um vitale Exemplare handeln, wobei pro Blatt weiters keine Mehrfachmessungen durchgeführt werden.

(9) Infrarot-Thermographie (IRT)

Die Oberflächentemperatur der Begrünung wurde mit einer Testo 885 Wärmebildkamera (Testo GmbH) aufgenommen. Die Aufnahmen pro MP wurden auf größere Ausschnitte der Zielfläche angefertigt. Anschließend wurden aus den Aufnahmen der Höchst- und Tiefsttemperaturwert dargestellt und die Temperaturskalen hinzugefügt. Es wurde hierbei ein besonderes Augenmerk auf die Bandbreite der auf den Aufnahmen dargestellten Baustoffe geachtet, um einen Einblick zur Wärmeabstrahlung und Temperaturverteilung zu gewinnen.

In der Wärmebilddarstellung wurde die mittlere Tageslufttemperatur des Messzeitraums 09:00-17:00 als Bezugsgröße in der Temperaturskala vermerkt.

(10) Blatttemperatur (T_{leaf})

Die Blatttemperatur wird zusammen mit der Transpirationsrate E im Messgerät LCi T Photosynthese-Sensor (ADC BioScientific Ltd.) aufgenommen. Bei Blättern, die für das Messgerät ungeeignet waren, wurde ein Infrarot-Temperaturmessgerät (Laserliner ThermoSpot, UMAREX GmbH & Co KG) verwendet. Für das Messgerät LCiT sind Blätter ungeeignet, wenn sie aufgrund ihrer geringen Größe oder schlechten Vitalität nicht in der Blattkammer platziert werden können.

(11) Lufttemperatur (Luft-T_v und Luft-T_h)

Die Lufttemperatur wurde mit 2 ATMOS 14 (Meter Group) Sensoren gemessen. Bei Fassadenbegrünungen wurden die Sensoren auf einem Stativ in 1,5 m Höhe platziert. Ein Sensor wurde hinter die Begrünung und einer vor der Begrünung ausgerichtet.

Bei Dachbegrünungen wurde 1 Sensor auf der Substratoberfläche oder in der Begrünung platziert und der andere auf einem Stativ in 1,5m Höhe.

(12) Relative Luftfeuchte (Luft-F_v und Luft-F_h)

Die relative Luftfeuchte wurde mit 2 ATMOS 14 (Meter Group) Sensoren gemessen Bei Fassadenbegrünungen wurden die Sensoren auf einem Stativ in 1,5 m Höhe platziert. Ein Sensor wurde in die Begrünung und einer vor der Begrünung ausgerichtet. Bei Dachbegrünungen wurde ein Sensor auf der Substratoberfläche oder in der Begrünung platziert und der andere auf einem Stativ in 1,5m Höhe.

(13) Solarstrahlung (I_{sol})

Die Solarstrahlung wurde mit 2 Silicon Cell Pyranometer SP-110 von Apogee Instrument, Inc. erfasst. Bei den Fassadenbegrünungen wurde 1 Sensor vor der Begrünung und 1 Sensor hinter der Begrünung auf einem Stativ in 150 cm Höhe vertikal installiert. Bei den Dachbegrünungen wurde 1 Sensor an der Substratoberfläche unter/in der Vegetationsschicht und 1 Sensor über der Begrünung auf einem Stativ in 150 cm Höhe horizontal positioniert.

(14) Bioshading Coefficient B_{SC} (Grünverschattungsfaktor F_{bs})

Der Grünverschattungsfaktor (F_{bs}) wurde aus den Strahlungsdaten der Pyranometer-Sensoren SP-110 (Apogee Instruments) mit einem Wellenspektrum von 360 – 1.120 nm errechnet. Bei Fassadenbegrünungen wurden die Sensoren auf einem Stativ in 1,5 m Höhe platziert. Ein Sensor wurde hinter der Begrünung und einer vor der Begrünung vertikal ausgerichtet.

Bei Dachbegrünungen wurden die Sensoren horizontal ausgerichtet. Ein Sensor wurde unter dem Laub an der Bodenoberfläche platziert und der andere auf einem Stativ in 1,5 m Höhe. Anschließend wurde der Grünverschattungsfaktor (BSC) nach Poiss et al. (2025) wie folgt berechnet:

$$BSC = \frac{I_{sol}\ \text{hinter/in Begrünung}}{I_{sol}\ \text{vor/über Begrünung}}$$

(15) Strahlungsbilanz (I_{NR})

Die Strahlungsbilanz wurde mit 3 SN-500 Net-Radiometer-Sensoren von Apogee Instruments, Inc. erfasst. Bei den Fassadenbegrünungen wurden 2 Sensoren auf einem Stativ in 160 cm Höhe vertikal installiert und mit 20 cm Abstand zur Fassadenbegrünung aufgestellt. Ein Sensor wurde horizontal als Referenz in 1 m Höhe installiert.

Bei den Dachbegrünungen wurden die Strahlungssensoren in unterschiedlichen Höhen, je nach vorhandener Vegetation, aufgestellt. Die Positionierung der Sensoren wurde in 20 cm über dem Substrat bzw. 20 cm oberhalb der Vegetation und als Referenz Messung in 1,5 m Höhe installiert.

Die Messungen erfassen die kurzwellige Strahlung und kurzwellige Rückstrahlung, sowie die langwellige Strahlung und langwellige Rückstrahlung.

(16) Kurzwellige Strahlungsbilanz Transmission, Absorption und Albedo

In Abbildung 11 wird die Strahlungsintensität der Sonnenstrahlung gegenüber den Wellenlängen dargestellt. Das Spektrum der verwendeten Strahlungssensoren SN-500 (295 – 2.685 nm) wird in blau angezeigt und der Sensor SP-110 (360 – 1.120 nm) in lila. Die Sensoren erfassen einen überlappenden Spektralbereich. Der Spektralbereich mit der höchsten Strahlungsintensität (Peaks) wird von beiden Sensoren (Sensoren SN-500 (295 – 2.685 nm) und SP-110 (360 – 1.120 nm), Apogee Instruments) abgedeckt. Aufgrund der überlappenden Erfassung der Spektralbereiche und der beinahe identen Peaks können die Daten für die Strahlungsintensität aus den beiden Sensoren miteinander verglichen und verknüpft werden

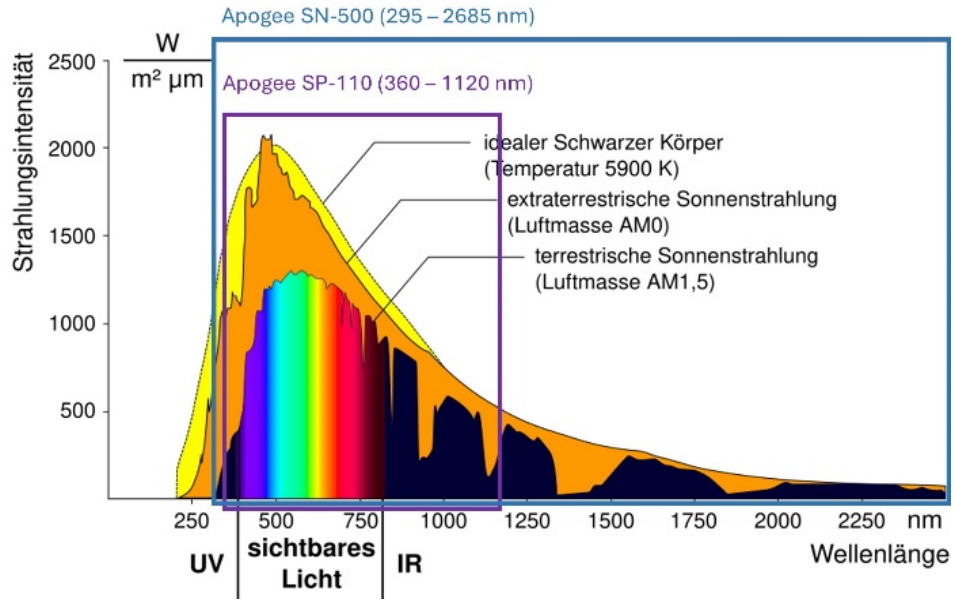


Abbildung 11: Strahlungsintensität der Sonnenstrahlung mit Strahlungssensor Spektrum (Bildquelle: wikicommons, verändert).

Die Transmission ist die Durchlässigkeit solarer Strahlung und ergibt sich aus der Strahlung vor und hinter dem Grünkörper I_{sol}. Die Reflexion wird über den Net-Radiometer-Sensor SN-500 von Apogee Instruments erfasst und in % ausgedrückt. Die Albedo wird berechnet als Quotient aus reflektierter und einfallender Strahlung. Der Anteil der Absorption lässt sich näherungsweise mit Hilfe von Transmission und Reflexion berechnen und basiert auf der Formel der Energieerhaltung.

$$E_{ges} = E_{reflektiert} + E_{transmittiert} + E_{absorbiert}$$

(17) Verdampfungsenthalpie (Δ_{Hv})

Da durch die Transpiration Wasser verdunstet und gleichzeitig Wärme aus der Umgebung entzogen wird, kann aus der Transpirationsrate (E) die Wärmeenergie (Q) berechnet werden. Diese Wärmeabsorption führt zu einer Kühlung (latenter Wärmefluss).

Durch die Transpirationsrate wird die Wasserabgabe eines Blattes in mmol m^{-2} s^{-1} angegeben. Da sich die Transpiration auf Wasser (H_2O) bezieht und die molare Masse von Wasser 18 g mol^{-1} beträgt, entspricht 1 mmol H_2O einer Masse von 0,018 g. Die Umrechnung von mmol m^{-2} s^{-1} in g m^{-2} s^{-1} erfolgt durch Multiplikation mit 0,018. Zur Umrechnung auf eine stündliche Rate wird der Wert mit 3.600 multipliziert. Unter der Annahme von einer Wasserdichte von etwa 1 g ml^{-1} entspricht die Masse näherungsweise dem Volumen in ml.

Zur Berechnung des Energiebedarfs der Verdunstung wird die spezifische Verdampfungsenthalpie von Wasser herangezogen (≈2.450 kJ kg^{-1} bei 20 °C; 2.257 kJ kg^{-1} bei 100 °C). Die Multiplikation der verdunsteten Wassermasse mit der spezifischen Verdampfungsenthalpie ergibt den Energiefluss in kJ/h. Die Umrechnung von kJ in Wh erfolgt mit dem Faktor 0,278; für kWh wird der Wert durch 1.000 dividiert (Atkins et de Paula 2006, BIPM 2019).

5.1.2.3 Verortung der Messpunkte sowie Sensorik [Messkampagnen] für FB

FB1-tW Amtshaus Margareten

Die Messpunkte (MP) des Standorts wurden so angeordnet, dass eine repräsentative Erfassung der gesamten Fassadenbegrünung gewährleistet ist. An den ausgewählten Messpunkten werden umfangreiche Messungen durchgeführt. Der Standort des Strahlungssensors (SN-500) ist ebenfalls gekennzeichnet. Die MP wurden mit Hilfe eines Hubsteigers aufgenommen.

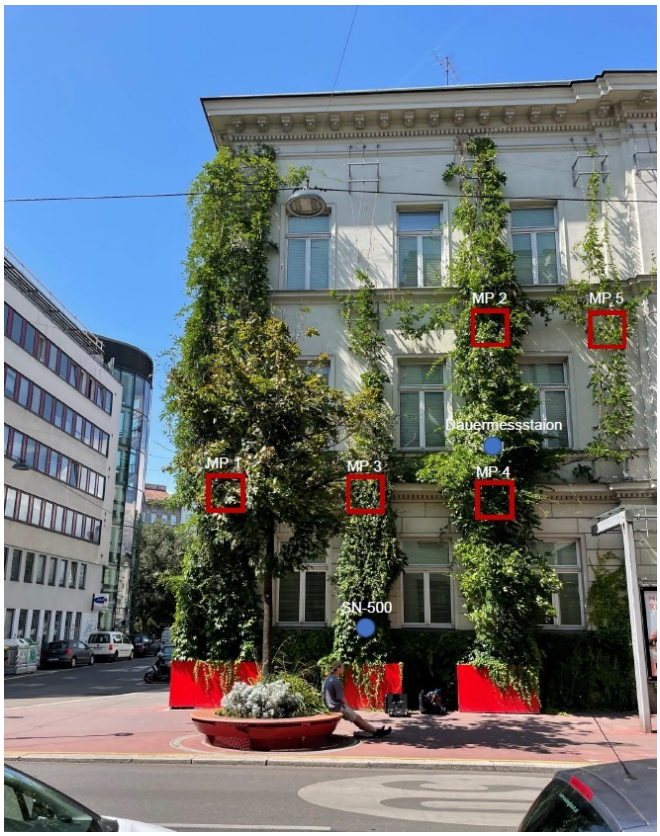


Abbildung 12: Amtshaus Margareten, Verortung Messpunkte (©IBLB).

Die räumliche Verteilung der Messpunkte umfasst:

- MP 1 beim linken Trog in ca. 3 m Höhe;
- MP 2 beim rechten Trog in ca. 9 m Höhe;
- MP 3 beim mittleren Trog in ca. 3 m Höhe:
- MP 4 beim rechten Trog in ca. 3 m Höhe:
- MP 5 beim rechten Ableger in ca. 9 m Höhe befindlich.

Der Sensor zur Solarstrahlung (SN-500) wurde im mittleren Trog vor der Fassadenbegrünung installiert.

FB2-bP Bürogemeinschaft Kräftner

Die Messpunkte (MP) des Standorts wurden so angeordnet, dass eine repräsentative Erfassung der gesamten Fassadenbegrünung gewährleistet ist. An den ausgewählten Messpunkten werden

umfangreiche Messungen durchgeführt. Der Standort des Strahlungssensors (SN-500) ist ebenfalls gekennzeichnet. Die MP wurden mit Hilfe einer Leiter aufgenommen.



Abbildung 13: Bürogemeinschaft Kräftner, Verortung Messpunkte (©IBLB).

Die räumliche Verteilung der Messpunkte umfasst:

- MP 1 links vom Fenster in ca. 1 m Höhe;
- MP 2 links vom Fenster in ca. 2 m Höhe;
- MP 3 links vom Fenster in ca. 3 m Höhe;
- MP 4 mittig vom Fenster in ca. 3 m Höhe;
- MP 5 rechts vom Fenster in ca. 3 m Höhe befindlich.

Der Sensor zur Solarstrahlung (SN-500) wurde links vom Fenster in ca. 1,5m Höhe installiert.

FB3-m Kraftwerk Simmering

Die Messpunkte (MP) des Standorts wurden so angeordnet, dass eine repräsentative Erfassung der gesamten Fassadenbegrünung gewährleistet ist. An den ausgewählten Messpunkten werden umfangreiche Messungen durchgeführt. Der Standort des Strahlungssensors (SN-500) und die Dauermessstation sind ebenfalls gekennzeichnet. Die MP wurden mit Hilfe einer Leiter aufgenommen.



Abbildung 14: Kraftwerk Simmering, Verortung Messpunkte (©IBLB).

Die räumliche Verteilung der Messpunkte umfasst:

- MP 1 oberhalb vom rechten Fenster in ca. 4,5 m Höhe;
- MP 2 oberhalb vom mittleren Fenster in ca. 4,5 m Höhe;
- MP 3 oberhalb vom mittleren Fenster in ca. 3 m Höhe;
- MP 4 oberhalb vom linken Fenster in ca. 4,5 m Höhe;
- MP 5 oberhalb vom linken Fenster in ca. 3 m Höhe befindlich.

Der Sensor zur Solarstrahlung (SN-500) wurde auf dem Vordach ca. 1,5 m von der linken Fassadenbegrünung und in 1 m Höhe installiert.

FB4-w MA 48

Die Messpunkte (MP) des Standorts wurden so angeordnet, dass eine repräsentative Erfassung der gesamten Fassadenbegrünung gewährleistet ist. An den ausgewählten Messpunkten werden umfangreiche Messungen durchgeführt. Der Standort des Strahlungssensors (SN-500) und die Dauermessstation ist ebenfalls gekennzeichnet. Die MP wurden mit Hilfe eines Hubsteigers aufgenommen.



Abbildung 15: MA 48, Verortung Messpunkte (©IBLB).

Die räumliche Verteilung der Messpunkte umfasst:

- MP 1 ca. 2 m rechts vom rechten Fenster im 3. OG in ca. 12 m Höhe;
- MP 2 ca. 2 m rechts von der OK vom rechten Fenster im 2. OG in ca. 10 m Höhe;
- MP 3 rechts vom mittleren Fenster im 3. OG in ca. 12 m Höhe;
- MP 4 oberhalb vom rechten Fenster im 4. OG in ca. 14 m Höhe;
- MP 5 oberhalb vom rechten Fenster im 2. OG in ca. 10 m Höhe befindlich.

Der Sensor zur Solarstrahlung (SN-500) wurde oberhalb vom 1. OG in ca. 6 m Höhe installiert.

FB5-bW Lichtblau Wagner

Die Messpunkte (MP) des Standorts wurden so angeordnet, dass eine repräsentative Erfassung der gesamten Fassadenbegrünung gewährleistet ist. An dem Standort teilt sich die Fassade in eine linke und rechte Fassadenhälfte. An den ausgewählten Messpunkten werden umfangreiche Messungen durchgeführt. Der Standort des Strahlungssensors (SN-500) ist ebenfalls gekennzeichnet. Die MP wurden mit Hilfe einer Leiter aufgenommen.



Abbildung 16: Lichtblau Wagner, Verortung Messpunkte (©IBLB).

Die räumliche Verteilung der Messpunkte umfasst:

- MP 1 an der linken Fassadenseite in ca. 2 m Höhe;
- MP 2 mittig an der linken Fassadenseite in ca. 2 m Höhe;
- MP 3 an der rechten Fassadenseite in ca. 3,5 m Höhe;
- MP 4 an der rechten Fassadenseite in ca. 3,5 m Höhe;
- MP 5 an der rechten Fassadenseite in ca. 6 m Höhe befindlich.

Der Sensor zur Solarstrahlung (SN-500) wurde an der linken Fassadenseite, rechts neben MP 2, in ca. 2 m Höhe installiert.

FB6-Privathaus Ternitz

Die Messpunkte (MP) des Standorts wurden so angeordnet, dass eine repräsentative Erfassung der gesamten Fassadenbegrünung gewährleistet ist. An den ausgewählten Messpunkten werden umfangreiche Messungen durchgeführt. Der Standort des Strahlungssensors (SN-500) ist ebenfalls gekennzeichnet. Die MP wurden mit Hilfe einer Leiter aufgenommen.

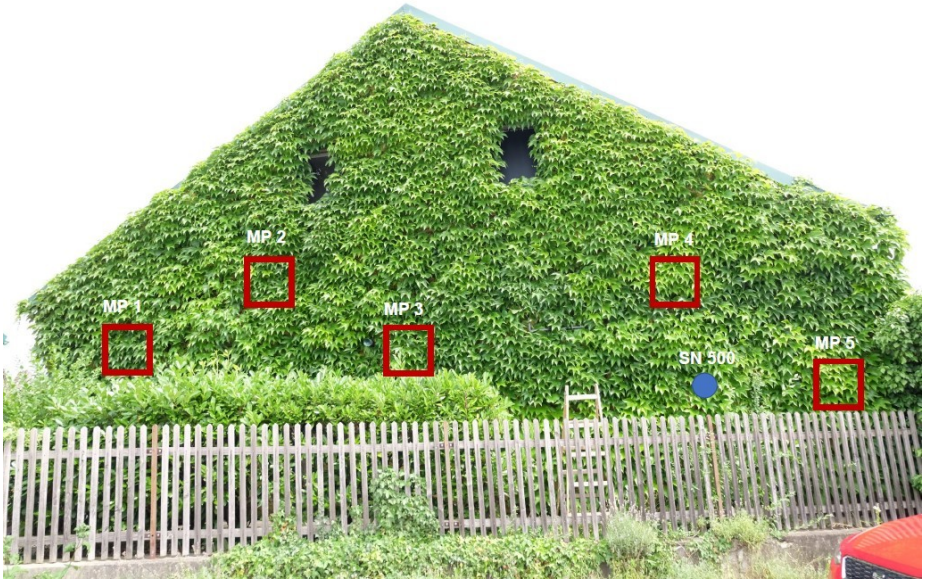


Abbildung 17: Privathaus Ternitz, Verortung Messpunkte (©IBLB).

Die räumliche Verteilung der Messpunkte umfasst:

- MP 1 2 m von der linken Fassadenkante in ca. 2 m Höhe;
- MP 2 5 m von der linken Fassadenkante in ca. 4 m Höhe;
- MP 3 mittig an der Fassade in ca. 2 m Höhe;
- MP 4 5 m von der rechten Fassadenkante in ca. 4 m Höhe;
- MP 5 5 m von der rechten Fassadenkante in ca. 2 m Höhe befindlich.

Der Sensor zur Solarstrahlung (SN-500) wurde an der linken Fassadenseite, rechts neben MP 2, in ca. 2 m Höhe installiert.

FB7-bW BH Korneuburg

Die Messpunkte (MP) des Standorts wurden so angeordnet, dass eine repräsentative Erfassung der gesamten Fassadenbegrünung gewährleistet ist. An dem Standort teilt sich die Fassade in eine große westliche Fassadenseite und eine südliche Fassadenseite. An den ausgewählten Messpunkten werden umfangreiche Messungen durchgeführt. Der Standort des Strahlungssensors (SN-500) ist ebenfalls gekennzeichnet. Die MP wurden mit Hilfe einer Leiter aufgenommen.



Abbildung 18: BH Korneuburg, Verortung Messpunkte (©IBLB).

Die räumliche Verteilung der Messpunkte umfasst:

- MP 1 an der südlichen Seite, ca. 3m vom Gebäudeeck in ca. 4,5 m Höhe;
- MP 2 an der südlichen Seite, ca. 1,5 m vom Gebäudeeck in ca. 2 m Höhe;
- MP 3 an der westlichen Seite, an der 3. *Wisteria* von links in ca. 4,5 m Höhe;
- MP 4 an der westlichen Seite, an der 2. *Wisteria* von links in ca. 4,5 m Höhe;
  MP 5 an der westlichen Seite und ist an der 3. Wisteria von links in ca. 1,5 m Höhe befindlich.

Der Sensor zur Solarstrahlung (SN-500) wurde an der westlichen Fassadenseite an der 4. Wisteria, in ca. 1,5 m Höhe installiert.

FB8-m Hotel Gilbert

An diesem Standort war der Zugang für die Messkampagne sehr eingeschränkt, da es von außen keine Möglichkeit gab die Fassadenbegrünung zu messen. Der Zugang zur Fassadenbegrünung erfolgte deshalb über 5 Zugangspunkte. Die Messkampagne wurde über die Fenster durchgeführt und die Messungen verlaufen entlang der Zugangspunkte an den Fenstern. An den ausgewählten Zugangspunkten wurden kompaktere Messungen durchgeführt.

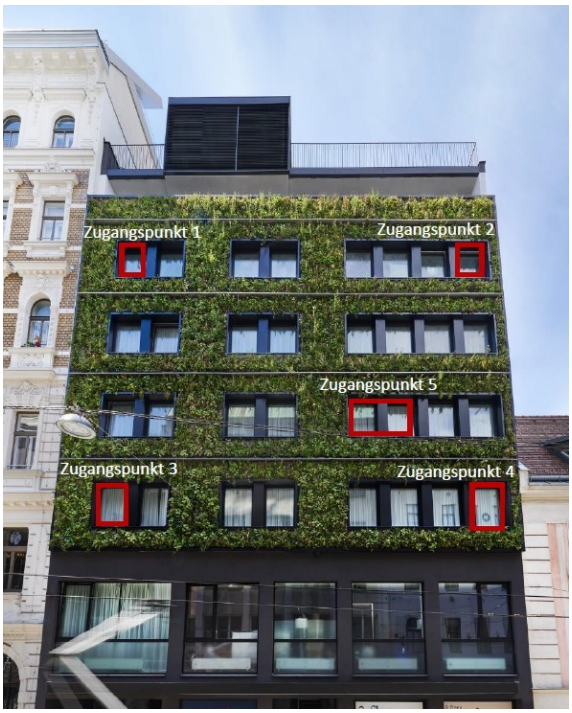


Abbildung 19: Hotel Gilbert, Verortung Zugangspunkte (©IBLB).

Die räumliche Verteilung der Messpunkte umfasst:

- Zugangspunkt 1 im 5. OG am linken Fenster;
- Zugangspunkt 2 im 5. OG am rechten Fenster;
- Zugangspunkt 3 im 2. OG am linken Fenster;
- Zugangspunkt 4 im 2. OG am rechten Fenster;
- Zugangspunkt 5 im 3. OG am 5- Fenster von links befindlich.

5.1.2.4 Verortung der Messpunkte sowie Sensorik [Messkampagnen] für DB

DB1-e Steinbauer Development (extensive Dachbegrünung)

Die Messpunkte (MP) des Standorts wurden so angeordnet, dass eine repräsentative Erfassung der gesamten Dachbegrünung gewährleistet ist. An den ausgewählten Messpunkten werden umfangreiche Messungen durchgeführt. Der Standort des Strahlungssensors (SN-500) ist ebenfalls gekennzeichnet.



Abbildung 20: Steinbauer Development, extensiv - Verortung Messpunkte (Bildquelle: Google Maps Dezember 2025, © Airbus, Maxar Technologies, Map data 2025, verändert)

Die räumliche Verteilung der Messpunkte umfasst:

- MP 1 in der südwestlichen Ecke, ca. 2 m von der Attika entfernt;
- MP 2 in der nordwestlichen Ecke, ca. 2 m von der Attika entfernt;
- MP 3 im nördlichen Bereich, ca. 2 m von der Attika entfernt;
- MP 4 im südwestlichen Bereich, ca. 1 m von der Attika entfernt;
- MP 5 im östlichen Bereich des Daches, ca. 2 m von der Attika entfernt;

Der Sensor zur Solarstrahlung (SN-500) liegt zwischen MP 1 und MP 2.

DB1-i Steinbauer Development (intensive Dachbegrünung)

Die Messpunkte (MP) des Standorts wurden so angeordnet, dass eine repräsentative Erfassung der gesamten Dachbegrünung gewährleistet ist. Die Vegetationsstruktur ist an dem Standort mehrschichtig und sehr vielfältig und beinhaltet neben Kleinbäumen und Sträuchern, Stauden, Gräser- und Kräutergesellschaften. An den ausgewählten Messpunkten werden umfangreiche Messungen durchgeführt. Der Standort des Strahlungssensors (SN-500) ist ebenfalls gekennzeichnet.



Abbildung 21: Steinbauer Development, intensiv - Verortung Messpunkte (Bildquelle: Google Maps Dezember 2025, © Airbus, Maxar Technologies, Map data 2025, verändert)

Die räumliche Verteilung der Messpunkte umfasst:

- MP 1 im westlichen Bereich, ca. 3 m von der Attika entfernt;
- MP 2 im südlichen Bereich in der Rasenstruktur, ca. 2 m von der Terrasse entfernt;
- MP 3 im südwestlichen Bereich;
- MP 4 im östlichen Bereich, ca. 4 m von der Attika entfernt;
- MP 5 im nördlichen Bereich des Daches.

Der Sensor zur Solarstrahlung (SN-500) liegt 2 m südlich von MP 5.

DB2-e HTL St. Pölten (extensive Dachbegrünung)

Die Messpunkte (MP) des Standorts wurden so angeordnet, dass eine repräsentative Erfassung der gesamten Dachbegrünung gewährleistet ist. An den ausgewählten Messpunkten werden umfangreiche Messungen durchgeführt. Der Standort des Strahlungssensors (SN-500) ist ebenfalls gekennzeichnet.



Abbildung 22: HTL St. Pölten, extensive Dachbegrünung - Verortung Messpunkte (Bildquelle: Google Maps Dezember 2025, © Airbus, Maxar Technologies, Map data 2025, verändert).

Die räumliche Verteilung der Messpunkte umfasst:

- MP 1 am nordöstlichen Eck;
- MP 2 mittig, ca. 3 m vom Dachrand;
- MP 3 westlich, ca. 5 m vom Gebäude;
- MP 4 südwestlichen Eck;
- MP 5 westlich, ca. 5 m vom Gebäude befindlich.

Der Sensor zur Solarstrahlung (SN-500) liegt zwischen MP 1 und MP 2.

DB2-ri HTL St. Pölten (reduziert-intensive Dachbegrünung)

Die Messpunkte (MP) des Standorts wurden so angeordnet, dass eine repräsentative Erfassung der gesamten Dachbegrünung gewährleistet ist. An den ausgewählten Messpunkten werden umfangreiche Messungen durchgeführt. Der Standort des Strahlungssensors (SN-500) ist ebenfalls gekennzeichnet.



Abbildung 23: HTL St. Pölten, reduziert-intensive Dachbegrünung - Verortung Messpunkte (Bildquelle: Google Maps Dezember 2025, © Airbus, Maxar Technologies, Map data 2025, verändert).

Die räumliche Verteilung der Messpunkte umfasst:

- MP 1 am südwestlichen Eck;
- MP 2 am nordwestlichen Eck;
- MP 3 mittig;
- MP 4 am nordwestlichen Eck;
- MP 5 am nordöstlichen Eck befindlich.

Der Sensor zur Solarstrahlung (SN-500) liegt ca. 2 m nördlich von MP 3.

DB3-e Ilse-Wallentin-Haus BOKU University (extensive Dachbegrünung)

Die Messpunkte (MP) des Standorts wurden so angeordnet, dass eine repräsentative Erfassung der gesamten Dachbegrünung gewährleistet ist. An den ausgewählten Messpunkten werden umfangreiche Messungen durchgeführt. Der Standort des Strahlungssensors (SN-500) ist ebenfalls gekennzeichnet.

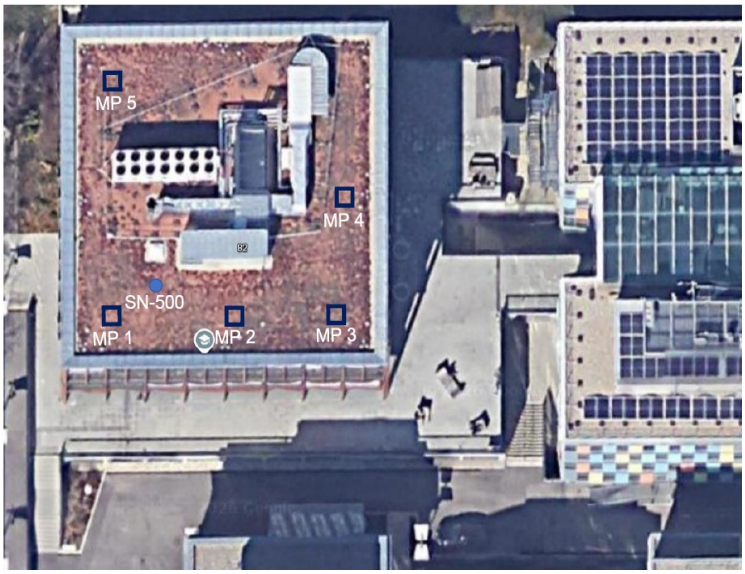


Abbildung 24: Ilse-Wallentin-Haus BOKU University, extensive Dachbegrünung - Verortung Messpunkte (Bildquelle: Google Maps Dezember 2025, © Airbus, Maxar Technologies, Map data 2025, verändert).

Die räumliche Verteilung der Messpunkte umfasst:

- MP 1 am südwestlichen Eck, ca. 6 m von der Attika entfernt;
- MP 2 im Süden in der Mitte, ca. 6 m von der Attika entfernt;
- MP 3 am südöstlichen Eck, ca. 6 m von der Attika entfernt;
- MP 4 im Osten in der Mitte, ca. 6 m von der Attika entfernt;
- MP 5 am nordwestlichen Eck, ca. 6 m von der Attika entfernt befindlich.

Der Sensor zur Solarstrahlung (SN-500) liegt zwischen MP 1 und MP 2.

DB4-ri Klangforum Wien (reduziert-intensive Dachbegrünung)

Die Messpunkte (MP) des Standorts wurden so angeordnet, dass eine repräsentative Erfassung der gesamten Dachbegrünung gewährleistet ist. An den ausgewählten Messpunkten werden umfangreiche Messungen durchgeführt. Der Standort des Strahlungssensors (SN-500) ist ebenfalls gekennzeichnet.

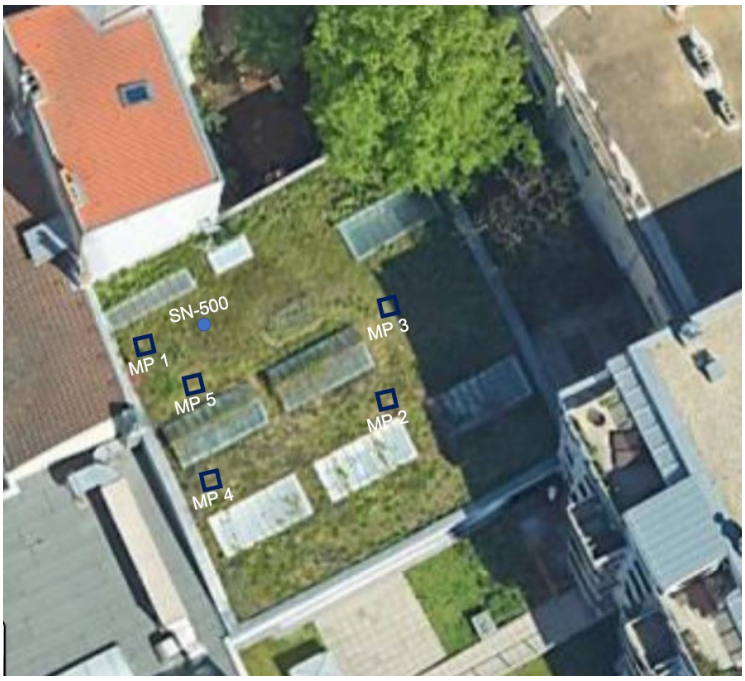


Abbildung 25: Klangforum Wien, reduziert-intensive Dachbegrünung - Verortung Messpunkte (Bildquelle: Google Maps Dezember 2025, © Airbus, Maxar Technologies, Map data 2025, verändert).

Die räumliche Verteilung der Messpunkte ist wie folgt:

- MP 1 am nordwestlichen Eck, ca. 2 m von der Attika entfernt;
- MP 2 mittig;
- MP 3 im Osten, ca. 5 m vom Gebäude;
- MP 4 im Westen zwischen den Dachfenstern, ca. 2 m von der Attika entfernt;
- MP 5 im Westen, ca. 3 m von der Attika entfernt befindlich.

Der Sensor zur Solarstrahlung (SN-500) liegt ca. 2 m westlich von MP 1.

DB5-e Garten Tulln (extensive Dachbegrünung)

Die Messpunkte (MP) des Standorts wurden so angeordnet, dass eine repräsentative Erfassung der gesamten Dachbegrünung gewährleistet ist. An den ausgewählten Messpunkten werden umfangreiche Messungen durchgeführt. Der Standort des Strahlungssensors (SN-500) ist ebenfalls gekennzeichnet.



Abbildung 26: Die Garten Tulln, extensive Dachbegrünung - Verortung Messpunkte (Bildquelle: Google Maps Dezember 2025, © Airbus, Maxar Technologies, Map data 2025, verändert).

Die räumliche Verteilung der Messpunkte ist wie folgt:

- MP 1 befindet sich am südwestlichen Eck, ca. 2 m von der Attika entfernt;
- MP 2 befindet sich mittig an der Westseite, ca. 2 m von der Attika entfernt;
- MP 3 befindet sich an der südwestlichen Gebäudeecke, ca. 2 m vom Gebäude;
- MP 4 befindet sich an der nordwestlichen Gebäudeecke, ca. 2 m von der Attika entfernt;
- MP 5 befindet sich am nordwestlichen Eck, ca. 3 m von der Attika entfernt;

Der Sensor zur Solarstrahlung (SN-500) liegt ca. 3 m östlich von MP 5.

DB6-e Gregor-Mendel-Haus BOKU University (extensive Dachbegrünung)

Die Messpunkte (MP) des Standorts wurden so angeordnet, dass eine repräsentative Erfassung der gesamten Dachbegrünung gewährleistet ist. An den ausgewählten Messpunkten werden umfangreiche Messungen durchgeführt. Der Standort des Strahlungssensors (SN-500) ist ebenfalls gekennzeichnet.



Abbildung 27: Gregor-Mendel-Haus BOKU University, extensive Dachbegrünung - Verortung Messpunkte (Bildquelle: Google Maps Dezember 2025, © Airbus, Maxar Technologies, Map data 2025, verändert).

Die räumliche Verteilung der Messpunkte umfasst:

- MP 1 im südwestlichen Eck, ca. 1,5 m von der Attika entfernt;
- MP 2 zentral platziert;
- MP 3 im südöstlichen Eck, ca. 1,5 m von der Attika entfernt;
- MP 4 im nördlichen Bereich vom Dach, ca. 1,5 m von der Attika entfernt;
- MP 5 im nordöstlichen Eck, ca. 1,5 m von der Attika entfernt befindlich.

Der Sensor zur Solarstrahlung (SN-500) liegt ca. 5 m westlich von MP 2.

5.2 Messkonzept und Monitoring-Setup Innenraum

5.2.1 Messtechnische Erfassung und Qualitätssicherung

Um die thermische Dynamik der sechs Dauermessobjekte zu erfassen, wurde eine kontinuierliche Langzeitmessung durchgeführt. Zur Qualitätssicherung der Daten wurden sämtliche Sensoren vor Messbeginn gegen ein kalibriertes Referenzgerät abgeglichen und entsprechend justiert.

Die Platzierung der Messgeräte erfolgte strategisch an spezifischen Schlüsselpunkten, um sowohl die raumklimatischen Zustände als auch die thermische Interaktion zwischen den Begrünungssystemen und der Gebäudehülle abzubilden. Dabei wurde methodisch zwischen Fassaden- und Dachbegrünungsystemen differenziert.

5.2.1.1 Raumluftkonditionen (Kernzone)

In allen Objekten wurde an einer repräsentativen, strahlungsgeschützten Innenwand ein kombinierter Sensor zur Erfassung der Raumlufttemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit installiert. Diese Positionierung stellte sicher, dass die Messung weitgehend unbeeinflusst von direkter solarer Einstrahlung bleibt und somit den thermischen Grundzustand des Raums widerspiegelt. Diese Daten dienten als Primärquelle für die Komfortbewertung nach dem adaptiven Modell lt. ÖNORM EN 16798-1 (Austrian Standards International 2024) sowie nach dem Komfortzonen-Modell von Freymark et Leusden (1951).

5.2.1.2 Thermische Interaktion mit der Gebäudehülle

Je nach Art des Begrünungssystems wurden die Oberflächen- und Zwischenraumtemperaturen unterschiedlich erfasst, um die energetische Schutzwirkung der Vegetation zu quantifizieren:

- Objekte mit Fassadenbegrünung (4 Standorte): Hier wurde ein Oberflächentemperaturfühler an der Innenseite der Außenwand appliziert. Dieser Messpunkt dient dazu, die Phasenverschiebung und die thermische Trägheit der massiven Wandkonstruktionen zu bestimmen und den Einfluss der fassadengebundenen Verschattung auf den Wärmedurchgang zu untersuchen.
    - Amtshaus Margareten [FB1-tW]
    - Bürogemeinschaft Kräftner [FB2-bP]
    - Kraftwerk Simmering [FB3-m]
    - Amtsgebäude MA 48 [FB4-w]
- Objekte mit Dachbegrünung (2 Standorte): Bei diesen Objekten lag der Fokus auf dem vertikalen Wärmestrom durch den Dachaufbau. Gemessen wurde die Oberflächentemperatur der Innendecke im Raum sowie zusätzlich die Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit im Deckenhohlraum (abgehängte Decke bzw. Dachboden). Diese

differenzierte Messung erlaubte es, die Dämm- und Pufferwirkung des Gründachaufbaus gegenüber der äußeren Hitzeeinwirkung zu bewerten.

- Steinbauer (Dach extensiv) [DB1-e]
- HTL St. Pölten (2 Räume, Dach extensiv und reduziert-intensiv) [DB2-e und DB2-ri]

5.2.1.3 Fensternahe Zone und Erfassung des Öffnungszustands

Zur Überwachung des Fensterzustands wurde an ausgewählten Positionen eine Kombination aus Magnetkontakten und Temperatur- sowie Feuchtesensoren eingesetzt. Während die Magnetkontakte den Öffnungszustand der Fensterflügel protokollierten, diente die zusätzliche Sensorik in unmittelbarer Fensternähe dazu, das lokale Raumklima an diesen Punkten zu erfassen. Damit konnten manuelle Lüftungsvorgänge oder unkontrollierte Infiltration für die jeweiligen Messbereiche identifiziert werden, um deren Einfluss auf die thermische Bilanz bei der Auswertung zu berücksichtigen.

5.2.2 Sensorik, Datenübertragung und Monitoring

Um eine lückenlose Erfassung der klimatischen Parameter über alle sechs Monitoringobjekte hinweg zu gewährleisten, kam ein hybrides Messnetzwerk zum Einsatz. Die Auswahl der Übertragungsstandards (LoRaWan, EnoCean, kabelgebunden etc.) erfolgte dabei auf Basis der baulichen Gegebenheiten (massive Mauerstärken, Reichweitenanforderungen), wobei vorwiegend energieeffiziente Funktechnologien genutzt wurden.

In spezifischen Fällen wurde das Standard-Mess-Setup (Raumklima, Oberfläche, Fensterstatus) um zusätzliche Sensoren erweitert (Tabelle 8). Dies betraf das Objekt in Wien Simmering (LoRaWAN). Hier wurden punktuell Sensoren zur Betriebsüberwachung der Klimaanlage eingesetzt, um deren Einfluss auf die thermische Bilanz zu identifizieren.

Tabelle 8: Verwendete Sensorik für die Innenraummessungen.

Komponente	**Hardware / Modell**	**Messgrößen**
Wireless Multisensor	EnOcean[1] STM 550	Temp., Feuchte, Licht, Beschleunigung, Magnetkontakt
Externer Temperatur- und Feuchtefühler	Sensirion (SHT-Serie)	Temperatur, rel. Luftfeuchtigkeit
Externer Temperatursensor	TMP117, Texas Instruments	Temperatur
LoRaWAN[2] Node	Dragino LHT65N-NE117 (inkl. TI TMP117)	Temperatur (intern/extern), rel. Luftfeuchtigkeit

[1] EnOcean - energieautarker Funkstandard basierend auf Energy-Harvesting-Technologie

[2] LoRaWAN - Low-Power-Wide-Area-Network zur energieeffizienten Weitbereichs-Datenübertragung

5.2.3 Bewertung thermischer Komfort

Die Bewertung des raumklimatischen Zustands erfordert eine differenzierte Betrachtung physikalischer Messgrößen im Kontext der menschlichen Wahrnehmung. Da moderne Gebäude zunehmend darauf ausgelegt sind, den Energieverbrauch zu minimieren und gleichzeitig das Wohlbefinden der Nutzer zu maximieren, reicht eine rein statische Betrachtung der Lufttemperatur oft nicht aus. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden die erhobenen Messdaten daher unter Anwendung zweier komplementärer Ansätze evaluiert, dem adaptiven Komfortmodell nach ÖNORM EN 16798-1 (Austrian Standards International 2024) sowie dem Behaglichkeitsmodell nach Freymark und Leusden (1951).

Den methodischen Schwerpunkt bildet das adaptive Komfortmodell der ÖNORM EN 16798-1 (Austrian Standards International 2024). Dieser Ansatz trägt der Erkenntnis Rechnung, dass die thermische Erwartungshaltung der Nutzer*innen in natürlich belüfteten Gebäuden keine konstante Größe ist, sondern in direkter Korrelation zur gleitenden mittleren Außentemperatur steht. Durch diesen dynamischen Bewertungsrahmen wird berücksichtigt, dass Menschen über einen längeren Zeitraum hinweg physiologische und verhaltensbedingte Anpassungsmechanismen – wie die Wahl der Kleidung oder die Veränderung der Luftgeschwindigkeit durch Fensterlüftung – entwickeln.

Die adaptive Bewertung nach ÖNORM EN 16798-1 (Austrian Standards International 2024) wurde ergänzt durch das Komfortzonenmodell nach Freymark und Leusden (1951) zur Abbildung der Raumluftfeuchtigkeit. Während das adaptive Modell der Norm die operative Innentemperatur in den Fokus rückt, bleibt die relative Luftfeuchtigkeit in diesem Rahmen als explizites Bewertungskriterium weitgehend unberücksichtigt. Um diese für das Wohlbefinden und ein gesundes Raumklima wesentliche Variable dennoch bewerten zu können, wurde ergänzend das Modell nach Freymark und Leusden herangezogen. Das klassische Behaglichkeitsfeld nach Freymark und Leusden erlaubt es, die Interaktion zwischen Lufttemperatur und relativer Feuchte in einem empirisch belegten Korridor abzubilden. Dies ist insbesondere notwendig, um kritische Zustände wie eine zu geringe Luftfeuchtigkeit (Reizung der Schleimhäute) oder eine zu hohe Feuchte (Schwüleempfinden und Schimmelrisiko) zu identifizieren, welche durch das rein temperaturfokussierte adaptive Modell nicht erfasst werden.

Durch die Kombination beider Modelle wird eine ganzheitliche Analyse der Messwerte ermöglicht, die sowohl der dynamischen Temperaturwahrnehmung als auch den gesundheitsrelevanten Anforderungen an die Luftfeuchte gerecht wird.

Zusätzlich zu den oben genannten Modellen zur Bewertung der Behaglichkeit wurde eine quantitative Analyse der thermischen Belastung durchgeführt. Hierfür erfolgte eine vergleichende Gegenüberstellung der Übertemperaturstunden an den sechs untersuchten Standorten für den Zeitraum des Sommers 2024. Als Schwellenwert für diese Auswertung wurde ein Stundenmittelwert der operativen Raumtemperatur von > 25 °C definiert. Für diese Untersuchung wurde ein Schwellenwert von > 25 °C als Stundenmittelwert festgelegt. Diese Festlegung diente dazu, den Beginn des Kühlbedarfs präziser zu erfassen, da die 25-Grad-Marke in der modernen Gebäudeplanung oft als Grenze gilt, ab der die thermische Akzeptanz ohne unterstützende Maßnahmen sinkt. Der Zweck dieser Auswertung bestand darin, die zeitliche Dauer zu quantifizieren, in der an den sechs Standorten die Schwelle überschritten wurde.

5.2.4 Methodik zur Ermittlung der systematischen Temperaturabweichung (Bias)

Die Untersuchung der thermischen Kopplung zwischen der Raumluft und den umschließenden Bauteilflächen erfolgte auf Basis einer statistischen Auswertung der gemessenen Stundenmittelwerte. Zur Quantifizierung der systematischen Abweichung (Bias in Grad Kelvin (K)) zwischen der Raumlufttemperatur und der jeweiligen Oberflächentemperatur wurden die Datensätze in einem Streudiagramm gegenübergestellt. Die Quantifizierung des systematischen Bias folgt den statistischen Bewertungsmaßstäben. Als Referenz dient hierbei die Identitätslinie (y=x), welche den theoretischen Zustand vollkommener Temperaturübereinstimmung repräsentiert. Der Bias wurde als konstante Verschiebung mathematisch über eine Regressionsgerade mit der festen Steigung Eins ermittelt. Die resultierende Funktionsgleichung der Form $y=x+\Delta T$ (beispielsweise y=x+1,04 K) beschreibt dabei den mittleren Versatz der Messpunkte zur Identitätslinie.

Zusätzlich wurde der Korrelationskoeffizient r bestimmt, um die Güte der thermischen Kopplung zu validieren. Während der Bias den systematischen Offset beschreibt, gibt r Auskunft darüber, inwieweit die Schwankungen der Oberflächentemperatur den Veränderungen der Raumlufttemperatur linear folgen. Die Wahl dieses Verfahrens ermöglicht es, zufällige Messfehler und kurzzeitige Schwankungen durch die Mittelwertbildung zu eliminieren und die stationäre Temperaturdifferenz als systematischen Offset auszuweisen. Ein positiver Achsenabschnitt verdeutlicht hierbei ein höheres Temperaturniveau der Oberfläche gegenüber der Raumluft, während ein negativer Wert die thermisch bedingte Abkühlung der Bauteiloberfläche (z. B. infolge von Transmissionswärmeverlusten) quantifiziert.

5.3 Methodik Simulation Innenraum

5.3.1 Methodik der Modellierung und thermischen Simulation

Da an den untersuchten Standorten keine direkt vergleichbaren Referenzräume zur Verfügung standen, erfolgte die energetische Bewertung sowie die Quantifizierung der potenziellen Kühlleistung durch Begrünungsmaßnahmen exemplarisch mittels einer detaillierten numerischen Simulation. Um die komplexen Wechselwirkungen zwischen der urbanen Umgebung, der massiven Bausubstanz und der biologisch aktiven Verschattung abzubilden, wurde die Simulationssoftware IDA ICE (Version 5.1, EQUA Simulation AB) eingesetzt.

Der methodische Ansatz verfolgt das Ziel, die realen physikalischen Effekte der Vegetation – insbesondere die Reduktion des solaren Eintrags und die thermische Pufferwirkung – in ein energetisches Rechenmodell zu übersetzen.

5.3.2 Modellvalidierung und statistische Gütekriterien

Um die Zuverlässigkeit des Simulationsmodells sicherzustellen, werden die gemessenen Stundenmittelwerte der Raumluft- und Oberflächentemperaturen als Referenz herangezogen. Die quantitative Bewertung der Modellgüte erfolgt in Anlehnung an die statistischen Bewertungsmaß-

stäbe der ASHRAE Guideline 14 (2023), wobei primär der Mean Bias Error (MBE) sowie der Root Mean Square Error (RMSE) als zentrale Indizes dienten.

Um eine ganzheitliche Aussage über die Modellqualität zu treffen, wurde neben dem systematischen Fehler (Bias) auch die dynamische Übereinstimmung der Temperaturverläufe mittels des Bestimmtheitsmaßes R^2 geprüft. Diese kombinierte Betrachtung wurde gewählt, um Fehlinterpretationen auszuschließen, die durch sich gegenseitig aufhebende positive und negative Abweichungen entstehen könnten. Während der MBE den stationären Versatz identifiziert, validiert das R^2 somit die korrekte Abbildung der thermischen Dynamik, insbesondere im Hinblick auf Phasenverschiebung und Amplitudenverlauf der Bauteile.

Für das Post-Processing der Simulationsergebnisse sowie den automatisierten Abgleich mit den Messdaten wurde die Programmiersprache Python eingesetzt. Dies ermöglichte eine effiziente Verarbeitung großer Datensätze aus unterschiedlichen Quellen (CSV-Exporte der Sensoren und IDA ICE Output). Innerhalb der Python-Umgebung wurden spezialisierte Bibliotheken für die statistische Auswertung und Visualisierung genutzt.

5.3.3 Randbedingungen und Modellierungsansatz

Die Simulation wurde als Einzelobjektmodell durchgeführt. Um eine isolierte und konservative Betrachtung der energetischen Wirksamkeit zu ermöglichen, wurde auf die Modellierung der komplexen Strahlungskopplung mit der umgebenden Stadtmorphologie verzichtet. Die wesentlichen Säulen der Modellbildung umfassen:

- **Thermische Trägheit:** Die massiven Bauteile, wie die 80 cm starken Außenwände oder die 35 cm starken Dachaufbauten, werden über ihre spezifischen Materialkennwerte abgebildet, um die zeitverzögerte Wärmeübertragung (Phasenverschiebung) realitätsnah zu erfassen.
- **Konvektiver Wärmeaustausch:** Die Berechnung der Windgeschwindigkeiten an der Fassade erfolgte nach dem Potenzgesetz der ASHRAE Fundament als (ASHRAE 1997). In der Simulation wird dabei berücksichtigt, dass im dichten urbanen Kontext die natürliche Konvektion aufgrund der hohen Geländerauigkeit oft gegenüber der windgetriebenen Strömung dominiert.
- **Abstraktion der Vegetation:** Da die Verschattungsleistung von sommergrünen Pflanzen einer starken Saisonalität mit Einsetzen der Laubmasse bis zum Laubfall unterliegt, wurde für die Analyse der kritischen und hitzerelevanten Sommermonate ein statisch konservativer Ansatz gewählt. Die Schutzwirkung wird dabei primär über modifizierte Oberflächenparameter (Reflexions- und Absorptionsgrade) substituiert, um die physikalische Abschirmung der Solarstrahlung durch das Blattwerk energetisch abzubilden.
- **Langwelliger Strahlungsaustausch**: Zur Abbildung der urbanen Wärmeinsel und der abschirmenden Wirkung der Vegetation wird die effektive Himmeltemperatur (TSky) der lokalen Umgebungstemperatur (TAmb) gleichgesetzt. Dies verhindert eine unrealistische nächtliche Unterkühlung durch Abstrahlung in den Weltraum und bildet die thermische Pufferwirkung der Begrünungsschicht sowie die reduzierte Sicht zum freien Himmel (Sky View Factor) konservativ ab.

5.3.4 Modellierung Begrünung Fassade

Durch die fassadengebundene Begrünung wird der solare Eintrag auf die bauliche Struktur maßgeblich reduziert, da das Blattwerk als natürlicher Verschattungskörper fungiert und durch Evapotranspiration die Oberflächentemperatur senkt (Stangl et al. 2025, Poiss et al. 2025). Je nach Blattflächendichte (LAI - Leaf Area Index) werden dabei über 90 % der Solarstrahlung blockiert.

In der Simulationsumgebung IDA ICE wurde dieser kombinierte Effekt durch eine Anpassung der Oberflächeneigenschaften modelliert. Mit einem gewählten Reflexionsgrad von 0,95 (entspricht einem Absorptionsgrad von 5 %) wird die solar bedingte Wärmeaufnahme der Fassade minimiert.

Zur Verdeutlichung der physikalischen Tragweite dieses Modellierungsschritts: Von einer Strahlungsintensität von beispielsweise 1.000 W/m², die auf die begrünte Fassade trifft, werden 950 W/m² rechnerisch "reflektiert". Nur 50 W/m² dringen als Wärmelast in den Schichtaufbau der Wand ein. Es ist anzumerken, dass grünes Laub in der Realität nur etwa 20–30 % der solaren Strahlung reflektiert. Der Wert von 0,95 dient hierbei als abstraktes Werkzeug, um sicherzustellen, dass die Wand im Rechenmodell nahezu keine solare Wärme mehr aufnimmt.

Hinsichtlich der zeitlichen Dynamik ist festzuhalten, dass die Verschattungsleistung einer Fassadenbegrünung einer ausgeprägten Saisonalität unterliegt. Der Leaf Area Index (LAI) sowie die damit verbundene Strahlungsabsorption schwanken je nach Pflanzenart und phänologischem Verlauf erheblich. Für die vorliegende thermische Simulation wurde jedoch ein statisch-konservativer Ansatz gewählt. Da der Fokus der Untersuchung ausschließlich auf den kritischen Sommermonaten liegt, wurden monatliche Schwankungen vernachlässigt. Die Begrünung wurde stattdessen mit einer konstanten Wirksamkeit modelliert, um das maximale Potenzial der passiven Kühlung während sommerlicher Überhitzungsperioden abzubilden.

Da die Simulation als Einzelobjektmodell ohne Berücksichtigung der umgebenden Stadtmorphologie durchgeführt wurde, bleiben Wechselwirkungen durch Strahlungskopplung mit Nachbargebäuden unberücksichtigt. Die, durch den hohen Reflexionsgrad abgewiesene, Energie wird rechnerisch an den freien Außenraum abgegeben.

Tabelle 9: Rahmenbedingungen Simulationsparameter (Fassadenbegrünung troggebunden, Amtshaus Margareten).

Kategorie	Parameter / Spezifikation
Objekt	Amtshaus Margareten [FB1-tW]
Begrünung	Troggebundene Fassadenbegrünung, Transmissionsfaktor solare Strahlung 0,9
Konstruktion	Außenwand: Ziegelwand massiv, 80 cm
Raumgeometrie	36 m² Nutzfläche, Deckenhöhe 4,1 m
Fensteranteil	40 % der Fassadenfläche

5.3.5 Wechselwirkung von thermischer Trägheit und Fassadenbegrünung - Parameterstudie

Die Relevanz einer Fassadenbegrünung wird häufig primär über die Reduktion der äußeren Oberflächentemperaturen argumentiert. In der Praxis zeigt sich jedoch, dass hohe thermische Belastungen an der Fassadenaußenseite, etwa durch intensive solare Einstrahlung auf unverschattete Ziegelwände, nicht zwangsläufig unmittelbar zu einer Überhitzung des Innenraums führen. Dieses als Amplitudendämpfung bekannte Phänomen beschreibt das Verhältnis der Temperaturschwankung auf der Außenseite zur resultierenden Schwankung auf der Innenseite (Willems 2017).

Ursächlich hierfür ist die thermische Trägheit massiver Konstruktionen, wie sie insbesondere beim Amtshaus Margareten vorliegen, welches im Rahmen dieser Arbeit als Beispielobjekt herangezogen wurde. Mit Wandstärken von bis zu 80 cm verfügt das Gebäude über eine enorme Speichermasse. Obwohl unbegrünte Außenoberflächen im Sommer hohe Temperaturen erreichen können, sorgt diese Trägheit dafür, dass ein Großteil der Wärmeenergie zeitversetzt und stark gedämpft im Inneren ankommt.

Um diesen Zusammenhang zu klären, wurde eine umfassende Parameterstudie im Simulationsprogramm IDA ICE 5.1 durchgeführt. Als Referenzbaustoff diente Ziegelmauerwerk, wobei die Wandstärken in drei Stufen (25 cm, 38 cm und 80 cm) variiert wurden, um den Einfluss dieser Trägheit auf das Einsparpotenzial zu untersuchen. Die methodische Differenzierung erfolgte über drei Szenarien: Im Szenario 1 (Referenz) wurde eine Standardfassade (ρ=0,5) ohne Begrünung simuliert. Zur Abbildung der Begrünungseffekte wurde im Szenario 2 der Reflexionsgrad auf ρ=0,95 angehoben. Das Szenario 3 (Worst-Case) simuliert eine dichte Begrünung, welche die nächtliche Strahlungskühlung der massiven Ziegelwand behindert, indem die Variable T_{Sky} der Umgebungstemperatur T_{Amb} gleichgesetzt wurde.

Tabelle 10: Definition der Simulationsszenarien Fassadenbegrünung, thermische Trägheit und Begrünungseffekte.

Wandstärke	**25 cm / 38 cm / 80 cm**	**Skalierung der thermischen Speichermasse und des U-Wertes**
Szenario 1: Referenz	Reflexionsgrad ρ = 0,5	Standardfassade (hell) ohne Begrünungs-effekt
Szenario 2: Verschattung	Reflexionsgrad ρ = 0,95	Abbildung der solaren Verschattung durch das Blattwerk
Szenario 3: Worst-Case	Reflexionsgrad ρ = 0,95 +TSky = TAmb	Verschattung bei gleichzeitiger Unter-bindung der nächtlichen Strahlungs-kühlung

5.3.6 Modellierung Gründachaufbauten

Um die komplexen thermischen Prozesse der Dachbegrünung in der Simulation realitätsnah abzubilden, wurde eine äquivalente Albedo (Reflexionsgrad) ermittelt. Die äquivalente Albedo fungierte dabei als kombinierter Ersatzparameter, der die Gesamtwirkung der Vegetation und des Substrats in Verbindung mit der Evapotranspiration energetisch zusammenfasste. Dieser methodische Ansatz wurde gewählt, um die Verschattungsleistung des Blattwerks sowie die Verdunstungskühlung abzubilden, welche die solare Einstrahlung effektiv vom Substrat fernhalten und die Wärmelast an der Oberfläche massiv reduzieren. Durch die Kalibrierung dieses Wertes wurde sichergestellt, dass die simulierten Innendeckentemperaturen optimal mit den realen Messergebnissen korrelierten. Obwohl begleitend Feuchtemessungen des Substrats durchgeführt wurden, konnten daraus keine belastbaren mathematischen Zusammenhänge für die thermische Modellierung ermittelt werden. Da die thermischen Kennwerte (λ-Werte) von Substrat und Perlite aufgrund variabler Feuchtegehalte in der Realität stark schwanken, stellte der gewählte Ansatz über die äquivalente Albedo sicher, dass diese Unsicherheiten kompensiert wurden. Die langwellige Emissivität der Oberfläche wurde auf dem Standardwert von 0,9 belassen. Als Vergleichsobjekt wurde das identische Raummodell herangezogen, wobei für die Referenz-betrachtung lediglich der Dachaufbau auf ein konventionelles, kiesbeschüttetes Warmdach abgeändert wurde.

Tabelle 11: Definition der Simulationsparameter (Dachbegrünung reduziert-intensiv, HTL St. Pölten).

Kategorie	**Parameter / Spezifikation**
Objekt	HTL St. Pölten [DB2-ri]
Konstruktion	Betonrippendecke (modelliert als 18 cm homogen), 35 cm Substrat
Raumgeometrie	18 m² Nutzfläche, Zone 1 (Arbeitsraum) und Zone 2 (Deckenhohlraum)
Warmdach (Vergleich)	Betonrippendecke, 16 cm Dämmung, 6 cm Kies, U = 0,20 W/(m²K)
Ersatzparameter	Variation des solaren Reflexionsgrades von 0,10 bis 0,90
Substrat-Varianten	Referenz (0,3 W/mK), Trocken (0,153 W/mK), Nass (0,423 W/mK)

5.4 Datenmanagement

5.4.1 Messintervalle, Datenübertragung und Backup Außenraummonitoring

Die Daten der Dauermessobjekte wurden in einer Taktung von 10 Minuten (600 Sekunden) aufgezeichnet und in Echtzeit an eine Cloud des Drittleisters RED Bernard GmbH (shm.bernard-gruppe.com) übertragen. Zusätzlich wurde beim Messobjekt Amtshaus Margareten [FB1-tW] auf die ZENTRACLOUD zurückgegriffen, mit der bereits in der Vergangenheit an diesem Standort gearbeitet wurde. Die Messdaten von [FB1-tW] wurde jedoch auch in die zentrale Plattform vom Projektdrittleister RED Bernard GmbH eingespielt. Durch das regelmäßige und eigenständige monatliche Herunterladen der Messdaten unabhängig vom Drittleister wurde ein doppeltes Backup ermöglicht.

5.4.2 Datenübertragung, Datenmanagement und Validierung Innenraummonitoring

Die Datenübertragung erfolgte primär drahtlos über EnOcean-Schnittstellen sowie das Umidus-System, welches die Messwerte direkt in eine Cloud-Umgebung einspeist und visualisiert. Für größere Distanzen innerhalb der Objekte oder bei schwierigen Durchdringungsverhältnissen kamen Sensoren mit LoRaWAN-Technologie (Funknetzwerkprotokoll für das Internet der Dinge - IoT) zum Einsatz, die sich durch eine hohe Durchdringungstiefe im baulichen Bestand auszeichnen.

Sämtliche Daten wurden in einer zentralen Datenbank zusammengeführt. Die statistische Prüfung wurde in Kapitel 5.2.1 sowie 5.2.3 beschrieben, die Zeitreihen wurden auf Plausibilität geprüft und – durch die vorab durchgeführte Justierung der Sensoren auf ein einheitliches Genauigkeitsniveau normiert.

5.5 Datenprüfung und Datenanalyse Außenraum

Die Datenprüfung erfolgte im Zuge des monatlichen Datendownloads, mit dem Stichtag des Monatsersten. Näheres ist den nachstehenden Unterkapiteln zu entnehmen.

5.5.1 Vorgehen Datenauswertung Dauermessobjekte

Als Vorbereitung für spätere Analysen wurden die Daten zunächst in Excel gesichtet und aufbereitet. Dies umfasste im ersten Schritt das Laden aus der Cloud von RED Bernard. Danach wurden jene Zeilen, die den Wert „*undefined*“ enthielten, durch „“ (kein Wert) ausgetauscht.

5.5.1.1 Fassadenbegrünung

Für sämtliche Dauermessobjekte mit Fassadenbegrünung wurde die **Monatssumme des Energieeintrags jeweils vor sowie hinter der Begrünung** zwischen Juni und September 2024 sowie Juni und September 2025 dargestellt. Dies umfasste die Umrechnung der Strahlungsdaten von W/m2 in kWh sowie die Aufsummierung aller Stundentageswerte für den jeweils untersuchten Monat. Die Daten wurden anschließend als Balkendiagramme dargestellt.

Für die Darstellungen der s**olaren Einstrahlung in Kombination mit dem Grünverschattungsfaktor** wurden die Messdaten zunächst von W/m2 in kWh umgerechnet und anschließend die Tagessummen des solaren Eintrags (vor sowie hinter der Begrünung) gebildet. Die Ermittlung des Grünverschattungsfaktors (FB_s) beruht auf dem Quotienten der durchkommenden Strahlung hinter der Begrünung durch jener vor der Begrünung. Die Parameter wurden in Form eines Verbunddiagramms (Balken- sowie Punktdiagramms) visualisiert.

Für die **Hitzewellen** wurde zunächst nach geeigneten zeitlichen Perioden gesucht (mindestens 5 aufeinanderfolgende Tage mit zumindest einem ermittelten Tageslufttemperaturwert von über 30 °C). Anschließend wurden zwei Liniendiagramme erstellt. Das erste umfasste die Solarstrahlung, vor sowie hinter der Begrünung sowie die Luftfeuchte - ebenfalls vor und hinter dem Grünkörper. Das zweite Diagramm stellte die Lufttemperatur dar. Anschließend wurden beide Diagramme übereinandergelegt.

Für die **Kennwerte-Tabellen der Fassadenbegrünungsobjekte mit Monatsmittel aus dem Dauermonitoring** wurden für die Parameter Lufttemperatur, Luftfeuchte, Solarstrahlung jeweils vor sowie hinter der Begrünung sowie ergänzend der *Bioshading Coefficient* über 2 Jahre (2024 und 2025) dargestellt. Weiters wurde auf die Monatssummen des Solarenergieeintrags zwischen Juni und September 2024 und 2025, die Hitzewelle vom 01. – 05. September 2024 sowie die Hitzewelle vom 29.06. – 03.07.2025 fokussiert.

5.5.1.2 Dachbegrünung

Für die Dauermessobjekte mit Dachbegrünung wurde für den Schwerpunkt Regenereignis zunächst nach geeigneten zeitlichen Untersuchungszeiträumen mit Starkregenereignissen gesucht. Anschließend wurden zwei Liniendiagramme erstellt. Das erste umfasste die Parameter Wärmedurchfluss sowie Niederschlagsmenge und das zweite Diagramm die Lufttemperatur. Anschließend wurden beide Diagramme übereinandergelegt.

Um längere Zeitspannen analysieren zu können, wurde auf die Monate Juni bis September 2024 (Sommerfall) sowie November bis Februar 2025 (Winterfall) fokussiert. Die Parameter wurden in Form eines Liniendiagramm visuell dargestellt und umfassten die Lufttemperatur, die Niederschlagsmenge sowie den Wärmedurchfluss, aber auch die Substratfeuchte sowie die Substrattemperatur.

Für Kennwertetabellen Dachbegrünungsobjekte mit Monatsmittel aus dem Dauermonitoring wurden für die ausgewählten die Parameter Wärmedurchfluss, Bodentemperatur sowie Bodenfeuchte über 2 Jahre (2024 und 2025) dargestellt. Der *Bioshading Coefficient* wurde analog zu den Fassadenbegrünungen dargestellt. Weiters wurde die Untersuchungsperiode Juni bis

September 2025 (Sommerfall) sowie November 2024 bis Februar 2025 (Winterfall) hinsichtlich einer möglichen Korrelation von Niederschlag und Wärmedurchfluss näher beleuchtet. Ergänzend wurde auf das Regenereignis im September (mit der Zeitspanne vom 01.09. bis zum 15.10.2025) vertieft eingegangen.

5.5.2 Vorgehen Datenauswertung Messkampagnen

Für die Datenauswertung der Messkampagnen wurden die Messgeräte und Messsensorik aus den Messkampagnen wie in Kap.5.1.2.2. ausgelesen und als Excel-Dateien abgespeichert. Die Vegetationsparameter und mikroklimatischen Parameter wurden für jeden Standort in Übersichtstabellen in Excel gespeichert und für weitere Berechnungen und Analysen verwendet. Die Ergebnisse wurden in Kennwerte-Tabellen für jeden Standort übertragen. Der Leaf Area Index und der Deckungsgrad wurden für jeden Standort in Säulendiagrammen dargestellt. Die Solarstrahlung mit dem Lufttemperaturverlauf wurden in Liniendiagramme übertragen. Für die Vitalitätsübersicht wurden für jeden Standort Netzdiagramme erstellt. Die Wärmebilder wurden mit einer Temperaturskala und der Luft-T versehen. Um die Verteilung der stomatären Leitfähigkeit graphisch darzustellen, wurden alle geeigneten Standorte mittels Boxplots ausgewertet.

5.5.3 Methodik PET Analyse

Die Berechnung der PET wurde auf Basis des Munich Energy Balance Model for Individuals (MEMI) durchgeführt (Höppe 1999). Diese berücksichtigt die Energiebilanz des menschlichen Körpers und gibt an, welche Lufttemperatur bei Standardbedingungen (Innenraum, leichte Aktivität, bekleidet) zur selben thermischen Belastung führen würde wie die tatsächlichen Außenbedingungen.

Die PET wurde ursprünglich von Höppe (1999) vorgeschlagen. 2018 veröffentlichten Walther und Goestchel eine überarbeitete Version des Modells. Die PET-Berechnungen im Projekt HEDWIG basieren auf diesem verbesserten Ansatz von Walther und Goestchel (2018). Dafür wurde der entsprechende Code aus der Python-Bibliothek pythermalcomfort 3.9.1 übernommen und entsprechend auf die im Projekt erhobenen Daten angewendet. Die verwendeten Codes finden sich im Anhang.

Als Eingangsgroße für die PET ist die mittlere Strahlungstemperatur notwendig. Diese wurde laut ÖNORM ISO 7726:2023 (Austrian Standards International 2023) mit folgender Formel berechnet.

$$T_{mrt} = \sqrt[4]{\left(\frac{0{,}7 \cdot \left(\frac{I_{K\uparrow}}{I_{K\downarrow}}\right) + 0{,}97 \cdot \left(\frac{I_{L\uparrow}}{I_{L\downarrow}}\right)}{0{,}97 \cdot \sigma}\right)} - 273{,}15$$

T_{mrt} = mittlere Strahlungstemperatur

$I_{K\uparrow}$ = reflektierte kurzwellige Strahlung

$I_{K\downarrow}$ = eingehende kurzwellige Strahlung

$I_{L\uparrow}$ = reflektierte langwellige Strahlung

$I_{L\downarrow}$ = eingehende langwellige Strahlung

σ = Stefan-Boltzmann-Konstante ($5{,}67 \cdot 10^{-8}$)

Da Daten aus den Net-Radiometermessungen nur für die Tage der Messkampagnen zur Verfügung stehen, ergibt sich daraus die Tageswahl der Standorte.

5.6 Datenüberprüfung

5.6.1 Statistische Valdierung

Für die Analysen von Spearman-Korrelationen und linearen Regressionen wurden die Daten zunächst in Excel aufbereitet. In Python erfolgte die statistische Auswertung: Die Spearman-Korrelationen (scipy.stats.spearmanr) prüfte monotone Zusammenhänge zwischen den Variablen, während die lineare Regression (sklearn.linear_model import LinearRegression) den linearen Einfluss der unabhängigen auf die abhängige Variable quantifizierte. Die Ergebnisse wurden durch Streudiagramme mit Regressionsgeraden (via seaborn.regplot) visualisiert. Die Interpretation umfasste die Stärke und Signifikanz der Korrelation (Spearman) sowie die Modellgüte (R^2) der Regression.

5.6.2 Messobjekt Steinbauer [DB1-e und DB1-i]

Zur Validierung der Daten der HEDWIG-Wetterstation wurden aufgrund der geografischen Nähe die Daten der Station am Objekt Steinbauer [DB1-e und DB1-i] mit den Daten der GeoSphere Austria Wetterstation Innere Stadt Wien (GS) verglichen. Dazu wurden Monatsmittelwerte aus stündlichen Messdaten berechnet, um Übersicht und Vergleichbarkeit zu gewährleisten.

Die Differenzen zwischen den Stationen zeigen mikroklimatische Unterschiede (Abbildung 28). Das Extensivgründach [DB1-e] ist im Sommer etwas wärmer, aber die Luftfeuchtigkeit geringfügig niedriger als auf dem Intensivdach [DB1-i], wobei die Temperaturdifferenzen meist 1 – 3 °C und die Feuchtigkeitsunterschiede 3 – 6 % (rel. Luft-F) betragen. Das Intensivgründach bleibt im Sommer etwas kühler, und zeigt eine konsistent höhere Luftfeuchtigkeit als das Extensivgründach. Die Messdaten der GS-Station ähneln in der Temperatur dem Extensivgründach, weisen jedoch insbesondere im Winter geringere relative Luftfeuchte auf, mit Differenzen bis zu 15 %. Die größten Temperaturunterschiede treten im Sommer auf, die größten Feuchtigkeitsunterschiede im Winter. Insgesamt bleiben die Δ-Werte saisonal konsistent: Das Extensivgründach heizt sich stärker auf, das Intensivdach bleibt moderater temperiert und die GS-Station ist insgesamt trockener, was plausibel und nachvollziehbar ist.

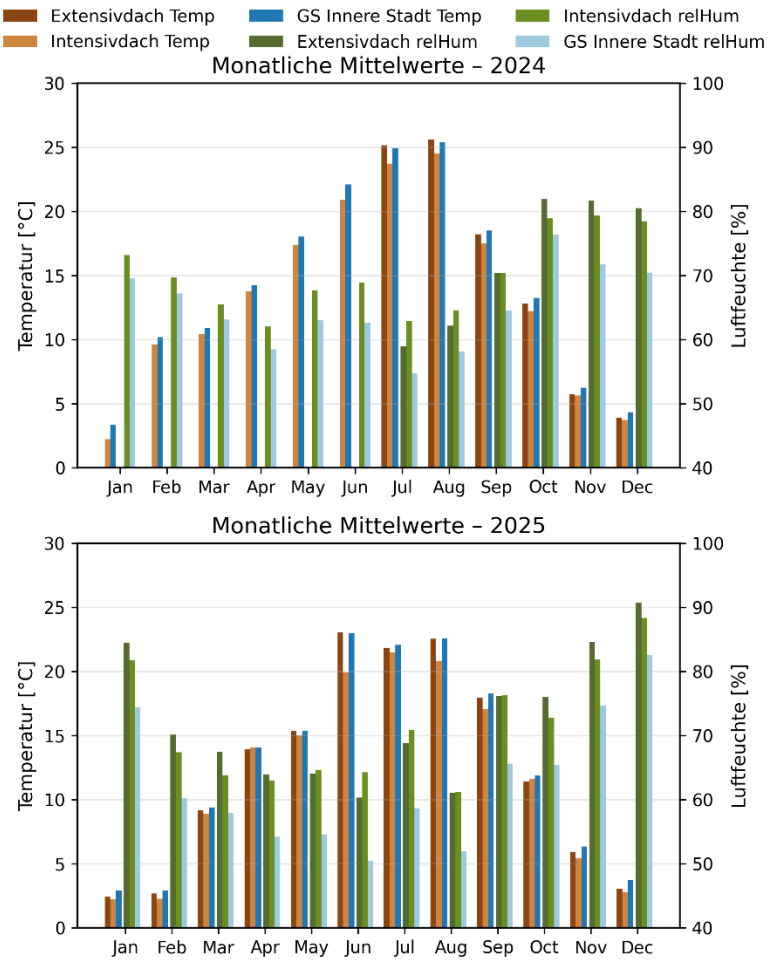


Abbildung 28: Monatliche Gegenüberstellung der mittleren Lufttemperatur beim Messobjekt Steinbauer Development GmbH, extensiv und intensiv [DB1-e und DB1-i] und jener der GeoSphere Austria, Wien Innere Stadt (© IBLB).

Tabelle 12 listet die Δ-Werte der einzelnen Wetterstationen im Vergleich miteinander nochmals auf.

Tabelle 12: Unterschiede in Temperatur (Δ Temp) und Luftfeuchtigkeit (Δ Airh) zwischen den untersuchten Wetterstationen Steinbauer Extensivdach (EX) und Intensivdach (INT) und GeoSphere Austria Innere Stadt (GS).

Monat	Δ Temp EX-INT (°C)	Δ Airh EX-INT (%)	Δ Temp GS-EX (°C)	Δ Airh GS-EX (%)	Δ Temp GS-INT (°C)	Δ Airh GS-INT (%)
Jänner 2024	1.01	2.5	0.08	-6.1	1.09	-3.6
Februar 2024	0.58	3.2	0	-5.7	0.58	-2.5
März 2024	1.89	-0.5	-1.4	-1.8	0.49	-2.4
April 2024	2.31	-0.1	-1.81	-3.5	0.5	-3.6
Mai 2024	3.04	-3.3	-2.36	-1.4	0.68	-4.7
Juni 2024	3.38	-4	-2.19	-2.2	1.19	-6.3
Juli 2024	1.46	-3.9	-0.23	-4.2	1.23	-8.1
August 2024	1.09	-2.4	-0.25	-4	0.84	-6.4

September 2024	0.72	0	0.28	-5.9	1	-5.9
Oktober 2024	0.57	3	0.45	-5.5	1.02	-2.5
November 2024	0.09	2.3	0.53	-9.9	0.62	-7.6
Dezember 2024	0.2	2.1	0.41	-10.1	0.6	-8
Jänner 2025	0.22	2.7	0.48	-10.1	0.69	-7.4
Februar 2025	0.41	2.7	0.24	-9.9	0.65	-7.2
März 2025	0.3	3.6	0.2	-9.5	0.5	-6
April 2025	-0.12	1	0.14	-9.8	0.02	-8.8
Mai 2025	0.33	-0.6	0.02	-9.4	0.35	-10
Juni 2025	3.15	-3.9	-0.09	-9.9	3.06	-13.8
Juli 2025	0.36	-2	0.22	-10.2	0.58	-12.2
August 2025	1.77	-0.1	0.01	-9.2	1.78	-9.3
September 2025	0.89	-0.1	0.32	-10.6	1.21	-10.7
Oktober 2025	-0.2	3.2	0.46	-10.6	0.26	-7.4
November 2025	0.47	2.7	0.43	-10	0.89	-7.3
Dezember 2025	0.3	2.5	0.66	-8.2	0.96	-5.8

Spearman-Korrelationen bestätigen diese Beobachtungen. Zwischen dem Extensivgründach und dem Intensivgründach besteht eine sehr starke Korrelation sowohl für die Temperatur (ρ = 0,986, p < 0,001) als auch für die Luftfeuchtigkeit (ρ= 0,949, p < 0,001). Zwischen der GS-Station und dem Extensivgründach sind die Zusammenhänge für die Temperatur noch etwas stärker (ρ = 0,991, p < 0,001) und für die Luftfeuchtigkeit ebenfalls hoch (ρ = 0,935, p < 0,001). Der Vergleich der GS-Station mit dem Intensivgründach Steinbauer zeigt ähnliche Werte (Temperatur ρ = 0,986, Luftfeuchtigkeit ρ = 0,925). Die sehr hohen Korrelationen verdeutlichen, dass trotz der lokalen Unterschiede in Dachtyp und Standort das saisonale Muster aller Messpunkte nahezu identisch verläuft.

Zusammenfassend zeigen die Messungen, dass das Extensivgründach im Sommer etwas wärmer ist, das Intensivgründach leicht kühler bleibt und die GS-Station deutlich trockener als die Dachstationen ist. Alle Standorte weisen saisonal stark synchronisierte Temperatur- und Feuchtigkeitsverläufe auf, wobei die Δ-Werte und Spearman-Korrelationen die geringfügigen Unterschiede und die Stabilität der saisonalen Muster über die Messstandorte hinweg bestätigen.

Regressionsanalysen der Tagesmittelwerte zeigen für alle Stationspaare sehr starke lineare Zusammenhänge sowohl für die Temperatur als auch für die relative Luftfeuchtigkeit (Abbildung 29). Zwischen Extensiv- und Intensivgründach ergibt sich eine hohe Übereinstimmung (Luft-R R^2 = 0,90; Luft-Frel R^2 = 0,91). Die Punktewolken liegen eng entlang der Regressionsgeraden, was auf eine nahezu synchrone Dynamik beider Dachtypen hinweist. Geringe Streuungen spiegeln die bereits beschriebenen mikroklimatischen Unterschiede wider.

Der Vergleich zwischen GS Innere Stadt und Extensivgründach zeigt die stärkste Übereinstimmung in der Temperatur (R^2 = 0,98). Auch die Luftfeuchtigkeit korreliert stark (R^2 = 0,90), weist jedoch eine etwas größere Streuung auf. Dies bestätigt die sehr ähnliche thermische Entwicklung beider Standorte bei gleichzeitig etwas abweichender Feuchtedynamik. Für GS Innere Stadt und Intensivdach ergeben sich ebenfalls hohe Bestimmtheitsmaße (Temperatur R^2 = 0,92; rel. Luftfeuchte

R^2 = 0,88). Die Temperatur zeigt wiederum eine eng gebündelte lineare Beziehung, während die Feuchtewerte geringfügig stärker streuen.

Insgesamt verdeutlichen die Regressionsanalysen, dass die Tagesmittelwerte aller Stationen stark linear miteinander verknüpft sind. Die hohen R^2-Werte bestätigen die ausgeprägte Synchronität der saisonalen Muster, während die verbleibende Streuung die standortspezifischen mikroklimatischen Unterschiede zwischen Extensiv-, Intensivgründach und der GS-Station widerspiegelt.

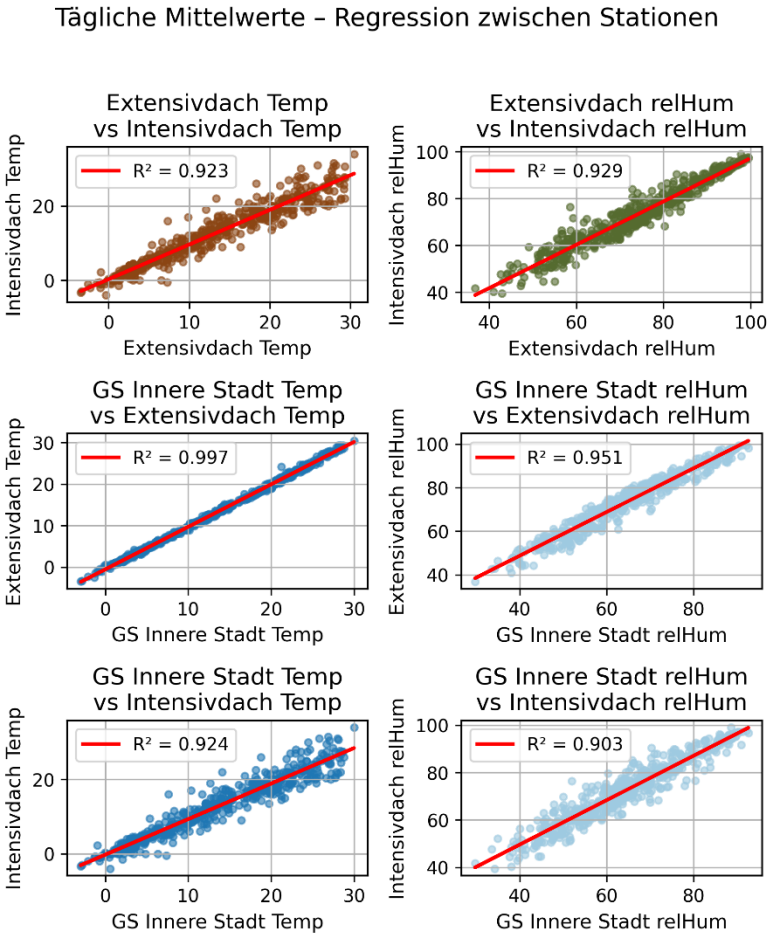


Abbildung 29: Regression von Lufttemperatur und Luftfeuchte am Beispiel Steinbauer Development GmbH, extensiv sowie intensiv [DB1-e und DB1-i] sowie den Messdaten der Geosphere, Wien Innere Stadt (© IBLB).

5.6.3 Messobjekt HTL St. Pölten [DB2-e und DB2-ri]

Für die Lufttemperatur wurden Monatsmittelwerte aus den stündlichen Messdaten der HEDWIG-Gründachstationen und der GeoSphere-Station St. Pölten berechnet. Diese sind in Abbildung 30 als Balkengrafiken dargestellt und in Tabelle 13 finden sich monatliche Temperaturdifferenzen wieder. Daten des Intensivdachs sind aufgrund eines Sensorausfalls erst ab Juni 2024 verfügbar.

Die monatlichen Temperaturdifferenzen (Δ Temp) zwischen den Stationen zeigen insgesamt nur geringe Abweichungen und bestätigen die sehr hohe Übereinstimmung der Standorte. Die Differenzen zwischen Extensiv- und Intensivdach liegen überwiegend im Bereich von ± 0,3 °C.

Im Vergleich zwischen Intensivgründach- und Referenzdach zeigt sich in vielen Monaten ein leicht höheres Temperaturniveau des Intensivdachs, meist zwischen +0,1 °C und +1,0 °C, mit etwas stärkeren Abweichungen im Frühsommer 2025 (z. B. Juni +1,23 °C; Juli +1,06 °C).

Die Differenzen zwischen Extensivgründach und GeoSphere bewegen sich überwiegend zwischen −0,4 °C und +1,2 °C. Dabei ist das Extensivgründach in mehreren Sommermonaten geringfügig wärmer als die GeoSphere-Station, während es in einzelnen Wintermonaten leicht darunter liegt.

Die Unterschiede zwischen Referenzdach und GeoSphere sind durchgehend sehr klein (meist −0,05 °C bis −0,43 °C), wobei das Referenzdach tendenziell minimal kühler ist. Insgesamt bleiben die Temperaturabweichungen fast durchgehend unter ±1 °C und zeigen kein stark ausgeprägtes systematisches Auseinanderdriften der Standorte. Die Delta-Werte bestätigen somit, dass die Temperaturverläufe an allen Messpunkten sehr ähnlich sind und sich primär in geringfügigen Niveauunterschieden äußern.

Eine Spearman-Korrelation der Tagesmittelwerte bestätigt eine nahezu perfekte monotone Beziehung zwischen allen Dachstationen und der GeoSphere-Station. Für das Extensivgründach ergibt sich ρ = 0,996 (p < 0,001), für das Intensivgründach ρ = 0,998 (p < 0,001) und für das Referenzdach ρ = 1,000 (p < 0,001). Diese hohen Korrelationskoeffizienten zeigen, dass die saisonalen Temperaturverläufe an allen Standorten praktisch identisch sind. Unterschiede bestehen primär im absoluten Niveau durch die geografische Lage, nicht jedoch im zeitlichen Muster.

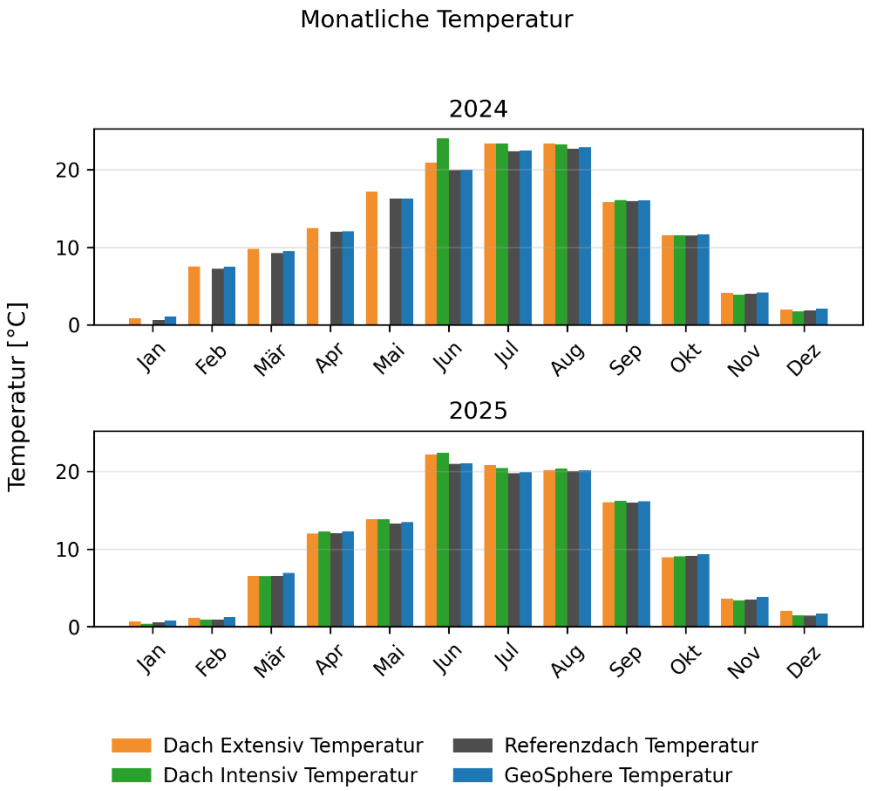


Abbildung 30: Monatliche Gegenüberstellung der mittleren Lufttemperatur beim Messobjekt HTL St. Pölten, extensiv und reduziert-intensiv [DB2-e und DB2-ri] und jener der GeoSphere Austria (© IBLB).

Tabelle 13: Unterschiede der Temperatur (Δ Temp) zwischen den untersuchten Wetterstationen HTL St. Pölten Extensivdach (EX), Intensivdach (INT), Referenzdach (REF) und der Geosphere Landhaus St. Pölten (GS).

Monat	Δ Temp EX-INT (°C)	Δ Temp INT-REF (°C)	Δ Temp EX-GS (°C)	Δ Temp INT-REF (°C)	Δ Temp INT-GS (°C)	Δ Temp REF-GS (°C)
Jänner 2024	n.a.	0.23	-0.19	n.a.	n.a.	-0.43
Februar 2024	n.a.	0.29	0.07	n.a.	n.a.	-0.22
März 2024	n.a.	0.52	0.27	n.a.	n.a.	-0.25
April 2024	n.a.	0.51	0.46	n.a.	n.a.	-0.06
Mai 2024	n.a.	0.94	0.90	n.a.	n.a.	-0.05
Juni 2024	-3.09	0.98	0.93	4.07	4.03	-0.05
Juli 2024	-0.04	0.99	0.88	1.03	0.92	-0.10
August 2024	0.16	0.69	0.53	0.54	0.37	-0.16
September 2024	-0.27	-0.15	-0.18	0.11	0.09	-0.03
Oktober 2024	0.00	0.03	-0.13	0.03	-0.13	-0.16
November 2024	0.28	0.15	-0.05	-0.13	-0.33	-0.20
Dezember 2024	0.25	0.16	-0.10	-0.09	-0.35	-0.26
Jänner 2025	0.32	0.14	-0.13	-0.18	-0.45	-0.28
Februar 2025	0.14	0.13	-0.16	-0.01	-0.30	-0.29
März 2025	0.01	-0.06	-0.37	-0.06	-0.38	-0.32
April 2025	-0.22	-0.07	-0.29	0.15	-0.07	-0.23
Mai 2025	0.05	0.57	0.38	0.51	0.33	-0.18
Juni 2025	-0.18	1.23	1.15	1.41	1.33	-0.08
Juli 2025	0.35	1.06	0.94	0.71	0.59	-0.12
August 2025	-0.21	0.11	0.04	0.31	0.25	-0.06
September 2025	-0.19	0.01	-0.11	0.21	0.08	-0.12
Oktober 2025	-0.15	-0.21	-0.45	-0.06	-0.30	-0.24
November 2025	0.21	0.10	-0.16	-0.12	-0.38	-0.26
Dezember 2025	0.55	0.56	0.32	0.01	-0.22	-0.24

Für die relative Luftfeuchte wurden ebenfalls Monatsmittelwerte aus den stündlichen Messdaten berechnet und in Abbildung 31 als Balkendiagramme dargestellt, die monatlichen Differenzen sind in Tabelle 14 zusammengefasst. Daten des Intensivdachs sind analog zur Temperatur erst ab Juni 2024 verfügbar.

Im Gegensatz zur Temperatur zeigen die Δ-Werte der Luftfeuchte deutlich ausgeprägtere Unterschiede zwischen den Standorten. Besonders auffällig ist das durchgehend höhere Feuchteniveau des Intensivgründachs. Die Differenzen zwischen Extensiv- und Intensivgründach (Δ EX-INT) liegen häufig zwischen etwa +2 % und +10 %, mit besonders hohen Abweichungen im Frühjahr und Frühsommer 2025 (z. B. Mai 2025: +16,62 %; Juni 2025: +10,95 %). Damit ist das Intensivdach über lange Zeiträume klar feuchter als das Extensivdach.

Auch im Vergleich zwischen Intensiv- und Referenzdach (Δ INT–REF) zeigt sich überwiegend ein höheres Feuchteniveau des Intensivgründachs, meist im Bereich von +2 % bis +12 %. Besonders hohe Differenzen treten im Mai 2025 (+21,68 %) sowie im Juni 2025 (+13,73 %) auf. Negative

Werte sind selten und gering ausgeprägt (z. B. Juni 2024: −4,80 %). Insgesamt ist das Referenzdach HTL St. Pölten somit meist trockener als das Intensivdach.

Die größten Abweichungen zeigen sich im Vergleich zwischen Extensivgründach und GeoSphere (Δ EX–GS). Hier liegen die Differenzen häufig zwischen +7 % und +18 %, mit einem Maximum von +26,13 % im Mai 2025. Die Gründächer am Standort HTL weisen durchgehend höhere Feuchtewerte auf als die GeoSphere-Station in der hochurbanen und stark versiegelten Umgebung des Landhausviertels. Auch das Referenzdach liegt meist über der GeoSphere (Δ REF–GS meist zwischen +2 % und +6 %). Zusammenfassend zeigen die Luftfeuchte-Differenzen ein klares, systematisches Gefälle: Intensivgründach > Extensivgründach > Referenzdach > GeoSphere. Die Unterschiede sind dabei wesentlich ausgeprägter als bei der Temperatur.

Die Spearman-Korrelationen der Tagesmittelwerte bestätigen dennoch eine hohe Synchronität der zeitlichen Verläufe. Zwischen Intensivgründach und GeoSphere besteht eine sehr starke Korrelation ($\rho = 0{,}979$, $p < 0{,}001$), ebenso zwischen Referenzdach und GeoSphere ($\rho = 0{,}986$, $p < 0{,}001$). Die Beziehung zwischen Extensivgründach und GeoSphere ist mit $\rho = 0{,}854$ ($p < 0{,}001$) etwas schwächer, aber weiterhin hoch signifikant. Trotz der deutlichen Niveauunterschiede verlaufen die saisonalen Feuchtemuster somit weitgehend parallel; die Unterschiede betreffen primär das absolute Feuchteniveau, nicht das zeitliche Muster.

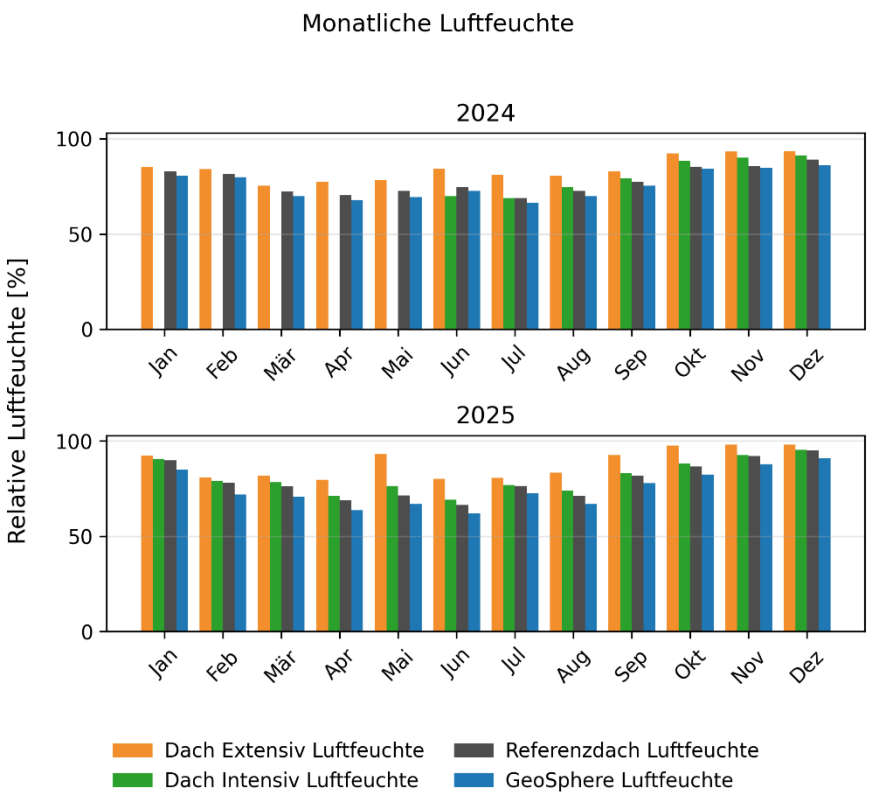


Abbildung 31: Monatliche Gegenüberstellung der mittleren relativen Luftfeuchte beim Messobjekt HTL St. Pölten, extensiv und reduziert-intensiv [DB2-e und DB2-ri] und jener der GeoSphere Austria (© IBLB).

Tabelle 14: Unterschiede in Luftfeuchtigkeit (Δ Airh) zwischen den untersuchten Wetterstationen HTL St. Pölten Extensivdach (EX), Intensivdach (INT), Referenzdach (REF) und der Geosphere Landhaus St. Pölten (GS).

Monat	Δ Airh EX-INT (%)	Δ Airh INT-REF (%)	Δ Airh EX-GS (%)	Δ Airh INT-REF (%)	Δ Airh INT-GS (%)	Δ Airh REF-GS (%)
Jänner 2024	n.a.	2.31	4.50	n.a.	n.a.	2.19
Februar 2024	n.a.	2.69	4.40	n.a.	n.a.	1.71
März 2024	n.a.	2.87	5.33	n.a.	n.a.	2.46
April 2024	n.a.	6.96	9.53	n.a.	n.a.	2.57
Mai 2024	n.a.	5.85	8.90	n.a.	n.a.	3.05
Juni 2024	14.47	9.67	11.66	-4.80	-2.81	1.99
Juli 2024	12.31	12.23	14.74	-0.08	2.43	2.51
August 2024	6.05	8.16	10.87	2.11	4.82	2.71
September 2024	3.50	5.68	7.56	2.18	4.07	1.88
Oktober 2024	3.84	6.83	8.00	2.99	4.16	1.18
November 2024	3.20	7.65	8.40	4.45	5.20	0.75
Dezember 2024	2.10	4.56	7.57	2.46	5.47	3.01
Jänner 2025	1.92	2.71	7.49	0.78	5.56	4.78
Februar 2025	1.70	2.68	8.89	0.99	7.19	6.20
März 2025	3.44	5.78	11.26	2.34	7.82	5.48
April 2025	8.58	10.76	16.02	2.18	7.44	5.25
Mai 2025	16.62	21.68	26.13	5.06	9.51	4.45
Juni 2025	10.95	13.73	18.26	2.79	7.31	4.52
Juli 2025	3.51	4.12	7.74	0.61	4.23	3.62
August 2025	9.45	12.04	16.35	2.59	6.91	4.32
September 2025	9.41	10.69	14.74	1.28	5.33	4.04
Oktober 2025	9.51	10.92	15.28	1.41	5.77	4.36
November 2025	5.42	5.99	10.20	0.57	4.78	4.21
Dezember 2025	2.72	2.94	7.12	0.22	4.41	4.19

5.6.4 Globalstrahlung

Für die monatlichen Summen der Globalstrahlung wurden ebenfalls die Unterschiede zwischen den HEDWIG-Gründachstationen und der GeoSphere-Station in St. Pölten analysiert. Die Balkengrafiken sind in Abbildung 32 dargestellt, die Differenzen sind in Tabelle 15 zusammengefasst.

Die Ergebnisse zeigen bei der Solarstrahlung deutlich stärkere systematische Unterschiede als bei Temperatur und Luftfeuchte. Besonders das Intensivgründach weist durchgehend wesentlich geringere Strahlungssummen auf als das Extensivgründach und die GeoSphere-Station.

Die Differenzen zwischen Extensivgründach und Intensivdach (Δ EX–INT) sind durchgehend positiv und erreichen im Jahresverlauf sehr hohe Werte, insbesondere in den Sommermonaten (z. B. Mai 2024: +172 kW/m²; April 2024: +133 kW/m²; Mai 2025: +135 kW/m²). Dies zeigt, dass das

Extensivgründach deutlich höhere Strahlungssummen empfängt als das Intensivdach. Im Vergleich zwischen Intensivdach und Referenzdach (Δ INT–REF) sind die Unterschiede vergleichsweise gering und bewegen sich meist zwischen −9 und +4 kW/m², was auf ein ähnliches Strahlungsniveau dieser beiden Standorte hindeutet. Die Differenzen zwischen Extensivgründach und GeoSphere (Δ EX–GS) sind durchgehend stark negativ und liegen meist zwischen −19 und −174 kW/m². Besonders in den Sommermonaten treten die größten Abweichungen auf (z. B. Juni 2025: −174 kW/m²; Mai 2025: −140 kW/m²), was die deutlich höhere Strahlungsaufnahme der GeoSphere-Station im Vergleich zum Gründachstandort Intensiv bestätigt.

Zusammenfassend zeigen die Strahlungsdaten deutliche standortspezifische Unterschiede mit einem klaren Gefälle: GeoSphere ≈ Extensivdach > Intensivdach. Während das Extensivgründach und die GeoSphere-Station sehr ähnliche saisonale Muster aufweisen, empfängt das Intensivdach aufgrund möglicher Abschattungseffekte signifikant geringere Strahlungssummen. Die Spearman-Korrelationen unterstützen diese Beobachtung durch eine sehr starke Übereinstimmung zwischen Extensivgründach und GeoSphere ($\rho = 0{,}993$, $p < 0{,}001$), während die Korrelation zwischen Intensivdach und GeoSphere deutlich schwächer ausfällt, aber immer noch hohe Signifikanz zeigt ($\rho = 0{,}416$, $p < 0{,}001$).

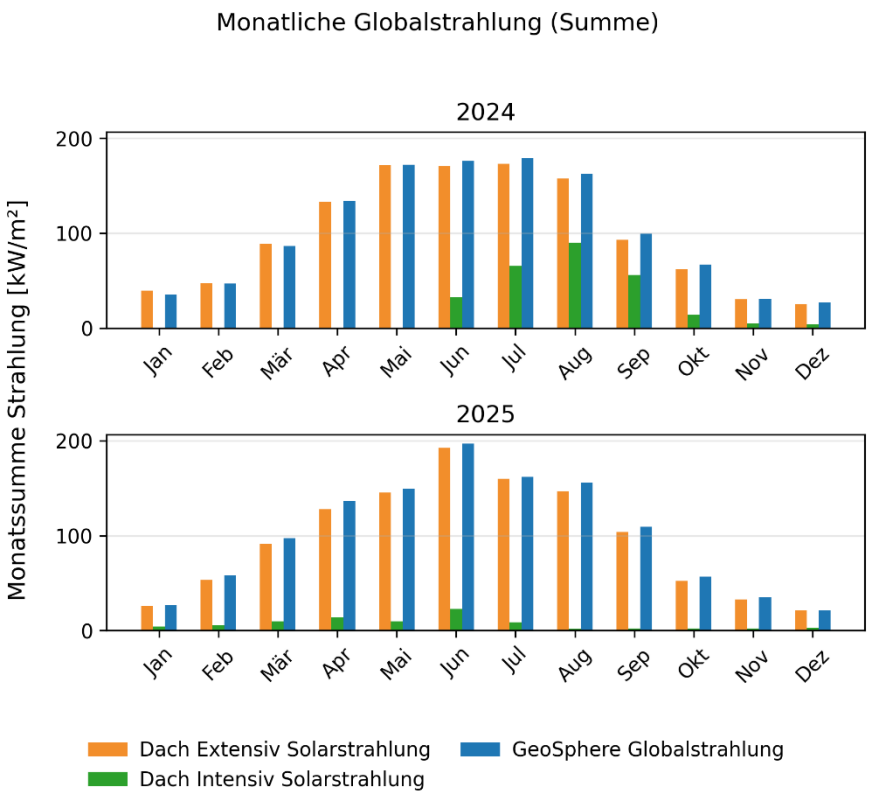


Abbildung 32: Monatliche Gegenüberstellung der mittleren Solarstrahlung beim Messobjekt HTL St. Pölten, extensiv und reduziert-intensiv [DB2-e und DB2-ri] und jener der GeoSphere Austria (© IBLB).

Tabelle 15: Unterschiede der solaren Einstrahlung (Δ Isol) zwischen den untersuchten Wetterstationen HTL St. Pölten Extensivdach (EX), Intensivdach (INT), Referenzdach (REF) und Geosphere Landhaus St. Pölten (GS).

Monat	Δ I_{sol} EX-INT (kW/m²)	Δ I_{sol} INT-REF (kW/m²)	Δ I_{sol} EX-GS (kW/m²)
Jänner 2024	40	4	-36
Februar 2024	47	1	-47
März 2024	89	3	-87
April 2024	133	-1	-134
Mai 2024	172	0	-172
Juni 2024	139	-5	-144
Juli 2024	108	-6	-114
August 2024	67	-5	-73
September 2024	37	-6	-43
Oktober 2024	48	-5	-53
November 2024	26	0	-26
Dezember 2024	22	-1	-23
Jänner 2025	21	-1	-23
Februar 2025	48	-5	-53
März 2025	82	-6	-88
April 2025	114	-9	-123
Mai 2025	135	-4	-140
Juni 2025	170	-4	-174
Juli 2025	151	-2	-153
August 2025	145	-9	-154
September 2025	102	-5	-107
Oktober 2025	50	-5	-55
November 2025	30	-3	-33
Dezember 2025	19	0	-19

Die Regressionsplots zwischen HEDWIG-Sensoren und GeoSphere zeigen insgesamt sehr starke lineare Zusammenhänge für die Temperatur, mäßig bis stark ausgeprägte für die relative Luftfeuchte und stärkere Abweichungen für die Globalstrahlung.

Die Analyse der Temperatur zeigt, dass alle HEDWIG-Stationen mit der GeoSphere Station nahezu perfekt übereinstimmen (Extensivgründach, Intensivgründach, und Referenzdach $R^2 > 0,99$). Die Punktwolken liegen eng entlang der Regressionsgeraden. Nur bei höheren Temperaturen ist punktuell eine leichte systematische Abweichung erkennbar.

Bei der relativen Luftfeuchtigkeit zeigt die Korrelation Variationen in der Übereinstimmung mit der GeoSphere Station. Das Referenzdach zeigt die höchste Übereinstimmung ($R^2 = 0,97$) gefolgt vom Intensivdach ($R^2 = 0,94$). Beim Extensivgründach ist die Streuung deutlich größer und die Beziehung nur moderat $R^2 = 0,73$, was auf stärkere mikrolokale Einflüsse der Substrat- und Bewuchsbedingungen hinweist.

Die Strahlungsdaten zeigen für das Extensivgründach eine sehr hohe Übereinstimmung mit der GeoSphere Station R^2 = 0,99. Beim Intensivdach ist die Korrelation dagegen wesentlich schwächer R^2 = 0,24.

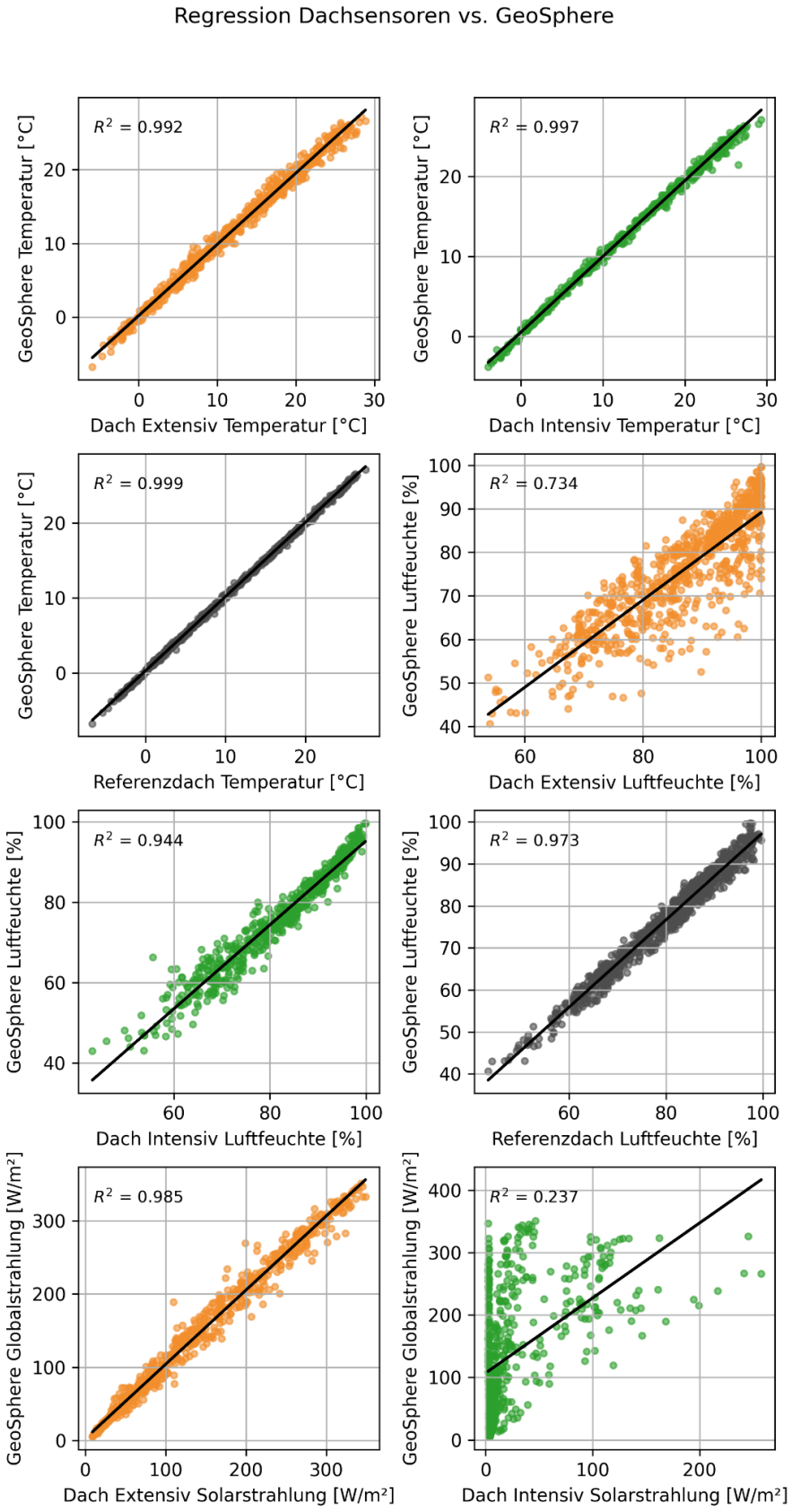


Abbildung 33: Regressionen der Tagesmittelwerte von Lufttemperatur, relativer Luftfeuchtigkeit und solarer Einstrahlug zwischen den untersuchten Wetterstationen HTL St. Pölten Extensivdach (EX), Intensivdach (INT), Referenzdach (REF) und der Geosphere Landhaus St. Pölten (GS) (© IBLB).

5.7 Datenprüfung und Datenanalyse Innenraum

Für die Erstellung der Kennwerte-Tabellen Innenräume mit Monatsmitteln aus dem Dauermonitoring wurden für die die Parameter Raumlufttemperatur, relative Luftfeuchte sowie die raumseitigen Oberflächentemperaturen der begrünten Bauteile über den Zeitraum von 2 Jahren (2024 und 2025) ausgewertet. Ein besonderer Fokus lag dabei auf der vergleichenden Analyse der Korrelationen zwischen Luft- und Wandtemperatur, um die thermische Trägheit und die Strahlungskühlleistung der Begrünungssysteme zu quantifizieren. Hierbei wurde insbesondere der Sommer 2024 (01.06. – 31.08.2024) detailliert untersucht, da diese Periode durch ihre außergewöhnliche Dauer und Intensität eine kritische Belastungsprobe für das Innenraumklima darstellte.

Zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit kamen mehrere Verfahren zum Einsatz. Es erfolgte einerseits die Einordnung in das Behaglichkeitsdiagramm nach Freymark und Leusden 1951, um die physiologische Wirkung der reduzierten Strahlungstemperatur unabhängig von den Außenbedingungen zu bestimmen. Andererseits wurde die adaptive thermische Behaglichkeit ÖNORM EN 16798-1 (Austrian Standards International 2024) herangezogen, um die Korrelation zwischen der Raumlufttemperatur, der Luftfeuchte und der gleitenden Außenlufttemperatur zu bewerten. Ergänzend wurde das Nutzerver*innenhalten durch die Auswertung der Fensterkontakte (Lüftungsintervalle) einbezogen, um die passiven Kühlbeiträge der Begrünung von aktiven Eingriffen der Nutzer*innen für die thermische Simulation zu differenzieren.

6 Vergleichende Ergebnisse Bauphysik und Innenraum

6.1 Übertemperatur – Intensität der Hitzeeinwirkung, alle Dauermessobjekte

Neben den grafischen Darstellungen zur thermischen Behaglichkeit wurde im Rahmen der Auswertung auch die Anzahl der Stundenmittelwerte unter 25°C sowie die Summe der Gradstunden ermittelt (Abbildung 34), um eine präzisere Einschätzung für das thermische Entlastungspotenzial und die Intensität der Hitzeeinwirkung zu erhalten. Während die Stunden unter 25°C Aufschluss darüber geben, wie oft sich die Räume in einem thermisch unbelasteten Bereich befanden, quantifizieren die Gradstunden die Schwere der Überschreitungen durch die Multiplikation von Zeit und Temperaturdifferenz. An allen Standorten lagen im Sommer 2024 während der regulären Büroarbeitszeiten mindestens 75 % der gemessenen Stundenmittelwerte über 25°C.

Es zeigt sich das Objekt [DB1-i] als negativer Spitzenreiter der Untersuchung, da dort mit 2.345 Kh die mit Abstand höchste Summe an Gradstunden sowie mit 632 Stunden der höchste Anteil an Übertemperaturen verzeichnet wurde. Am anderen Ende des Spektrums bildet die MA48 am Gürtel den positiven Bestwert, da dieser Standort mit 739 Kh die geringste energetische Hitzebelastung und mit 28,2°C auch die niedrigste Maximaltemperatur während der Arbeitszeit aufweist.

Objekt [DB2-ri] erzielt mit der reduziert-intensiven Dachbegrünung ebenfalls ein sehr stabiles Ergebnis und liegt mit 862 Kh deutlich unter den Werten der fassadenbegrünten Standorte wie [FB3-m] oder [FB1-tw]. Die Ergebnisse verdeutlichen insgesamt eine große Spannweite in der thermischen Performanz der Gebäude, wobei die Kopplung zwischen Begrünungstyp und baulicher Masse entscheidend für das Ausmaß der sommerlichen Überhitzung bleibt.

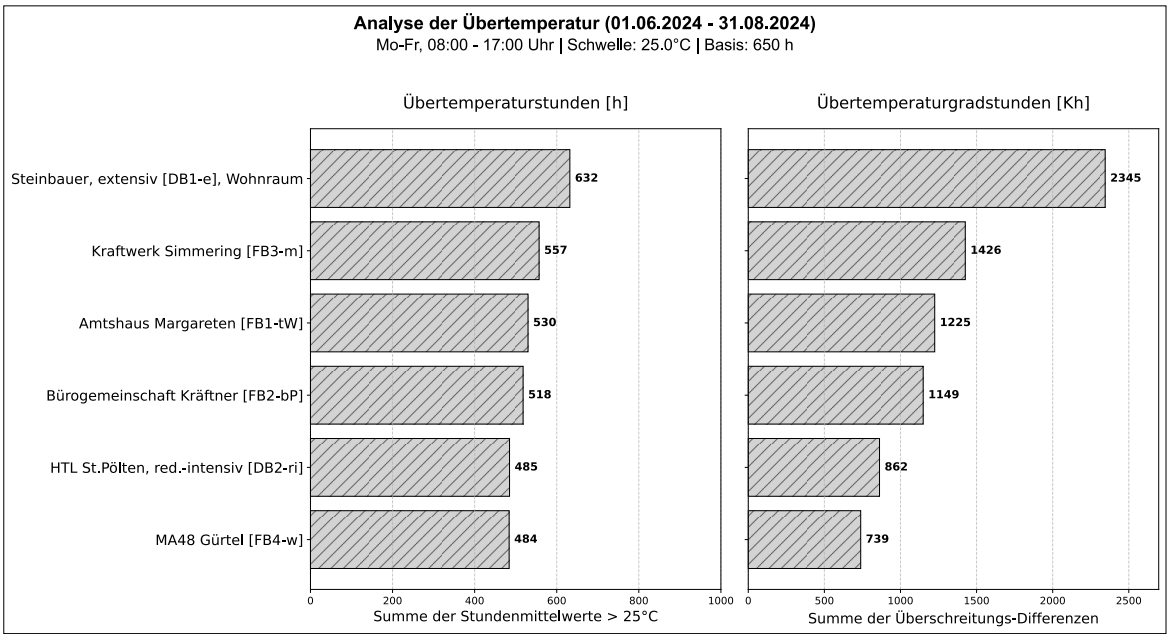


Abbildung 34: Übertemperatur und Übertemperaturgradstunden bei einer Temperaturschwelle von 25°C, Sommer 2024 (© IBO).

6.2 Thermische Gebäudesimulation (IDA ICE)

Das folgende Kapitel beschreibt die computergestützte Untersuchung zur Wirksamkeit von Fassaden- und Dachbegrünungssystemen mittels Simulationsmodellen. Ziel der Analyse ist es, die thermischen Effekte dieser Maßnahmen zu quantifizieren und deren Potenzial zur Reduktion des Kühlenergiebedarfs sowie zur Regulierung der Oberflächentemperaturen zu eruieren. Die Untersuchung basiert auf einer umfassenden Parameterstudie, in der unterschiedliche bauliche Konfigurationen wie variierende Wandstärken und Reflexionsgrade der Gebäudehülle gegenübergestellt werden, um den Einfluss der thermischen Trägheit auf die energetische Einsparung zu bestimmen. Ein wesentlicher Bestandteil der Arbeit ist die Validierung der Simulationsergebnisse durch den Abgleich mit punktuell erfassten In-situ-Messdaten der Referenzobjekte. Dabei werden die methodischen Herausforderungen dargelegt, die sich aus den Limitationen der zonalen Simulationsprogramme bei der Abbildung komplexer Randzonen und lokaler Kühleffekte ergeben. Darüber hinaus werden objektspezifische Parameter analysiert, die maßgeblich die Genauigkeit der Prognose beeinflussen. Dazu gehören insbesondere die thermische Kopplung massiver Bauteile sowie die variierenden bauphysikalischen Eigenschaften des Substrats in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt. Die vorliegende Analyse bildet somit die Grundlage für eine differenzierte Bewertung der Leistungsfähigkeit von Begrünungssystemen unter Berücksichtigung realer klimatischer und konstruktiver Randbedingungen.

6.2.1 Fassadenbegrünung troggebunden, Amtshaus Margareten

Zur Quantifizierung der thermischen Effekte der Fassadenbegrünung wurde eine umfassende Parameterstudie im Simulationsprogramm IDA ICE (5.1.1) durchgeführt. Dabei wurden

verschiedene bauliche Varianten mit Wandstärken von 25 cm, 38 cm und 80 cm verglichen, um den Einfluss der thermischen Trägheit auf das Einsparpotenzial (Kühlenergie) zu untersuchen. Innerhalb dieser Wandstärken wurde zudem zwischen drei Fassadenkonfigurationen differenziert: einem Reflexionsgrad von 0,5 (helle Fassade), einem erhöhten Reflexionsgrad von 0,95 (Simulation der Verschattungswirkung) sowie einer kombinierten Variante mit einem Reflexionsgrad von 0,95 und einer Himmelstemperatur, die der Umgebungstemperatur gleichgesetzt wurde (Worst-Case-Szenario des unterbundenen Strahlungsaustausches).

Die Simulation erfolgte für einen Referenzraum mit den Abmessungen von 6 x 6 m und einer Höhe von 4 m, dessen Fensteranteil bei 40 % lag. In der Modellierung wurde gezielt nur die SS0-orientierte Wand (Süden) modifiziert, während die flächengleiche WSW-Wand (West-Süd-West) einen Reflexionsgrad von 0,5 behielt, um die isolierte Wirkung an der Hauptfassade zu verdeutlichen (Abbildung 35).



Abbildung 35: links: Frontansicht Messobjekt Amtshaus Margareten, rechts: Darstellung Simulationsmodell IDAICE (© IBO).

6.2.1.1 Validierung der Wandoberflächentemperaturen (80 cm Ziegelwand, begrünt)

Die Genauigkeit dieses Modells wurde für die Hochsommerperiode (Juli und August 2024) mittels statistischer Kennwerte der Innenwandoberflächentemperaturen verifiziert (Abbildung 36). Die Auswertung liefert ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,7$, was eine hohe Übereinstimmung der zeitlichen Dynamik unter Berücksichtigung der massiven thermischen Trägheit bestätigt. Die absolute Prognosegüte wird durch einen RMSE von 0,43 K und einen Bias von 0,31 K untermauert. Diese Werte liegen innerhalb der messtechnischen Toleranzgrenzen und bestätigen die Belastbarkeit der gewählten Modellparameter. Das folgende Diagramm visualisiert diese Korrelation und zeigt die Verteilung der Stundenmittelwerte im Verhältnis zur Identitätslinie.

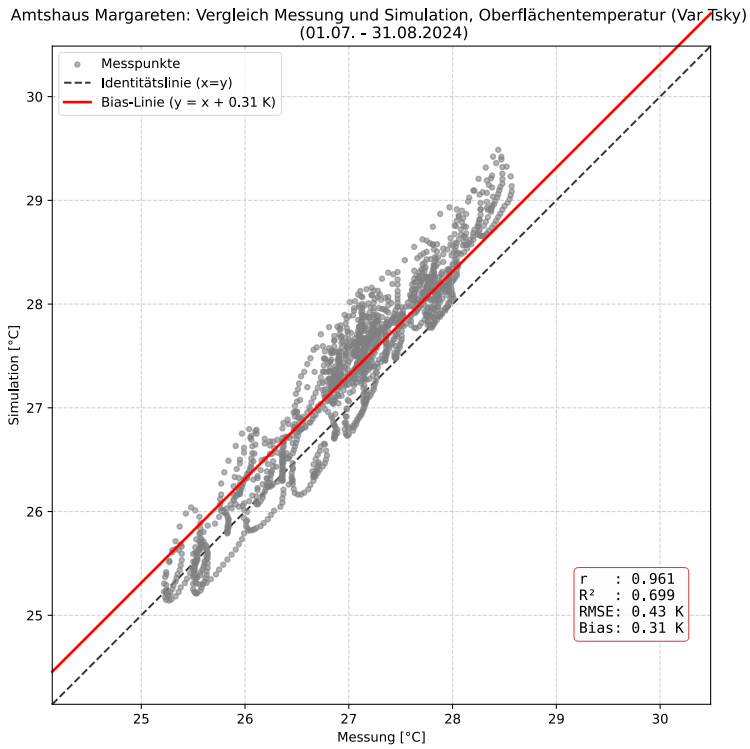


Abbildung 36: Scatterplot Juli-August 2024, Oberflächentemperaturen; Fassadenbegrünung troggebunden, *W. sinensis*, Amtshaus Margareten [FB1-tW] (© IBO).

Zu berücksichtigen ist bei der Validierung die spezifische Positionierung des Sensors. Dieser befindet sich in einer geometrisch komplexen Randzone, ca. 20 cm entfernt von einem Fensterstock sowie 20 cm von einer einbindenden massiven Innenwand. Trotz der daraus resultierenden zwei- bzw. dreidimensionalen Wärmeströme und potenzieller lokaler Kühleffekte durch das Fenster-Laibungsdetail zeigt das zonale Simulationsmodell eine bemerkenswerte Robustheit.

Bei der detaillierten Analyse der Daten ab ca. 27 °C zeigt sich jedoch eine geringfügige Divergenz. Während die Simulation Spitzenwerte von bis zu 29 °C berechnet, verharren die realen Messwerte bei ca. 28,2 °C. Diese Differenz von rund 0,8 K lässt sich primär durch die spezifische thermische Situation am Messpunkt begründen. Der entscheidende Einflussfaktor ist hierbei die thermische Kopplung mit der massiven Innenwand. Diese innenliegenden Massen fungieren als bedeutende thermische Speicher, die aufgrund der fehlenden solaren Exposition deutlich kühler bleiben als die Gebäudehülle. Da der Sensor im Eckbereich platziert ist, wirkt die kühlere Masse des Gebäudekerns als thermischer Anker, was die Temperaturspitzen am Messpunkt dämpft. Die zonale Simulation bildet den Raum hingegen als thermisch homogenen Knoten ab, wodurch diese lokale dreidimensionale Wärmeableitung rechnerisch unterschätzt wird.

Ergänzend könnte die im Vergleich zur Simulation leicht niedrigere Temperatur auf lokale mikroklimatische Effekte im Zwischenraum von Vegetation und Fassade zurückzuführen sein. Inwieweit hierbei eine geringfügiger Kamineffekt innerhalb der Kletterstruktur zur konvektiven Wärmeabfuhr beiträgt, müsste in weiterführenden Untersuchungen verifiziert werden.

Zusammenfassend ist die geringfügige systematische Überschätzung (Bias) als Sicherheitsreserve des gewählten konservativen Berechnungsansatzes zu werten. Da die realen Oberflächen-

temperaturen an heißen Tagen unter den prognostizierten Werten bleiben, liefert das Modell eine planungssichere Grundlage für die Bewertung des sommerlichen Wärmeschutzes.

6.2.1.2 Kühlbedarf und Einsparung

Die Ergebnisse der Parameterstudie zeigen (Abbildung 37), dass das größte Einsparpotenzial naturgemäß bei der 25-cm-Variante liegt, da die geringere Wandstärke sensibler auf die Reduktion des solaren Eintrags reagiert. Bei der massiven 80-cm-Wand betrugen die Einsparungen beim Kühlbedarf zwischen 92 kWh (bei einem Reflexionsgrad von 0,95) und 38 kWh, wenn zusätzlich die Begrünung als Blockade der Abstrahlung zum kalten Himmel berücksichtigt wurde. Bei der dünneren 25-cm-Wand fielen die Einsparungen signifikant höher aus und bewegten sich in einem Bereich von 234 bis 157 Stunden (reduzierte Kühlstunden). Dies unterstreicht, dass insbesondere thermisch weniger träge Bestandsgebäude in hohem Maße von der kühlenden Wirkung einer troggebundenen Begrünung profitieren können.

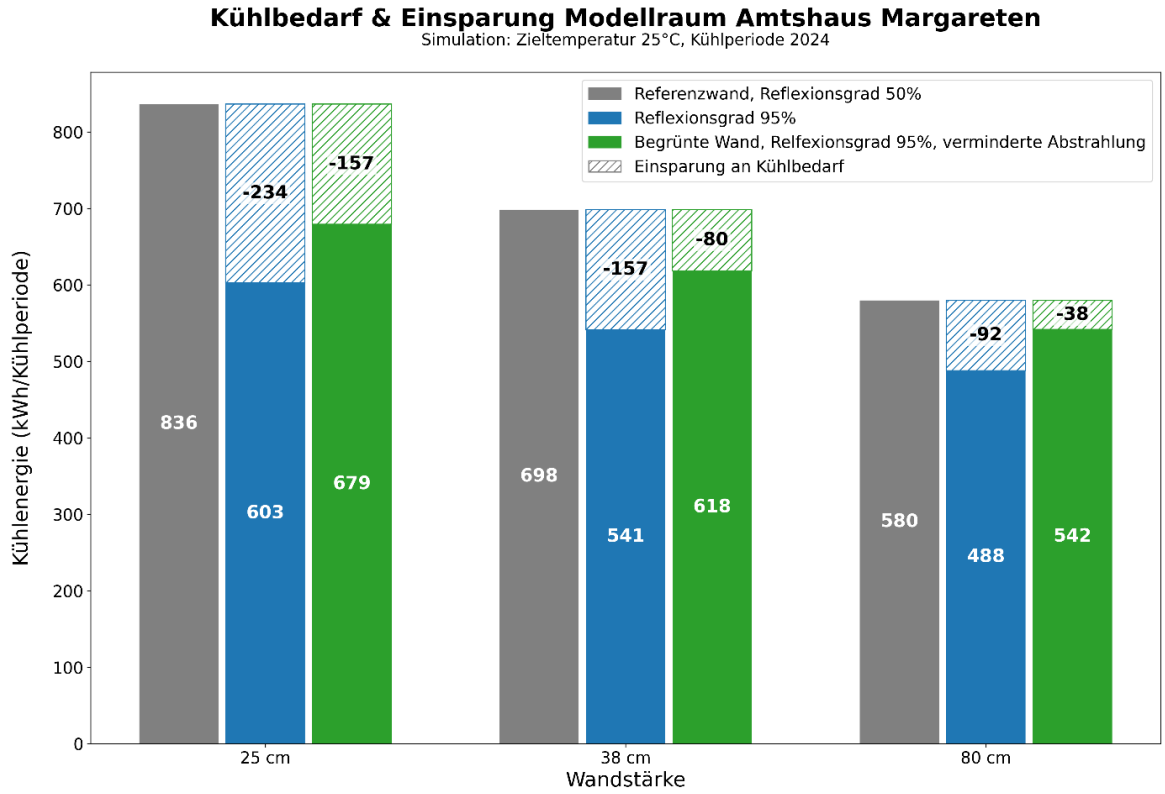


Abbildung 37: Kühlbedarf und Einsparung, Simulationsergebnisse bei unterschiedlichen Wandstärken; Fassadenbegrünung troggebunden, *W. sinensis*, Amtshaus Margareten [FB1-tW] (© IBO).

In einer weiterführenden Untersuchung wurde der solare Wärmeeintrag über ein einzelnes Fenster – bei einem Gesamtfensteranteil von 40 % – den Transmissionswärmeströmen der 16,8 m² großen und 80 cm starken Außenwand gegenübergestellt. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass der solare Eintrag durch das unverschattete Fenster im Vergleich zu den möglichen solaren Einträgen durch die Außenwand um ein Vielfaches höher sein kann. Bei einem g-Wert (Energie-durchlassgrad) von 0,55 verursacht dieses einzelne Fenster bereits eine zusätzliche Kühllast von

453 kWh, während ein Fenster mit einem g-Wert von 0,76 diesen Bedarf sogar drastisch auf 676 kWh erhöht (Abbildung 38).

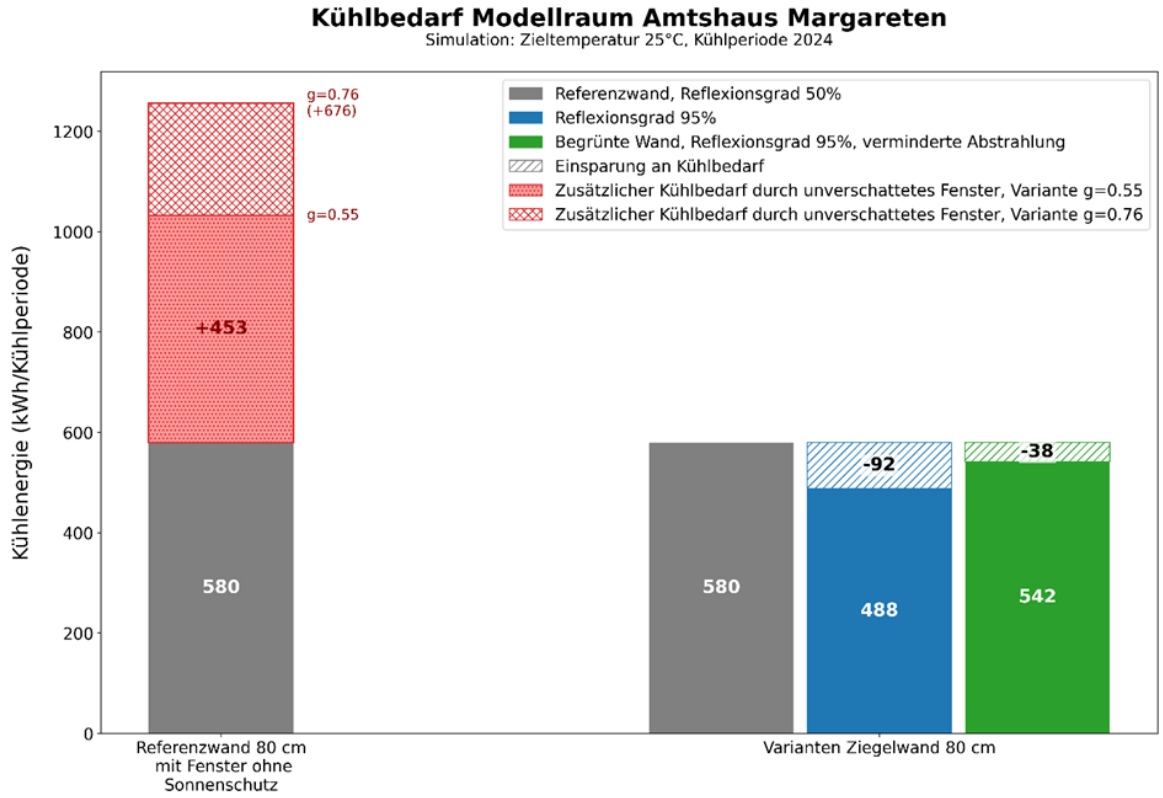


Abbildung 38: Kühlbedarf und Einsparung, Simulationsergebnisse: Vergleich mit Fenster ohne Sonnenschutz; Fassadenbegrünung troggebunden, *W. sinensis*, Amtshaus Margareten [FB1-tW] (© IBO).

Im Vergleich dazu fallen die Einsparungen durch eine Begrünung der opaken Wandflächen (60 % Anteil) deutlich geringer aus. Eine begrünte Bestandswand mit 80 cm Stärke verringert den Kühlbedarf um 38 bis 92 kWh, und selbst bei einer dünneren 25 cm Wand liegt das Einsparpotenzial mit 157 bis 234 kWh noch weit unter dem solaren Eintrag der hier unverschatteten Fensterfläche. Dabei ist festzuhalten, dass diese Berechnungen auf dem Vergleich mit einer bereits thermisch günstigen hellen Fassade mit einem Absorptionsgrad von α=0,50 gemäß ÖNORM B 8110-3 basieren. Bei einer dunkleren Bestandsfassade würde das relative Einsparungspotenzial zwar steigen, bliebe jedoch im Verhältnis zu den solaren Gewinnen über die Glasflächen weiterhin in einem überschaubaren Rahmen. Diese Zahlen bestätigen die Notwendigkeit eines ganzheitlichen Verschattungskonzepts das sowohl die massiven Wandteile als auch die Fensterflächen miteinbezieht. Eine effektive Umsetzung bietet hierbei die Vorverschattung durch Laubmasse, die in Abhängigkeit der Kletterhilfenstruktur sowie eines abgestimmten Pflegemanagements gezielt auch vor Fensterflächen eingesetzt werden kann (Stangl et al. 2025, Poiss et al. 2025).

6.2.2 Dachbegrünung reduziert-intensiv, HTL ST. Pölten [DB-ri]

Nach der detaillierten Betrachtung und Modellierung der vertikalen Begrünungssysteme bildet die Analyse der horizontalen Dachflächen den zweiten Schwerpunkt dieser Untersuchung. Das thermische Verhalten von Dachkonstruktionen ist aufgrund der exponierten Lage und der damit verbundenen hohen solaren Einstrahlung sowie der nächtlichen langwelligen Abstrahlung von entscheidender Bedeutung für die Energiebilanz eines Gebäudes. In diesem Kontext wird das System der reduziert-intensiven Dachbegrünung [DB1-ri] in St. Pölten als effektive Maßnahme zur thermischen Pufferung und zum Schutz der Baukonstruktion untersucht.

Von den zwei messtechnisch dauerhaft überwachten Dachsystemen am Standort der HTL St. Pölten wurde dieses System für die detaillierte Simulation ausgewählt, da der ungedämmte Zustand der Primärkonstruktion (ungedämmtes Flachdach) die höchste thermische Sensitivität gegenüber Außenbedingungen aufweist. Es wurde davon ausgegangen, dass hier die physikalischen Effekte der Begrünung auf den Innenraum am deutlichsten und unverfälschtesten quantifizierbar sind. Der betrachtete Raum weist eine Nutzfläche von 18 m² auf und ist über eine nach Osten orientierte Außenwand thermisch an die Umgebung gekoppelt. Die Räumlichkeit dient technischem Wartungspersonal als Arbeitsplatz. Zur Validierung der Simulationsergebnisse und zur Erfassung der realen thermischen Dynamik wurde messtechnische Sensorik direkt im Raum sowie innerhalb der abgehängten Zwischendecke installiert.

6.2.2.1 Validierung Simulationsmodell anhand der Deckenoberflächentemperaturen

Die Verifikation des Simulationsmodells für die Hochsommerperiode erfolgte durch einen Vergleich der berechneten Oberflächentemperaturen mit In-situ-Messdaten einer Betonrippendecke des Baujahres 1979. Das Simulationsmodell in IDA ICE wurde als Zwei-Zonen-Modell konzipiert (Abbildung 39), wobei der Hauptraum (Zone 1) und der Deckenhohlraum (Zone 2) durch einen Plattenwerkstoff von der abgehängten Decke getrennt wurden. Aufgrund der geometrischen Komplexität wurde die Rippenstruktur vereinfacht als homogene, 18 cm starke Betonschicht modelliert. Der Dachaufbau umfasst 35 cm Substrat, die Wärmeleitfähigkeit wurde aus dem Datensatz Nehls et al. (2024) mit 0,3 W/(m·K) übernommen.

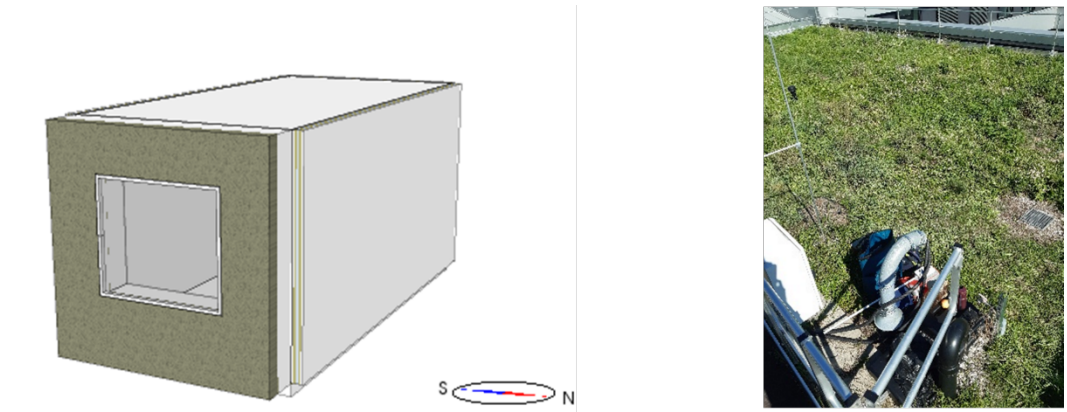


Abbildung 39: links: Simulationsmodell Zone 1, rechts: reduziert-intensive Dachbegrünung, HTL St. Pölten [DB2-ri] (© IBO).

Da komplexe biologische und physikalische Prozesse der Begrünung – insbesondere die Verschattung durch Biomasse und die Kühlung durch Evapotranspiration – im verwendeten Simulationsmodell nicht dynamisch über veränderliche Stoffwerte des Substrats abgebildet werden konnten, wurde der solare Reflexionsgrad ρ (Albedo) als Ersatzparameter zur Kompensation dieser Effekte herangezogen (Abbildung 40). Zur Identifikation des am besten geeigneten Reflexionsgrades, wurden neun verschiedene Szenarien (ρ = 0,10 bis 0,90) berechnet und den realen Messdaten der Deckentemperatur gegenübergestellt.

Die grafische Auswertung des Jahresverlaufs verdeutlicht die thermische Dynamik der raumseitigen Oberflächentemperatur der Decke im Vergleich zu den simulierten Varianten mit unterschiedlichen Reflexionsgraden. Über das gesamte Kalenderjahr hinweg folgen sowohl die Messwerte als auch die Simulationen einem charakteristischen saisonalen Zyklus, wobei die Temperaturen in den Wintermonaten eine hohe Stabilität aufweisen und sich zumeist in einem engen Korridor zwischen 13 °C und 17 °C bewegen. Mit der Zunahme der Globalstrahlung im Frühjahr setzt eine deutliche Spreizung der Simulationsergebnisse ein, die im Hochsommer, insbesondere in den Monaten Juli und August, ihren Kulminationspunkt erreicht. In dieser Periode zeigt sich der massive Einfluss des Albedos auf die thermische Last des Bauteils, da die Temperaturdifferenz zwischen einem sehr dunklen Dach (ρ = 0,10) und einer hochreflektiven Oberfläche (ρ = 0,90) auf der Raumseite bis zu 10 K betragen kann. Die Messwerte der Deckenoberfläche ordnen sich dabei vor allem während der strahlungsintensiven Sommermonate im Bereich der hohen Reflexionsgrade ein. Während die Varianten in den strahlungsarmen Wintermonaten nahezu deckungsgleich verlaufen, bestätigt die signifikante Auffächerung im Sommer die Sensitivität des Modells gegenüber der kurzwelligen Strahlungsabsorption an der Außenfläche.

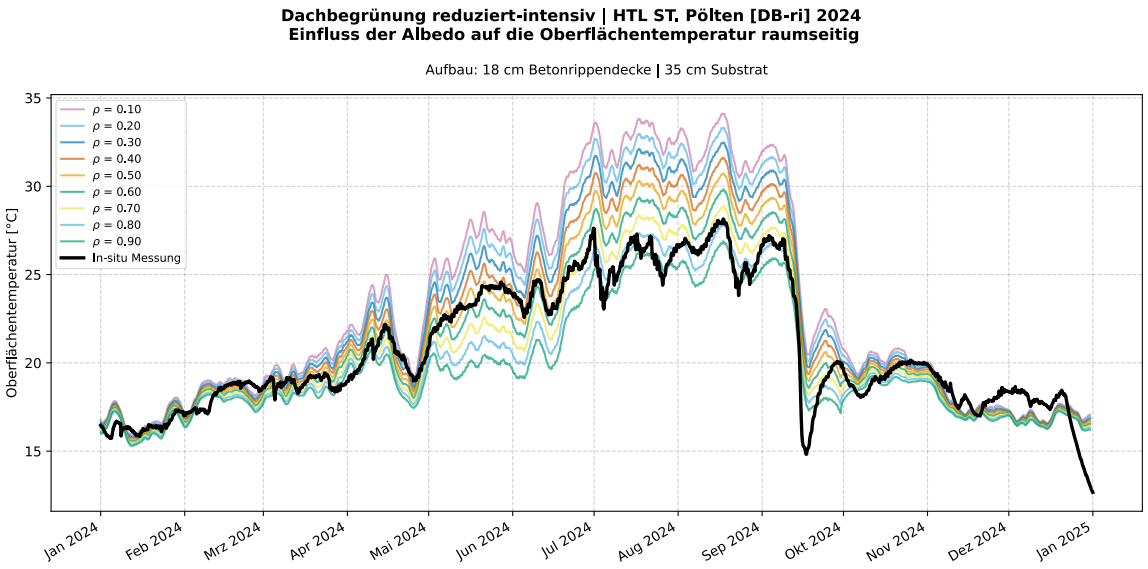


Abbildung 40: Einfluss der Albedo, Simulationsergebnisse; reduziert-intensive Dachbegrünung, HTL St. Pölten [DB2-ri] (© IBO).

Die statistische Auswertung der Modellgüte erfolgt nach wissenschaftlichen Standards zweistufig (ASHRAE Guideline 14). Zunächst wurde mittels der mittleren quadratischen Gesamtabweichung (RMSE) die allgemeine Prognosepräzision der Simulation bewertet. Anschließend wird über den normierten mittleren Bias-Fehler (NMBE) die systematische Abweichung (Unterschätzung oder Überschätzung) des Modells quantifiziert, um die thermische Wirksamkeit der Begrünungsparameter über den Jahresverlauf zu validieren.

In Abbildung 41 gibt die mittlere quadratische Gesamtabweichung (RMSE) Aufschluss über die absolute Prognosegüte der Simulation in Kelvin. Es wird deutlich, dass Konfigurationen mit niedrigen Reflexionsgraden zwischen 0,1 und 0,3 über das gesamte Jahr hinweg hohe Fehlerwerte von teils über 2,7 K aufweisen und somit die thermische Realität des begrünten Dachs unzureichend abbilden. Mit steigendem Reflexionsgrad sinkt der Fehler kontinuierlich ab. Für die spezifische Betrachtung der Sommermonate Juli und August erweist sich ein Wert von ρ = 0,8 als optimal, da hier die Abweichungen mit 0,82 K bzw. 0,65 K ihr Minimum erreichen und eine präzise Abbildung der Temperaturspitzen ermöglichen. Betrachtet man hingegen das gesamte Kalenderjahr im Mittel, zeigt der Reflexionsgrad 0,7 mit einem Jahres-RMSE von 1,09 K statistisch die geringste Gesamtabweichung, dicht gefolgt von den Werten 0,6 und 0,8.

Dachbegrünung reduziert-intensiv | HTL ST. Pölten [DB-ri] 2024

Mittlere quadratische Abweichung (RMSE) simulierter Deckentemperaturen bei Variation des solaren Reflexionsgrades ρ (Dachoberfläche)

Monat	ρ = 0.10 [K]	ρ = 0.20 [K]	ρ = 0.30 [K]	ρ = 0.40 [K]	ρ = 0.50 [K]	ρ = 0.60 [K]	ρ = 0.70 [K]	ρ = 0.80 [K]	ρ = 0.90 [K]
1	0.71	0.65	0.61	0.57	0.54	0.53	**0.53**	0.54	0.57
2	0.72	0.68	0.65	**0.64**	0.65	0.67	0.72	0.77	0.84
3	1.39	1.19	1.00	0.82	0.67	0.56	**0.54**	0.61	0.74
4	2.12	1.75	1.40	1.12	0.93	**0.88**	0.96	1.14	1.37
5	3.34	2.54	1.75	1.01	**0.61**	1.07	1.84	2.68	3.55
6	4.45	3.62	2.79	1.98	1.28	**0.99**	1.43	2.21	3.10
7	6.89	6.06	5.22	4.35	3.47	2.56	1.64	0.82	**0.78**
8	5.74	4.99	4.21	3.42	2.61	1.79	1.00	**0.65**	1.25
9	4.51	3.98	3.43	2.89	2.37	1.89	1.52	**1.38**	1.56
10	1.10	0.95	0.81	0.69	0.60	**0.56**	0.57	0.64	0.75
11	**0.50**	0.54	0.59	0.65	0.72	0.79	0.86	0.94	1.02
12	1.51	1.50	1.50	1.49	**1.49**	1.49	1.50	1.50	1.51
Jahr	2.75	2.37	2.00	1.64	1.33	1.15	**1.09**	1.16	1.42

Abbildung 41: Mittlere quadratische Abweichung der Simulationsergebnisse zu Oberflächentemperatur-messungen; reduziert-intensive Dachbegrünung, HTL St. Pölten [DB2-ri] (© IBO).

In Abbildung 42 wird die systematische Tendenz des Modells zur Über- oder Unterschätzung der Messwerte in Prozent quantifiziert (normierter mittlerer Bias - NMBE). Die durchgehend negativen Werte bei geringen Reflexionsgraden (0,1 bis 0,4) belegen eine deutliche energetische Über-schätzung der solaren Einstrahlung, was zu simulierten Deckentemperaturen führt, die weit über den Realdaten liegen. Im Fokus der sommerlichen Betrachtung erreicht der Reflexionsgrad 0,8 im August mit einem NMBE von lediglich 0,4 % nahezu eine ideale Übereinstimmung, während er im Juli mit −2,1 % ebenfalls innerhalb sehr enger Toleranzgrenzen liegt. Für eine ganzjährige Charakterisierung des Dachaufbaus erweisen sich die Reflexionsgrade 0,6 und 0,7 als am passendsten, da deren Jahresmittelwerte mit −1,0 % bzw. 0,9 % am nächsten an der Nulllinie liegen und somit über die verschiedenen Jahreszeiten hinweg den geringsten kumulierten Bias aufweisen.

Dachbegrünung reduziert-intensiv | HTL ST. Pölten [DB-ri] 2024

Systematische Abweichung (NMBE) der Simulationsmodelle gegenüber Realdaten in Abhängigkeit vom Reflexionsgrad ρ der Dachoberfläche

Monat	ρ = 0.10 [%]	ρ = 0.20 [%]	ρ = 0.30 [%]	ρ = 0.40 [%]	ρ = 0.50 [%]	ρ = 0.60 [%]	ρ = 0.70 [%]	ρ = 0.80 [%]	ρ = 0.90 [%]
1	-3.0	-2.5	-2.0	-1.5	-1.0	-0.5	**-0.0**	0.5	1.0
2	-2.1	-1.5	-0.9	**-0.3**	0.3	0.9	1.5	2.1	2.7
3	-6.2	-5.1	-3.9	-2.8	-1.6	**-0.5**	0.7	1.9	3.0
4	-9.0	-7.0	-5.0	-3.1	-1.2	**0.5**	2.2	3.8	5.3
5	-14.0	-10.6	-7.1	-3.5	**0.1**	3.7	7.3	11.0	14.7
6	-17.4	-13.9	-10.3	-6.7	-3.0	**0.8**	4.6	8.4	12.4
7	-26.6	-23.4	-20.1	-16.7	-13.3	-9.7	-5.9	-2.1	**1.8**
8	-21.7	-18.8	-15.9	-12.8	-9.7	-6.4	-3.0	**0.4**	4.0
9	-19.9	-17.3	-14.7	-12.0	-9.2	-6.3	-3.3	**-0.3**	2.8
10	-4.7	-3.8	-3.0	-2.1	-1.2	**-0.2**	0.7	1.6	2.5
11	**1.5**	1.9	2.4	2.8	3.3	3.8	4.2	4.7	5.2
12	**0.5**	0.8	1.1	1.5	1.8	2.1	2.4	2.7	3.1
Jahr	-10.2	-8.4	-6.6	-4.8	-2.9	-1.0	**0.9**	2.9	4.9

Abbildung 42: Systematische Abweichung der Simulationsergebnisse zu Oberflächentemperaturmessungen; reduziert-intensive Dachbegrünung, HTL St. Pölten [DB2-ri] (© IBO).

6.2.2.2 Vergleich Oberflächentemperaturen, Heiz- und Kühlenergiebedarf

Um das thermische Substitutionspotenzial des reduziert-intensiv begrünten Dachsystems [DB2-ri} gegenüber einer Standardlösung quantifizierbar zu machen, wurde dieses einem konventionellen Referenzszenario gegenübergestellt. Als Referenz diente hierfür ein klassisches Warmdach mit einer Kiesschüttung, welches auf der identischen Stahlbetondecke wie die Gründachvariante aufbaut. Die Konstruktion besteht aus einer 16 cm starken Wärmedämmung und einer abschließenden, 6 cm dicken Kiesschüttung. Mit einem resultierenden Wärmedurchgangs-koeffizienten von U = 0,20 W/(m²·K) entspricht dieses Dach den Anforderungen der OIB-Richtlinie 6 für den Mindestwärmeschutz und repräsentiert somit den Stand der Technik für konventionelle Flachdachbauten (OIB 2023).

Das vorliegende Diagramm (Abbildung 43) illustriert den zeitlichen Verlauf der raumseitigen Oberflächentemperaturen der Deckenkonstruktion für die beiden Simulationsvarianten im Vergleich zur In-situ Messung. Die Darstellung erfolgt in Form von Liniendiagrammen, wobei die Abszisse (X-Achse) den zeitlichen Verlauf über das Kalenderjahr 2024 abbildet, während die Ordinate (Y-Achse) die Temperatur in Grad Celsius (°C) quantifiziert. Die Einbeziehung der Messdaten dient hierbei der Validierung des Simulationsmodells und verdeutlicht die hohe Übereinstimmung zwischen der theoretischen Modellierung und den realen thermischen Verhältnissen im Gebäudeinneren.

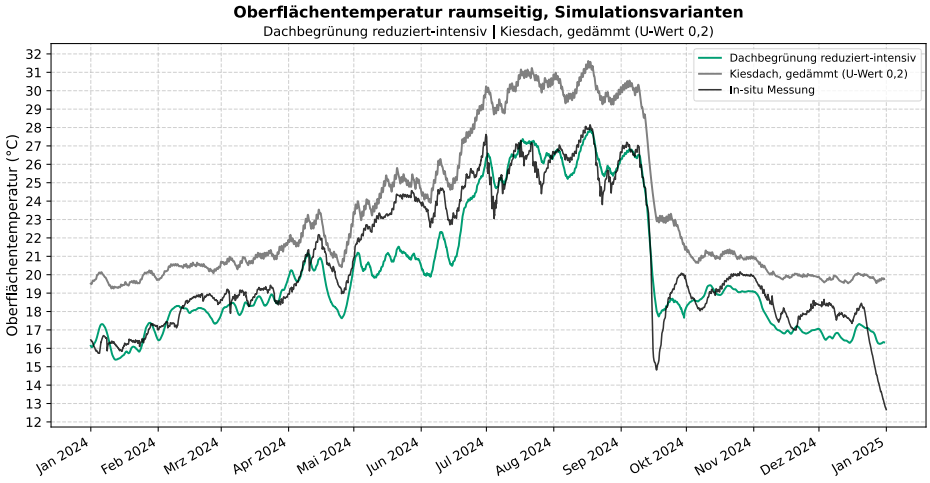


Abbildung 43: Temperaturverläufe der Simulationsvarianten zu in-situ Messung; reduziert-intensive Dachbegrünung, HTL St. Pölten [DB2-ri] (© IBO).

Der Vergleich der raumseitigen Oberflächentemperaturen zwischen dem konventionellen Kiesdach und der reduziert-intensiven Dachbegrünung verdeutlicht die unterschiedlichen thermischen Wirkungsweisen der Aufbauten im Jahresverlauf. Dabei lassen sich signifikante Unterschiede feststellen.

Sommerperiode (Juni bis August): In den Sommermonaten zeigt die Dachbegrünung ihr größtes Potenzial hinsichtlich des sommerlichen Wärmeschutzes. Während das Kiesdach im August mittlere tägliche Spitzenwerte der Oberflächentemperatur von bis zu 31,6 °C erreicht, limitiert die Dachbegrünung diese Spitzen auf maximal 27,9 °C. Die Differenz der täglichen Maximaltemperaturen zwischen beiden Varianten beträgt im August im Mittel ca. 4,0 K.

Übergangszeiten (Frühling/Herbst): In den Übergangsperioden reagiert das Kiesdach deutlich dynamischer auf wechselnde Außenbedingungen. Die Oberflächentemperaturen liegen hier im Mittel bei ca. 22,4 °C, während das Gründach mit durchschnittlich 19,5 °C eine kühlere, aber stetigere Charakteristik aufweist.

Winterperiode (Dezember bis Februar): Die Simulation weist für das Gründach eine mittlere Oberflächentemperatur von ca. 16,9 °C aus, wohingegen das Kiesdach mit ca. 19,9 °C höhere Werte erreicht. Der Transmissionswärmeschutz des gedämmten Kiesdaches macht sich hier bemerkbar.

Die zuvor analysierten Oberflächentemperaturen verdeutlichen die physikalische Wirkweise der Dachaufbauten und deren Einfluss auf das thermische Verhalten der Bauteilunterseiten. Inwieweit die Oberflächentemperaturen der Gründachvariante zu einer realen Reduktion der technischen Konditionierungsleistung führen, verdeutlicht die nachfolgende energetische Bilanzierung.

Analyse des Kühl- und Heizenergiebedarfs

Die folgenden Diagramme illustrieren den monatlichen Nutzenergiebedarf für die thermische Konditionierung der beiden Varianten, wobei zwischen dem Heiz- und Kühlenergiebedarf differenziert wurde. Die Darstellung erfolgte in Form von gruppierten Balkendiagrammen, in denen die X-Achse den zeitlichen Verlauf über das Kalenderjahr 2024 abbildet und die Y-Achse die

jeweilige Energiemenge in Kilowattstunden (kWh) quantifiziert. Zur Gewährleistung der direkten Vergleichbarkeit beider Bedarfsarten wurde eine einheitliche Skalierung der Ordinate gewählt, während die Legende zusätzlich die kumulierten Jahressummen für jedes Szenario ausweist.

Kühlenergiebedarf

Der Bedarf an Kühlenergie konzentriert sich primär auf die Sommermonate von Mai bis September, wobei beide Varianten ihren Lastspitzenpunkt im Monat Juli erreichen (Abbildung 44). Ein detaillierter Vergleich der Simulationsdaten verdeutlicht die hohe Effektivität der Dachbegrünung im Bereich des sommerlichen Wärmeschutzes. Während das gedämmte Kiesdach einen jährlichen Kühlbedarf von insgesamt 169 kWh aufweist, benötigt die begrünte Variante lediglich 82 kWh. Dies entspricht einer signifikanten Reduktion des Kühlenergiebedarfs um ca. 51,5 %. Besonders in den Kernsommermonaten Juni, Juli und August halbiert lt. Simulation die Dachbegrünung die erforderliche Kühlenergie, was in der Realität auf die Verschattungswirkung der Pflanzen, Evapotranspiration und der spezifischen Eigenschaften (thermische Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit) des Substrats zurückzuführen ist.

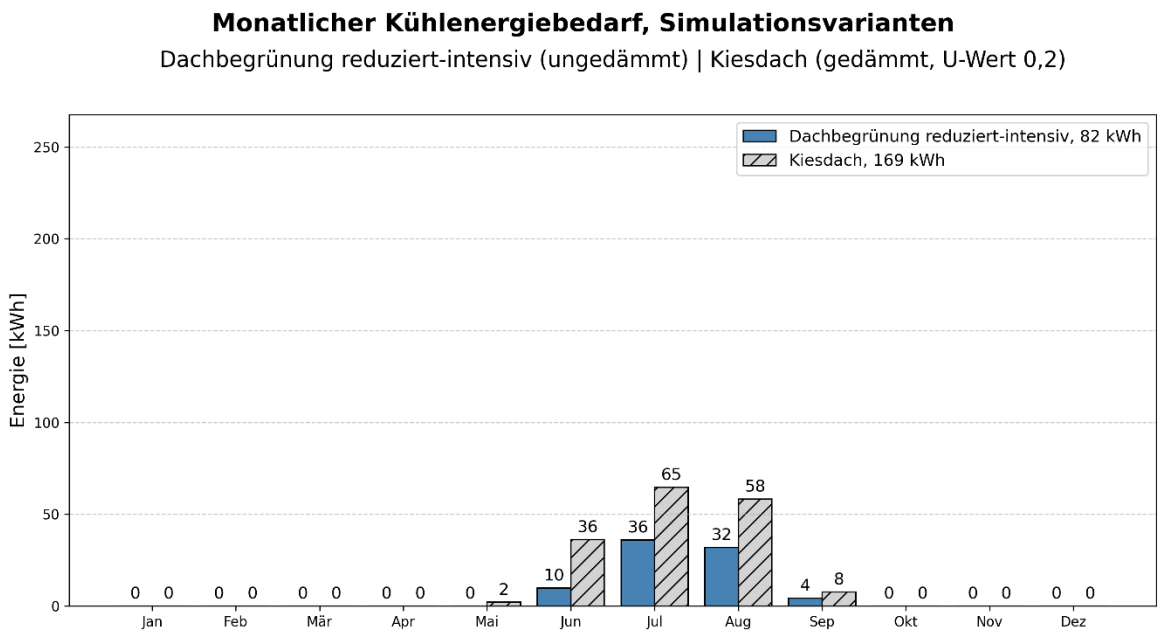


Abbildung 44: Simulationsergebnisse monatlicher Kühlenergiebedarf; reduziert-intensive Dachbegrünung (ohne Dämmung) im Vergleich zur Referenz gedämmtes Kiesdach HTL St. Pölten [DB2-ri] (© IBO).

Heizenergiebedarf

Im Bereich des Heizenergiebedarfs zeigt sich ein gegensätzliches Bild, wobei die Verbräuche schwerpunktmäßig in den Wintermonaten sowie den Übergangszeiten liegen (Abbildung 45). Die Variante „Kiesdach, gedämmt“ weist über das Jahr einen Heizwärmebedarf von 534 kWh auf. Im Vergleich dazu verzeichnet die untersuchte ungedämmte begrünte Dach einen deutlich höheren Bedarf von insgesamt 1.088 kWh, was einem Anstieg von ca. 104 % gegenüber der Referenz entspricht. Dieser markante Unterschied zeigt, dass das gedämmte Kiesdach mit einem U-Wert von 0,2 eine wesentlich höhere thermische Barriere gegen Transmissionswärmeverluste im Winter bietet als der hier simulierte Aufbau der Dachbegrünung.

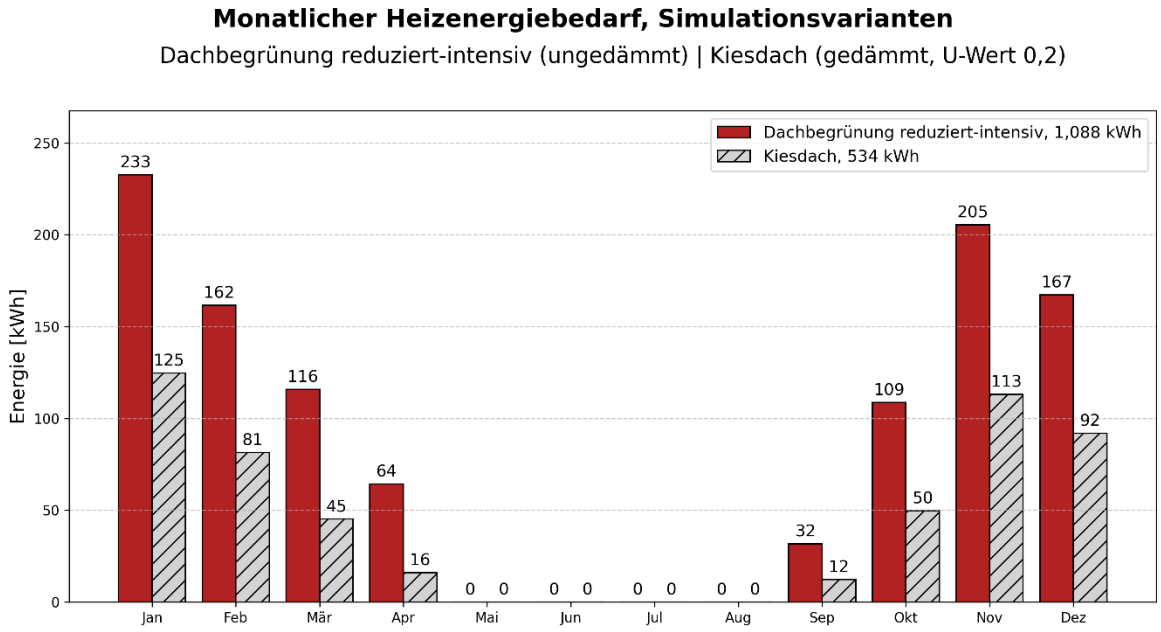


Abbildung 45: Simulationsergebnisse monatlicher Heizenergiebedarf; reduziert-intensive Dachbegrünung (ohne Dämmung) im Vergleich zur Referenz (gedämmtes Kiesdach), HTL St. Pölten [DB2-ri] (© IBO).

Die Ergebnisse verdeutlichen die unterschiedlichen Wirkmechanismen der untersuchten Dachaufbauten. Während die Dachbegrünung ihre Stärken im sommerlichen Wärmeschutz ausspielt und den Kühlbedarf um mehr als die Hälfte senkt, führt sie in der vorliegenden Konfiguration im Winter zu einem verdoppelten Heizenergiebedarf gegenüber dem gedämmten Kiesdach.

Abschließende Bemerkungen

Trotz der hohen Übereinstimmung im Hochsommer zeigt die statistische Analyse für die Monate Mai und Juni signifikante Abweichungen der Simulationsergebnisse von den Messwerten. Während das Modell mit einem äquivalenten Reflexionsgrad von 0,8 im Juli und August eine exzellente Modellgüte erreicht, liegen die Fehlerwerte im späten Frühjahr und Frühsommer deutlich höher, wobei die Ursache für diese Diskrepanz zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht zweifelsfrei durch Messdaten belegt werden kann.

Zur Abschätzung des Einflusses der Substrateigenschaften im Rahmen des vorliegenden Projekts wurden Messdaten aus dem Forschungsprojekt „U-*green – Bauphysikalische Bewertung von Fassaden- und Dachbegrünungen*“ (Nehls et al. 2024) herangezogen und ausgewertet. Die in Abbildung 46 dargestellten Untersuchungen beziehen sich speziell auf das Intensivsubstrat „OPTIGRÜN i“. Um die Sensitivität der thermischen Auswirkungen zu bewerten, wurde das Referenzszenario (Wärmeleitfähigkeit 0,3 W/mK, Rohdichte 1.000 kg/m³, spez. Wärmekapazität 1.000 J/kgK) den beiden Varianten „Substrat trocken“ (Rohdichte 900 kg/m³, Wärmeleitfähigkeit 0,153 W/mK, spez. Wärmekapazität 961 J/kgK) und „Substrat nass“ (Rohdichte 1.000 kg/m³, Wärmeleitfähigkeit 0,423 W/mK, spez. Wärmekapazität 1580 J/kgK) gegenübergestellt.

Mittelwerte der thermophysikalischen Eigenschaften in Abhängigkeit vom Wassergehalt

OPTIGRÜN i Intensiv-Substrat | Quelle Messdaten: Projekt U-Green

gravimetrischer Wassergehalt [%]	Rohdichte feucht [kg/m3]	Wärmeleitf. [W/mK]	Spez. Wärmekapazität [J/kgK]
5,0	941,7	0,153	961,0
10,0	916,7	0,188	1.107,3
15,0	890,1	0,250	1.240,9
20,0	860,4	0,218	1.363,3
25,0	936,4	0,366	1.476,0
30,0	955,7	0,423	1.580,0

Abbildung 46: Eigenauswertung, Wärmeleitfähigkeit und spez. Wärmekapazität Substrat Optigrün, intensiv-Substrat; Datenquelle: Häusler et al.

Der Vergleich dieser Varianten mit den tatsächlichen Messdaten der Jahre 2024 und 2025 ist in Abbildung 47 sowie Abbildung 48 grafisch aufbereitet. Dabei ist deutlich erkennbar, dass die Messwerte insbesondere in den Juni-Monaten beider Jahre signifikant von der Referenzvariante abweichen. Während sich die Variante „Substrat trocken“ den realen Messdaten annähert, verbleibt dennoch eine maximale Temperaturdifferenz von 2 Kelvin. Diese verbleibende Abweichung verdeutlicht, dass der Zustand des Substrats allein die Diskrepanz nicht vollständig erklären kann. Eine verminderte Albedo aufgrund geringer Biomasseausbildung als Ursache kann für den Juni 2024 ausgeschlossen werden, da die Begrünung zum Zeitpunkt eines Lokalaugenscheins als gut ausgebildet dokumentiert wurde.

Ein weiterer kritischer Aspekt betrifft die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Zeiträume. Das Jahr 2024 war durch eine überdurchschnittlich heiße Witterung bei gleichzeitig hohen Niederschlagsmengen gekennzeichnet, was die Leistungsfähigkeit der Evapotranspiration begünstigt haben könnte. Es stellt sich daher die Frage, ob der äquivalente Reflexionswert von 0,8 eine allgemeingültige Charakteristik für diese spezifische Art der Begrünung darstellen kann oder ob es sich um eine jahresspezifische Kalibrierung handelt, die unter trockeneren Bedingungen (z.B. in Dürrejahren) zu einer Unterschätzung der Temperaturen führen würde. Eine abschließende Beurteilung der Robustheit dieses Parameters für die Modellierung erfordert daher zwingend die Auswertung weiterer Messjahre mit differierenden klimatischen Randbedingungen, um die statistische Sicherheit der Modellvalidierung langfristig zu gewährleisten. Für den Juni 2025 konnte aber wie bereits erwähnt, eine ähnliche hohe Abweichung wie im Jahr 2024 festgestellt werden (Abbildung 47 sowie Abbildung 48).

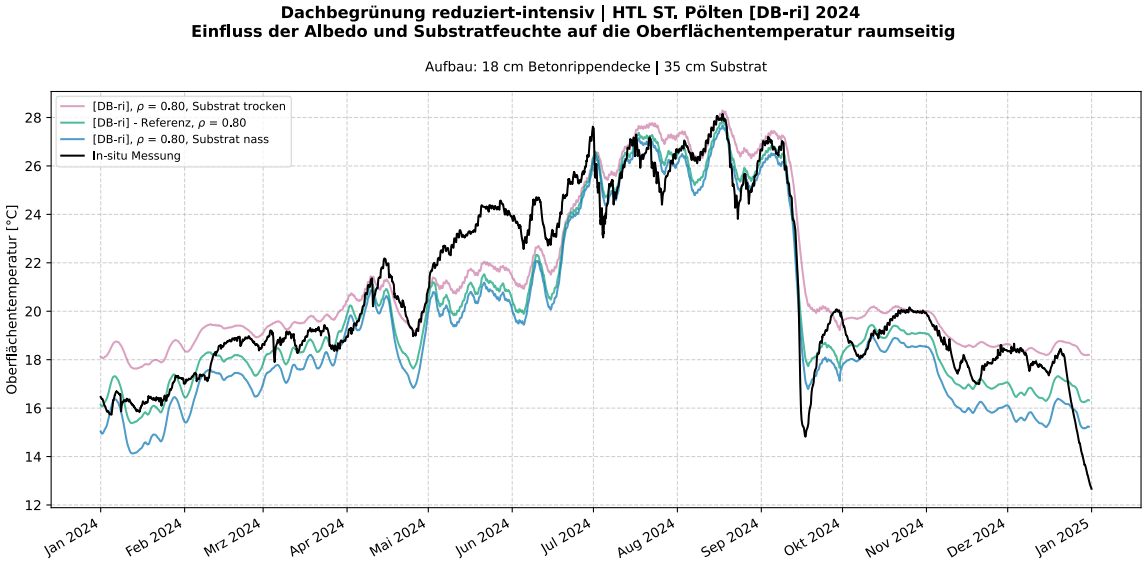


Abbildung 47: Diagramm für 2024: Simulationsergebnisse, Variation Substratfeuchte, Klimadaten 2024; reduziert-intensive Dachbegrünung, HTL St. Pölten [DB2-ri] (© IBO).

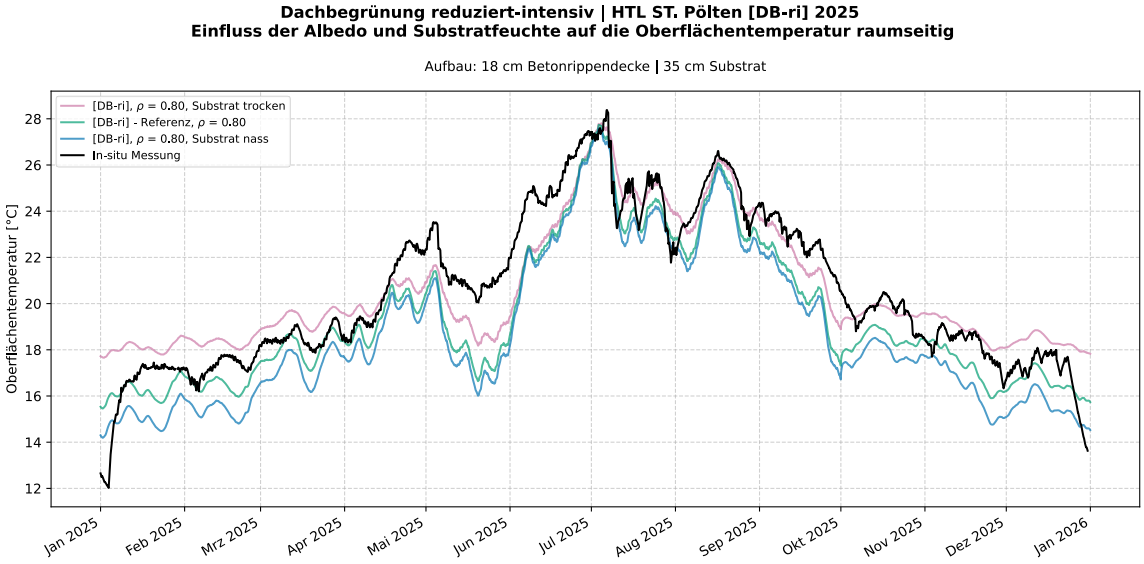


Abbildung 48: Diagramm für 2025: Simulationsergebnisse, Variation Substratfeuchte, Klimadaten 2025; reduziert-intensive Dachbegrünung, HTL St. Pölten [DB2-ri] (© IBO).

7 HEDWIG-Kennwertetabellen

7.1 Überblick über die HEDWIG-Messstandorte

Die HEDWIG-Messungen wurden an insgesamt 16 Objekten an 14 Standorten durchgeführt (Abbildung 49). An 8 Objekten wurde im Außen- und im Innenraum ein Dauermonitoring eingerichtet und durchgeführt. An weiteren 8 Objekten wurden die Vegetationsparameter und ergänzende Sensormessdaten im Rahmen von Tages-Messkampagnen erhoben.

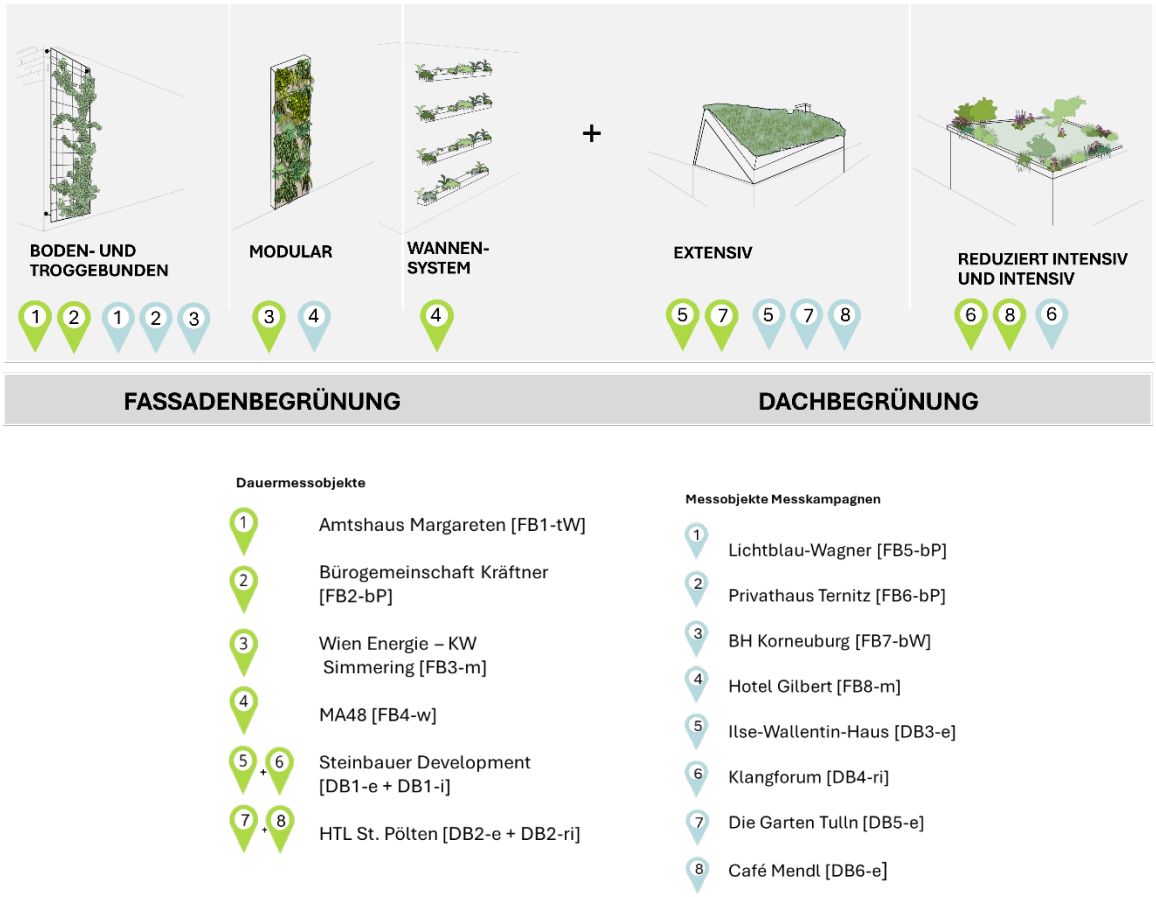


Abbildung 49: Überblick über die HEDWIG-Fassaden- und Dachbegrünungssysteme (© IBLB).

Abbildung 50 ist die geographische Lage der Messobjekte zu entnehmen. Diese umfasst Wien sowie umliegende Städte in Niederösterreich.

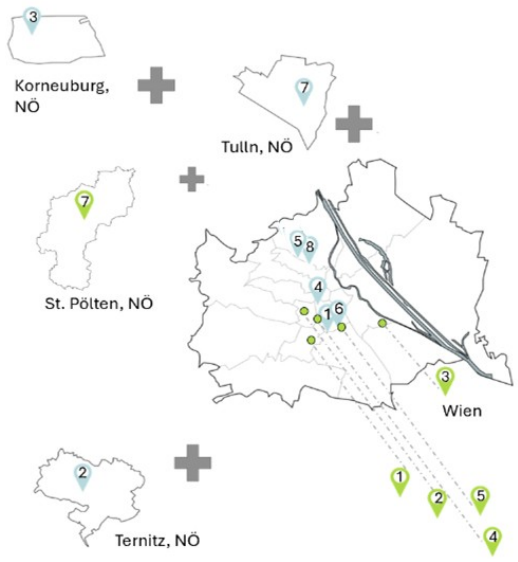


Abbildung 50: Schematische Verortung und geografische Lage der HEDWIG Messstandorte (© IBLB).

In Abbildung 51 wird eine Übersicht zur Gebäudetypdiversität hinsichtlich der Untersuchungsobjekte geboten.



Abbildung 51: Diversität der untersuchten Gebäudetypen (1 Wohnhaus, 2 Bürogebäude, 3 Gewerbe, 4 Dienstleistung, 5 Universität, 6 Hotel, 7 Ausbildungsstätte bzw. (Fort-)bildungseinrichtung, 8 Amtsgebäude) (© IBLB).

Sowohl aus den Tages-Messkampagnen als auch aus den Dauermonitoringdaten wurden Kennwerte zur Vegetation sowie dem Mikroklima erhoben. Diese umfassten hinsichtlich der Vegetationsparameter den WLAI (*Wall Leaf Area Index*), den Deckungsgrad, das Pflanzenvolumen sowie die Transpirationsrate. Ergänzt wurden diese Daten um jene des Dauermonitorings, welche unter anderem die Lufttemperatur (vor sowie hinter der Begrünung), die Luftfeuchte (vor und hinter der Begrünung), die Solarstrahlung (vor sowie hinter dem Grünkörper) sowie den *Bioshading Coefficient* inkludieren.

7.2 Kennwertetabelle Vegetations- und mikroklimatische Parameter aus Tages-Messkampagnen für Fassadenbegrünung

Im Zuge der Tages-Messkampagnen 2023 und 2024 wurden definierte Vegetationsparameter und mikroklimatische Daten vor Ort erhoben. Eine detaillierte Darstellung der Kennwerte ist Abbildung 52 sowie Abbildung 53 zu entnehmen.

Standort					Amtshaus Margareten	Amtshaus Margareten	Büro Kräftner	Kraftwerk Simmering	MA 48	Minimum aller Standorte	Maximum aller Standorte
Datum					20.07.2023	10.07.2024	04.09.2024	31.07.2024	20.08.2024		
Parameter	Mess-angabe	Anzahl (n)	Einheit	Messgerät	FB1-tW	FB1-tW	FB2-bP	FB3-m	FB4-w		
Kategorie											
Typ/System					troggeb.	troggeb.	bodengeb.	modular	wandgeb.		
Ausrichtung			N/O/S/W		S-SO	S-SO	W	SO	S		
Pflanzenauswahl					*Wisteria*	*Wisteria*	*Parthenocissus*	Gräser-Kräuter-Stauden	Gräser-Kräuter-Stauden		
Pflanzenvolumen	MW (SD)	5	m^3		0.25	0,92 (0,35)	0,2 (0,04)	0,29 (0,05)	0,67 (0,13)	0.12	0.77
$DG_{proj.}$	MW (SD)	5	%		97.9	78,8 (19,6)	75,9 (8,3)	96,0 (3,5)	98,8 (1,5)	77.8	97.9
DG_{Ziel}		1	%		n.v.	82.5	90.0	100.0	100.0	82.5	100.0
WLAI	MW (SD)	5	dimensionslos	Meter Group, AccuPAR	7.1	3,4 (1,9)	1,9 (0,6)	4,2 (1,6)	5,3 (1,2)	2.4	7.1
Blatt-T	MW (SD)	25	°C	Meter Group, Atmos 14	32.2	34,3 (0,1)	31,9 (0,5)	32,1 (0,4)	25,6 (0,9)	28.5	32.2
Stom. Leiftähigkeit	MW (SD)	25	mmol m^{-2} s^{-1}	Delta-T Devices, AP4	119.0	22,2 (26,1)	26,2 (6,8)	112,2 (61,8)	357,2 (227,2)	51.0	119.0
Luft-T, vor Laub	MW	10' Intervall	°C	Meter Group, Atmos 14	n.v.	34.1	30.0	29.7	25.9	25.9	34.1
Luft-T, hinter Laub	MW	10' Intervall	°C	Meter Group, Atmos 14	n.v.	34.4	30.4	28.6	24.7	24.7	34.4
Luft-T, Innenraum	MW	10' Intervall	°C	Meter Group, Atmos 14	n.v.	DM	28.8	DM	DM	24.8	28.8
Luft-F_{Rel}, vor Laub	MW	10' Intervall	%	Meter Group, Atmos 14	n.v.	DM	34.5	34.3	60.6	34.3	60.6
Luft-F_{Rel}, hinter Laub	MW	10' Intervall	%	Meter Group, Atmos 14	n.v.	DM	37.3	39.6	76.2	37.3	76.2
Luft-F_{Abs}, vor Laub	MW	10' Intervall	g/m^3	Meter Group, Atmos 14	n.v.	DM	10.5	10.2	14.7	9.3	14.7
Luft-F_{Abs}, hinter Laub	MW	10' Intervall	g/m^3	Meter Group, Atmos 14	n.v.	DM	11.6	11.1	17.3	9.0	17.3
Bioshading Coefficient BSC	MW	1	dimensionslos	Errechnet	n.v.	0.1	0.3	0.3	0.1	0.1	0.3
Tagessumme eintreffende kurzwellige Strahlung	SUM	09:00-17:00	kWh	Apogee, SN-500	n.v.	1.8	0.9	1.9	2.7	0.9	3.4
Transmission	MW	10' Intervall	%	Errechnet	n.v.	14.4	25.7	25.1	5.8	5.8	34.5
Reflexion	MW	10' Intervall	%	Apogee, SN-500	n.v.	28.2	14.8	11.0	15.1	6.8	28.2
Absorption*	MW	10' Intervall	%	Errechnet	n.v.	42.6	40.5	36.1	20.9	20.9	52.7
Transpirationsrate	MW	25	$ml/m^2/h$	ADC BioScientific, LCiT	n.v.	25.6	41.1	129.0	169.4	25.6	227.7
Verdunstungsenthalpie	MW	25	W/m^2	Errechnet	n.v.	128.4	206.1	647.2	849.6	128.4	1 141.9
Albedo	MW	1	dimensionslos	Errechnet	n.v.	0.3	0.1	0.1	0.2	0.1	0.3

* Errechnet aus T-R (unterschiedliche Sensoren und Positionen) DM = Dauermessung

Abbildung 52: Kennwertetabelle 1 von 2 aus den Tages-Messkampagnen für Fassadenbegrünung mit Vegetationsparametern und mikroklimatischen Parametern (Tagesmittelwerte) (© IBLB).

Standort					LichtBlau Wagner	LichtBlau Wagner	Privathaus Ternitz	Privathaus Ternitz	BH Korneuburg	BH Korneuburg	Hotel Gilbert	Hotel Gilbert
Datum					02.08.2023	04.09.2024	24.07.2023	19.07.2024	06.09.2023	30.06.2024	13.11.2023	12.08.2024
Parameter	Mess-angabe	Anzahl (n)	Einheit	Messgerät	FB5-bP	FB5-bP	FB6-bP	FB6-bP	FB7-bW	FB7-bW	FB8-m	FB8-m
Kategorie												
Typ/System					bodengeb.	bodengeb.	bodengeb.	bodengeb.	bodengeb.	bodengeb.	modular	modular
Ausrichtung			N/O/S/W		SO	SO	W	W	SW	SW	O	O
Pflanzenauswahl					*Parthenocissus*	*Parthenocissus*	*Parthenocissus*	*Parthenocissus*	*Wisteria*	*Wisteria*	Gräser-Kräuter-Stauden	Gräser-Kräuter-Stauden
Pflanzenvolumen	**MW (SD)**	5	m^3		0.13	0,27 (0,02)	0.20	0,42 (0,06)	0.77	1,52 (0,27)	0.12	0,18 (0,03)
$DG_{proj.}$	**MW (SD)**	5	%		77.8	76,6 (4,8)	97.5	97,2 (1,5)	97.9	94,0 (10,7)	n.v.	n.v
DG_{Ziel}		1	%		n.v.	n.v.	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
WLAI	**MW (SD)**	5	dimensionslos	Meter Group, AccuPAR	3.4	2,9 (0,4)	4.0	4,1 (0,6)	4.4	5,6 (0,7)	2.4	1,8 (0,6)
Blatt-T	**MW (SD)**	25	°C	Meter Group, Atmos 14	28.5	32,9 (2,0)	30.6	33,4 (0,1)	n.v.	35,5 (0,7)	n.v.	n.v
Stom. Leiftähigkeit	**MW (SD)**	25	mmol m^{-2} s^{-1}	Delta-T Devices, AP4	96.0	70,8 (25,8)	51.0	65 (28,5)	n.v.	118,9 (37,9)	n.v.	n.v
Luft-T, vor Laub	**MW**	10' Intervall	°C	Meter Group, Atmos 14	n.v.	26.6	n.v.	31.2	n.v.	26.6	n.v.	n.v
Luft-T, hinter Laub	**MW**	10' Intervall	°C	Meter Group, Atmos 14	n.v.	25.2	n.v.	30.7	n.v.	25.2	n.v.	n.v
Luft-T, Innenraum	**MW**	10' Intervall	°C	Meter Group, Atmos 14	n.v.	25.1	n.v.	25.7	n.v.	24.8	n.v.	n.v
Luft-F_{Rel}, vor Laub	**MW**	10' Intervall	%	Meter Group, Atmos 14	n.v.	36.9	n.v.	38.4	n.v.	36.9	n.v.	n.v
Luft-F_{Rel}, hinter Laub	**MW**	10' Intervall	%	Meter Group, Atmos 14	n.v.	38.5	n.v.	39.8	n.v.	38.5	n.v.	n.v
Luft-F_{Abs}, vor Laub	**MW**	10' Intervall	g/m^3	Meter Group, Atmos 14	n.v.	9.3	n.v.	12.4	n.v.	9.3	n.v.	n.v
Luft-F_{Abs}, hinter Laub	**MW**	10' Intervall	g/m^3	Meter Group, Atmos 14	n.v.	9.0	n.v.	12.6	n.v.	9.0	n.v.	n.v
Bioshading Coefficient BSC	**MW**	1	dimensionslos	Errechnet	n.v.	0.3	n.v.	0.3	n.v.	0.3	n.v.	n.v
Tagessumme eintreffende kurzwellige Strahlung	**SUM**	09:00-17:00	kWh	Apogee, SN-500	n.v.	1.3	n.v.	1.5	n.v.	3.4	n.v.	n.v
Transmission	**MW**	10' Intervall	%	Errechnet	n.v.	33.6	n.v.	34.5	n.v.	24.8	n.v.	n.v
Reflexion	**MW**	10' Intervall	%	Apogee, SN-500	n.v.	19.1	n.v.	6.8	n.v.	21.0	n.v.	n.v
Absorption*	**MW**	10' Intervall	%	Errechnet	n.v.	52.7	n.v.	41.3	n.v.	45.8	n.v.	n.v
Transpirationsrate	**MW**	25	$ml/m^2/h$	ADC BioScientific, LCiT	n.v.	74.0	n.v.	83.8	n.v.	227.7	n.v.	n.v
Verdunstungsenthalpie	**MW**	25	W/m^2	Errechnet	n.v.	368.1	n.v.	420.5	n.v.	1 141.9	n.v.	n.v
Albedo	**MW**	1	dimensionslos	Errechnet	n.v.	0.2	n.v.	0.1	n.v.	0.2	n.v.	n.v

* Errechnet aus T-R (unterschiedliche Sensoren und Positionen) DM = Dauermessung

Abbildung 53: Kennwertetabelle 2 von 2 aus den Tages-Messkampagnen für Fassadenbegrünung mit Vegetationsparametern und mikroklimatischen Parametern (Tagesmittelwerte) (© IBLB).

7.3 Kennwertetabelle Vegetations- und mikroklimatische Parameter aus Tages-Messkampagnen für Dachbegrünungen

Im Zuge der Tages-Messkampagnen der Jahre 2023 und 2024 wurden definierte Vegetationsparameter und mikroklimatische Daten vor Ort ermittelt. Eine detaillierte Übersicht der Kennwerte ist Abbildung 54 und Abbildung 55 zu entnehmen.

Standort					Steinbauer Dev.	Steinbauer Dev.	Steinbauer Dev.	Steinbauer Dev.	HTL St. Pölten	HTL St. Pölten	HTL St. Pölten	HTL St. Pölten	Minimum aller Standorte	Maximum aller Standorte
Datum					23.08.2023	05.07.2024	23.08.2023	05.07.2024	21.09.2023	19.06.2024	21.09.2023	19.06.2024		
Parameter	Mess-angabe	Anzahl (n)	Einheit	Messgerät	DB1-e	DB1-e	DB1-i	DB1-i	DB2-e	DB2-e	DB2-ri	DB2-ri		
Kategorie														
Typ/System					extensiv	extensiv	intensiv	intensiv	extensiv	extensiv	red. Intensiv	red. Intensiv		
Pflanzenauswahl					*Sedum*	*Sedum*	gemischt inkl. Gehölze	gemischt inkl. Gehölze	*Sedum*	*Sedum*	Gräser-Kräuter	Gräser-Kräuter		
Pflanzenvolumen	MW (SD)	5	m³		0.04	0,058 (0,027)	0.26	0,51 (0,33)	0.04	0,14 (0,06)	0.10	0,43 (0,11)	0.0	0.3
$DG_{proj.}$	MW (SD)	5	%		87.4	78,2 (20,9)	96.1	93,5 (8,9)	67.4	95,0 (3,12)	97.2	100,0 (0,0)	43.2	97.2
DG_{Ziel}		1	%		n.v.	87.0	100.0	100.0	99.0	99.0	100.0	100.0	80.0	100.0
LAI	MW (SD)	5	dimensionslos	Meter Group, AccuPAR	0.8	0,2 (0,2)	3.1	3,0 (1,9)	0.5	0,9 (0,5)	2.0	4,5 (1,3)	0.3	3.1
Blatt-T	MW (SD)	25	°C	Meter Group, Atmos 14	n.v.	n.v.	32.2	31,8 (3,3)	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	32.2	32.2
Stom. Leiftähigkeit	MW (SD)	25	mmol m^{-2} s^{-1}	Delta-T Devices, AP4	n.v.	n.v.	245.0	252,4 (175,7)	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	245.0	245.0
Luft-T, vor Laub	MW	10' Intervall	°C	Meter Group, Atmos 14	n.v.	26.6	n.v.	26.6	n.v.	26.2	n.v.	26.6	26.2	29.9
Luft-T, in Laub	MW	10' Intervall	°C	Meter Group, Atmos 14	n.v.	25.3	n.v.	25.3	n.v.	25.2	n.v.	25.2	25.2	32.2
Luft-T, Innenraum	MW	10' Intervall	°C	Meter Group, Atmos 14	n.v.	DM	n.v.	DM	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	27.2	30.7
Luft-F_{Rel}, vor Laub	MW	10' Intervall	%	Meter Group, Atmos 14	n.v.	DM	n.v.	DM	n.v.	36.9	n.v.	36.9	36.9	55.5
Luft-F_{Rel}, in Laub	MW	10' Intervall	%	Meter Group, Atmos 14	n.v.	DM	n.v.	DM	n.v.	38.5	n.v.	38.5	38.5	59.2
Luft-F_{Abs}, vor Laub	MW	10' Intervall	g/m³	Meter Group, Atmos 14	n.v.	DM	n.v.	DM	n.v.	9.1	n.v.	9.1	9.1	16.0
Luft-F_{Abs}, in Laub	MW	10' Intervall	g/m³	Meter Group, Atmos 14	n.v.	DM	n.v.	DM	n.v.	9.0	n.v.	9.0	9.0	16.2
Bioshading Coefficient BSC	MW	1	dimensionslos	Errechnet	n.v.	*0,9	n.v.	0.3	n.v.	0.8	n.v.	0.2	0.2	0.9
Tagessumme eintreffende kurzwellige Strahlung	SUM	09:00-17:00	kWh	Apogee, SN-500	n.v.	5.7	n.v.	5.5	n.v.	6.4	n.v.	6.2	1.6	6.4
Transmission	MW	10' Intervall	%	Errechnet	n.v.	88.7	n.v.	30.0	n.v.	83.2	n.v.	17.5	17.5	100.0
Reflexion	MW	10' Intervall	%	Apogee, SN-500	n.v.	16.9	n.v.	6.9	n.v.	12.1	n.v.	0.8	0.8	19.3
Absorption*	MW	10' Intervall	%	Errechnet	n.v.	n.v.		63.1		4.7		81.7	4.7	81.7
Transpirationsrate	MW	25	ml/m²/h	ADC BioScientific , LCiT	n.v.	n.v.	n.v.	131.3	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	131.3	208.8
Verdunstungsenthalpie	MW	25	W/m²	Errechnet	n.v.	n.v.	n.v.	658.5	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	658.5	1 047.1
Albedo	MW	1	dimensionslos	Errechnet	n.v.	0.2	n.v.	0.1	n.v.	0.1	n.v.	0.0	0.0	0.2

* Errechnet aus T-R (unterschiedliche Sensoren und Positionen) DM = Dauermessung

Abbildung 54: Kennwertetabelle 1 von 2 aus Tages-Messkampagnen für Dachbegrünungen mit Vegetationsparametern und mikroklimatischen Parametern (Tagesmittelwerte) (© IBLB).

Standort					Boku Ilse-Wallentin	Boku Ilse-Wallentin	Klangforum	Klangforum	Die Garten Tulln	Die Garten Tulln	Boku Gregor-Mendl	Boku Gregor-Mendl
Datum					18.07.2023	18.06.2024	02.08.2023	16.07.2024	06.09.2023	29.08.2024	18.07.2023	09.07.2024
Parameter	Mess-angabe	Anzahl (n)	Einheit	Messgerät	DB3-e	DB3-e	DB4-ri	DB4-ri	DB5-e	DB5-e	DB6-e	DB6-e
Kategorie												
Typ/System					extensiv	extensiv	red. Intensiv	red. Intensiv	extensiv	extensiv	extensiv	extensiv
Pflanzenauswahl					*Sedum*	*Sedum*	Gräser-Kräuter	Gräser-Kräuter	*Sedum*-Gräser-Kräuter	Sedum-Gräser-Kräuter	Gräser-Kräuter	Gräser-Kräuter
Pflanzenvolumen	MW (SD)	5	m³		0.03	0,06 (0,03)	0.09	0,21 (0,14)	0.06	0,06 (0,02)	0.24	0,22 (0,14)
$DG_{proj.}$	MW (SD)	5	%		43.2	74,2 (14,11)	82.1	73,4 (32,4)	85.1	65,0 (13,1)	93.4	91,9 (7,7)
DG_{Ziel}		1	%		n.v.	80.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
LAI	MW (SD)	5	dimensionslos	Meter Group, AccuPAR	0.3	0,4 (0,3)	1.9	2,1 (1,7)	1.1	0,5 (0,8)	1.4	1,3 (0,8)
Blatt-T	MW (SD)	25	°C	Meter Group, Atmos 14	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Stom. Leiftähigkeit	MW (SD)	25	mmol m^{-2} s^{-1}	Delta-T Devices, AP4	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Luft-T, vor Laub	MW	10' Intervall	°C	Meter Group, Atmos 14	n.v.	28.0	n.v.	n.v.	n.v.	29.9	n.v.	29.0
Luft-T, in Laub	MW	10' Intervall	°C	Meter Group, Atmos 14	n.v.	30.3	n.v.	30.5	n.v.	32.2	n.v.	28.1
Luft-T, Innenraum	MW	10' Intervall	°C	Meter Group, Atmos 14	n.v.	30.7	n.v.	27.2	n.v.	30.7	n.v.	
Luft-F_{Rel}, vor Laub	MW	10' Intervall	%	Meter Group, Atmos 14	n.v.	48.7	n.v.	47.1	n.v.	51.5	n.v.	55.5
Luft-F_{Rel}, in Laub	MW	10' Intervall	%	Meter Group, Atmos 14	n.v.	47.0	n.v.	45.9	n.v.	46.5	n.v.	59.2
Luft-F_{Abs}, vor Laub	MW	10' Intervall	g/m³	Meter Group, Atmos 14	n.v.	13.3	n.v.	14.1	n.v.	15.6	n.v.	16.0
Luft-F_{Abs}, in Laub	MW	10' Intervall	g/m³	Meter Group, Atmos 14	n.v.	14.5	n.v.	14.3	n.v.	15.9	n.v.	16.2
Bioshading Coefficient BSC	MW	1	dimensionslos	Errechnet	n.v.	*1,0	n.v.	0.5	n.v.	0.9	n.v.	0.7
Tagessumme eintreffende kurzwellige Strahlung	SUM	09:00-17:00	kWh	Apogee, SN-500	n.v.	6.3	n.v.	5.8	n.v.	4.7	n.v.	1.6
Transmission	MW	10' Intervall	%	Errechnet	n.v.	100.0	n.v.	53.8	n.v.	85.2	n.v.	67.0
Reflexion	MW	10' Intervall	%	Apogee, SN-500	n.v.	14.9	n.v.	1.9	n.v.	16.0	n.v.	19.3
Absorption*	MW	10' Intervall	%	Errechnet		n.v.		44.3		n.v.		13.7
Transpirationsrate	MW	25	ml/m²/h	ADC BioScientific, LCiT	n.v.	n.v.	n.v.	208.8	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Verdunstungsenthalpie	MW	25	W/m²	Errechnet	n.v.	n.v.	n.v.	1 047.1	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Albedo	MW	1	dimensionslos	Errechnet	n.v.	0.1	n.v.	0.0	n.v.	0.2	n.v.	0.2

* Errechnet aus T-R (unterschiedliche Sensoren und Positionen) DM = Dauermessung

Abbildung 55: Kennwertetabelle 2 von 2 aus Tages-Messkampagnen für Dachbegrünungen mit Vegetationsparametern und mikroklimatischen Parametern (Tagesmittelwerte) (© IBLB).

7.4 Kennwertetabellen Solarstrahlung und *Bioshading Coeffficient* BSC (Monatsmittelwerte) aus Dauermonitoring

Im Rahmen des kontinuierlichen Monitorings über 24 Monate (2024 und 2025) wurden definierte mikroklimatische Daten an den Dauermessobjekten erhoben. Um die ermittelten Werte insbesondere für die Arbeit von Bauphysiker*innen nutzbar zu machen wurden die Daten als Monatsmittel ausgewertet. Eine übersichtliche Darstellung hierzu ist Abbildung 56 zu entnehmen.

Standort	Amtshaus Margareten	Bürogemeinschaft Kräftner	Kraftwerk Simmering	MA 48	Amtshaus Margareten	Bürogemeinschaft Kräftner	Kraftwerk Simmering	MA 48
Kürzel	FB1-tW	FB2-bP	FB3-m	FB4-w	FB1-tW	FB2-bP	FB3-m	FB4-w
Kategorie								
Typ/System	troggeb.	bodengeb.	modular	wandgeb.	troggeb.	bodengeb.	modular	wandgeb.
Ausrichtung	S-SO	W	O	S	S-SO	W	O	S
Pflanzenart	*Wisteria*	*Parthenocissus*	biodivers	biodivers	*Wisteria*	*Parthenocissus*	biodivers	biodivers
Solarstrahlung [W/m^2]	vor Begrünung | Mittelwert (SD)				hinter Begrünung | Mittelwert (SD)			
Jänner 2024	11,9 (23,0)	n.a.	n.a.	n.a.	3,1 (15,4)	n.a.	n.a.	n.a.
Februar 2024	35,1 (74,8)	n.a.	n.a.	n.a.	20,5 (41,7)	n.a.	n.a.	n.a.
März 2024	64,4 (128,4)	n.a.	n.a.	n.a.	35,5 (81,5)	n.a.	n.a.	n.a.
April 2024	112,3 (185,6)	n.a.	n.a.	171,1 (245,2)	55,9 (102,6)	n.a.	n.a.	31,4 (65,5)
Mai 2024	117,6 (213,4)	n.a.	112,1 (222,7)	191,5 (278,1)	11,1 (18,4)	n.a.	6,7 (9,0)	22,2 (48,4)
Juni 2024	93,9 (169,0)	n.a.	129,9 (229,3)	207,6 (285,3)	11,5 (17,9)	n.a.	4,4 (3,8)	16,7 (32,2)
Juli 2024	148,8 (241,0)	n.a.	130,5 (244,7)	216,8 (294,5)	13,2 (19,2)	n.a.	3,9 (3,5)	10,8 (9,4)
August 2024	138,9 (235,1)	n.a.	119,9 (232,9)	200,7 (275,3)	15,0 (25,3)	n.a.	7,5 (35,3)	9,4 (8,5)
September 2024	70,4 (157,2)	100,1 (139,1)	80,8 (185,7)	136,7 (217,5)	8,5 (18,0)	11,4 (17,0)	20,9 (63,7)	9,1 (14,5)
Oktober 2024	41,8 (100,3)	92,1 (100,0)	46,5 (111,8)	88,0 (152,6)	8,8 (24,8)	9,9 (20,5)	14,6 (50,0)	15,6 (36,0)
November 2024	40,4 (49,0)	54,7 (56,8)	26,1 (66,1)	53,3 (102,4)	20,3 (30,3)	9,4 (21,0)	9,2 (36,5)	17,9 (34,8)
Dezember 2024	8,3 (16,2)	16,9 (39,3)	26,9 (65,2)	41,6 (83,2)	4,2 (1,6)	9,8 (13,9)	10,1 (37,8)	17,3 (35,3)
Jänner 2025	31,5 (75,2)	17,5 (41,0)	21,2 (51,8)	38,5 (83,2)	16,5 (45,3)	12,7 (26,7)	7,1 (23,7)	18,5 (40,4)
Februar 2025	n.a.	38,6 (88,4)	48,0 (102,7)	76,2 (134,6)	n.a.	25,3 (60,9)	16,2 (46,8)	33,7 (63,2)
März 2025	67,9 (139,0)	59,0 (133,5)	79,5 (158,2)	126,6 (198,8)	32,9 (76,2)	32,9 (77,2)	15,2 (43,2)	48,3 (86,9)
April 2025	110,4 (193,3)	67,4 (151,4)	123,8 (222,1)	161,6238,6)	48,2 (93,9)	44,8 (108,6)	11,1 (19,7)	56,6 (107,4)
Mai 2025	106,5 (191,2)	100,8 (198,4)	83,8 (201,2)	174,3 (260,7)	13,0 (23,2)	20,9 (40,7)	5,0 (8,7)	6,6 (9,8)
Juni 2025	133,8 (224,8)	191,0 (284,4)	133,1 (248,1)	273,5 (315,5)	13,1 (18,5)	32,9 (49,7)	3,5 (2,7)	4,1 (2,6)
Juli 2025	110,2 (101,3)	139,3 (229,9)	103,8 (203,1)	179,7 (268,1)	21,9 (22,8)	22,9 (36,9)	2,6 (1,9)	6,4 (6,3)
August 2025	113,6 (202,4)	145,5 (234,3)	109,6 (222,4)	204,2 (276,6)	20,6 (37,8)	21,7 (23,2)	4,6 (6,1)	6,7 (10,4)
September 2025	38,0 (99,7)	83,1 (163,7)	76,1 (176,7)	n.a.	9,7 (22,6)	11,8 (12,7)	2,7 (2,6)	n.a.
Oktober 2025	37,8 (99,1)	38,9 (91,5)	49,1 (119,4)	48,9 (119,2)	8,3 (21,4)	10,2 (23,0)	2,2 (1,3)	2,2 (1,3)
November 2025	14,6 (36,1)	20,9 (52,8)	25,4 (63,8)	n.a.	6,8 (22,2)	11,2 (20,0)	2,0 (1,3)	n.a.
Dezember 2025	6,9 (14,6)	12,7 (30,3)	13,2 (31,7)	n.a.	2,6 (6,0)	8,1 (10,0)	2,1 (1,4)	n.a.

Abbildung 56: Kennwertetabelle Solarstrahlung (Monatsmittel) für Fassadenbegrünungen aus dem Dauermonitoring (© IBLB).

Nachstehend sind die ermittelten Grünverschattungsfaktoren auf monatlicher Basis zwischen Jänner 2024 und Dezember 2025 abgebildet. Diese umfassen sowohl die Dauermessobjekte zu Fassadenbegrünung (Abbildung 57) sowie die HTL St. Pölten bei den Dachbegrünungen (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Das Messobjekt Steinbauer Development GmbH konnte aufgrund von fehlenden Strahlungsdaten im Bereich des Intensivdaches nicht für diesen Vergleich herangezogen werden.

	Amtshaus Margareten	Bürogemeinschaft Kräftner	Kraftwerk Simmering	MA 48	HTL St. Pölten, red.-intensiv
	FB1-tW	FB2-bP	FB3-m	FB4-w	DB2-ri
	troggeb.	bodengeb.	modular	wandgeb.	red.-intensiv
	S-SO	W	O	S	
	Wisteria	*Parthenocissus*	biodivers	biodivers	Gräser
Bioshading Coefficient	**Mittelwert (SD)**				
Jänner 2024	0.24	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Februar 2024	0.32	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
März 2024	0.34	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
April 2024	0.38	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Mai 2024	0.10	n.a.	0.08	0.06	n.a.
Juni 2024	0.13	n.a.	0.05	0.03	n.a.
Juli 2024	0.10	0.17	0.05	0.03	0.38
August 2024	0.12	0.13	0.09	0.06	0.59
September 2024	0.08	0.23	0.30	0.20	0.72
Oktober 2024	0.12	0.39	0.37	0.25	0.46
November 2024	0.21	0.75	0.43	0.29	0.45
Dezember 2024	0.19	0.76	0.23	0.33	0.45
Jänner 2025	n.a.	0.75	0.47	0.32	0.44
Februar 2025	0.27	0.75	0.40	0.32	0.35
März 2025	0.30	0.70	0.25	0.24	0.30
April 2025	0.31	0.69	0.16	0.13	0.21
Mai 2025	0.12	0.23	0.06	0.04	0.11
Juni 2025	0.14	0.18	0.05	0.02	0.13
Juli 2025	0.14	0.16	0.04	0.04	0.11
August 2025	0.19	0.18	0.17	0.15	0.08
September 2025	0.19	0.23	0.28	n.a.	0.17
Oktober 2025	0.15	0.56	0.37	0.05	0.27
November 2025	0.22	0.86	0.48	n.a.	0.36
Dezember 2025	0.11	0.88	0.70	n.a.	0.42

Abbildung 57: Kennwertetabelle *Bioshading Coefficient* (Monatsmittel) für Fassadenbegrünungen und dem Messobjekt Dachbegrünung in St. Pölten aus dem Dauermonitoring (© IBLB).

7.5 Kennwertetabelle Wärmedurchfluss im Substrat und Substratfeuchte (Monatsmittel aus Dauermonitoring) für Dachbegrünungen

Abbildung 58 beinhaltet Wärmedurchflussraten und die Substrattemperatur (jeweils Monatsmittel mit Standardabweichung. Der Wärmedurchfluss wurde unter der Substratschicht an der obersten Abdichtungsebene (Gründächer) oder an der Hinterseite der Wandmodule (Grünfassaden) gemessen.

STANDORT		Steinbauer Development, extensiv	Steinbauer Development, intensiv	HTL St. Pölten, extensiv	HTL St. Pölten, red.-intensiv
KÜRZEL		DB1-e	DB1-i	DB2-e	DB2-ri
	Kategorie				
	Typ/System	extensiv	intensiv	extensiv	red.-intensiv
Monatsmittel Parameter	Vegetation	*Sedum sp.*	Baumbestand	*Sedum sp.*	Gräser
Substrattemperatur [°C]		Mittelwert (SD)			
Jänner 2024		1,6 (2,7)	3,3 (2,5)	-0,8 (2,2)	4,5 (2,0)
Februar 2024		8,5 (1,8)	8,7 (1,4)	5,9 (2,7)	9,9 (1,4)
März 2024		10,8 (2,6)	19,6 (1,9)	9,2 (3,1)	12,2 (1,2)
April 2024		14,4 (5,3)	14,2 (3,4)	20,0 (4,1)	19,4 (1,5)
Mai 2024		19,6 (2,8)	17,6 (1,6)	17,1 (6,1)	17,4 (3,0)
Juni 2024		23,5 (4,7)	20,8 (2,5)	22,4 (4,5)	21,6 (2,3)
Juli 2024		27,6 (4,0)	22,9 (1,7)	25,5 (3,9)	24,1 (1,5)
August 2024		27,4 (4,2)	23,9 (1,7)	24,1 (3,4)	23,8 (1,7)
September 2024		19,2 (7,2)	17,9 (4,3)	17,2 (6,8))	17,8 (5,8)
Oktober 2024		13,0 (1,8)	13,9 (1,1)	11,8 (2,2)	14,3 (0,8)
November 2024		5,7 (2,5)	7,9 (2,2)	3,7 (2,5)	n.a.
Dezember 2024		3,4 (1,7)	5,1 (1,2)	1,2 (1,7)	6,4 (1,5)
Jänner 2025		2,5 (2,6)	3,5 (1,7)	-0,6 (0,7)	4,8 (1,4)
Februar 2025		3,4 (2,2)	3,9 (1,6)	0,8 (2,0)	5,6 (1,4)
März 2025		n.a.	9,1 (2,2)	7,5 (3,6)	5,6 (2,1)
April 2025		n.a.	12,8 (2,6)	14,1 (5,4)	12,4 (3,1)
Mai 2025		n.a.	15,1 (1,5)	16,4 (3,6)	17,2 (1,5)
Juni 2025		n.a.	20,5 (1,5)	23,5 (3,6)	23,1 (2,1)
Juli 2025		n.a.	20,9 (1,6)	22,6 (4,2)	23,8 (2,6)
August 2025		24,6 (5,4)	21,1 (1,7)	21,6 (2,0)	22,6 (2,0)
September 2025		18,5 (3,2)	18,7 (1,8)	17,5 (3,6)	19,1 (2,1)
Oktober 2025		10,9 (2,1)	12,9 (1,2)	9,2 (2,4)	11,7 (1,8)
November 2025		6,1(3,8)	8,7 (3,3)	28,6 (0,7)	25,4 (1,8)
Dezember 2025		4,0 (2,2)	5,5 (1,7)	2,0 (2,1)	6,5 (1,7)

Steinbauer Development, extensiv	Steinbauer Development, intensiv	HTL St. Pölten, extensiv	HTL St. Pölten, red.-intensiv
DB1-e	DB1-i	DB2-e	DB2-ri
			
extensiv	intensiv	extensiv	red.-intensiv
Sedum sp.	Baumbestand	*Sedum sp.*	Gräser
Mittelwert (SD)			
18,9 (6,4)	24,9 (3,7)	18,1 (11,5)	29,0 (0,2)
18,6 (1,1)	24,5 (0,6)	26,6 (0,8)	28,7 (0,2)
16,6 (3,4)	24,1 (1,9)	24,2 (5,1)	28,4 (0,9)
15,1 (5,6)	21,0 (2,4)	9,9 (7,9)	2,6 (2,2)
14,0 (7,7)	9,4 (10,6)	9,7 (7,3)	10,8 (8,1)
26,0 (7,9)	22,7 (2,5)	20,5 (8,5)	20,1 (7,2)
10,6 (6,2)	23,2 (3,5)	7,1 (6,6)	0,1 (0,3)
9,5 (4,9)	18,1 (4,8)	18,7 (8,9)	17,2 (4,6)
24,6 (13,0)	23,4 (3,5)	18,9 (11,0)	20,5 (10,4)
29,1 (2,2)	19,5 (2,1)	26,8 (2,0)	28,2 (0,7)
22,5 (1,2)	17,1 (1,8)	23,1 (1,7)	27,0 (0,2)
28,6 (2,9)	21,6 (2,3)	28,0 (1,3)	28,7 (0,8)
29,9 (0,7)	23,6 (0,5)	26,6 (1,7)	29,3 (0,1)
27,5 (1,0)	22,0 (0,7)	27,0 (1,4)	29,0 (0,2)
n.a.	21,3 (2,8)	26,5 (2,1)	29,1 (0,2)
n.a.	27,2 (0,9)	15,8 (10,2)	27,1 (1,9)
n.a.	23,8 (2,2)	6,6 (4,4)	11,5 (6,2)
n.a.	20,0 (3,6)	4,3 (3,4)	0,8 (0,5)
n.a.	15,7 (3,4)	21,4 (10,3)	20,8 (3,8)
7,7 (6,2)	11,0 (4,2)	20,6 (7,4)	12,9 (6,3)
27,0 (6,4)	11,3 (2,9)	18,2 (10,3)	10,7 (7,1)
26,6 (2,7)	11,4 (2,5)	28,3 (0,6)	15,3 (5,6)
31,3 (2,3)	12,7 (3,0)	3,8 (3,5)	7,2 (2,5)
32,5 (1,1)	22,0 (1,3)	29,3 (0,5)	27,0 (0,2)

Substratfeuchte [%]

Steinbauer Development, extensiv	Steinbauer Development, intensiv	HTL St. Pölten, extensiv	HTL St. Pölten, red.-intensiv
DB1-e	DB1-i	DB2-e	DB2-ri
			
extensiv	intensiv	extensiv	red.-intensiv
Sedum sp.	Baumbestand	*Sedum sp.*	Gräser
Mittelwert (SD)			
-1,1 (1,8)	-1,9 (2,5)	0,7 (2,5)	-7,6 (1,6)
-1,1 (1,7)	1,1 (1,5)	1,3 (2,9)	-4,8 (1,0)
-0,9 (2,7)	0,1 (2,2)	1,8 (4,8)	-3,6 (1,8)
-0,2 (3,4)	-0,1 (4,0)	2,5 (7,3)	-0,4 (0,7)
-0,1 (4,1)	0,9 (1,8)	2,4 (7,1)	-1,1 (1,4)
-0,2 (4,0)	0,7(2,6)	2,6 (7,6)	-0,3 (1,2)
-0,3 (3,6)	-0,6 (2,3)	1,7 (8,4)	-0,1 (0,8)
-1,1 (3,8)	-1,2 (2,2)	0,9 (10,6)	-1,4 (2,2)
-1,4 (3,2)	-2,5 (4,7)	1,1 (6,1)	-2,6 (4,2)
-1,3 (1,8)	-0,8 (1,6)	1,1 (4,3)	-2,8 (0,8)
-1,2 (1,3)	-2,2 (1,3)	0,2 (2,4)	-5,7 (1,0)
-1,3 (1,1)	-1,6 (1,1)	0,5 (1,5)	-6,5 (0,8)
-1,1 (1,4)	-0,7 (1,7)	0,6 (1,2)	-7,0 (1,0)
-1,8 (1,3)	-1,0 (1,5)	1,1 (1,2)	-7,2 (1,0)
-1,4 (2,2)	0,7 (2,2)	1,4 (3,9)	-5,3 (1,6)
-0,6 (2,7)	0,8 (2,7)	2,1 (5,9)	-2,6 (1,6)
-0,1 (3,1)	0,2 (2,19)	1,7 (5,2)	-1,7 (1,1)
-1,1 (4,1)	1,7 (1,8)	2,4 (6,6)	0,6 (1,2)
-1,5 (3,4)	0,1 (1,7)	1,7 (6,0)	-1,1 (2,3)
-1,1 (2,6)	0,8 (2,3)	1,7 (5,2)	-0,3 (1,9)
-2,0 (1,6)	-0,1 (2,0)	1,5 (4,0)	-0,9 (0,8)
-1,1 (0,9)	-0,2 (1,4)	1,3 (2,4)	-3,0(1,0)
-1,6 (1,2)	-1,0 (1,8)	0,9 (1,7)	-4,7 (1,4)
-1,2 (1,1)	-1,2 (1,5)	1,3 (1,0)	-5,5 (0,6)

Wärmedurchfluss [W/m²]

Abbildung 58: Kennwertetabelle Wärmedurchfluss unter Substrat- und Substratfeuchte (Monatsmittel mit Standardabweichungen) für Dachbegrünungen aus dem Dauermonitoring (© IBLB).

7.6 Kennwertetabelle Raumluft- und Oberflächentemperaturen aus Dauermessungen – Fassadenbegrünung

Standort	Amtshaus Margareten	Bürogemeinschaft Kräftner	Kraftwerk Simmering	MA 48	Amtshaus Margareten	Bürogemeinschaft Kräftner	Kraftwerk Simmering	MA 48	Amtshaus Margareten	Bürogemeinschaft Kräftner	Kraftwerk Simmering	MA 48
Kürzel	FB1-tW	FB2-bP	FB3-m	FB4-w	FB1-tW	FB2-bP	FB3-m	FB4-w	FB1-tW	FB2-bP	FB3-m	FB4-w
Kategorie												
Typ/System	troggeb.	bodengeb.	modular	wandgeb.	troggeb.	bodengeb.	modular	wandgeb.	troggeb.	bodengeb.	modular	wandgeb.
Ausrichtung	S-SO	W	O	S	S-SO	W	O	S	S-SO	W	O	S
Pflanzenart	*Wisteria*	*Parthenocissus*	biodivers	biodivers	*Wisteria*	*Parthenocissus*	biodivers	biodivers	*Wisteria*	*Parthenocissus*	biodivers	biodivers
Temperaturen	Raumlufttemperatur | Mittelwert				Oberflächentemperatur Wand innen | Mittelwert				Monatsmittel			
Jänner 2024	23.0	19.6	22.9	20.9	21.0	17.7	19.5	18.5	2.0	1.9	3.4	2.4
Februar 2024	24.2	21.1	22.6	21.6	22.6	19.8	20.1	19.6	1.6	1.4	2.6	2.0
März 2024	24.4	21.9	22.7	22.1	22.9	20.6	20.5	20.4	1.4	1.3	2.2	1.7
April 2024	24.6	21.6	23.1	22.1	23.5	20.7	21.5	20.9	1.1	0.9	1.7	1.3
Mai 2024	23.4	22.2	23.5	22.8	22.5	21.8	22.6	22.0	0.9	0.5	1.0	0.9
Juni 2024	24.9	24.6	25.9	24.3	24.1	24.2	25.0	23.5	0.8	0.4	1.0	0.8
Juli 2024	27.4	27.4	27.9	26.5	26.9	27.2	27.0	25.6	0.5	0.3	0.9	1.0
August 2024	27.7	27.7	28.0	26.7	27.2	27.4	27.3	25.8	0.5	0.2	0.8	0.8
September 2024	25.6	24.6	24.3	24.3	24.8	24.1	23.3	23.3	0.8	0.5	1.0	1.0
Oktober 2024	24.5	22.2	22.5	22.1	23.2	21.1	20.7	20.5	1.2	1.1	1.9	1.6
November 2024	24.1	21.3	22.5	21.7	22.5	19.7	19.6	19.4	1.6	1.6	2.9	2.3
Dezember 2024	23.8	21.2	22.9	21.4	22.0	19.3	19.3	19.1	1.8	1.9	3.6	2.3
Jänner 2025	23.1	21.5	22.8	21.5	21.1	19.4	19.0	18.5	2.0	2.1	3.9	3.1
Februar 2025	24.3	21.9	22.2	21.2	22.4	20.0	18.9	17.8	2.0	1.9	3.3	3.3
März 2025	24.9	21.7	21.3	22.0	23.4	20.8	19.5	20.2	1.4	0.9	1.8	1.8
April 2025	24.8	22.7	22.0	22.4	23.6	21.7	20.7	20.7	1.2	1.0	1.3	1.6
Mai 2025	22.2	22.3	22.1	22.4	21.1	22.1	20.7	20.9	1.1	0.2	1.4	1.5
Juni 2025	25.4	25.5	26.7	24.7	24.7	25.5	25.5	23.6	0.7	-0.1	1.2	1.0
Juli 2025	26.3	25.8	25.1	25.0	25.6	25.8	24.3	23.9	0.7	0.1	0.7	1.1
August 2025	26.1	25.8	26.2	24.6	25.4	25.9	25.2	23.7	0.7	0.0	1.0	0.9
September 2025	24.0	24.7	23.9	24.0	23.1	24.7	23.1	23.2	0.8	0.0	0.8	0.8

Temperaturdifferenz Monatsmittel

Abbildung 59: Kennwertetabelle Raumlufttemperatur sowie Oberflächentemperatur für den Innenraum aus dem Dauermonitoring der Fassadenbegrünungsobjekte (© IBO).

7.7 Kennwertetabelle Raumluft- und Oberflächentemperaturen aus Dauermessungen – Dachbegrünung

Standort	Steinbauer Development, extensiv	HTL St. Pölten, extensiv	HTL St. Pölten, red.-intensiv	Steinbauer Development, extensiv	HTL St. Pölten, extensiv	HTL St. Pölten, red.-intensiv		Steinbauer Development, extensiv	HTL St. Pölten, extensiv	HTL St. Pölten, red.-intensiv
Kürzel	DB1-e	DB2-e	DB2-ri	DB1-e	DB2-e	DB2-ri		DB1-e	DB2-e	DB2-ri
Kategorie										
Typ/System	extensiv	extensiv	red.-intensiv	extensiv	extensiv	red.-intensiv		extensiv	extensiv	red.-intensiv
Ausrichtung										
Pflanzenart	*Sedum sp.*	*Sedum sp.*	Gräser	*Sedum sp.*	*Sedum sp.*	Gräser		*Sedum sp.*	*Sedum sp.*	Gräser
Temperaturen	Raumlufttemperatur | Mittelwert			Oberflächentemperatur Decke innen | Mittelwert			Temperaturdifferenz	Monatsmittel		
Jänner 2024	21.6	23.4	20.7	8.9	21.5	16.4	Jänner 2024	12.7	1.9	4.3
Februar 2024	23.4	23.6	21.5	13.6	22.1	18.2	Februar 2024	9.8	1.5	3.3
März 2024	23.5	23.9	21.6	14.8	22.7	18.9	März 2024	8.7	1.2	2.8
April 2024	24.2	23.6	22.3	17.4	22.7	20.3	April 2024	6.7	0.9	1.9
Mai 2024	25.4	25.2	24.8	20.9	24.7	23.3	Mai 2024	4.5	0.5	1.4
Juni 2024	26.9	26.1	25.8	23.8	25.7	24.4	Juni 2024	3.1	0.3	1.4
Juli 2024	29.3	28.6	26.3	27.2	28.5	25.8	Juli 2024	2.1	0.1	0.5
August 2024	29.5	28.2	27.0	27.5	28.1	26.4	August 2024	2.0	0.1	0.7
September 2024	25.8	24.2	23.3	21.1	24.2	21.7	September 2024	4.7	0.0	1.7
Oktober 2024	23.8	22.6	21.5	16.2	21.6	19.3	Oktober 2024	7.6	1.0	2.1
November 2024	23.3	23.1	21.2	12.4	21.6	18.2	November 2024	11.0	1.5	3.0
Dezember 2024	22.5	22.1	20.4	10.5	20.6	17.1	Dezember 2024	12.0	1.5	3.4
Jänner 2025	22.2	22.3	20.4	9.7	20.4	16.2	Jänner 2025	12.6	1.9	4.2
Februar 2025	23.4	22.3	21.3	11.0	20.5	17.3	Februar 2025	12.4	1.7	4.0
März 2025	23.9	23.5	21.8	14.7	22.2	18.5	März 2025	9.2	1.4	3.3
April 2025	24.4	25.1	23.2	17.4	24.0	20.6	April 2025	7.0	1.1	2.6
Mai 2025	24.1	24.3	22.8	19.1	23.8	21.3	Mai 2025	5.1	0.5	1.5
Juni 2025	27.1	27.1	26.3	24.6	26.7	25.1	Juni 2025	2.5	0.4	1.2
Juli 2025	26.8	28.4	25.2	23.8	28.2	25.1	Juli 2025	3.1	0.2	0.1
August 2025	27.7	26.9	25.5	24.9	26.5	24.7	August 2025	2.8	0.4	0.9
September 2025	25.0	25.3	24.3	21.4	25.0	23.5	September 2025	3.6	0.3	0.8

Abbildung 60: Kennwertetabelle Raumlufttemperatur sowie Oberflächentemperatur für den Innenraum aus dem Dauermonitoring der Dachbegrünungsobjekte (© IBO).

8 Synthese der Ergebnisse aus Dauermonitoring und Messkampagnen

8.1 Analyse und Interpretation der Monitoringdaten

8.1.1 Transmissivität, *Bioshading Coefficien*t BSC und Wechselwirkungen mit Deckungsgrad und Blattflächenindex LAI

8.1.1.1 Fassadenbegrünungen

Die HEDWIG-Messungen bestätigen Beobachtungen aus früheren Projekten wie etwa GLASGrün oder das Vorprojekt am Amtshaus Margareten (Stangl et al. 2025, Blecha et Stangl 2022) zur starken und effizienten Reduktion der solaren Einträge (bis > 90 %), hinter vertikalen Grünkörpern bzw. die geringe Transmissivität (bis < 10 % im Vegetationspeak). Dies wird durch den BSC < 0,2 bis < 0,1 in der Sommersommersaison gespiegelt.

Insbesondere Wisterien entfalten rasch und bereits nach wenigen Standjahren (Stangl et al. 2025) einen dichten Biomassekörper mit hoher projektiver Deckung von annähernd 100 % und gewährleisten damit eine sehr gute Beschattungswirkung (Objekte FB1-bW, FB7-W), unabhängig von trog- oder bodengebundenen Formen. Die projektive Deckung von *Parthenocissus tricuspidata* zeigt sich etwas differenzierter und jedenfalls standortabhängiger. Am bodengebundenen Objekt Ternitz in unversiegelter Umgebung ist die beinahe 100 %ige Deckung auffällig gegenüber den Standorten mit versiegelten Innenhöfen (etwa 75 % bei Objekt FB5-bP und FB2-bP). Dies schlägt sich auch in der Transmissivität bzw. am BSC nieder.

Während *Parthenocissus* früh austreibt und im Mai schon gute Deckung zeigt, jedoch im Herbst der Laubfall früh einsetzt und daher auch die Strahlungsdurchlässigkeit schneller eintritt, entfalten Wisterien verhältnismäßig spät ihr Laubkleid, liefern dafür aber im Herbst noch lange die Leistung zur Verminderung des Strahlungseintrags. Die artspezifischen Unterschiede im Habitus und in den Blattformen äußern sich bei Wisterien mit vielen kleinen, stark überlappenden Blättern und höherem WLAI (5,6-7,1) gegenüber dem *Parthenocissus* durch verhältnismäßig große Einzelblätter aber geringe Blattüberlappungen und entsprechend geringeren WLAI-Mittelwerten (1,9 - 4). Deren Verlust führt damit schneller zu größeren Lücken v.a. im Herbst (z.B. Standort Kräftner [FB2-bP]).

Überraschend hoch sind projektive Deckung und WLAI bei den wandgebundenen modularen Systemen mit Gräser-Kräuter-Staudengesellschaften (MA 48, Simmering) ausgefallen mit 96-99 %

respektive 4 – 6,5 WLAI an Einzelmesspunkten. Entsprechend hoch ist die Reduktion der solaren Einträge hinter dem Laub mit bis zu 95 - 99 % und geringster Transmission bzw. BSC < 0,1. Hier bleibt noch unberücksichtigt, dass keine Messungen hinter den Modulen durchgeführt wurden, welche durch die Komponente des Vegetationsträgers eine Vollverschattung der Fassade und damit höchste Wirksamkeit gewährleisten. Insgesamt zeichnen sich die wandgebundenen Systeme auch durch sehr homogene Pflanzenkörper und -deckung aus.

Dies unterstreicht, dass insbesondere thermisch weniger träge Bestandsgebäude in hohem Maße von der kühlenden Wirkung einer troggebundenen oder wandgebundenen Begrünung profitieren können.

8.1.1.2 Dachbegrünungen

Der *Bioshading Coefficient BSC* (Grünverschattungsfaktor F_{bs}), erarbeitet im GLASGrün-Projekt (Stangl et al. 2025) wurde im Projekt HEDWIG erstmalig auch für eine intensive Dachbegrünung angewendet. Vergleiche mit früheren Beobachtungen stehen hier nicht zur Verfügung. Die Sommersommersaison konnte aufgrund von verspäteter Sensorinstallation nicht zur Gänze abgebildet werden, allenfalls ist der beinahe sprunghafte Anstieg des F_{bs} zwischen Juli und August 2024 (von 0,38 auf 0,59) auffällig. In den Wintermonaten konnte eine weitere Reduktion auf ein Niveau von mindestens 0,44 nachgewiesen werden. Ab Februar 2025 begann der Grünverschattungsfaktor wieder zu sinken, wobei die geringsten Werte im August mit 0,08 ermittelt wurden. Da die Wertebereiche der Sommermonate mit der Vorjahresperiode nicht übereinstimmen, können diese lediglich als Indikatorwerte angesehen werden.

Die saisonübergreifende Inkonsistenz des *Bioshading Coefficient* ist nicht zur Gänze erklärbar. Die zeitlichen Schwankungen hängen am ehesten mit Windbewegungen zusammen, die Äste und beschattende Kronenteile bewegen und daher den Sensor unterschiedlich beschatten. Hier wirkt sich besonders nachteilig aus, dass je Standort nur 1 Messpunkt mit Sensorik ausgestattet werden konnte, weshalb keine Überprüfung von Messpunktabweichungen in der heterogenen, mehrschichtigen Begrünung erfolgen konnte. Die Sensorik war soweit möglich, repräsentativ für das Gesamtbild positioniert (z.B. Gründach intensiv [DB1-i]), also nicht unter Vollschatten, da das Gründach offene Rasenflächen genauso aufweist wie Stauden- und Strauchflächen, ebenso wie mehrschichtige Vegetationstypen mit Kleinbäumen.

8.1.2 Beziehungen zwischen WLAI und Deckungsgrad als potenzielle Vorhersagemodelle

Die Parameter Wand-Blattflächenindex (Wall Leaf Area Index WLAI) und Deckungsgrad *(Plant Coverage PC)* zur Beschreibung von vertikalen Grünsystemen (VGS) sind in internationaler Literatur anerkannt und weit verbreitet. Um den Zusammenhang der beiden Parameter zu verstehen, wird im Folgenden auf die bekannten Dynamiken der jeweiligen Kenngröße in Klimazonen mit 4 Jahreszeiten eingegangen. Genaue Aussagen darüber sind aufgrund mangelnder Studien zu dem Thema schwierig, aber es lassen sich Trends ableiten.

Eine einschlägige Arbeit von Pérez et al. (2022) zeigt aussagekräftig mit vielen Datenpunkten, dass bei VGS (*P. tricuspidata*) im mediterranen Klima, gemessen in allen vier Himmelsrichtungen der Peak der WLAI-Werte in allen Expositionen im Frühsommer (Mai-Juni) liegt. Dieser Effekt wird von den Autor*innen auf danach bereits fortschreitende Blattalterung zurückgeführt. Die groß angelegte Studie von Zhao et al. (2022) verglich Satellitendaten, die den Höchststand in der Vegetationsperiode des mit dem LAI korrelierenden *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) für ganze Ökosysteme der nördlichen Hemisphäre mit Mitte bis Ende Juni gefunden haben.

Auch die Studie von Poiss et al. (2025) sowie der Projektbericht von GLASGrün (Stangl et al. 2025) zeigen eine vergleichbare Dynamik des WLAI im Jahresverlaufs. Im Juli wurden hier bei 4 unterschiedlichen Kletterpflanzenarten Peaks im WLAI gemessen und ein graduelles Abfallen desselben im weiteren Jahresverlauf. Zudem ist auch in beiden Veröffentlichungen erkennbar, dass der Trend des Deckungs-Peaks sich später in der Vegetationsperiode zeigt als der WLAI-Peak. Bei den 4 untersuchten Arten zeigte sich der Höchststand der durch oberirdische Pflanzenteile bedeckte Bereich im August mit abfallender Tendenz ab September. Die Ergebnisse der Deckungsgrad-Analyse von einem direkten VGS in Ostendorf et al. (2025) zeigte ebenfalls Peaks aller untersuchten Arten im August und einen Abfall der Pflanzendeckung danach.

Die im Rahmen von HEDWIG durchgeführten (Spearman) Korrelations- und (lineare) Regressionsanalysen zeigen artspezifische Unterschiede in der Stärke des Zusammenhangs zwischen den untersuchten Parametern WLAI und projektiver Deckung sowie in der Verwendung der Datenzusammensetzung. Die Daten für *W. sinensis* sind variabel, der Datensatz zu *P. tricuspidata* bleibt in jeder Analyse derselbe aufgrund mangelnder Messdaten aus anderen Projekten.

Der Regression ist eine RSME (Root Mean Squared Error), AIC (Akaike Information Criterion) und BIC (Bayesian Information Criterion) Analyse vorangegangen, um den Grad des Fits zu bestimmen. Für *P. tricuspidata* ist die Linearität bestätigt, während für *W. sinensis* lediglich das AIC einen quadratischen Fit als besser einstuft, RSME und BIC allerdings auch eine Linearität bestätigen (Abbildung 61).

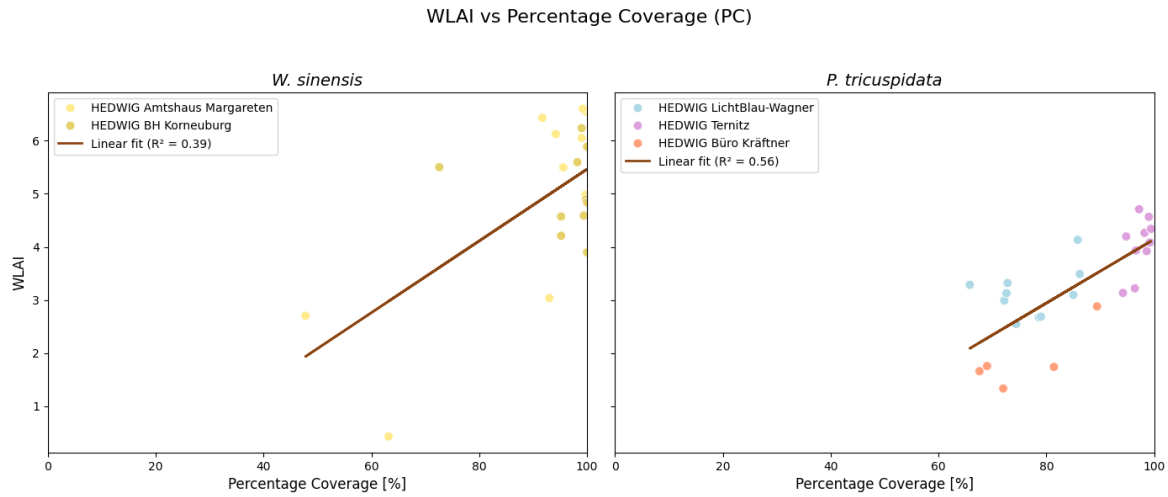


Abbildung 61: Punktwolke und linearer Regressionsfit von WLAI und PC (projektiver Deckung) aus dem Datensatz HEDWIG für *W. sinensis* und *P. tricuspidata* (© IBLB).

Bei ausschließlicher Verwendung der HEDWIG-Daten (Abbildung 62) zeigte *W. sinensis* lediglich einen schwachen und nicht signifikanten Zusammenhang (ρ = 0,229; p = 0,331). Entsprechend fiel auch die lineare Anpassung moderat aus (R^2 = 0,39). Für *P. tricuspidata* ergab sich hingegen unter dieser Datengrundlage ein starker und hochsignifikanter Zusammenhang (ρ = 0,762; p < 0,001) mit einem höheren, aber immer noch schwachen Erklärungsgehalt der Regression (R^2 = 0,56).

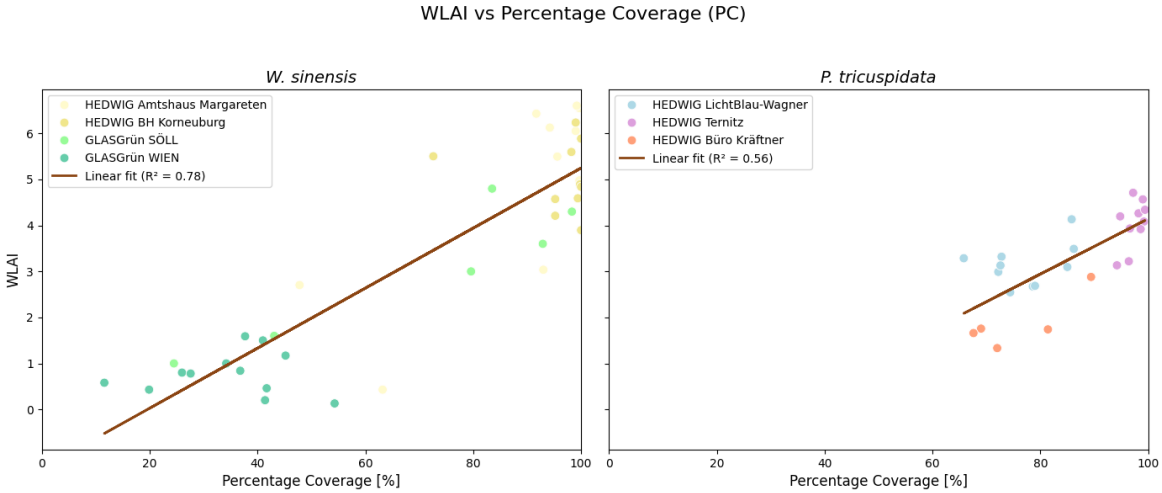


Abbildung 62: Punktwolke und linearer Regressionsfit von WLAI und PC aus dem Datensatz HEDWIG und GLASGrün für *W. sinensis* und *P. tricuspidata* aus HEDWIG (© IBLB).

Durch die Einbeziehung der GLASGrün-Daten verstärkte sich der Zusammenhang für *W. sinensis* deutlich, da GLASGrün im unter Wertebereich (also von jungen Kletterpflanzen) Daten lieferte, während die HEDWIG-Daten vorwiegend von adulten Individuen im höheren Wertebereich zeigen (Abbildung 63). Der Korrelationskoeffizient stieg auf ρ = 0,779 (p < 0,001), begleitet von einem hohen Bestimmtheitsmaß der linearen Regression (R^2 = 0,78).

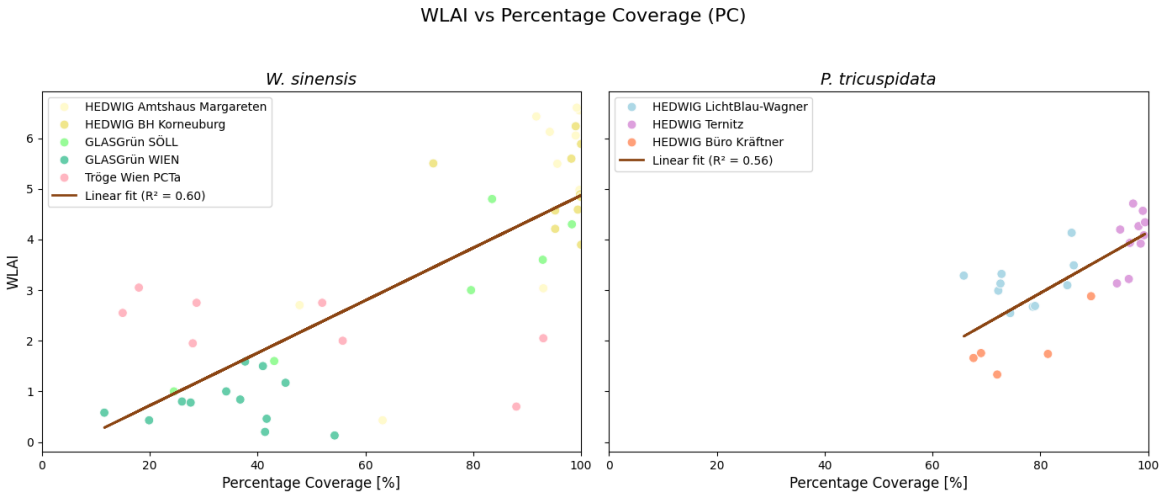


Abbildung 63: Punktwolke und linearer Regressionsfit von WLAI und PC aus dem Datensatz HEDWIG + GLASGrün + TrögeWien (Zieldeckungsgrad PCTa) für *W. sinensis* und *P. tricuspidata* aus HEDWIG (© IBLB).

Wurden zusätzlich die Tröge Wien-Daten (Blecha et al., 2022) auf Basis des Zieldeckungsgrads berücksichtigt (Abbildung 64), blieb der Zusammenhang signifikant. Für *W. sinensis* zeigte sich ein weiterhin starker positiver Zusammenhang (ρ = 0,743; p < 0,001), jedoch mit einem reduzierten Erklärungsgehalt der Regression (R^2 = 0,60).

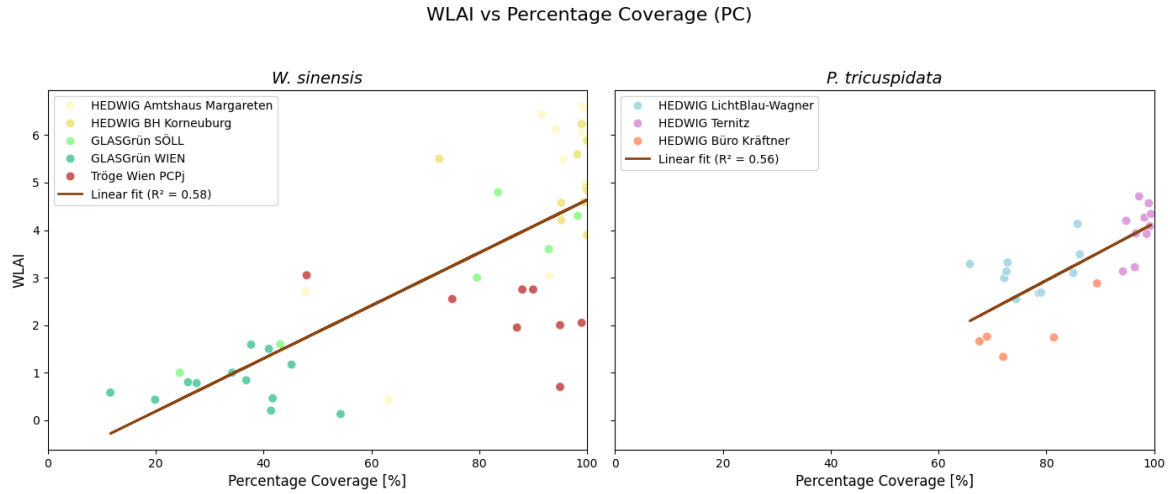


Abbildung 64: Punktwolke und linearer Regressionsfit von WLAI und PC aus dem Datensatz HEDWIG + GLASGrün + TrögeWien (projektiver Deckungsgrad PCPj) für *W. sinensis* und *P. tricuspidata* aus HEDWIG (© IBLB).

Ein vergleichbares Muster ergab sich bei Verwendung der Tröge-Wien -Daten (Blecha et al. 2022) auf Basis des projektiver Deckungsgrads. Der Zusammenhang für *W. sinensis* blieb stark und hochsignifikant (ρ = 0,764; p < 0,001), während das Bestimmtheitsmaß der Regression leicht auf R^2 = 0,58 reduziert wurde.

Diese erweiterte Analyse zeigt, dass mit zunehmender Datenverfügbarkeit das Potenzial für Vorhersagemodelle zwischen Deckungsgrad und LAI gegeben ist und dass tendenziell vom projektiven Deckungsgrad auf LAI geschlossen werden kann. **Wichtig ist, hierbei auf den projektiven Deckungsgrad zurückzugreifen,** da der Deckungsgrad der Zielfläche eine andere Kenngröße darstellt und vom projektiven Deckungsgrad massiv abweichen kann.

Schätzungen des (W)LAI ausgehend vom projektiven Deckungsgrad sind insbesondere deswegen interessant, weil die Erhebung des letzteren verhältnismäßig unaufwändig ist und keine Messinstrumente erfordert, während die Erhebung des (W)LAI zeit- und ressourcenaufwändiger ist. Dies könnte künftig beitragen, Monitoring von Bauwerksbegrünungen zu simplifizieren und einfach anwendbare Erhebungen zulassen. Jedenfalls ist für die verlässliche Modellanwendung die Sammlung weiterer Daten erforderlich und die Schätzgenauigkeit noch zu erhöhen. Insbesondere sind die Datenlücken im mittleren Datenbereich bei *W. sinensis* und im unteren Datenbereich bei *P. tricuspidata* zu füllen. Außerdem sind allometrische Beziehungen zu prüfen, ob sie zu besseren Vorhersagen beitragen.

8.1.3 Stomatäre Leitfähigkeit und Transpiration

Die stomatäre Leitfähigkeit äußerte sich an den Messobjekten mit großen Unterschieden. Die Gräser-Kräuter-Staudengesellschaften der wandgebundenen Systeme zeigten hier deutlich höhere Leistung bis 900 mmol m^{-2} s^{-1} am Objekt [FB4-w], während *an Parthenocissu*s und auch den Wisterien der boden- bzw. troggebundenen Systeme geringe Niveaus < 150 mmol m^{-2} s^{-1} registriert wurden. Die Gehölze am Intensivgründach [DB1-i] hingegen erreichten ebenfalls beachtliche Leitfähigkeiten bis 600 mmol m^{-2} s^{-1}.

Abbildung 65 zeigt die Transpirationsraten errechnet aus den Messwerten von 2024 im Vergleich in l/h/m². Diese wurden ergänzt um Raten, die die Blattfläche bzw. Blattfläche mir projektivem Deckungsgrad der jeweiligen Begrünungen berücksichtigen. Bezugsfläche bleibt zur objektübergreifenden Vergleichbarkeit für alle 1 m². Es zeigen sich interessante Muster. Die Transpirationsraten an Einzelblättern sind vergleichbar für die wandgebundenen Begrünungen [FB3-m, FB4-w] sowie die bodengebundene Wisterie am Standort Korneuburg [FB7-bW], welche mit > 0,2 l /h/m² am stärksten transpirierte. Die 3 *Parthenocissus*-Standorte zeigen vergleichbare Niveaus von etwa 0,1 l/h/m². Die troggebundene Wisterie am Amtshaus Margareten [FB1-tW] wies 2024 die geringsten Raten auf. Jedoch stehen von diesem Objekt auch Messwerte von 2023 zur Verfügung, die bei knapp unter 0,2 l/h/m² lagen. Der große Gap zwischen 2023 und 2024 lässt vermuten, dass die Wisteria bei der Messung 2024 unter akutem Stress gestanden ist. Der Messtag zeichnete sich durch besondere Schwüle aus, sehr wahrscheinlich hat in diesen Tagen die Bewässerungsautomatik nicht funktioniert, wodurch die Pflanzen die Selbstschutzmechanismen sofort aktivieren und die Verdunstung radikal einbremsen.

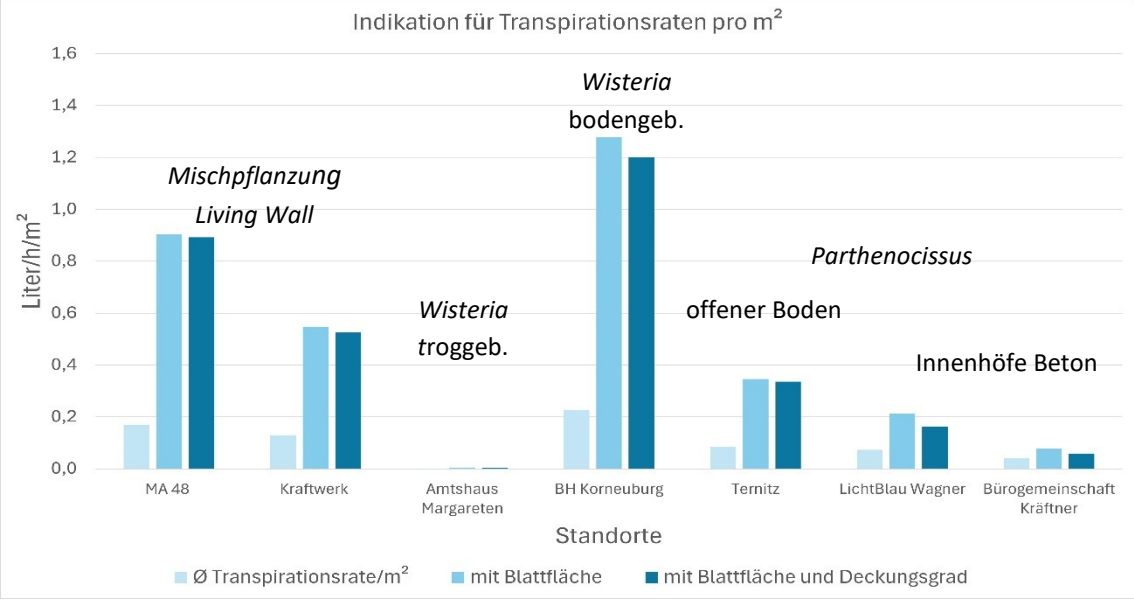


Abbildung 65: Transpirationsraten (2024) für die Fassadenbegrünungen im Vergleich in l/h/m², sowie hochgerechnet mit LAI und projektivem Deckungsgrad am Quadratmenter (© IBLB).

Interessant wird es, wenn bei den Transpirationsraten der (W)LAI, also die Blattflächen je m², mitberücksichtigt wird. Die Gräser-Kräuter-Staudenbegrünungen schaffen es damit auf 0,9 bzw. > 0,5 l/h/m². Ins Auge sticht die bodengebundene Wisterie mit beinahe 1,3 l/h/m², während die troggebundene Wisterie 2024 praktisch keine Transpiration anzeigt. 2023 kam die troggebundene

Wisterie auf 0,6 l/m². Die *Parthenocissus*-Standorte reagieren unterschiedlich: auf unversiegeltem, natürlichem Boden schneidet *Parthenocissus* in Ternitz [FB6-bP] durch den höchsten LAI auch bei der Transpirationsrate am besten ab (> 0,3 l/h/m²), während die Wiener Standorte in den versiegelten Hoflagen sowohl mit der Laubmasse nicht mithalten können als auch bis um 2/3 geringere Transpirationsraten bieten ([FB5-bP], [FB2-bP]).

Wird neben dem LAI auch der Deckungsgrad berücksichtigt, zeigen sich in Abbildung 65 geringere Transpirationsraten. Dies lässt sich dadurch erklären, dass der Deckungsgrad zwar zumeist hoch ist, aber nirgends 100 % beträgt. Dies zeigt, dass WLAI und Deckungsgrad zu berücksichtigen sind, um die Transpirationsraten annähernd realistisch zu erfassen.

In Summe lässt sich ableiten, dass die heterogenen Pflanzenbestände in einer bewässerten wandgebundenen Begrünung hohe Tagestranspiration bis 8 l am Quadratmeter schaffen kann. Übertroffen wird das durch bodengebundene, jedoch nur gut wasserversorgte Wisterien, die bis 10 l pro Quadratmeter und Tag transpirieren können. Ohne Bewässerung auf natürlichem Boden kann *Parthenocissus* etwa 3 l/m² pro Tag verdunsten. Die größten Einschränkungen zeigten sich bei der troggebundenen Wisteria [FB1-tW]. Bei funktionierender Bewässerung ließen sich hier 4-5 l pro Quadratmeter und Tag ableiten. Eine eingeschränkte oder gar unterbrochene Wasserversorgung, damit verbunden Temperaturbelastung auch im Substrat und die gegebene Einschränkung des Wurzelraums im Trog verursachen den Pflanzen Stress, den sie durch Schließung der Stomata und Minimierung der Evapotranspiration ausgleichen.

8.1.4 Luft- und Oberflächentemperatur im Außenraum

8.1.4.1 Effekte bei Fassadenbegrünungen

Für die wandgebundenen Fassadensysteme Simmering [FB3-m] und MA48 [FB4-w] zeichnet sich deutlich ab, dass die flächigen Systeme mit hohen Deckungsgraden eine hoch effiziente Beschattungswirkung ergeben, die sich in der Luft- und Oberflächentemperatur äußern sowie am Infrarotbild klar ablesen lassen. Zusätzlich begünstigend zur dichten Biomasse der Gräser-Kräuter-Staudengesellschaften ergibt sich durch die Substratfeuchte in den Modul- bzw. Wannensystemen durch die automatisch gesteuerte Bewässerungstechnologie. Sie ergibt eine konstante Wasserversorgung, wodurch die Blattkühlung aufrechterhalten werden kann und keine wesentlichen Stressreaktionen und damit verbundene Erhöhungen der Laubtemperatur auftreten (außer im Falle eines Ausfalls der Bewässerungssysteme). Damit bleiben die Blatttemperaturen am Lufttemperaturniveau, und die Oberflächenabstrahlung ist im Vergleich zu inerten Materialien (Verblechungen, Mauerwerke, Fensterrahmen etc.) deutlich reduziert (9 – 16 °C Temperaturdifferenzen am Infrarotbild). Inhomogene Substratfeuchte äußert sich in individuellen Blattreaktionen, die am Infrarotbild durch Temperaturerhöhungen sichtbar werden. Weiters äußert sich die Beschattungs- und Verdunstungswirkung in der reduzierten mittleren Lufttemperatur im bzw. hinter der Laubmasse um 3 °C im Durchschnitt im Betrachtungszeitraum und im Vergleich zur Lufttemperatur vor der Laubmasse.

Diese begünstigenden Situationen sind bei den boden- /troggebundenen Systemen durch verschiedene Faktoren eingeschränkt:

- Nicht alle Systeme sind bewässert, damit tritt temporärer oder punktueller Trockenstress auf. V.a. in der Mittagshitze zeigen sich erhitzte Oberflächen an Einzelblättern, die Trockenstress anzeigen.
- Wärmebelastungen in versiegelten Hofumgebungen [FB2-bP, FB5-bP] sind höher und Stresssymptome treten durch eingeschränkte Wasserverfügbarkeit eher auf als auf natürlichem Boden [FB6-bP] oder in bewässerten Systemen [FB1-tW, FB7-bW].
- Bei hoher bzw. vollständiger Deckung [FB6-bP, FB7-bW, FB5-bP], bleibt die Luft-T hinter dem Laub ganztägig unterhalb des Niveaus vor dem Laub, während bei nur teil-beschatteten Fassaden [FB1-tW, FB2-bP] die Rückstrahlung von der Wandoberfläche zu Temperaturerhöhungen im Luftkörper hinter dem Laub führen kann.
- Dieser Effekt wird verstärkt, wenn hinter dem Laub auch kein nächtlicher Luftaustausch stattfinden kann (etwa durch Bauteile, Auskragungen etc.). Warme Luft hinter der Begrünung tw. gehalten bzw. ergeben sich wechselnde Verhältnisse vor und hinter dem Laub im Tages- und Nachtverlauf. Damit wird transparent, dass unvollständige Deckung der Fassadenflächen ungünstige oder gegenteilige Effekte erzeugt und ein hoher Deckungsgrad der Zielfläche anzustreben und zu erhalten ist.

8.1.4.2 Effekte bei Dachbegrünungen

Bei den Dachbegrünungen zeichnete sich ab, dass Extensivgründächer mit Sedum-Bewuchs einen ungünstigen Temperatureffekt erzeugen und sich die Lufttemperatur an der Substratoberfläche bzw. im niedrigen Laubkörper gleich wie die Substrattemperatur massiv erhöhen kann [DB3-e, DB5-e, DB1-e, DB2-e]. Dies steht im Zusammenhang mit der meist eingeschränkten projektiven Deckung, wodurch sich das Dach- (tw. Ziegel-)substrat stark erhitzt und abstrahlt, aber auch mit der geringen Schichthöhe. Die Substrattemperatur in (reduziert-)intensiven Substratschichten bleib mit geringen Tagesschwankungen etwa bei 25 °C auch an Hitzetagen, während im Extensiv-substrat die Temperatur mit der Lufttemperatur mitgeht und ebenso Tagesmaxima von > 35° C erreicht mit tw. hohen Tagesschwankungen von > 15° C. Besonders ungünstig zeigen sich Durch-hitzung der Substratschicht durch Lücken oder abgestorbene Vegetation, wodurch es auch zu einer hohen Abstrahlung kommt.

An Gründächern mit knöchel- bis kniehohen Vegetationsschichten wurden abweichende Effekte beobachtet. Am extensiven Objekt mit einer artenreicheren Gräser-Kräuterschicht [DB6-e] wurden ganztägig kühlere Temperaturen in der Vegetationsschicht gemessen im Vergleich zur Lufttemperatur. Zuträglich ist hier die Teilverschattung durch Gebäudeteile und damit gering gehaltene Einstrahlung. Bei vollem Sonneneintrag wurde auch beim reduziert-intensiven Gründach ohne Bewässerung mit kniehoher Vegetation [DB4-ri] beobachtet, dass Trockenstress tw. das Temperaturegime stark beeinflusst. Auch Gräser und Kräuter schließen ihre Stomata, ziehen sich zum Selbstschutz zurück, verbraunen und erhitzen dabei deutlich gegenüber frischen und grünen Pflanzenteilen. Damit erhöhen sich sowohl die Lufttemperatur in der Vegetations-schicht, im Substrat als auch die Rückstrahlung am Infrarotbild.

Innerhalb des HEDWIG-Projektes konnten dazu keine eindeutigen und vollkommen nachvollziehbare Muster nachgewiesen werden. Hier besteht konkreter Forschungsbedarf, um die Reaktionen und die Hintergründe zu verstehen.

8.1.5 Reflexion und Absorption

8.1.5.1 Effekte bei Fassadenbegrünungen

Von den Grünfassaden mit guter Deckung wurde keine maßgebliche Erhöhung der emittierenden langwelligen Strahlung (Wärmestrahlung) an die Umgebung festgestellt. Geringfügige Erhöhung tritt dann auf, wenn die Deckung lückig ist (< 80 %] und auch von der Fassadenoberfläche langwellige Strahlung emittiert wird. Dies wiederum kann zu Anstieg der Lufttemperatur in oder hinter der Begrünung beitragen.

Vom Pflanzenkörper wird ein Großteil der gesamten eintreffenden Energie durch kurzwellige Solarstrahlung durch die Transpiration der Pflanzen in Verdunstungskälte und damit in latente Wärme übergeführt. Dieser Prozess trägt maßgeblich dazu bei, dass das Mikroklima der angrenzenden Luftschichten aber auch die Oberflächen(-temperatur) der Fassaden hinter der Vertikalbegrünung reguliert wird, obwohl ein teils hoher Energieeintrag stattfindet.

Bei den Fassadenbegrünungen zeigte sich ein einheitliches und synchrones Muster quer über alle Objektstandorte und Grünfassaden- bzw. Pflanzentypen: im Tagesverlauf erfolgt an heißen Sonnentagen ein hoher Energieeintrag in die Grünkörper sowohl durch kurzwelligen solaren Eintrag (bis etwa 700 W/m², Tagessummen zwischen 0,9 und 3,4 kWh²) als auch durch langwellige Abstrahlung aus der unmittelbaren Umgebung. Hier wurde ein einheitliches Niveau von 300 – 400 W/m² eintreffende langwellige Strahlung im Tagesverlauf beobachtet. Auffällig ist, dass von den Grünkörpern darüber hinaus praktisch keine oder nur geringe langwellige Abstrahlung im Tagesverlauf erfolgte. Die mittleren Reflexionsraten zeigten sich zumeist zwischen 12 und 20 %, die geringste mittlere Reflexion wurde an der *Parthenocissus*-Begrünung am Objekt [FB6-bP] erfasst (7%), die höchste am Wisterien-Objekt [FB1-tW] mit 29% (gemessen im Rahmen der Messkampagnen), welche v.a. durch starke Rückstrahlung von der nicht bedeckten Fassadenfläche geprägt ist. Das ist ausschlaggebend für die Wirkung auf die angrenzende Umgebung und den thermischen Komfort. Berücksichtigt man die geringen Transmissionsraten durch den Grünkörper (während der Laubperiode < 20 %, tw. < 10 %, gemessen im Rahmen des Dauermonitorings und der Messkampagnen), wird die Absorption einfach kalkulierbar. Für die HEDWIG-Grünfassaden ließ sich die errechnete Absorption auf Basis der Messkampagnen ermitteln. Sie liegt zwischen 21 und 53 %

8.1.5.2 Effekte bei Dachbegrünungen

Die Effekte bezüglich Reflexion und Absorption äußern sich auf den HEDWIG-Gründachobjekten anders, wenngleich die meisten Dachobjekte ein beinahe identes Muster ergaben. Die Energieeinträge erreichen am Dach tw. ein sehr hohes Niveau (bis > 1.000, tw. bis 1.200 W/m² im heißen

Sommertagsverlauf, Tagessummen von 1,6 bis 6,4 kWh). Die eintreffende langwellige Strahlung zeigt sich auf einem ähnlichen Niveau wie bei den Fassadenbegrünungen zw. 300 und 400 W/m² im Tagesverlauf. Die ausgehende langwellige Strahlung ist im Vergleich jedoch höher zw. 500 und 600 W/m² [DB1-e, DB2-e, FB5-bP, BOKU DB3-e, DB5-e]. Beim Extensivgründach am Objekt [DB6-e] erfolgte keine höhere langwellige Abstrahlung, was auf die lange Verschattung durch die Hoflage und angrenzenden Gebäude und damit den reduzierten Strahlungseintrag zurückgeführt wird.

Wärmestrahlung wird insbesondere bei Extensivgründächern emittiert, und wenn der Deckungsgrad gering ist. Bei lückiger Pflanzendecke liegt das (Ziegel-)Substrat frei, das sich durch eintreffende kurwellige Strahlung stark erwärmt. Das erhöht die Oberflächentemperatur und die Temperatur in der Luftschicht darüber und in der Begrünung und verursacht entsprechend hohe Ausstrahlung.

Die Netradiometermessungen zur Strahlungsbilanz – genauso wie die Solarstahlungsmessungen unterhalb der Vegetationsschicht unterliegen auf extensiven Sedumdächern mit sehr niedrigen Pflanzenhöhen starken Limitationen. Die Sensoren können nur an der Substratoberfläche positioniert werden, sind aber aufgrund geringer oder lückiger Deckung oder sehr niedrigen Vegetationsschichten meist nicht durch Blattmasse bedeckt. Teilweise überragen sie die Vegetation oder liegen ohnedies frei. Damit war nicht nur die Erhebung des *Bioshading Coefficent* großteils verunmöglicht, sondern auch – in manchen Fällen - die Erfassung der Strahlungskomponenten Transmission, v.a. aber die Reflexion des Vegetationsanteils. Damit entfiel auch die Errechnung der Absorption.

Auf (reduziert-)intensiven Gründächern mit kniehohen Beständen hingegen ergab sich, dass die Sensorhöhe zur Erfassung der emittierenden Strahlung zu nah an der Vegetationsoberfläche lag. Teilweise auffällig und unrealistisch niedrige Reflexionsgrade legen die Vermutung nahe, dass damit die Emissionsstrahlung nicht ausreichend erfasst werden kann vom Sensor. Diese Erkenntnisse ergaben sich jedoch erst bei der Datenauswertung und -analyse. Eine Überprüfung des Sensoreinsatzes und der Sensorhöhen bzw. ihrer Abstände zur Oberkante der Vegetation ist jedenfalls notwendig.

8.1.6 Substratfeuchte und Wärmedurchfluss im Substrat

Extensivgründächer ohne Bewässerung trocknen während Hitzeperioden fast vollständig aus (Substratfeuchte von nur 6 Vol.-%). Damit erwärmt sich das Substrat wesentlich stärker, tw. über das Tagesmaximum hinaus und beeinflusst das Temperaturregime sowie die Strahlungsbilanz auf extensiven Dächern mit eingeschränkten Substratschichten ungünstig. Auffällig ins Auge sticht der hohe Anstieg der Substratfeuchte im Extensivgründach mit geringer Schichthöhe [DB1-e] bis beinahe 60 Vol.-% während des Niederschlagspeaks im Extremereignis vom September 2024. Dies deutet auf ein eingeschränktes Abflussverhalten während des hohen Niederschlagseintrages hin. Im Mittel lag die Sättigung nach dem Regenereignis bei 27 %.

Wassersättigung der Substrate bei intensiven und reduziert-intensiven Varianten tritt bei etwa 30 Vol.-% Substratfeuchte ein. Speziell hoch speicherfähige Substrate und höherer Schichtaufbau können Wasser über mehrere Wochen im Nachgang der Niederschlagsereignisse halten. Dies belegt die hohe Retentionsleistung von Gründachsubstraten und die wichtige Pufferwirkung,

sofern die Aufbauhöhen über die Minimumvarianten (Extensivschichthöhen) hinausgehen. Damit wird nicht nur das Kanalnetz entlastet, sondern das Regenwasser bleibt auch für die Dachvegetation verfügbar und trägt zur Verdunstung bei. Im Herbst konnte sich das Substratwasser weitgehend konstant am Niveau nahe der Sättigung halten.

Der **Wärmedurchfluss** wurde direkt unter dem Substrat an der obersten Abdichtungsfolie gemessen. Bei den Extensivdachsubstraten zeigen sich an Hitzetagen konstante und hohe Wärmestromdichten in beide Richtungen mit homogenen Tagesgängen. Es treten sowohl Wärmeeinträge als auch Wärmeabgaben in der Substratschicht im Tagesverlauf bis beinahe 30 W/m² auf. Der Wärmefluss in der Substratschicht ist im Vergleich zu Blechdächern gering (bis +10 - 20 W/m²]. Abweichungen können an geografischen Unterschieden und damit verbundenen klimatischen Abweichungen liegen. Je höher die Substratschicht ist, umso geringer wird der potenzielle Wärmestrom in Richtung Gebäudehülle. Die Ausstattung mit Dämmung stellt v.a. bei Extensivgründächern einen entscheidenden Faktor für den Wärmefluss im Substrat dar. Sie bildet eine Barriere nach unten.

Auf den Intensivgründächern sind die Tagesamplituden bemerkenswert abgeschwächt mit Wärmestromdichten von bis etwa nur 5 W/m². Dies belegt den hohen Einfluss der Substratstärke auf die Effektivität zur Verminderung des Wärmeein- als auch -austrags. Schichthöhen < 8 cm sind wenig wirksam, lückige Sedumdecken können keinen wesentlichen Beitrag leisten im Vergleich zu höheren Aufbauten. Weiters fehlt die abschirmende Gräser-Kräuterdecke.

Niederschläge sind verbunden mit einem Temperaturabfall und fehlendem solaren Eintrag. In Regenphasen kehrt sich daher der Wärmestrom um und es kommt zu Wärmeabgaben. Außerdem sättigt sich das Substrat mit Wasser, welches kühler ist, der Wärmefluss im Substrat pendelt in dieser Phase ein, die Tagesschwankungen bleiben aus.

8.2 Bewertung der physiologischen Äquivalenztemperatur (PET): eine Näherungsanalyse und ihre Limitationen

Für 2 Dauermessobjekte – MA48 [FB4-w] repräsentativ für Fassadenbegrünungen sowie die Dachbegrünungen [DB1-e und DB1-i] repräsentativ für Dachbegrüngen – wurde eine PET-Analyse durchgeführt. Die Berechnung der PET wurde auf Basis des *Munich Energy Balance Model for Individuals* (MEMI) durchgeführt (Höppe 1999). Diese berücksichtigt die Energiebilanz des menschlichen Körpers und gibt an, welche Lufttemperatur bei Standardbedingungen (Innenraum, leichte Aktivität, bekleidet) zur selben thermischen Belastung führen würde wie die tatsächlichen Außenbedingungen.

Am Standort [FB4-w] (19.06.2024) steigen die PET-Werte im Tagesverlauf bis in die Zeitspanne von 13:00 – 15:00 deutlich an und fallen danach wieder. Die Referenz erreicht ihr Maximum mit 61,5°C um 13:00, die Grünfassade „vorne“ mit 66,0 °C um 14:00. Berechnet mit Messdaten hinter der Begrünung liegen die Spitzen um 15:00 bei 58,5°C (Referenz) bzw. 65,2°C (Grünfassade). Innerhalb desselben Standorts ist „hinter der Vegetation“ vom Morgen bis in den frühen Nachmittag im Mittel um etwa 3°C kühler als „vor der Begrünung“. Um 15:00 kehrt sich dieses Muster kurzzeitig um, wobei „hinter der Begrünung“ um etwa 6 – 7 °C höher liegt. Vergleicht man Referenz mit der

begrünten Fassade, so zeigt die Grünfassaden-Position gegenüber der Referenz ab dem späten Vormittag meist höhere PET-Werte: „vorne“ im Mittel um rund +4,7 °C, „hinter“ ebenfalls 4,7 °C mit einzelnen Ausschlägen bis etwa + 14 °C am späten Nachmittag. Nur am frühen Morgen (09:00–10:00) ist die Grünfassaden-Position geringfügig kühler. Hinter der Begrünung ist. die Windgeschwindigkeit um einiges geringer und somit der Luftaustausch deutlich eingeschränkt, welche maßgebliche Rollen in der Berechnung des thermischen Komforts darstellen.

Am Gründach Steinbauer (Abbildung 66) zeigt der Tagesgang der PET am 05.07.2024 einen Anstieg bis zum frühen Nachmittag und anschließend einen Rückgang für beide untersuchten Dachvarianten. Die höchsten Werte treten um 14:00 auf: Intensivdach = 56,7°C, Extensivdach = 54,9°C. Über den gesamten Tag liegt das Extensivdach jedoch meist höher. Betrachtet man die Differenz $\Delta PET = PET_{EX} - PET_{INT}$, ergibt sich im Mittel ein Plus von etwa +4,9°C zugunsten des Intensivdachs. Besonders deutlich ist der Abstand am späten Nachmittag (15:00 – 17:00), mit einem Maximum von +11,7°C um 17:00. Eine kurze Gegenphase zeigt sich um 14:00, als das Intensivdach um rund 1,9°C höher liegt. Insgesamt weist das Intensivdach die geringere thermische Belastung auf und kühlt insbesondere nach 15:00 schneller ab.

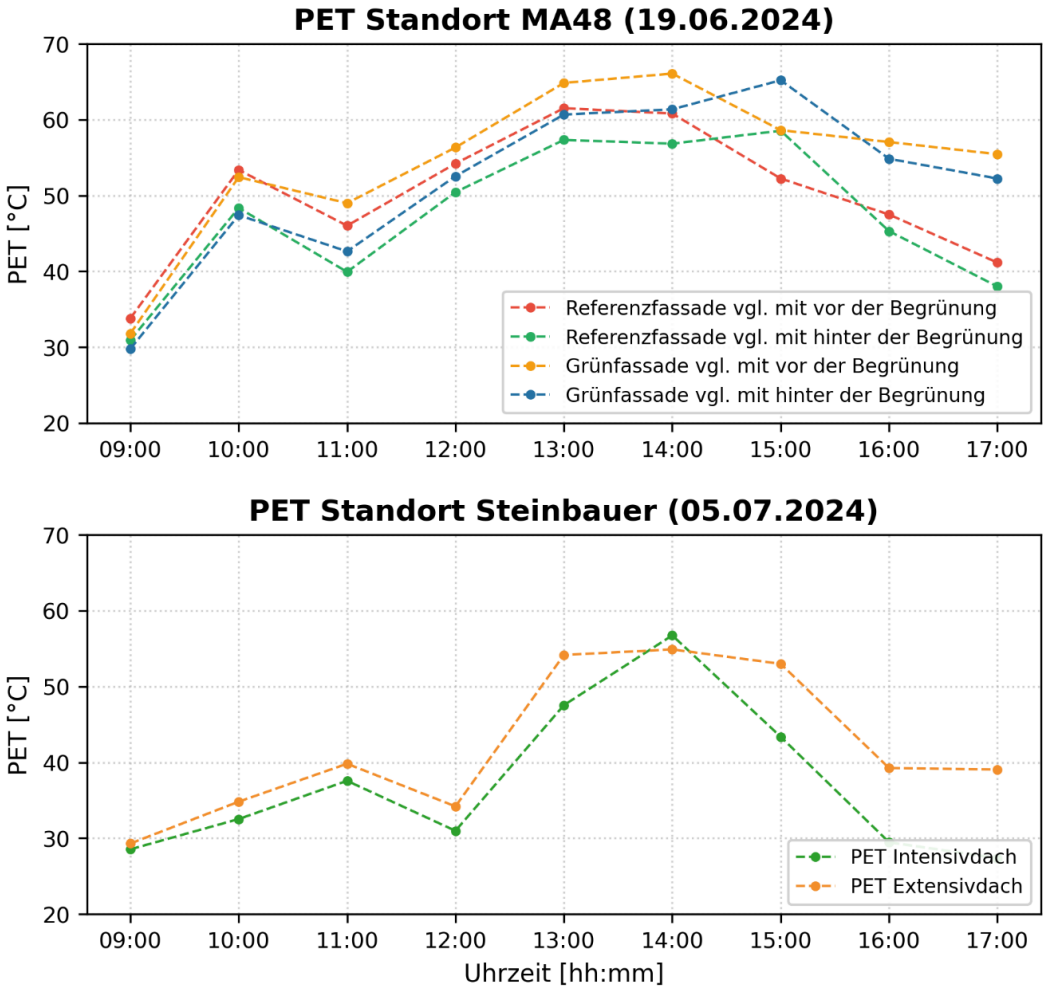


Abbildung 66: Tagesgänge der physiologisch äquivalenten Temperatur (PET) an zwei Standorten. Oben: MA48 [FB4-w] am 19.06.2024 mit Referenzfassade und Grünfassade, jeweils „vor“ und „hinter“ der Begrünung; Unten: Steinbauer am 05.07.2024 mit Intensiv- und Extensivdach [DB1-e, DB1-i] (© IBO).

Zusammengefasst deutet die Dachanalyse auf eine merklich geringere thermische Belastung beim Intensivdach hin, besonders am Nachmittag. An der Fassade überlagern Unterschiede in Lage und Besonnung die Effekte; ein konsistentes Kühlungssignal der Begrünung lässt sich aus diesen PET-Schätzwerten allein nicht ableiten. In Abbildung 66 sind die Tagesgänge der physiologisch äquivalenten Temperatur (PET) an den untersuchten Fassaden- und Dachbegrünungsobjekten ersichtlich.

Im Folgenden werden die Werte der PET mit der Zuordnung aus Tabelle 16 zur thermischen Wahrnehmung und Belastungsgrad nach Matzarakis et Mayer 1996 verglichen. Am Gründach-Standort Steinbauer liegen die PET-Werte am 05.07.2024 morgens noch im Bereich „leicht warm" bis „warm". Das Intensivdach startet um 09:00 mit 28,5°C („leicht warm"), erreicht gegen 11:00 kurz „heiß" (rund 37,6°C), fällt um 12:00 wieder auf „warm" zurück und liegt ab 13:00 durchgehend in „sehr heiß" mit einem Maximum von 56,7°C um 14:00. Ab 16:00 sinkt die Einstufung wieder auf „warm" (ca. 29,5°C) und um 17:00 auf „leicht warm". Das Extensivdach zeigt insgesamt eine höhere und länger anhaltende Belastung: 09:00–12:00 „warm" bis „heiß" (Spitze 39,8°C um 11:00), 13:00 – 15:00 „sehr heiß" und selbst um 16:00 – 17:00 noch „heiß" mit etwa 39°C. Damit weist das Intensivdach die geringere und schneller abklingende Wärmebelastung auf.

Am Standort MA48 (19.06.2024) beginnen alle vier Zeitreihen um 09:00 im Bereich „warm" (etwa 30 – 34°C). Bereits ab 10:00 dominiert jedoch „sehr heiß": Referenz- und Grünfassaden überschreiten meist deutlich 41 °C und erreichen zwischen 13:00 und 15:00 Spitzen bis rund 66°C. „Heiß" statt „sehr heiß" tritt nur vereinzelt auf, etwa an der Referenz „hinten" um 11:00 (ca. 40°C) und um 17:00 (ca. 38°C). Insgesamt zeigt sich damit an der Fassade überwiegend eine extreme Wärmebelastung. Unterschiede zwischen den Positionen betreffen vor allem das Niveau innerhalb der höchsten Belastungsklassen.

Tabelle 16: Zuordnung der Bereiche der physiologischen Äquivalenztemperatur (PET) nach thermischer Wahrnehmung und Belastungsgrad nach Matzarakis et Mayer 1996).

PET (°C)	Thermische Wahrnehmung	Grad der physiologischen Belastung
< 4	Sehr kalt	Extreme Kältebelastung
4 – 8	Kalt	Starke Kältebelastung
8 – 13	Kühl	Mäßige Kältebelastung
13 – 18	Leicht kühl	Geringe Kältebelastung
18 – 23	Behaglich	Keine thermische Belastung
23 – 29	Leicht warm	Geringe Wärmebelastung
29 – 35	Warm	Mäßige Wärmebelastung
35 – 41	Heiß	Starke Wärmebelastung
> 41	Sehr heiß	Extreme Wärmebelastung

Die Methodik der hier vorliegenden Näherung an eine PET-Bewertung unterliegt mehreren Limitationen. Die Strahlungstemperatur T_{mrt} ist für eine robuste Bewertung laut ÖNORM ISO 7726:2023 (Austrian Standards International 2023) mittels Black Globe Sensor (Strahlungser-

hebung in 6 Richtungen) zu erheben. Im vorliegenden Fall standen Daten aus Net-Radiometer-messungen (Strahlungsmessungen in 2 Richtungen aus den Messkampagnen) zur Verfügung. Die T_{mrt} Werte wurden mit der Software Rayman (Matzarakis 2007, 2010) überprüft und für plausibel befunden.

Weiters erfolgt die Erfassung der PET standardmäßig auf Höhe 1,1 m über Bodenniveau. Die Standardsensorhöhe konnte im Rahmen der HEDWIG-Messungen nicht eingehalten werden, da die Messensoren einheitlich für alle Fassadenobjekte auf Höhe 1,5 m montiert waren. Weitere Limitationen ergeben sich durch Sensorausfälle am Standort Steinbauer. Hier wurden fehlende Winddaten aus der Messstation vor Ort mit Daten der GeoSphere Station Innere Stadt substituiert. Beim Standort [FB1-tW] weichen die erhobenen Parameter in der Messhöhe ab von der in der ÖNORM ISO 7726:2023 (Austrian Standards International 2023) definierten Höhe von 0,1 – 1,7 m. Die Winddaten wurden den Messinstrumenten jeweils vor und hinter der Begrünung (siehe Kap. 5.1.1.2) entnommen, wobei die Strahlungsdaten bei der Messkampagne auf 1,5 bzw. 3 m Höhe erhoben wurden. Daraus ergeben sich Inkonsistenzen bei den Inputdaten und die Ergebnisreihen am Standort MA48. Durch die fehlende räumliche Konsistenz der Messungen an diesem Standort werden die Ergebnisse daher nur als eine grobe Annäherung an die tatsächliche PET eingestuft. Für eine robuste Bewertung sind künftig jedenfalls Messungen mit Black Globe Sensoren anzustreben, die auch lt. ÖNORM EN ISO 7726:2023 für Erhebungen der relevanten Parameter für den thermischen Komfort zu verwenden sind. Diese nehmen als standardisierter schwarzer Körper Einstrahlung und Abstrahlung der umliegenden Flächen auf und erzeugen ein realistisches Bild der thermischen Wahrnehmung. Räumlich sollen diese Messungen konsistent sein mit Erhebungen der Windgeschwindigkeit und Lufttemperatur (z.B. genannte Sensortechnik am selben Stativ installiert.)

8.3 Thermische Behaglichkeit Innenraum

Die zusammenfassende Auswertung der Untersuchungsobjekte im Sommer 2024 (Abbildung 67) verdeutlicht, dass die thermische Performanz von Begrünungssystemen maßgeblich von der Art des Begrünungssystems (Fassade oder Dach und Intensität des Aufbaus) sowie der baulichen Qualität und thermischen Kopplung der Gebäudehülle beeinflusst wird. Die Fassadenbegrünungen am Amtshaus Margareten [FB1-bW], dem Kraftwerk Simmering [FB3-m], der MA 48 [FB4-w], Büro Kräftner [FB2-bP] und das Gründachobjekt in St. Pölten [DB2-ri] mit reduziert-intensiver Dachbe-grünung zeigten nach ÖNORM EN 16798-1 (Austrian Standards International 2024) ein bemerkenswertes Ergebnis. Diese Standorte konnten hohe adaptive Komfortwerte erzielen, wobei [FB1-bW] mit 650 Stunden in Kategorie I die höchste Leistung aufwies.

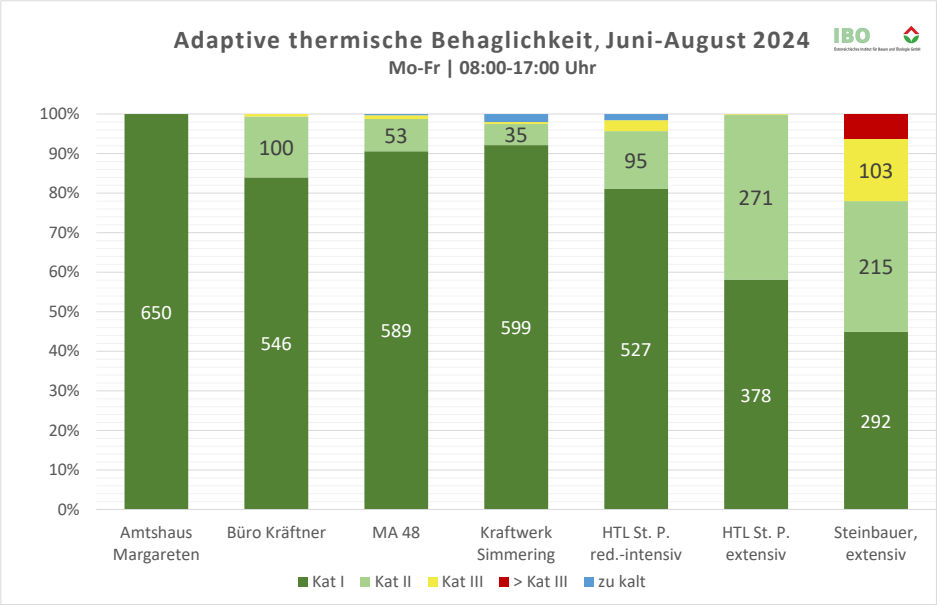


Abbildung 67: Adaptive thermische Behaglichkeit nach ÖNORM EN 16798-1, alle Dauermessstandorte (FB1-tW, FB2-bP, FB3-m, FB4-w, DB1-e, DB1-i, DB2-e, DB2-ri) (© IBO).

Dass die Bewertung der Performanz jedoch stark von der gewählten Methodik abhängt, offenbart die Gegenüberstellung des adaptiven Modells und des statischen Modells nach Leusden und Freymark (1951). Während das adaptive Modell die physiologische Anpassungsfähigkeit positiv bewertet, führen die starren Temperaturgrenzen und die Berücksichtigung der Luftfeuchtigkeit bei Freymark zu kritischeren Ergebnissen. Besonders das Extensivgründach Steinbauer [DB1-e] markiert hier einen Extrempunkt, da der Wohnraum mit 565 Stunden außerhalb der Behaglichkeitsgrenzen verbleibt (Abbildung 68).

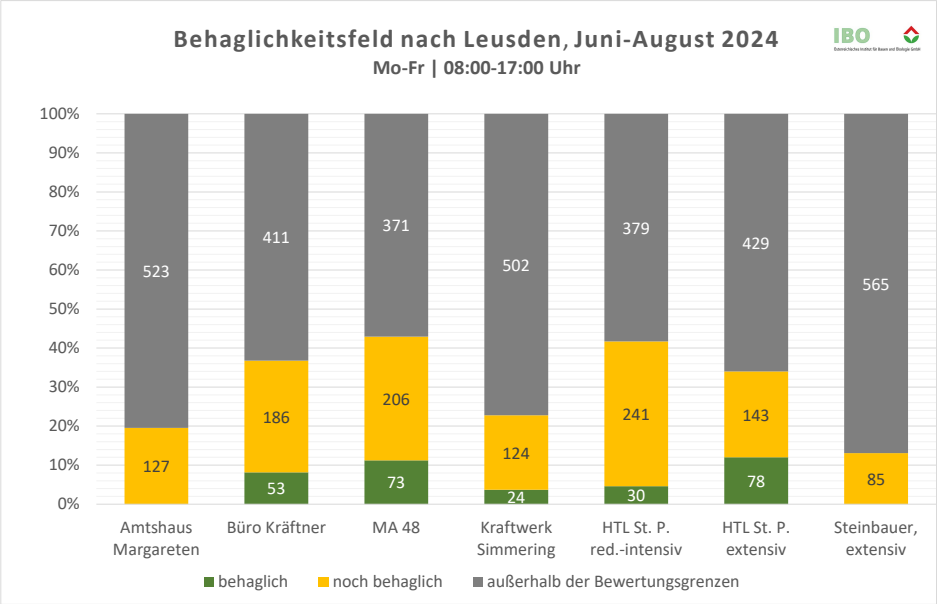


Abbildung 68: Thermische Behaglichkeit nach Freymark und Leusden (1951), alle Dauermessstandorte (© IBO).

Unabhängig von den theoretischen Komfortmodellen offenbaren die Messdaten die hohe thermische Belastung an den weniger effizienten Standorten. In sämtlichen untersuchten Räumen lagen während der üblichen Büroarbeitszeiten im Sommer 2024 mindestens 75 % der gemessenen Stundenmittelwerte über der Marke von 25 °C. Diese Bedingungen zeigten bei den Übertemperaturstunden eine Spreizung zwischen 484 Stunden am stabilsten Standort MA48 [FB4-w] und 632 Stunden am Standort Extensivgründach Steinbauer [DB1-e] mit der höchsten Belastung. Auch die Intensität dieser Überschreitungen wies eine erhebliche Bandbreite bei den Gradstunden (Summe aus der Anzahl der Stunden und der jeweiligen Grad-Differenz zum Grenzwert 25°C) auf, die von 739 Kh bei [FB4-w9] am Gürtel bis zu 2.345 Kh beim Objekt [DB1-e] reichte. Während die Maximaltemperaturen (Stundenmittelwerte) bei [FB4-m] auf 28,2 °C begrenzt blieben, wurden beim Objekt [DB1-e] Spitzenwerte von 32,8 °C dokumentiert.

8.4 Thermische Gebäudesimulation für ausgewählte, repräsentative Räume

Das nachstehende Kapitel beschäftigt sich näher mit den Ergebnissen der thermischen Gebäudesimulation der Untersuchungsobjekten Amtshaus Margareten (FB1-tW) und HTL St. Pölten, reduziert-intensiv (DB2-ri).

8.4.1 Fassadenbegrünung am Beispiel Amtshaus Margareten

Die Untersuchung am Amtshaus Margareten [FB1-tW] verdeutlicht das Potenzial troggebundener Fassadenbegrünungen zur Minderung sommerlicher Kühllasten. Von vier potenziellen Untersuchungsobjekten bot das Amtshaus Margareten die wissenschaftlich belastbarsten Rahmenbedingungen für eine isolierte Betrachtung der bauphysikalischen Effekte. Ein entscheidender Vorteil lag im Leerstand des Raumes während des Messzeitraums. Durch das Fehlen interner Lasten (Personen, Geräte) und die konsequente Schließung des außenliegenden Sonnenschutzes konnten thermische Störfaktoren, die üblicherweise die Kausalität von Begrünungseffekten verzerren, minimiert werden. Zudem stellte das Objekt eine ideale Konfiguration für eine kostengünstige, einfach umsetzbare Lösung dar, da die Pflanztröge auf dem Gehsteig platziert sind und die Verschattungswirkung direkt im darüberliegenden Stockwerk analysiert werden konnte.

Während eine herkömmliche, unverschattete Fassade im Sommer Temperaturen von über 50 °C erreichen kann und somit als belastende Strahlungsquelle fungiert, kehren Begrünungssysteme diesen Effekt um. Durch die Verschattung der opaken Bauteile sowie die Evapotranspiration der Pflanzen und des Substrats kann die Bauteiloberflächentemperatur sogar unter dem Niveau der Umgebungslufttemperatur gehalten werden (fassadengebundene Systeme). Die Modellierung der Begrünung erfolgte dabei über eine gezielte Erhöhung des solaren Reflexionsgrades sowie eine rechnerische Anpassung der Himmelstemperatur, um die Verschattung und den unterbundenen Strahlungsaustausch zu substituieren. Da die Fassadenbegrünung kein wintergrünes Laub trägt, konzentrierte sich die Analyse ausschließlich auf die sommerliche Kühlperiode.

Im Zuge der Untersuchung ergab sich die Fragestellung, wie die massive Bauweise des Bestands die Wirksamkeit der Begrünung beeinflusst, um daraus Ableitungen für Objekte mit unter-

schiedlichen Wandstärken treffen zu können. Die Ergebnisse der Parameterstudie belegen hierbei eine starke Abhängigkeit von der thermischen Trägheit des Bauteils. Es zeigt sich, dass nur die Verschattung massiver Wandteile allein keine signifikante Senkung der Gesamtkühllast bewirkt, da im Vergleich dazu die solaren Einträge über bspw. unverschattete Fensterflächen die energetischen Einsparungen an den opaken Wandteilen massiv dominieren. Eine effektive Strategie zur Klimawandelanpassung sollte daher die Vegetation zwingend als Vorverschattung für Glasflächen integrieren. Die gezielte Vorverschattung durch Laubmasse stellt hierbei den maßgeblichen Lösungsansatz dar, um solare Lasten bereits vor der transparenten Gebäudehülle zu minimieren. Dies kann über eine definierte Kletterhilfenstruktur sowie ein darauf abgestimmtes Pflegemanagement (Stangl et al. 2025, Poiss et al. 2025) gezielt gesteuert und optimiert werden.

8.4.2 Dachbegrünung am Beispiel HTL St. Pölten

Die Analyse der Messergebnisse und die anschließende Modellierung der reduziert-intensiven Dachbegrünung [DB2-ri] verdeutlichen die Schwierigkeit, die thermische Wirksamkeit grüner Infrastruktur im bewohnten Bestand isoliert zu bewerten. Von den drei dauerhaft überwachten Dachsystemen am Standort der HTL St. Pölten wurde dieses System ausgewählt, da die ungedämmte Betonrippendecke (Baujahr 1979) die höchste theoretische Sensitivität gegenüber den Außenbedingungen aufweist. Es zeigt sich jedoch deutlich, dass die physikalische Kühlleistung – bestehend aus Evapotranspiration und Verschattung – in modernen, gedämmten Systemen weitgehend vom Innenraum entkoppelt wird, während sie beim vorliegenden ungedämmten Dach die Strahlungssenkenwirkung am effektivsten ausnutzt.

Ein Bias von 0,84 K zwischen Raum- und Deckenoberflächentemperatur belegt zwar, dass die Dachbegrünung das Temperaturniveau der Konstruktion niedrig hält, doch die Kausalität dieses Effekts ist nicht eindeutig nachweisbar. Da die Messungen im realen Schulbetrieb stattfanden, überlagern signifikante Störfaktoren die Daten. Unterschiedliches Nutzer*innenverhalten, wie die manuelle Fensterlüftung zur Nachtauskühlung oder die Verwendung des Sonnenschutzes an der Ostfassade, beeinflussen das Raumklima potenziell stärker als der Wärmestrom durch das Dach. Zudem erschweren schwankende innere Lasten und der Betrieb der Heizkörper eine präzise Trennung zwischen der bauteilspezifischen Kühlleistung und raumklimatischen Einflüssen.

Ein wesentlicher methodischer Vorteil der vorliegenden Untersuchung ist jedoch der Ort der Datenerhebung. Die Sensoren wurden innerhalb der abgehängten Zwischendecke installiert. Da die Deckenoberflächentemperatur somit im Deckenhohlraum und nicht direkt im genutzten Raum erfasst wurde, sind die Messwerte weitgehend von direkten raumseitigen Störungen wie Zugluft oder unmittelbarer Strahlungswärme interner Quellen entkoppelt. Diese „ungestörte“ Messung erlaubt eine präzisere Validierung der thermischen Dynamik der Betonkonstruktion, auch wenn die Rückkopplung auf die tatsächliche Raumlufttemperatur durch die Abhängung wiederum gedämpft wird.

Die thermische Wirkung der Vegetation wurde im Simulationsmodell über den solaren Reflexionsgrad (ρ) als Ersatzparameter abgebildet. Dieser substituiert die physikalischen Effekte der Verschattung durch Biomasse sowie die Kühlung durch Evapotranspiration. Die Stärke dieses Ansatzes liegt in der effizienten Integration in Standard-Simulationen und einer hohen Prognosegüte für sommerliche Temperaturlastspitzen.

Die statistische Validierung mit einem Albedowert von 0,8 bestätigt dies für den Hochsommer (August: RMSE 0,65 K). Limitationen zeigen sich jedoch in der Übergangszeit (Juni: RMSE 2,21 K; NMBE 8,43 %), da der statische Parameter weder die phänologische Variabilität der Vegetation noch die hygrothermische Dynamik des Substratfeuchtehaushalts dynamisch abbilden kann.

Die Einsparung von ca. 4,8 kWh/m² an Kühlenergie im Sommer steht einem Heizwärmebedarf von rd. 30 kWh/m² im Winter gegenüber. Ohne zusätzliche Dämmschicht fungiert das Substrat in der Heizperiode als thermische Brücke, was den sommerlichen Gewinn überwiegt.

Für zukünftige Untersuchungen ist festzuhalten, dass eine zweifelsfreie Quantifizierung der Begrünungseffekte eine detaillierte messtechnische Erfassung der Heizkörperlaufzeiten, der Lüftungszyklen und der inneren Lasten erfordert. Die temperaturbasierte Validierung im geschützten Deckenhohlraum stellt zwar eine wissenschaftlich belastbare Grundlage für die Bauteilmodellierung dar, die Übertragbarkeit auf die energetische Gesamtbilanz des Raumes bleibt jedoch ohne Kenntnis der nutzer*innenabhängigen Variablen eingeschränkt. Eine robuste Modellierung sollte künftig von statischen Ersatzparametern abrücken und zeitabhängige Stoffwerte für die Substratfeuchte oder dem *Bioshading Coefficient i*mplementieren.

9 Reflexion zur Wirkungsabschätzung und zu relevanten Messwerten bzw. Kennwerten

9.1 Wirkungen im Außenraum

9.1.1 Lufttemperatur im Außenraum

Zahlreiche Arbeiten belegen, dass Vegetationskörper (Baumkronen, Vertikalbegrünungen u.a.) die Erwärmung der Luftschicht hinter oder unter der Laubmasse aufgrund des Schattenwurfs und der Verdunstungskühlung verhindern (Jalits et Stangl 2026, Fensterseifer et al. 2022, Thomsit-Ireland et al. 2020, Stangl et al. 2019,). Wie bereits in GLASGrün (Stangl et al. 2025) zeigte sich auch bei manchen HEDWIG-Fassaden-Standorten, dass die Lufttemperatur hinter dem Laubkörper auch erhöht sein kann. Während dieses Phänomen bei modularen oder wannengebunden Systemen nicht auftritt (verminderte Luft-T im /hinter dem Laubkörper um 0,5 – 1,4 °C (Tagesmittelwerte aus Tagesmesskampagnen) bzw. absolute Reduktion während einer Hitzewelle um 0,2 – 5,6 °C), kann sich bei boden-/troggebundenen Systemen teilweise die Luft-T hinter dem Laubkörper um 0,1 - 0,3 °C (Tagesmittelwerte bzw. 0,4 °C Hitzeperiodenmittelwerte; maximale absolute T-Erhöhungen von bis zu 4,6 °C, wobei diese im Mittel über die gesamte Hitzewelle hinweg bei 1,1 °C liegen) erhöhen.

Erwärmung der Luftschichten hinter dem Pflanzenkörper ergibt sich in erster Linie durch unzureichende Deckung der Zielfläche (DG_{Ziel}) und damit verbundener starker Ausstrahlung der nicht beschatteten Fassadenbereiche (z.B. Amtshaus Margareten [FB1-tW]), oder bei eingeschränktem projektiven Deckungsgrad (DG_{proj}) bei weitgehend vollständiger Zieldeckung (FB2-bP). Weiters kann dies etwa durch Verhinderung des Luftaustauschs aufgrund der Behinderung der nächtlichen Abstrahlung durch den Laubkörper (FB1-tW, FB2-bP) oder auskragende Gebäudeteile (GLASGrün-Standort Söll, Stangl et al. 2025) begünstigt werden.

Bei den Objekten mit bodengebundener Begrünung mit *Parthenocissus tricuspidata* (Selbstkletterer mittels Haftwurzeln) zeigten sich sowohl erhöhte als auch verminderte Lufttemperaturen hinter dem Grünkörper, tw. mit wechselnden Peaks im Tages-/Nachtverlauf bei FB2-bP. Die volle Deckung (98%) am Objekt Privathaus Ternitz [FB6-bP], der doppelt so hohe WLAI von 4 und die doppelt so hohe Tiefe des Laubkörpers bzw. Pflanzenvolumen (0,4 m³) gewährleisten hier eine vollständige Beschattung der Fassadenmauer trotz ungehinderter Sonneneinstrahlung auf die betroffene Gebäudeseite. Am Objekt Lichtblau-Wagner [FB5-bP] sind Deckungsgrad, LAI und Pflanzenvolumen nur etwas höher als am Objekt Kräftner FB2-bP (75% | 2 | 0,2 m³), jedoch mildert eine Teilbeschattung durch gegenüberliegende Gebäude die Sonneneinstrahlung in

Sensorhöhe ab, entsprechend geringer ist die Aufheizung der Fassadenteilflächen und die Rückstrahlung.

Die Datenvalidierung der HEDWIG-Klimastationen mit den Stationen der Geosphere Austria brachten interessante und eindeutige Erkenntnisse sowohl für die Gründachstandorte Wien als auch St. Pölten: Es gibt demnach geringfügige mikroklimatische Unterschiede aufgrund der geografischen Lage zwischen den HEDWIG-Gründachstationen und den Vergleichsstationen am Graudach. Die Unterschiede sind jedoch größer am selben Standort zwischen Extensiv-, Intensivgründach und unbegrüntem Referenzdach.

Das Extensivgründach heizt sich stärker auf (1 – 3 °C), das Intensivdach bleibt moderater temperiert – bzw. im Vergleich am kühlsten – und die Geosphere-Stationen (Graudächer) sind insgesamt im verdichteten Umfeld am trockensten (Differenzen rel. Luft-F bis zu 15 %). Die Intensivgründächer sind am feuchtesten. Die Spearman-Korrelationen der Tagesmittelwerte bestätigen dennoch eine hohe Synchronität der zeitlichen Verläufe. Zusammengefasst bedeutet das, dass sich die Wirkungen intensiver Gründächer auf den Außenraum am günstigsten zeigen.

Auch die hier durchgeführte PET-Näherungsanalyse deutet zusammengefasst auf eine merklich geringere thermische Belastung beim Intensivdach hin, besonders am Nachmittag. Das Extensivdach zeigt insgesamt eine höhere und länger anhaltende Belastung: „warm“ bis „heiß“ am Vormittag, „sehr heiß“ am frühen Nachmittag und selbst um 16:00 – 17:00 noch „heiß“ mit etwa 39°C. Damit weist das Intensivdach die geringere und schneller abklingende Wärmebelastung auf.

Die Limitationen der Näherungsanalyse durch nicht normgerechte Sensorhöhen erlauben für die Grünfassade keine klaren Aussagen. Hier sind jedenfalls Messungen mit Black Globe Sensoren nach aktuellen Standards erforderlich, sodass robuste Daten zur Analyse thermischer Belastungsgrade und Wahrnehmung vorliegen.

9.1.2 Blatttemperatur, Oberflächentemperatur und Reflexion

Die Temperatur an der vitalen und grünen Vegetation ist im Vergleich zum Dachbsubstrat an der Oberfläche niedriger, wie es z.B. am Objekt Klangforum [DB4-ri] deutlich wurde. Blatttemperaturen liegen in etwa in der Höhe der Lufttemperatur (Gräf et al. 2021). Die Blatttemperatur erhöht sich jedoch, wenn die Pflanze in Trockenstress gerät, da die Pflanze die Stomata schließt und die Transpiration reduziert oder gestoppt wird. Diese physiologischen Reaktionen sind auch deutlich im Infrarotwärmebild zu erkennen, wie etwa bei den Objekten Steinbauer, extensiv [DB1-e] und Garten Tulln [DB8-e]. Bei letzterem wurde insbesondere transparent, dass die Erwärmung abgestorbener Pflanzenteile gegenüber lebenden Pflanzen 40 °C und darüber beträgt und damit ähnlich hoch ist, wie unbedeckter Kies oder Dachsubstrat. Das führt zu einer massiven Rückstrahlung, die als Energie wieder an die Umgebung abgegeben wird. Gleichzeitig erhöht sich auch die Lufttemperatur in der Vegetationsschicht, wenn die Pflanzendecke lückig ist, da sich das Ziegelsubstrat stark erwärmt und diese Wärme an die darüber liegende Luftschicht abgibt Klangforum [DB4-ri], [DB8-e].

Besonders eindrucksvoll am Infrarotwärmebild des Objekts [DB8-e] ist der Kontrast zwischen den weißen Blüten und den grünen Blättern der extensiven Kräuterpflanzen. Diese zeigen im Bild Temperaturdifferenzen von > 35 °C, wodurch der Effekt der Albedo deutlich sichtbar ist.

Insgesamt ist erkennbar, dass auch an den Extensivgründächern die Pflanzen eine wichtige Rolle spielen zur Abminderung der Ausstrahlung, jedoch sich die Wirkung erst bei reduziert-intensivem Pflanzenbestand bzw. im intensiven Gründach voll entfalten kann. Das ist ein deutlicher Hinweis dafür, dass Biodiversitätsgründächer oder reduziert-intensive Gründächer mit einem kräftigen Gräser-Kräuter oder Staudenbestand gegenüber Sedum-Dächern mit geringer Deckung vorzuziehen sind.

9.2 Wirkungen im Innenraum

9.2.1 Oberflächentemperaturen im Innenraum

Für das Verständnis dieser Werte ist ein wichtiger methodischer Aspekt entscheidend, da in der vorliegenden Auswertung primär die Raumlufttemperatur herangezogen wurde. Für das tatsächliche Wohlbefinden des Menschen ist jedoch die operative Temperatur maßgeblich, welche eine gewichtete Mischung aus der messbaren Raumlufttemperatur und der Wärmestrahlung darstellt, die von den umliegenden Wandoberflächen ausgeht.

Ein wesentlicher Vorteil im Sommer ergibt sich aus der Strahlungskühlung. Da die begrünten Außenwände durch die Pflanzen verschattet und gekühlt werden, sind ihre inneren Oberflächen konsequent kühler als die gemessene Raumlufttemperatur. In Räumen mit einem hohen Anteil an solchen begrünten Flächen wirken diese wie eine natürliche Wandkühlung. Selbst wenn die Raumlufttemperatur bei beispielsweise 26° Celsius liegt, fühlen sich diese Räume durch die kühlen Wände deutlich angenehmer an. Je niedriger die Oberflächentemperatur der begrünten Wand im Verhältnis zur Raumlufttemperatur ist, desto höher ist der gefühlte Komfort, da der menschliche Körper weniger Wärmestrahlung von den Flächen empfängt. Dies ist ein positiver Effekt, den eine reine Betrachtung der Raumlufttemperatur gar nicht in vollem Umfang abbilden kann. Die physikalische Grundlage für diese Beobachtungen bildet die saisonale Dynamik der Temperaturdifferenz zwischen Raumlufttemperatur und raumseitiger Oberfläche, die im Folgenden als Bias angeführt wird.

Begrünungen offenbaren jedoch eine energetische Schwachstelle in der kalten Jahreszeit, da das Grün im Winter eine fehlende Wärmedämmung der massiven Bauteile nicht ersetzen kann (bei Dächern noch eher). Bei vielen der untersuchten Bestandsgebäude führen ungedämmte Außenwände/Decken dazu, dass die inneren Oberflächen im Winter stark auskühlen. Dies führt zu einem gegenteiligen Effekt zum Sommer, der als Strahlungskälte bezeichnet wird. Selbst wenn die Heizung die Raumlufttemperatur auf einen theoretisch angenehmen Wert erwärmt, kann sich der Raum ungemütlich anfühlen, weil die kalten Wandoberflächen dem Körper Wärme entziehen.

9.2.1.1 Oberflächentemperaturen Innenraum bei Grünfassaden-Objekten

Im Sommer 2024 wurden an den wandgebundenen Standorten [FB3-m] und [FB4-w] eine systematische Abweichung der Innenwandoberflächentemperatur zur Raumlufttemperatur von

rund 0,85 K festgestellt, gefolgt von [FB1-tW] mit 0,6 K und [FB2-bP] mit 0,3 K. Das bedeutet, dass die Innenraumoberflächentemperatur mit begrünten Außenwänden in allen untersuchten Räumen konsequent kühler war als die gemessene Raumlufttemperatur. Die niedrigste mittlere Innenraumtemperatur wurde bei MA48 [FB4-w] mit 25,8 °C gemessen. Das Kraftwerk Simmering [FB3-m] wies mit 27,3 °C hinter den modularen Grünelementen den höchsten Mittelwert auf, während das Amtshaus Margareten [FB1-tW] und die Bürogemeinschaft Kräftner [FB2-bP] beide bei rund 26,6 °C lagen (trog- bzw. bodengebunden).

Kritisch muss berücksichtigt werden, dass neben der Dämmung die generelle Bauweise sowie die gewählten Materialstärken eine entscheidende Rolle für das thermische Verhalten spielen. Die massiven Mauerwerke der Altbauten [FB1-tW] und [FB2-bP] verfügen über eine deutlich höhere thermische Speicherfähigkeit als die vergleichsweisen dünnen Wände jüngerer Gebäude-generationen von [FB3-m] oder [FB4-w] (siehe Folgekapitel). Ebenso hat die Art des Begrünungs–systems einen wesentlichen Einfluss auf die Messergebnisse, da bewässerte wandgebundene Systeme durch die aktive Verdunstungskühlung eine andere thermische Dynamik aufweisen als boden- oder troggebundene Varianten.

Zudem erhöhen die niedrigen Innenraumoberflächentemperaturen die Transmissionswärme-verluste durch das Bauteil nach außen. Beispielsweise wurden in den Objekten [FB1-tW] und [FB2-bP] im Winter ein Bias von rund 1,7 K ermittelt, gefolgt von [FB4-w] mit 2,3 K und [FB3-m] mit 2,7 K.

9.2.1.2 Oberflächentemperaturen Innnenraum bei Gründach-Objekten

Bei den Dachbegrünungen zeigten sich signifikante Unterschiede zwischen der reduziert-intensiven und der extensiven Variante in St. Pölten [DB2-e] und [DB2-ri], was sich in einem Bias von 0,84 K bzw. 0,22 K widerspiegelte. Die mittlere Raumlufttemperatur betrug im Raum des reduziert-intensiven Dachs 26,4 °C, während sie unter dem extensiven Dach bei 27,6 °C lag. Das extensiv begrünte Objekt [DB1-e] in Wien wies mit 2,38 K die höchste Abweichung auf. Dieser Wert resultiert daraus, dass Dachraum und Wohnraum durch die gedämmte Zwischendecke und den Dachraum thermisch nahezu vollkommen entkoppelt sind. Die mittlere Raumlufttemperatur im darunterliegenden Raum betrug 28,6 °C.

Bei den Dachsystemen wird die thermische Trägheit maßgeblich von der Substratart und der Schichtdicke bestimmt. Ein intensivierter Aufbau mit einer höheren Substratschüttung fungiert hierbei als wesentlich effektiverer thermischer Puffer als eine dünne extensive Begrünung im Leichtbau.

Bei den Dachsystemen in St. Pölten [DB2-e] und [DB2-ri] wurden für die extensive Variante (gedämmt) 1,7 K und für die reduziert-intensive Variante 3,7 K ermittelt. Das Objekt Steinbauer in Wien wies mit einem Bias von 11,3 K den höchsten Wert auf. Auch hier ergibt sich ein wesentlicher Vorteil im Sommer aus der Strahlungskühlung, da die begrünten Außenwände durch die Pflanzen verschattet und gekühlt werden

9.2.2 Thermische Gebäudesimulation Grünfassaden: Speichermassen

Im Zuge der Untersuchung ergab sich die Fragestellung, wie die massive Bauweise des Bestands die Wirksamkeit der troggebundenen Begrünung [FB1-tW] beeinflusst, um damit auch Objekte mit geringeren Wandstärken einschätzen zu können. Die Ergebnisse der Parameterstudie belegen eine starke Abhängigkeit von der thermischen Trägheit. Um die Effekte vergleichbar zu machen, wurden die Simulationsergebnisse auf die betroffenen Flächeneinheiten (14,4 m^2 opake Wandfläche und 9,6 m^2 Fensterfläche) normiert. Folgende Erkenntnisse wurden daraus gewonnen:

- Spezifische Einsparung (opake helle Wand, Reflexionsgrad 50 %): Bei der massiven 80-cm-Wand reduziert die Begrünung den Kühlbedarf lediglich um 2,6 bis 6,4 kWh/m² Wand. Bei der thermisch sensibleren 25-cm-Wand steigt dieser Wert deutlich auf 10,9 bis 16,3 kWh/m² Wand an.
- Dominanz der Fensterflächen: Die Gegenüberstellung mit den solaren Einträgen über die Fenster verdeutlicht die Notwendigkeit eines ganzheitlichen Konzepts. Ein unverschattetes Fenster verursacht je nach Verglasung (g-Wert 0,55 bzw. 0,76) eine Kühllast von 116 bis 173 kWh/m².

Die vorliegenden Ergebnisse verdeutlichen, dass die solaren Gewinne über die Fensterflächen die energetischen Einsparungen an den opaken Wandteilen um ein Vielfaches übersteigen. Daraus leitet sich ab, dass eine effektive Strategie zur Klimawandelanpassung die Vegetation zwingend als Vorverschattung für Glasflächen integrieren muss, da die troggebundene Begrünung durch die Verschattung der massiven Wand allein keine signifikante Senkung der Gesamtkühllast bewirkt. Eine gezielte Vorverschattung durch Laubmasse – gesteuert über die Struktur der Kletterhilfen und ein darauf abgestimmtes Pflegemanagement (Stangl et al. 2025, Poiss et al. 2025) – stellen hierbei einen maßgeblichen Lösungsansatz dar, um solare Einträge bereits vor der transparenten Gebäudehülle zu minimieren.

Bei wandgebundenen Systemen spielt die Evapotranspiration eine größere Rolle, da die Verdunstungsfläche aus Substrat und Pflanzen über die gesamte Fassade verteilt ist. Durch die Bewässerung entsteht eine aktive Kühlzone direkt vor der thermischen Hülle, deren Effizienz maßgeblich vom Material des Vegetationsträgers und der Hinterlüftung abhängt. Messdaten am Objekt der Wiener MA 48 indizieren diesen Effekt, wobei auch die schlanke Wandstärke des Bestandsgebäudes eine entscheidende Rolle spielt. Da hier weniger thermische Speichermasse vorhanden ist, wirkt die Verdunstungskälte direkter auf den Innenraum, was den sommerlichen Wärmeschutz spürbar verbessert. Allerdings führt die Unterkonstruktion zu vermehrten Wärmebrücken an den Verankerungspunkten, während der höhere Wasserbedarf und die komplexe Technik den Ressourcenverbrauch als auch die Investitions- und Wartungskosten steigern. Die Performanz dieses Begrünungssystems wird im 2025 gestarteten Projekt „**GreenFDT** Green Fassade Digital Twin“ (BMIMI 2025) weiter erforscht.

9.2.3 Thermische Gebäudesimulation Gründach: Ersatzparameter

Die thermische Wirkung der Vegetation wurde im Simulationsmodell über den solaren Reflexionsgrad (ρ) als Ersatzparameter abgebildet. Dieser substituiert die physikalischen Effekte der Verschattung durch Biomasse sowie die Kühlung durch Evapotranspiration. Die Stärke dieses

Ansatzes liegt in der effizienten Integration in Standard-Simulationen und einer hohen Prognosegüte für sommerliche Temperaturlastspitzen.

Die statistische Validierung mit einem Albedo-Wert von 0,8 bestätigt dies für den Hochsommer (August: RMSE 0,65 K). Limitationen zeigen sich jedoch in der Übergangszeit (Juni: RMSE 2,21 K; NMBE 8,43 %), da der statische Parameter weder die phänologische Variabilität der Vegetation noch die hygrothermische Dynamik des Substratfeuchtehaushalts dynamisch abbilden kann.

Die Einsparung von ca. 4,8 kWh/m² an Kühlenergie im Sommer steht einem zusätzlichen Heizwärmebedarf von rd. 30 kWh/m² im Winter gegenüber. Ohne zusätzliche Dämmschicht fungiert das Substrat in der Heizperiode als thermische Brücke, was den sommerlichen Gewinn überwiegt.

9.3 Conclusio zum Stakeholder-Feedback (Workshop mit Stakeholder*innen und Expert*innen und Feedbackschleifen zur Wirkungsabschätzung und Kennwerten)

Zusammenfassend wurden im Rahmen des Projektes HEDWIG 2 Veranstaltungen abgehalten sowie auch an der MARGRET Fachdiskussion teilgenommen, die sich mit der Mess- und Berechenbarkeit von Gebäudebegrünung und der Übertragbarkeit in die Praxis auseinandersetzten. Das FFG-Projekt MARGRET beschäftigte sich mit der *„Messtechnischen Erfassung begrünter/nicht begrünter Objekte zur Adaptierungen von Berechnungsmodellen“* mit Fokus auf juvenilen Strukturen an einer Fassadenprüfbox (Bintinger et al. unveröffentlicht). Es bietet wichtige und wertvolle Ergänzungen zu den Erkenntnissen aus HEDWIG. Eine Übersicht der Workshop-Themen ist in Abbildung 69 dargestellt.

Teilnahme an der MARGRET **Fachdiskussion** „Bauwerksbegrünung im Energieausweis“ am 26.11.2024	• Messkonzept in Vorbereitung auf den Energieausweis • Anpassung der Berechnungsformeln • ÖNORMEN und Regelwerke
Kooperativer HEDWIG und MARGRET **Workshop** und Fachdiskussion „Bauwerksbegrünung messbar machen“ am 03.07.2025	• Anwendbarkeit der abgeleiteten Kennwerte in z.B. Energieausweisberechnung / Gebäudesimulation • Nachweise des Nutzens von Bauwerksbegrünung gegenüber Behörden, Planer*innen, Auftraggeber*innen • „Aha-Momente“ der Teilnehmer*innen

Kooperative HEDWIG und MARGRET **Ergebnispräsentation** „Bauwerksbegrünung messbar machen“ am 19.09.2025	• Wirkungsabschätzung durch abgeleitete Kennwerte • Gegenüberstellung von Begrünungsarten • Einfluss der pflanzenphysiologischen Parameter • Anwendungsbereiche der generierten Daten

Abbildung 69: Übersicht der Veranstaltungen für konstruktiven Fachaustausch im Rahmen des Forschungsprojektes HEDWIG.

Durch den fachlichen Austausch und die gezielten Fragestellungen konnte der konkrete Bedarf zur künftigen Erhebung und Weiterentwicklung von relevanten Kennwerten für die Einbindung in den Energieausweis und in Gebäudesimulationen identifiziert werden. Die Überprüfung der abgeleiteten und berechneten Kennwerte sowie der dafür verwendeten Methoden ermöglichte wertvolles, konstruktives Feedback zur Optimierung.

Die Forschungsprojekte konnten durch den Austausch mit Stakeholder*innen und Fachexpert*innen einen bedeutenden Schritt in Richtung Praxisanwendbarkeit der generierten Kennwerte machen. Die erhobenen Daten und abgeleiteten Kennwerte sowie die Ergebnisse zur messbaren und berechenbaren Wirkung von Gebäudebegrünung werden von GRÜNSTATTGRAU weiterhin genutzt. Ziel ist es, die Aufnahme in relevante ÖNORMEN zu fördern sowie die Implementierung in Energieausweisberechnungen und Gebäudesimulationen voranzutreiben. Darüber hinaus wird angestrebt, die Gebäudebegrünung in Gesetzestexte zu integrieren, um die Umsetzung und Verbreitung entsprechender Bauwerksbegrünungsmaßnahmen zu unterstützen.

10 Empfehlungen für einfach anwendbare, standardisierte Prüfverfahren und Kennwerteerhebung

10.1 Empfehlungen für ein praxistaugliches Monitoring und Messkampagnen im Außenraum

Im vorliegenden HEDWIG-Report wurden Messaufbau, -sensorik, -ablauf, Datenmanagement und Datenauswertung im Detail dokumentiert (Kapitel 5 Methodik und Arbeitsanleitung). Die Dokumentation zielte darauf ab, Messdatenerhebungen in einer weitgehend standardisierten Form an weiteren Standorten zu ermöglichen. Damit steht ein reproduzierbares Monitoring- und Analyseverfahren zur Verfügung. Nachfolgend werden weitere Empfehlungen abgegeben (Tabelle 17 und Tabelle 18), welche vegetationstechnischen und mikroklimatischen Parameter zu erheben sind und wie die Erhebungen simplifiziert werden können, um das Aufwand-Effizienzverhältnis zu optimieren und rasch wesentliche Kennwerte zu ermitteln. **Speziell die Erhebungen der Vegetationsparameter geben unmittelbare Auskunft über den Pflanzen- und Begrünungszustand und die daraus erwartbare Leistung oder auch über die Gefährdung des Bestands und sollte Anlass für unmittelbare Pflege- und Lenkungsmaßnahmen sein.**

Mit der Pflege der Vegetation werden die Leistung und die Wirkungen der Begrünung maßgeblich beeinflusst und gesteuert!

Tabelle 17: Empfehlungen zur effizienten und einfach anwendbaren Erhebung von Vegetationsparametern und Kennwerten des Vegetationskörpers über Messkampagnen (methodische Details siehe Kapitel 5, *jedenfalls zu erheben; Erhebungszeitpunkt erfolgt optimalerweise zum saisonalen Peak der Vegetationsperiode, kann aber auch zu anderen definierten und dokumentierten Zeitpunkten erfolgen).

Vegetations-parameter	**Methode/ Beschreibung**	**Begründung**	**Aufwand**	**Erhebungszeit-punkt**	**Erforderliche Sensorik**
Pflanzenart(en)*	Pflanzenkundliche Bestimmung	Kenntnis über die Pflanzenart(en) ermöglicht die Einschätzung des erwartbaren Wuchsverhaltens und Habitus und damit verbundener Leistungen.	**gering** Pflanzen- und Fachkenntnis erforderlich	jederzeit	keine
Pflanzenvitalität*	Visuelle Beurteilung von Erscheinungsbild, Blattanzahl, -größe und -gesundheit mittels Punktesystem 1-9 (Weiss et al. 2021, Pucher et al. 2022);	Ein vitaler Pflanzenbestand ist Grundvoraussetzung für eine optimale Leistung. Sind Beeinträchtigungen des Zustands oder Stresssymptome erkennbar, sind unverzüglich Pflegemaßnahmen zu ergreifen.	**gering** Fachkenntnis erforderlich	Juli-August	keine
Deckungsgrad der Zielfläche DG_{Ziel} [%] *	Schätzung, Bildaufnahmen vor Ort;	Je höher DG_{Ziel} (Deckung der für die Pflanzen erreichbaren Gebäudefläche) umso höher ist die Beschattungswirkung auf das Gebäude bzw. umso geringer ist der Energieeintrag. Entspricht DG_{Ziel} nicht der Erwartungshaltung und nicht den Vorgaben (z.B. ÖNORM L 1131 bzw. L 1136), sind die Ursachen dafür zu identifizieren und Steuerungsmaßnahmen zu ergreifen.	**gering** Fachkenntnis erforderlich	Juli-August	keine
Projektiver Deckungsgrad DG_{proj} [%]*	Schätzung oder visuelle Erfassung mittels Mess-rahmen (mind. 0,5 m²) an homogen verteilten Messpunkten (z.B.	DG_{proj} gibt Auskunft darüber, wie hoch die Deckung innerhalb der bewachsenen Fläche ist. Eine homogene, hohe Deckung spricht für eine gute Beschattungsleistung, eine starke Reduktion der solaren Einstrahlung sowie einer adäquaten Verdunstungskühlung bei vitalem Zustand.	**gering** Fachkenntnis erforderlich; **mittel bis hoch bei hohen Gebäudehöhen**	Juli-August	keine

	Raster) und digitaler Pixelauswertung		(Zugänglichkeit und Steighilfen erforderlich; kostenaufwändig);		
Kubisches Pflanzenvolumen V_{kub} [m³]*	Homogen verteilte Tiefenmessungen (z.B. Raster) mittels Messrahmen (mind. 0,5 m²)	Ergänzend zu DG_{Ziel} / DG_{proj} gibt V_{kub} Aufschluss über die Bestandstiefe und kann als Indikator für die Blattflächen dienen. Bei vitalem Zustand lassen dichte, tiefe Laubkörper auf gute Beschattungsleistung, starke Reduktion der solaren Einstrahlung sowie einer adäquaten Verdunstungskühlung bei vitalem Zustand schließen.	**gering** Pflanzenkenntnis erforderlich	Juli-August	keine
Blattflächenindex LAI /WLAI	Mind. 3 Messungen mit Messlanze und Referenzsensor je Messpunkt; homogen verteilt über die bewachsene Fläche	Der LAI ist ein Maß für die Blattflächen pro Flächeneinheit. Er ist ein wichtiger Indikator für Wasser-, Nährstoff- und Kohlenstoffflüssen und den damit verbundenen Leistungen z.B. Verdunstungskühlung aber auch Beschattungskapazität.	**mittel/kostenauf-wändig:** Fachkenntnis erforderlich; Messgerät erforderlich (destruktive Messalter-native erfordert Blattentnahmen);	Juli-August bei konstanten Witterungs-verhältnissen	z.B. ACCUPAR LP-80 (Meter Group)
Infrarot-Thermo-graphie IRT [°C]	Aufnahmen mittels Wärmebildkamera sind in Bezug zu Luft-T und Sonneneinstrahlung zum Aufnahmezeitpunkt zu stellen.	Geben Aufschluss über die IR-Rückstrahlung der Oberflächen bzw. Vegetationskörper	**gering/kostenauf-wändig:** Wärmebildkamera erforderlich	Juli-August an sonnigen, wolkenfreien Tagen	z.B. Testo 885 (Testo GmbH)
Stomatäre Leitfähigkeit gs [mmol m−2 s−1]	Messungen an mind. 5 adulten, vitalen Blättern in sonniger Exposition an mehreren homogen verteilten Messpunkten. Die Messung erfolgt über	gs ist ein Maß für den Öffnungsgrad der Stomata. Diese regulieren den Austausch von Wasserdampf und CO2 zwischen Blatt und Atmosphäre. Höhere Leitfähigkeit fördert die Photosynthese und Transpiration, wird aber durch Wasserverfügbarkeit, Licht und Umweltbe-	**hoch/kostenaufwändig:** Fachkenntnis erforder-lich; Messgerät erforderlich, wiederholte Kalibrierung	Juli-August an sonnigen, wolkenfreien Tagen	z.B. AP4 Porometer (Delta-T Devices)

	die Blattkammer an Einzelblättern.	dingungen gesteuert. Sie ist ausschlaggebend für Energie- und Wasserbilanz.	erforderlich und zeitaufwändig		
Transpirationsrate E [mmol m−2 s−1]	Messungen an mind. 5 adulten, vitalen Blätter in sonniger Exposition an mehreren homogen verteilten Messpunkten. Die Messung erfolgt über die Blattkammer an Einzelblättern.	E ist ein Maß für die Menge an Wasserdampf, die eine Pflanze über die Stomata in die Atmosphäre abgibt (je Zeiteinheit).	**hoch/kostenaufwändig:** Fachkenntnis erforderlich; Messgerät erforderlich, wiederholte Kalibrierung erforderlich und zeitaufwändig;	Juli-August an sonnigen, wolkenfreien Tagen	LCiT (ADC BioScientifitc Ltd.)
Blatttemperatur T_{leaf} [°C]	Ist an mehreren Blättern je nach Vegetationstyp mittels LCiT mitzumessen oder mit einem Infrarot-Temperaturmessgerät zu erfassen	T_{leaf} gibt Aufschluss über das Vermögen der Pflanze zur Selbstkühlung. Im Regelfall liegt T_{leaf} +/- bei Luft-T. Ist T_{leaf} erhöht, ist das ein alarmierendes Zeichen für Trockenstress (Gräf et al. 2021), die Pflanze schließt die Stomata und die Transpiration wird eingestellt.	**hoch/kosten mittel bis aufwändig:** Fachkenntnis erforderlich; Messgerät erforderlich, wiederholte Kalibrierung erforderlich und zeitaufwändig;	Juli-August an sonnigen, wolkenfreien Tagen	z.B. LCiT (ADC BioScientifitc Ltd.); z.B. Laserliner ThermoSpot, UMAREX GmbH & Co KG

Tabelle 18: Empfehlungen zur Erhebung von mikroklimatischen Kennwerten über Dauermonitoring (methodische Details siehe Kapitel 5, *jedenfalls zu erheben; Erhebungszeitpunkt erfolgt optimalerweise zum saisonalen Peak der Vegetationsperiode, kann aber auch zu anderen definierten und dokumentierten Zeitpunkten erfolgen).

Mikroklimatische Parameter	**Methode/ Beschreibung**	**Begründung**	**Aufwand**	**Erhebungszeit-punkt**	**Erforderliche Sensorik**
Luft-T vor und hinter der Begrünung Luft-T_v, Luft-T_h [°C]	1,5 m über Boden, Stativmontage	Luft-T und -F geben Aufschluss über das lokale Mikroklima vor und hinter der Begrünung. I.d.R. ist hinter einer Begrünung durch den Schattenwurf und die Verdunstungskühlung eine niedrigere Luft-T erwartbar als vor einer	**hoch:** Fachkenntnis erforderlich;	saisonal, optimalerweise ganzjährig	z.B. ATMOS 14 (Meter Group)

		unbegrünten Fläche/Fassade, die direkt der Sonnenstrahlung ausgesetzt ist. Es treten jedoch auch adverse Effekte auf, wodurch die Luftschicht hinter der Begrünung höher absolute Temperaturwerte gegenüber der Luft-T aufweist, z.B. durch hohe Reflexion von unbeschatteten Gebäudeteilen, durch eingeschränkte Ausstrahlung (nächtliche Abkühlung) oder durch eingeschränkten konvektiven Luftaustausch.	Dauermonitoring von Tages-/ Monatsverläufen erforderlich; Datenlogging/ -übertragung erforderlich; Analyse und Auswertung zeitaufwändig;		
Luft-F vor und hinter der Begrünung Luft-F_v, Luft-F_h [% relativ; g/m³ absolut]	1,5 m über Boden, Stativmontage;	Luft-Temperatur und -feuchte geben Aufschluss über das lokale Mikroklima vor und hinter der Begrünung. Die Luftfeuchtigkeit kennzeichnet den Wasserdampfgehalt der Luft. Dabei gibt die relative Luftfeuchtigkeit den prozentualen Anteil der maximal möglichen Wasserdampfmenge an (Sättigungszustand), während die absolute Luftfeuchtigkeit die tatsächliche Wasserdampfmasse pro Volumeneinheit beschreibt. Das Aufnahmevermögen für Wasserdampf ist temperaturabhängig. Kalte Luft kann weniger Feuchtigkeit aufnehmen als warme Luft. Folglich steigt die relative Luftfeuchtigkeit bei gleichbleibender absoluter Feuchte, sobald die Lufttemperatur sinkt.	**hoch:** Fachkenntnis erforderlich; Dauermonitoring von Tages-/ Monatsverläufen erforderlich; Datenlogging/-übertragung erforderlich; Analyse und Auswertung zeitaufwändig;	saisonal, optimalerweise ganzjährig	z.B. ATMOS 14 (Meter Group)
PET Phyisiologisch äquivalente Temperatur	Strahlungserhebung in 6 Richtungen lt. ÖNORM ISO 7726:2023 (Austrian Standards International 2023) mittels Black Globe Sensor; 1,1 m über Bodenniveau	Die Berechnung der PET auf Basis des Munich Energy Balance Model for Individuals (MEMI) berücksichtigt die Energiebilanz des menschlichen Körpers und gibt an, welche Lufttemperatur bei Standardbedingungen (Innenraum, leichte Aktivität, bekleidet) zur	**hoch:** Fachkenntnis erforderlich; Monitoring erfordert koordiniertes Patzieren der Sensorik und	an repräsentativen Hitzetagen sinnvoll um Maximalbelastungen abzubilden; auch	Black Globe Sensor und räumlich kohärente Daten von Lufttemperatur und Windgeschwindigkeit

		selben thermischen Belastung führen würde wie die tatsächlichen Außenbedingungen.	paralleles Loggen mehrerer Parameter; auch für Analyse und Auswertung Fach-kenntnis notwendig (Python)	Permanent-messung möglich	
Solarstrahlung, vor und Begrünung $I_{solv/h}$ [W/m²]	Sensor ist vor und hinter der Begrünung auf einem Stativ in 1,5 m Höhe zu installieren und vertikal auszurichten	Die solare Einstrahlung vor der Begrünung minus der Einstrahlung hinter der Begrünung ergibt die **Transmission** (Maß für die Durchlässigkeit). Der Quotient aus solarer Einstrahlung hinter der Begrünung und vor der Begrünung ergibt den ***Bioshading Coefficient*** **BSC (Grünverschattungs-faktor F_{bs}**; Stangl et al. 2025, Poiss et al. 2025)	**hoch:** Fachkenntnis erforder-lich; Dauermonitoring von Tages-/ Monatsverläufen erforderlich; Datenlogging/-über-tragung erforderlich; Analyse und Auswertung zeitaufwändig;	saisonal, optimalerweise ganzjährig	z.B. Pyranometer SP-110 (Apogee Instruments)
Strahlungsbilanz (Nettostrahlung) $I_{netv/h}$ [W/m²]	Net-Radiometer wird ca. 20 cm vor der Begrünung auf einem Stativ in 1,5 m Höhe installiert und vertikal ausgerichtet.	Die Strahlungsbilanz beschreibt die Differenz zwischen einfallender und ausstrahlender Energie. Sie setzt sich aus der kurzwelligen Bilanz (Globalstrahlung abzüglich der durch die Albedo reflektierten Anteile) und der langwelligen Bilanz (atmosphärische Gegenstrahlung abzüglich der Eigenemission von Vegetation und Umgebung) zusammen. Das Net-Radiometer misst die resultierende Nettostrahlung.	**hoch:** Fachkenntnis erforder-lich; Net-Radiometer-Sensor erforderlich; Messungen von Tages-/ Monatsverläufen erforderlich; Datenlogging/-über-tragung erforderlich; Analyse und Auswertung zeitaufwändig;	saisonal, optimalerweise ganzjährig	z.B. SN-500 (Apogee Instruments)

10.2 Empfehlungen für ein praxistaugliches Monitoring und Messkampagnen im Innenraum

Im Kontext der synergetischen Wirkung von Fassaden- und Dachbegrünungen auf das Gebäudeinnere wurden Messaufbau, Sensorik und Datenauswertung analog zu den Außenraummessungen standardisiert. Ziel dieser Dokumentation ist es, die thermische Behaglichkeit und die energetische Entlastung durch Gebäudebegrünung deskriptiv-analytisch zu erfassen. Da an den Realstandorten keine direkten Vergleichsräume zur Verfügung standen, ermöglicht die Standardisierung der Methodik zumindest eine systematische Einordnung der Messergebnisse in Bezug auf etablierte Komfortmodelle und klimatische Randbedingungen.

Das hier vorgestellte Monitoring-Verfahren nutzt eine Kombination aus physikalischen Messgrößen und physiologischen Bewertungsmodellen. Nachfolgend werden Empfehlungen ausgesprochen, welche raumklimatischen Parameter zu erheben sind. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf dem adaptiven Komfortmodell sowie den Ansätzen nach Freymark und Leusden, um die thermische Belastung des menschlichen Organismus abzubilden.

Um das Aufwand-Effizienzverhältnis zu optimieren, wird eine Differenzierung zwischen kontinuierlichem Langzeit-Monitoring (z.B. Raumtemperatur- und feuchte, Oberflächentemperaturen) und punktuellen Intensivmesskampagnen (z.B. operative Temperatur und Luftgeschwindigkeit an Hitzetagen) empfohlen (Tabelle 19). Die Ergebnisse dienen zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit von Arbeits- und Wohnräumen.

Tabelle 19:Empfehlungen zur Erhebung der thermischen Behaglichkeit über Dauermonitoring oder Messkampagnen (methodische Details siehe Kapitel 5).

Komfortparameter	Methode / Beschreibung	Begründung	Dauer- oder Messkampagne, Aufwand	Erhebungszeitpunkt	Erforderliche Sensorik
Raumlufttemperatur	Kontinuierliche Messung der Lufttemperatur im Raumzentrum (abgeschirmt gegen Strahlung).	Basiswert für alle thermischen Berechnungen und den energetischen Vergleich	Dauermessung/ Messkampagne; gering	kontinuierlich (Ganzjährig)	PT100, NTC oder digitale Halbleitersensoren
Operative Raumtemperatur	Kombinierte Messung aus Lufttemperatur und mittlerer Strahlungstemperatur auf Kopfhöhe (sitzend/ stehend).	Die operative Raumtemperatur ist die entscheidende Größe für das thermische Empfinden.	Messkampagne; hoch (Platzbedarf, Messung erfolgt an Arbeitsplatz)	kontinuierlich (Sommer/Winter-Extrema)	Thermometer und Globethermometer
Oberflächentemperatur (innen)	Messung der raumseitigen Wand,- Deckenoberfläche hinter der Begrünung im Vergleich zu Referenzwänden.	Zeigt den direkten Effekt der Fassadenbegrünung auf die Wärmeleitung und die Strahlungsasymmetrie im Raum.	Dauermessung; Aufwand je nach Lage (z.B. Zwischendecke)	kontinuierlich, Strahlungstage (Sommer)	Kontaktfühler oder IR-Thermometer / Wärmebildkamera
Relative Luftfeuchtigkeit	Messung der Feuchte im Raumzentrum und in Fensternähe (bei natürlicher Lüftung).	Beurteilung Behaglichkeit (Schwüle).	Dauermessung/ Messkampagne; gering	kontinuierlich	Hygrometer (kapazitiv)
Vertikaler Temperaturgradient	Messung der Lufttemperatur in 0,1 m (Knöchel) und 1,1 m (Kopf) Höhe.	Große Temperaturunterschiede zwischen Boden und Kopf führen zu Unbehaglichkeit. Begrünung sorgt oft für eine stabilere Schichtung.	Messkampagne; hoch (Platzbedarf, Messung erfolgt an Arbeitsplatz)	Heiz- oder Kühlperiode	Vertikaler Messbaum mit PT100/NTC Sensoren
Beleuchtungsstärke (bei Fensterverschattung durch Begrünung)	Messung der Lux-Werte auf der Nutzebene (Schreibtisch) im Vergleich zum Außenlicht.	Tageslichtversorgung bei z.B. Fensterverschattung durch Begrünung.	Dauermessung/ Messkampagne	Ganzjährig (v.a. Winter & trübe Tage)	Luxmeter / PAR-Sensoren

Adaptive thermische Behaglichkeit (Austrian Standards International 2024)	Ermittlung der Akzeptanzgrenzen basierend auf der gleitenden Außenlufttemperatur.	Einordnung der möglichen Temperaturtoleranz der Nutzer.	Dauermessung; mittel	Sommerperiode (Hitzewellen)	Innen-Raumfühler (Temperatur, Feuchte), Wetterdaten
Behaglichkeitsfeld (Freymark undLeusden)	Verortung der Messwerte (Raumlufttemperatur und Raumluftfeuchte) in einem nomografischen Diagramm.	Ermöglicht die sofortige Aussage, ob ein Zustand „behaglich“, „noch behaglich“ oder „unbehaglich“ ist – ohne Kenntnis der Außen-temperatur.	Dauermessung; mittel (Datenverarbeitung)	Jederzeit (Punkt-messung oder Zeitreihe)	Innen-Raumfühler (Temperatur, Feuchte)
PMV / PPD Index	Mathematische Ermittlung des *Predicted Mean Vote* (nach DIN EN ISO 7730).	Integriert Temperatur, Feuchte, Luftgeschwindigkeit, Kleidung und Aktivität zu einer "Komfort-Note".	Dauermessung; hoch (Datenfusion)	Repräsentative Nutzungstage	Datenlogger-Set (Multi-Sensorik) + Software
Subjektives Empfinden	Nutzer*innenbefragung mittels Fragebögen oder "Comfort-Buttons" vor Ort.	Die psychologische Wirkung von *"Grün im Blick"* kann das thermische Empfinden positiv beeinflussen.	Dauermessung/ Messkampagne; je nach Umfang hoch	Während der Messkampagne	Fragebögen (digital/analog)

11 Herausforderungen und Limitationen

Herausforderungen im Rahmen des HEDWIG-Projektes und insbesondere für das Einrichten von Dauermonitoringstandorten zeigten sich auf mehreren Ebenen. Nachfolgend werden jene Themen erläutert, die Limitationen in der Monitoringumsetzung, Datenerhebung und der wissenschaftlich relevanten Datenqualität und -validität, verursachen.

11.1 Realstandorte

Während die Identifikation von Realstandorten verhältnismäßig einfach war und eine lange Liste an potenziellen und interessanten Messobjekten sowie auch an Interessent*innen für die Berücksichtigung im Projekt generiert werden konnte, tauchten erste Schwierigkeiten bereits während der Kontaktaufnahme mit Betreiber*innen/Besitzer*innen auf. Insgesamt zeigten sich folgende Aspekte, die entweder (I) die Prüfung vor Ort zur Eignung als Messobjekt verhinderten, (II) Ausschließungsgründe für die Berücksichtigung im HEDWIG-Projekt oder (III) Behinderungen für die Sensorinstallationen bzw. während der Messkampagnen darstellten:

- **Eigentumsverhältnisse und Zugänglichkeit:**
  - **Anfragen blieben unbeantwortet** oder Kontakt zu Schlüsselpersonen konnte nicht hergestellt werden;
  - **Zugänglichkeit** zu den Grundstücken, Objekten und/oder Räumlichkeiten **konnte nicht vereinbart werden**;
  - **Zugänglichkeit** während der Projektlaufzeit oder kurzfristig zu passenden Witterungs-situationen **war nicht flexibel oder nicht möglich** (wie etwa am Standort Hotel Gilbert [FB8-m] durch den Hotelbetrieb und nicht-realisierbare Aufstiegshilfen: hier konnten nicht alle Parameter nach Standardplan oder nur in adaptierter Form erhoben werden;
  - **Bauliche Behinderungen:** Sensorinstallation und/oder die Durchführung der Messkampagnen an den Begrünungen war nicht möglich durch zu nah angrenzende Gebäude; keine Zugänglichkeit von außen; keine Zugänglichkeit unter Einhaltung der Sicherheitsbestimmungen; keine Möglichkeiten zum Hubsteigereinsatz bei großen Höhen u.a.m.;
  - **Nutzer*innen-/Nachbarschaftsproblematiken:** Einspruch von Nachbar*innen und Behinderungen der Messkampagnen; datenschutzrechtliche Einschränkungen der Messkampagnen durch Hotelbetrieb ua.;
- **individuelle Standortsituationen:**
  - **Exposition | Sonneneinstrahlung:** die Begrünung befand sich auf einer Nordseite und erwies sich als ungeeignet für die Messvorhaben und Projektziele;
  - **Teilverschattungen** durch andere Gebäude: die Begrünung war nicht oder nicht mehrheitlich im Tagesverlauf der solaren Einstrahlung ausgesetzt;

- **unzureichende Vitalität | Einschränkungen** im Zustand der Begrünung: die Begrünung war nicht mehr vorhanden, in schlechtem Zustand, im Wuchs und/oder Dimensionen eingeschränkt, oder die Entfernung der Begrünung war vorgesehen;

- **individuelle Raum- und Gebäudesituationen:**
  - sowohl Gebäudehülle als auch Innenausstattung unterliegen völlig **individuellen Materialitäten,** die teilweise der Errichtungsphase geschuldet sind aber auch durch unterschiedliche Renovierungsmaßnahmen geprägt sind;
  - insbesondere die unterschiedliche Ausstattung **mit und ohne Dämmung** erschweren die Vergleichbarkeit von Begrünungstypen und beeinflussen physikalische Effekte maßgeblich;
  - i**ndividuelle Raum- und Nutzungssituationen bzw. -frequenzen** führen zu unterschiedlichen inneren thermischen Lasten und Störungen, die die Messergebnisse und Vergleichbarkeit beeinflussen oder verunmöglichen:
- **KEINE Referenzräume |-wände:** gleichwertige Referenzräume mit gleichwertiger Exposition/Größe/Ausstattung/Zugänglichkeit/Nutzung ohne Begrünung waren generell nicht vorhanden.

11.2 Messtechnik und Sensorik

11.2.1 Einschränkungen der Sensorinstallation und Limitierungen in der Datengenerierung

Die Konzipierung und Vorbereitungen für das Dauermonitoring entfiel auf die Post-Coronazeit und jener Phase, in der der internationale Warenverkehr und die Marktsituation plötzlichen Veränderungen und zuvor nicht einschätzbaren Gegebenheiten unterlag. Dies hatte unmittelbare Auswirkungen auf das geplante Setup und Datenmonitoring und führte zu Verzögerungen in der Sensorinstallation bzw. behinderte den zeitgleichem Messbeginn an allen Objekten. Folgende Limitationen störten oder erschwerten die Datengenerierung oder beeinträchtigten die Datensätze:

- **eingeschränkte Sensorverfügbarkeit** und teilweise lange **Lieferverzögerungen**; enorme, **ungeplante Preiserhöhungen;**
- **komplizierte Sensorplatzierung im Außenraum,** die entweder ungewöhnliche Lösungen erforderte oder die Platzierung an der gewünschten Position behinderte (ausreichende Abstände vor oder hinter der Begrünung, Positionierung unterhalb des Laubes mit ausreichender Deckung nicht möglich; Befestigung/Verschraubungen der Traverse an der Hausmauer nicht möglich; u.a.m.); erschwerte Zugänglichkeit wie Zwischendecken, gegliederte Konstruktionen, kabelgebundene Limitationen;
- **geschützte Sensorplatzierung** muss gewährleistet sein im Hinblick auf Vandalismus oder mechanische Einwirkungen durch Menschen, Tiere oder andere Elemente; dies ist im öffentlichen Raum oft eingeschränkt oder verunmöglicht, insbesondere auf Arbeitshöhe bzw. Standardhöhen (wie etwa zur PET-Messung), Grundstücksabgrenzungen oder -

einfriedungen sind von Vorteil, behindern aber wiederum die uneingeschränkte Zugänglichkeit für die Arbeiten vor Ort;

- **notwendige Nachinstallationen** und damit verbundene Komplikationen mit Betreiber*innen/Besitzer*innen; Zugangsbeschränkungen oder komplizierte Terminvereinbarungen;
- **Sensorausfälle** durch Störungen der Elektronik, aber auch durch **fehlende/störende/ unkontrollierte Pflegemaßnahmen**, welche u.a. starke Triebeinkürzungen bei Fassadenbegrünungen bzw. einem unverhältnismäßig starken Rückschnitt der Vegetation bei Dachbegrünungen umfassten
- Einschränkungen in der **Umsetzung methodisch korrekter Settings** ergaben sich etwa bei der Strahlungsbilanz bzw. der PET-Analyse. Letztere erfordert den Einsatz von Blackglobe-Sensoren, welche im vorliegenden Fall nicht zur Verfügung standen. Die Strahlungsbilanzmessungen waren v.a. an den Gründächern gestört durch zu geringe Vegetationshöhen bei den Sedumdächern.

11.2.2 Datenoverload versus fehlende Messpunktwiederholungen

11.2.2.1 Wissenschaftliche bzw. statistische Validität

Während die große Zahl der Standorte und Messobjekte aber auch das umfangreiche HEDWIG-Messsetup insbesondere im Dauermonitoring einen weit unterschätzten Datenoverload verursachte, ist gleichzeitig die wissenschaftliche Validität der Daten aus dem Dauermonitoring eingeschränkt, da sich dieses ausschließlich auf eine Punktmessung je Standort/Messobjekt bezieht. Um dem wissenschaftlichen Qualitätsanspruch zu genügen, aber auch um potenzielle Sensorausfälle zu kompensieren, sind im Regelfall mehrere Sensorpositionen und Messpunkte erforderlich, die entweder homogen (z.B. Raster) oder zufällig über die Messfläche zu verteilen sind, oder entsprechend Besonderheiten und Inhomogenitäten in der Bestandssituation zu platzieren sind.

Es ist davon auszugehen, dass das Messergebnis den besten Schätzwert für die angestrebte Messgröße ergibt, eingeschlossen aller Komponenten, die zur Unsicherheit beitragen (Sensorfehler, Messabweichungen, mikrolokale Abweichungen, mikrolokale Störungen, Randeinflüsse, systematische und nicht-systematische Einwirkungen etc.). Zu geringe Messpunkte lassen Effekte oft nicht erkennen oder führen zu hoher Streuung, die eigentlich eine Erhöhung der Messpunkte erfordern. Als absolutes Minimum bei Feldstudien gelten verbreitet 3 Messpunkte, sie sollten nach Möglichkeit jedenfalls so hoch als möglich angesetzt werden. Die Unsicherheiten und die Streuung sind jedenfalls darzulegen, um die Ergebnisse erklärlich und interpretierbar zu machen, statistische Signifikanz zu gewährleisten und überhaupt Vergleichbarkeit zu ermöglichen.

11.2.2.2 Kompensation über Messkampagnen und Limitationen

Ein entscheidender und ursprünglich nicht explizit geplanter Schritt war die detaillierte Besichtigung der Objekte vor Ort. Erst durch diese Begehungen konnte die theoretische Eignung der Gebäude für die Außen- und Innenraummessungen verifiziert werden. Dabei zeigte sich erst ob die Installation der Sensorik an praktische Grenzen stieß.

Im Rahmen der Bedingungen für das HEDWIG-Projekt, den Vorgaben der Beauftragung und dem gegebenen Budgetrahmen war es nicht möglich, für jeden Standort ein statistisch vertretbares/ befriedigendes Sensormessnetz im Dauermonitoring für 16 Messobjekte einzurichten. Um dies zu kompensieren, wurden bereits im Angebot Messkampagnen vorgesehen, die nicht nur der Erhebung der erforderlichen Vegetationsparameter dienten, sondern auch die Möglichkeit schafften, zusätzliche Parameter mit Handmess-Sensorik aufzunehmen sowie zusätzliche mikroklima- und energiehaushaltsrelevante Daten und Erkenntnisse zu gewinnen.

Im Rahmen der Messkampagnen wurde darauf geachtet, als Standard eine Mindestanzahl von 5 Messpunkten einzurichten und je nach Sensortyp die Stichproben-/Messpunkteanzahl zusätzlich zu erhöhen. Zu beachten ist, dass dies den Ressourceneinsatz (Personal und Zeit vor Ort, Auswertung) ungleich erhöht und nach oben limitiert ist, wenn der Umfang der Messobjekte hoch ist. Limitationen allerdings auch bei den Messkampagnen mussten in Kauf genommen werden und sind in der Bewertung der Ergebnisse zu berücksichtigen aber auch zu tolerieren:

- Insbesondere für die energiehaushaltsrelevanten Messkampagnen (Strahlungsbilanz) konnte aufgrund von Budgetressourcen ebenfalls nur 1 Sensorpunkt berücksichtigt werden.
- Die Messkampagnen konnten aufgrund der hohen Zahl der Messobjekte nicht mehrfach wiederholt werden, da sie die verfügbaren Zeit- und Personalressourcen überschritten hätten. Dies bedeutet, dass hierzu nun die zeitlichen Wiederholungen fehlen und die Ergebnisse ebenfalls nur zeitlich punktuelle Situationen spiegeln und wiedergeben. Die Messkampagnen wurden jedenfalls so angelegt, dass sie den saisonalen Peak der Vegetationskörper abbilden und nach Möglichkeit an einem heißen wolkenfreien oder wenig bewölktem Sommertag durchgeführt wurden.

11.2.3 Limitationen der Lufttemperaturmessung bei der Erfassung komplexer thermischer Umgebungsbedingungen

Lufttemperatursensoren wie der in HEDWIG zum Monitoring der Außentemperaturen eingesetzte ATMOS 14 (METER) messen primär die Lufttemperatur als kinetische Energie der Luftmoleküle in der Umgebung. Zusätzlich zu Temperatur erfasst der ATMOS 14 weitere meteorologische Parameter (z.B. relative Luftfeuchtigkeit, Luftdruck). Diese Parameter sind relevant, um die mikroklimatischen Verhältnisse einzuschätzen bzw. abzubilden. Jedoch lassen sie allein keine validen Aussagen über den thermischen Komfort im angrenzenden Luftraum bzw. der unmittelbaren Umgebung zu. Folgende Parameter spielen eine wesentliche Rolle, um die Wirkungen von Vegetation und Pflanzenkörpern auf die Aufenthaltsqualität sowie kontraproduktive Situationen und Standortgegebenheiten vollumfänglich zu erfassen und einschätzen zu können:

- Strahlungsinput: Direkte und diffuse solare Einstrahlung;
- Transmission: Durchgang der Strahlung durch Laubkörper und Beschattungsstrukturen;
- Reflexion: Albedoeffekte von Fassaden und umliegenden Gebäudekörpern;
- Abschirmung und Emission: Wirkung von Gebäudeteilen auf die langwellige Bilanz;
- nächtliche Ausstrahlung: langwellige Abkühlung der Oberflächen gegen den Himmel;
- Konvektion: Windgeschwindigkeit und der daraus resultierende Luftaustausch sowie Verdunstungsrate.
- Für den thermischen Komfort Außen müsste man den UTCI (Universal Thermal Climate Index) bestimmen, da kommt dann auch die unten ausführlich beschriebene Schwarzkugel zum Einsatz.

Lufttemperatur der Umgebung und Strahlungstemperatur sind voneinander unabhängig definierte und gemessene physikalische Größen. Sie erfassen jeweils verschiedene Mechanismen des Wärmeaustauschs (Austrian Standards International 2023). Sie können als komplementär angesehen werden, da sie in der Kombination dazu beitragen, vollumfänglich die vorherrschenden thermischen Bedingungen zu beschreiben.

ISO 7726:2023 (Austrian Standards International 2023, 13) definiert Lufttemperatur als „[…] *die Temperatur der den Menschen umgebenden Luft. Sie wird mit einem gegen Strahlung abgeschirmten Temperaturmesswertaufnehmer gemessen*." Während die mittlere Strahlungstemperatur (MST) als abgeleitete physikalische Größe „[…] *die gleichmäßige Temperatur eines gedachten Hüllraumes, in dem die strahlungsbedingte Wärmeübertragung vom menschlichen Körper weg ebenso groß ist wie die in dem realen inhomogenen Hüllraum*." (Austrian Standards International 2023, 14). Weiters heißt dies konkret für die Messung der MST mit einem Schwarzkugelthermometer in Anhang B der ISO 7726:2023 (Austrian Standards International 2023): „*Das Schwarzkugelthermometer besteht aus einer geschwärzten Kugel, in deren Mittelpunkt sich ein Thermometer befindet. Die Kugel kann theoretisch jeden beliebigen Durchmesser haben; da nach den zur Berechnung der MST verwendeten Gleichungen diese vom Kugeldurchmesser abhängen wird allgemein ein Durchmesser von 0,15 m zur Verwendung mit diesen Gleichungen empfohlen. Es sollte beachtet werden, dass der Einfluss von Lufttemperatur und -geschwindigkeit umso größer ist, je kleiner der Kugeldurchmesser ist, wodurch sich die Genauigkeit der Messung der mittleren Strahlungstemperatur verringert; andererseits nimmt mit dem Kugeldurchmesser auch die Messdauer zu. Um die Absorption der von den Wänden des umgebenden Raumes ausgehenden Strahlung durch die Kugeloberfläche sicherzustellen, muss diese geschwärzt sein, entweder elektrochemisch oder mittels eines matt-schwarzen Farbanstrichs.*"

Diese Bauform führt dazu, dass der Fühler einen Wert misst, der näher an der mittleren Strahlungswirkung aller umgebenden Flächen liegt als ein einfacher Lufttemperatursensor (d'Ambrosio et al., 2021). Vor allem im Außenbereich bei direkter Sonneneinstrahlung oder langwelliger Rückstrahlung von aufgeheizten Flächen kann diese Strahlungstemperatur deutlich höher liegen als die reine Lufttemperatur (Liu er al., 2022). Der Strahlungstemperaturfühler kann daher eingesetzt werden, um die tatsächliche Außentemperatur bzw. Aussagen über den thermischen Komfort zu treffen oder Temperaturmessungen zu verbessern, indem Strahlungseinflüsse miteinbezogen werden (Teitelbaum er al., 2022).

Der zusätzliche Einsatz von Strahlungstemperatursensoren ist daher jedenfalls empfehlenswert. Der vollständige Ersatz von Lufttemperatursensoren wird aktuell als nicht ratsam eingestuft. Ein vollumfängliches Verständnis über die Messergebnisse und die Sensorwerte bzw. ihre Abweichungen zueinander, insbesondere auch in Abhängigkeit von individuellen Sensorpositionen und Standortsituationen ist noch zu erlangen, um die Dateninterpretation und die Aussagekraft zu untermauern.

11.2.4 Aussagekraft absolute versus relative Luftfeuchte

Lufttemperatur und -feuchte (Luft-T, Luft-F) und ihre Beziehung zueinander sind grundlegende klimatische Parameter, die das lokale Mikroklima charakterisieren. Die Luftfeuchte steht für den Wasserdampf, der in der Luft enthalten ist. Dabei gibt die relative Luft-F den Anteil des maximal möglichen Wasserdampfes in der Luft an. Die absolute Luft-F hingegen gibt Auskunft über den tatsächlichen Wasserdampfgehalt. Anders ausgedrückt: Die absolute Luftfeuchtigkeit beschreibt die tatsächliche Menge an Wasserdampf in Gramm pro Kubikmeter Luft, während die relative Luftfeuchtigkeit das prozentuale Verhältnis dieser Menge zum maximal möglichen Sättigungsgrad bei der jeweiligen Temperatur angibt.

Wie viel Wasserdampf von der Luft aufgenommen werden kann, ist abhängig von der Luft-T. Warme Luft nimmt mehr Wasserdampf auf als kalte Luft, daher ist der relative Feuchteanteil geringer. Die relative Luft-F ist bei gleichbleibender absoluter Luft-F niedriger, wenn Luft-T höher ist. Eine beispielhafte Gegenüberstellung der absoluten und relativen Luftfeuchte (Abbildung 70) beim Messobjekt [FB3-m] zeigt, dass Unterschiede zwischen Messgrößen stark voneinander abweichen. Die mittlere absolute Luftfeuchte während der Hitzeperiode 29.06.-03.07.2925 liegt vor der Begrünung bei 11 g/m^{3,} und hinter dem Laubkörper bei 12,6 g/m^3 (Tabelle 20). Dies entspricht einer absoluten Luftfeuchtedifferenz von 1,6 g/m^3, wohingegen die relative Luftfeuchte hinter der Begrünung um 21 % höher ist.

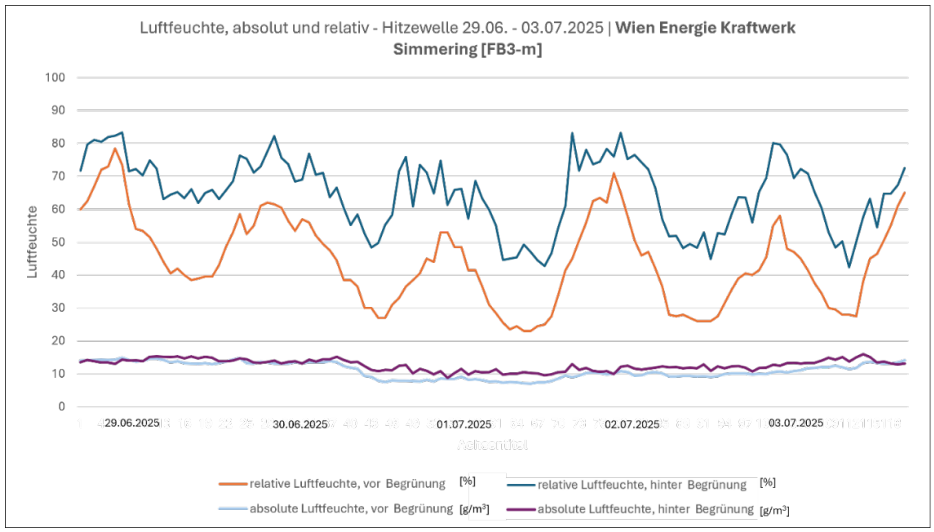


Abbildung 70: Gegenüberstellung Absolute und Relative Luftfeuchte, Hitzewelle 29.06. - 03.07.2025 [Wien Energie Kraftwerk Simmering] (© IBLB).

Die Luft hinter der Begrünung ist feuchter, da die absolute Wassermenge zunimmt, sie fühlt sich auch aufgrund der starken Abkühlung frischer an. Der Anstieg der relativen Luftfeuchtigkeit um 21 % ist in diesem Zusammenhang kein Beleg für eine Zunahme an Wasserdampf (Schwüle), sondern das direkte Resultat der erfolgreichen Temperaturabsenkung. Dazu muss auch die Lufttemperatur vor und hinter der Fassade bekannt sein, sonst kann nicht beurteilt werden, ob es sich ehr schwül oder frisch anfühlt.

Dieses Beispiel veranschaulicht die Bedeutung des Narrativs für die Wissensvermittlung und Bewusstseinsbildung. Die Wahl der Botschaft und die Formulierung von Fakten sind ausschlaggebend sowohl in der Kommunikation aber auch in der Wahrnehmung. In Tabelle 20 werden die Mittelwerte der absoluten sowie relativen Luftfeuchte jeweils vor sowie hinter der Begrünung im Zuge der Hitzewelle vom 29.06. bis 03.07.2025 aufgezeigt.

Tabelle 20: Gegenüberstellung Mittelwerte der absoluten und relativen Luftfeuchte, Hitzewelle 29.06. - 03.07.2025 [Wien Energie Kraftwerk Simmering].

Mittelwert [gesamte Hitzewelle]	**Luft-$F_{absolut}$**	**Luft-$F_{relativ}$**
hinter Begrünung	12,6 g/m^3	64,7 %
vor Begrünung	11,0 g/m^3	43,7 %
Differenz	1,6 g/m^3	21,0 %

12 Fazit

12.1 HEDWIG Key Findings

12.1.1 Unterscheidung Deckungsgrad der Zielfläche DG_{Ziel} und projektiver Deckungsgrad DG_{proj}

Fehlender Schutz der Fassade durch Laubbeschattung verhindert auch die Abminderung der solaren Einstrahlung und des Energieeintrags ins Gebäude und die Wärmerückstrahlung von der Gebäudefläche. Unvollständige Deckung der Fassadenflächen erzeugt ungünstige oder gegenteilige Effekte. Ein hoher Deckungsgrad der Zielfläche ist anzustreben und zu erhalten, um die potenzielle Leistung der Begrünung auszuschöpfen. Wichtig ist, Deckungsgrad der Zielfläche von der projektiven Deckung zu unterscheiden, da sie auch sehr stark voneinander abweichen können.

DG_{Ziel} bezieht sich auf die Gebäude- oder Fassadenfläche, die potenziell für die Pflanzen erschließbar ist. Bei Kletterpflanzen ist das von der Dimension und vom Ausmaß der Kletterhilfen abhängig, bei wandgebundenen oder modularen Systemen von der Fläche der Vegetationsträger (Zielflächen). ÖNORM L 1136 (Austrian Standards International 2021) gibt für Grünfassaden nach 10 Standjahren einen Deckungsgrad von 95 % vor, der sich auf DG_{Ziel} bezieht.

Hoher DG_{Ziel} heißt nicht prinzipiell hoher DG_{proj} und umgekehrt. Der projektive Deckungsgrad spiegelt die Deckung der Laubmasse auf einer projizierten Fläche (meist 1 m²), diese kann u.U. sehr lückig sein, selbst wenn DG_{Ziel} 100 % beträgt, ist aber stark ausschlaggebend für die solare Durchlässigkeit (Transmission) in der vom Laub bedeckten Fläche. Umgekehrt ist ein hoher DG_{proj} von 100 % wenig wirkungsvoll, wenn insgesamt gerade einmal nur ein kleiner Teil der Zielfläche bewachsen sind (DG_{Ziel}) und die Fassadenfläche weitgehend frei ist.

12.1.2 Korrelation zwischen (W)LAI und potenziellen Schätzgrößen

Um Erhebungen künftig weiter zu simplifizieren, können Vorhersagemodelle (Regression Fits) für (W)LAI aus projektiven Deckungsgrad-Daten interessant werden. Aus einer erweiterten Analyse mit den HEDWIG- und GLASGrün-Daten geht hervor, dass signifikante lineare Zusammenhänge bestehen, jedoch mit unterschiedlichen Erklärungsgehalten. Aus dem derzeitigen Datensatz können noch keine Vorhersagemodelle für den aufwändiger zu erhebenden (W)LAI zur Anwendung kommen, Datenlücken sind noch zu füllen und v.a. auch andere Beziehungsmodelle zu prüfen (z.B. allometrische Funktionen).

Schätzungen des (W)LAI ausgehend vom projektiven Deckungsgrad sind insbesondere deswegen interessant, weil die Erhebung des letzteren verhältnismäßig unaufwändig ist und keine Messinstrumente erfordert, während die Erhebung des (W)LAI zeit- und ressourcenaufwändiger ist. Dies könnte künftig beitragen, Monitoring von Bauwerksbegrünungen zu simplifizieren und

einfach anwendbare Erhebungen zulassen. Jedenfalls ist für die verlässliche Modellanwendung die Sammlung weiterer Daten erforderlich und die Schätzgenauigkeit noch zu erhöhen. Insbesondere sind die Datenlücken im mittleren Prozentbereich bei *W. sinensis* und im unteren Prozentbereich bei *P. tricuspidata* zu füllen. Außerdem sollten allometrische Beziehungen geprüft werde, ob sie zu besseren Vorhersagen beitragen.

12.1.3 Einfluss von Pflanzenvitalität und Deckungsgrad auf die Strahlungsbilanz

Die Erwärmung abgestorbener Pflanzenteile auf Extensivgründächern gegenüber lebenden Pflanzen ist mit > 40 °C sehr hoch, damit tragen auch ungepflegte Extensivgründächer mit schwach ausgeprägter Deckung massiv zur Abgabe von Wärmeenergie an die Umgebung bei. Auch bei Extensivgründächern ist es essenziell, einen gesunden, vollflächig deckenden und diversen Gräser-Kräuter-Mischbestand anstelle von Sedum-Dächern mit eingeschränkter Deckung anzustreben. Weiße Blüten von trockenresistenten Kräutern erhöhen die Reflexion und tragen so besonders effizient zur Reduktion der Wärmeabstrahlung bei.

Die Datenvalidierung der HEDWIG Klimastationen mit Daten nahe gelegener Geosphere-Austria-Stationen brachten zusätzliche, interessante Aspekte zutage. Die Differenzen zwischen den Stationen zeigen mikroklimatische Unterschiede. Das Extensivgründach [DB1-e] ist im Sommer etwas wärmer, aber die Luftfeuchtigkeit geringfügig niedriger als auf dem Intensivdach [DB1-i], wobei die Temperaturdifferenzen meist 1 – 3 °C und die Feuchtigkeitsunterschiede 3 – 6 % (rel. Luft-F) betragen. Das Intensivgründach bleibt im Sommer etwas kühler, und zeigt eine konsistent höhere Luftfeuchtigkeit als das Extensivgründach. Die Messdaten der Geosphere-Stationen ähneln in der Temperatur dem Extensivgründach, weisen jedoch insbesondere im Winter geringere relative Luftfeuchte auf, mit Differenzen bis zu 15 %. Die größten Temperaturunterschiede treten im Sommer auf, die größten Feuchtigkeitsunterschiede im Winter. Insgesamt bleiben die Differenz-Werte saisonal konsistent: Das Extensivgründach heizt sich stärker auf, das Intensivdach bleibt moderater temperiert und die Geosphere-Station auf Graudächern in Innenstadt-Umgebung ist insgesamt trockener, was plausibel und nachvollziehbar ist.

12.1.4 Transpirationspotenzial von Grünfassaden

Aus den Messungen der elektrischen Leitfähigkeit zur Einschätzung von Transpirationsraten der unterschiedlichen Systeme lassen sich folgende Aussagen bzw. Indikatorwerte ableiten:

- Heterogene Pflanzenbestände (biodiverse Gräser-Kräuter-Staudengesellschaften) in einer bewässerten wandgebundenen Begrünung schaffen Tagestranspiration bis 8 l/m² pro Tag.
- Boden- oder troggebundene und gut wasserversorgte Wisterien können bis 10 l/m² pro Tag transpirieren.
- Auf natürlichem Boden ohne Bewässerung kann *Parthenocissus* etwa 3 l/m² pro Tag verdunsten. Im versiegelten Umfeld bzw. versiegelten Hoflagen reduziert sich diese um 2/3.

- Die größten Einschränkungen zeigten sich 2024 bei der troggebundenen Wisteria [FB1-tW]. Der reduzierte Wurzelraum im Trog verursacht den Pflanzen bei eingeschränkter Wasserversorgung und damit verbundener Substraterhitzung Stress, den sie durch Schließung der Stomata und Minimierung der Evapotranspiration ausgleichen.

Um die potenzielle Transpirationsleistung von vollbegrünten Fassadenflächen (DG_{Ziel} = 100%) zu veranschaulichen, wird hier ein Vergleich mit der Wassermenge einer Standardbadewanne dargelegt:

- 20 m² einer bewässerten bodengebundenen Wisterien- Begrünung können potenziell pro Tag etwa eine Badewanne (200 l) voll Wasser verdunsten.
- 30 m² einer bewässerten wandgebundenen Grünfassade (Living Wall) können potenziell pro Tag etwa eine Badewanne (200 l) voll Wasser verdunsten.
- 80 m² einer unbewässerten bodengebundenen *Parthenocissus*-Begrünung auf natürlichem Boden können potenziell pro Tag etwa eine Badewanne (200 l) voll Wasser verdunsten.

12.1.5 Wärmedurchfluss im Substrat

Wandgebundene Fassadenbegrünungen

- Insgesamt schützt die modulare Wandbegrünung mit automatisch bewässerten Vegetationsträgern das Gebäude sehr effektiv vor Wärmeeintrag.
- Gleichzeitig bilden diese eine Vollverschattung der Fassade und verhindern somit die Erhitzung der Fassadenoberfläche. Das erhöht die Langlebigkeit der Gebäudehülle.
- Mit der Befeuchtung durch die Bewässerungssysteme kehrt sich der Wärmestrom in wandgebundenen Systemen um bzw. verstärkt sich der Wärmestrom vom Gebäude nach außen.
- Bei Tropennächten ist die Abkühlung des Substrats deutlich reduziert und somit der Wärmestrom zur Gebäudehülle am folgenden Hitzetag erhöht.

Dachbegrünungen

- An Hitzetagen heizen sich extensive Substratschichten stark auf und emittieren in Folge sensible Wärme. Bei hoher Substratfeuchte hingegen bleibt die Substrattemperatur unterhalb der Lufttemperatur.
- Trotz hoher Temperaturen pendelt beim Extensivdachsubstrat der Wärmedurchfluss in einem engen Korridor. An Hitzetagen sind keine im Vergleich erhöhten Wärmeströme zur Gebäudehülle ablesbar. Der Wärmestrom nimmt bei + 10 W/m² ein maximales Niveau ein.
- Bei eintretendem Niederschlag reagiert die Extensivbegrünung durch den Temperaturabfall mit einem deutlichen Energieaustrag weg von der Gebäudehülle.
- Kurze Regenereignisse blieben bei Intensivgründachern ohne wesentlichen Einfluss auf den Wärmedurchfluss im Substrat. Erst höhere Niederschlagsmengen, die mit einer starken Lufttemperaturabnahme einhergehen, resultieren in einer Wärmeabgabe nach außen.

- Mit zunehmender Substratstärke geht auch eine Trägheit hinsichtlich Wärmedurchfluss, Substrattemperaturen und Wasserspeicherfähigkeit einher. Das heißt, dass intensive Dachbegrünungen zeitversetzt auf Temperaturschwankungen reagieren sowie Regenwasser länger im Substrat halten.
- Im Winter sind wesentliche Niveauänderungen durch Minustemperaturen oder Niederschlag nicht erkennbar. Damit zeigt sich, dass das extensive Substrat eine gute Ergänzung zur konventionellen Dämmung darstellt.
- Bei einem gedämmten Extensivgründach nach aktuellem Stand der Technik bremst die Dämmung den Wärmefluss ins Gebäudeinnere als auch nach außen. Dies zeigt sich durch weitgehend fehlende negative Wärmeströme im Substrat und eine rasche Reaktion der Substrattemperatur auf Sonnenstrahlung auch im Winter. Das Substrat selbst bleibt hier thermisch stabil.
- Besonders in den Kernsommermonaten Juni, Juli und August halbiert lt. Simulation die Dachbegrünung die erforderliche Kühlenergie, was in der Realität auf die Verschattungswirkung der Pflanzen, Evapotranspiration und der spezifischen Eigenschaften (thermische Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit) des Substrats zurückzuführen ist.

12.1.6 Verschattungswirkung der Fassadenbegrünung und solarer Energieeintrag

Die Messdaten zeigen, dass die inneren Oberflächentemperaturen begrünter Fassaden im Sommer konsequent unter der Raumlufttemperatur liegen (Differenz von 0,3 K bis 0,85 K). Dies deutet theoretisch auf einen signifikanten Einfluss der begrünten Fassade hin. Die Beweiskraft dieser Beobachtung bleibt aber ohne den direkten Vergleich zu unbegrünten Referenzfassaden limitiert. Die ergänzenden Ergebnisse der Parameterstudie (thermische Gebäudesimulation) zeigen jedoch, dass beispielsweise die Wirksamkeit von troggebundenen Begrünungen (vorwiegend Verschattungswirkung) massiv von der Bestandskonstruktion abhängt (Wetterdaten Juni-August 2024). Während bei einer massiven, hellen (Reflexionsgrad 50 %) 80-cm-Wand der Kühlbedarf lediglich um bis zu 2,64 - 6,39 kWh/m² reduziert wird, steigt dieser Effekt bei einer thermisch sensibleren 25-cm-Wand auf bis zu 10,9 - 16,25 kWh/m² an. Trotz dieser Einsparungen an der opaken Wand zeigt die bauphysikalische Gesamtbetrachtung eine klare Dominanz der Fensterflächen. Die solaren Einträge über unverschattete Verglasungen (g-Wert 0,53) liegen vergleichsweise bei 116 kWh/m². Dies unterstreicht, dass Begrünungsmaßnahmen ihr volles energetisches Potenzial erst entfalten, wenn sie auch die transparenten Bauteile in das Verschattungskonzept einbeziehen.

12.1.7 Energetische Bewertung fassadengebundener Begrünungssysteme

Ergänzend zur bereits beschriebenen Abhängigkeit der Verschattungswirkung von der Speichermasse spielt bei fassadengebundenen Systemen die technische Struktur der Vegetationsträger eine entscheidende Rolle für den Energiehaushalt. Im Gegensatz zu bodengebundenen Lösungen sind bei diesen Systemen das Substrat sowie die Pflanzen über die

gesamte Fassadenfläche in Form von Wannen oder Modulen verteilt. Durch diese flächige Anordnung der feuchten Substratmasse und der aktiven Blattflächen nimmt die Evapotranspiration eine wesentlich zentralere Stellung im Kühlprozess ein.

Dies zeigt sich exemplarisch am Objekt der MA 48. Das dortige fassadengebundene System ermöglicht im Sommer durch die Kombination aus Verschattung sowie Verdunstung und aufgrund der geringen Wandstärken die niedrigsten Raumlufttemperaturen sowie Wandtemperaturen im Vergleich zu den anderen Dauermessstandorten. Das dort montierte System besteht aus Pflanztrögen welche mit einem vordefinierten Abstand zur Wand montiert sind. In der Heizperiode hingegen lag der untersuchte Raum im Vergleich mit den anderen Dauermessobjekten im Bereich höherer Differenzen zwischen Wandoberflächentemperatur und Raumlufttemperatur mit einem Wert von -2,3 K.

Geschlossene Systeme mit einer geschlossenen Hinterlüftungsebene bieten im Gegensatz zu einer vollständig freien Hinterlüftung eine zusätzliche thermische Pufferung für das Gebäude und können dadurch die Wärmeverluste im Winter reduzieren. Zu berücksichtigen sind weiters die Vielfalt an fassadengebundenen Systemen sowie deren unterschiedliche Unterkonstruktionen. Während metallische Werkstoffe wie Aluminium oder Edelstahl aufgrund ihrer hohen Wärmeleitfähigkeit den Energieaustausch mit der dahinterliegenden Luftschicht fördern wirken dämmende Verbundstoffe wie EPS thermisch entkoppelnd.

In der Gesamtbewertung bedeutet dies, dass fassadengebundene Lösungen aufgrund der über die Fläche verteilten Substratmodule zwar höhere Kühlpotenziale aufweisen können, jedoch stets die thermische Speichermasse der Bestandswand sowie der spezifische konstruktive Aufbau des gewählten Begrünungssystems in die Betrachtung einbezogen werden sollten. Ebenso darf die Anzahl der Wärmebrücken, welche durch die statisch erforderlichen Befestigungspunkte der Unterkonstruktion entstehen, nicht vernachlässigt werden da diese den energetischen Gesamtwert der Fassade maßgeblich beeinflussen können.

12.1.8 Synergieeffekte zwischen Dachbegrünung und thermischem Wärmeschutz

Dachbegrünung kann eine fehlende Wärmedämmung massiver Bauteile im Winter nicht vollständig ersetzen. Ungedämmte Decken kühlen stärker aus und können zu thermischer Unbehaglichkeit führen. Mit Hilfe einer thermischen Gebäudesimulation wurde das Verhalten des ungedämmten reduziert-intensiven Daches (35cm Substrat) [DB-ri] mit Hilfe einer „äquivalenten Albedo“ modelliert. In der Kühlperiode (Zieltemp. 25°C) konnten ca. 4,8 kWh/m² an Kühlenergie eingespart werden, in der Heizperiode ergab sich ein Mehrverbrauch von 30 kWh/m² im Vergleich zu einem gedämmten Kiesdach mit einem U-Wert von 0,2. Diese Diskrepanz verdeutlicht, dass der Fokus der Begrünung auf dem sommerlichen Wärmeschutz liegt. Dennoch könnten durch eine gezielte Kombination aus Begrünungstyp und einem darauf abgestimmten Dämmniveau Synergieeffekte entstehen. Diese ermöglichen es unter Umständen, konventionelle Dämmstoff-stärken moderat zu reduzieren, sofern die thermische Gesamtperformance über das gesamte Jahr sowie insbesondere im Hinblick auf die Vermeidung von einem erhöhten Heizwärmebedarf (HWB) sichergestellt bleibt.

12.1.9 Transmission, Reflexion und Absorption

In Abbildung 71 ist die kurzwellige Strahlungsbilanz einer boden- sowie troggebundenen Fassadenbegrünung dargestellt. Diese umfasst die von der Sonne eintreffende kurzwellige Strahlung, die Wärmeabsorption durch Evapotranspiration, die transmittierte sowie die reflektierte Strahlung. Die abgebildeten Werte sind als Mittelwerte aus den Messkampagnen 2024 der jeweils gleichen Begrünungssysteme zu verstehen. Die genauen Werte der untersuchten Begrünungssysteme sind in Tabelle 21 und Tabelle 22 dargelegt bzw. im Teilbericht Datenkatalog je Standort einsehbar (Jalits et al. (2025).

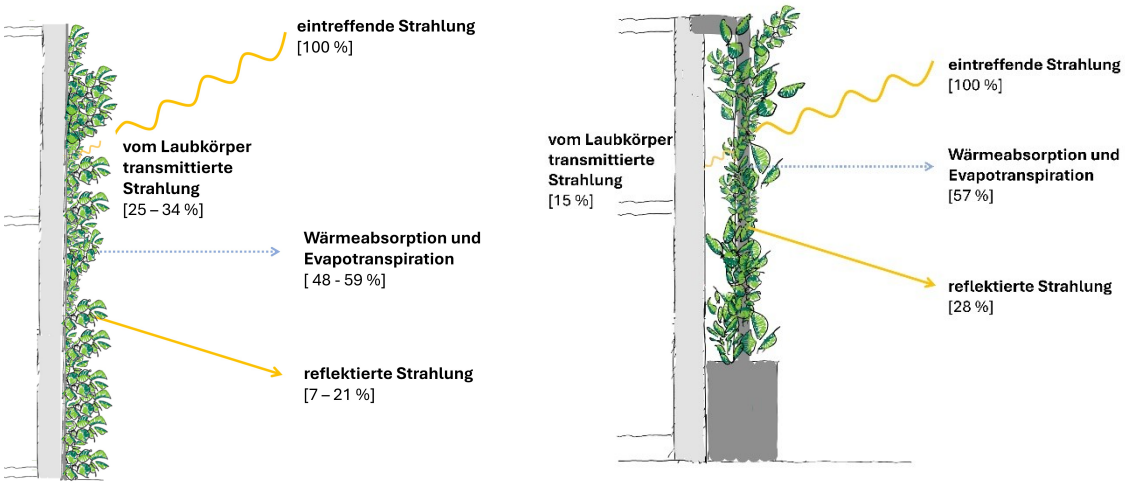


Abbildung 71: kurzwellige Strahlungsbilanz als Mittelwerte der in 2024 untersuchten boden- und troggebundenen Begrünungsobjekte (© IBLB).

Tabelle 21: Ermittelte Strahlungsdaten aus 2024 der bodengebundenen Begrünungsobjekte.

	BG Kräftner [FB2-bP]	**Lichtblau-Wagner [FB5-bP]**	**Privathaus Ternitz [FB6-bP]**	**BH Korneuburg [FB7-bW]**
Reflexion	15 %	19 %	7 %	21 %
Transmission	26 %	33 %	34 %	25 %
Absorption*	59 %	48 %	59 %	54 %

* ermittelt aus Messsensorik

Tabelle 22: Ermittelte Strahlungsdaten aus 2024 des troggebundenen Begrünungsobjekts.

	Amtshaus Margareten [FB1-tW]
Reflexion	28 %
Transmission	15 %
Absorption*	57 %

* ermittelt aus Messsensorik

In Abbildung 72 ist die kurzwellige Strahlungsbilanz wandgebundener Fassadenbegrünungen (modular bzw. lineares Wannensystem) dargestellt. In der Bilanz enthalten ist die eintreffende kurzwellige Strahlung, die Wärmeabsorption durch Evotranspiration, die transmittierte sowie die reflektierte Strahlung. Die angegebenen Werte sind Mittelwerte aus den Messkampagnen 2024 der jeweils gleichen Begrünungssysteme. Die ermittelten Werte der Untersuchungsobjekte sind in Tabelle 23 dargelegt.

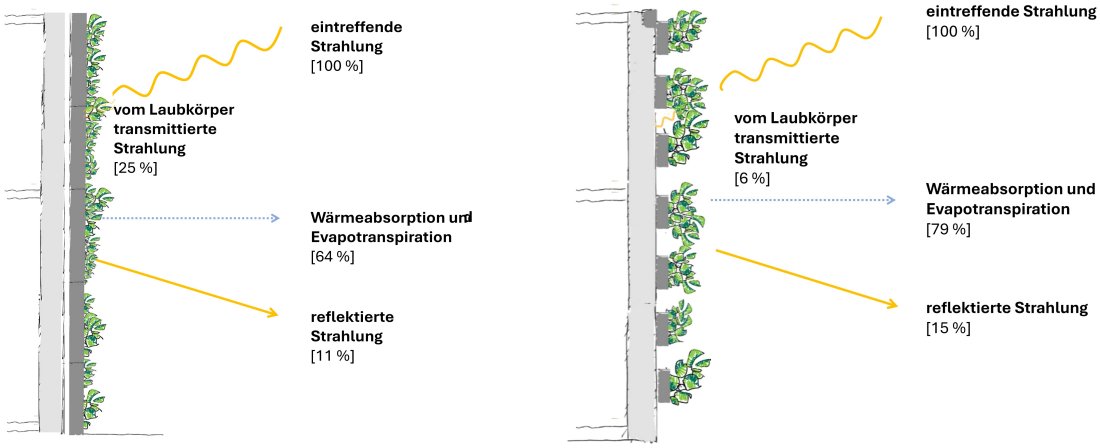


Abbildung 72: kurzwellige Strahlungsbilanz als Mittelwert der in 2024 untersuchten modularen und wandgebundenen Begrünungsobjekte (© IBLB).

Tabelle 23: Ermittelte Strahlungsdaten aus 2024 der modularen und wandgebundenen Begrünungsobjekte.

	Wien Energie [FB3-m]	**MA48 Gürtel [FB4-w]**
Reflexion	11 %	15 %
Transmission	25 %	6 %
Absorption *	64 %	49 %

* ermittelt aus Messsensorik

12.1.10 Anregungen aus den Stakeholder Workshops

Die engagierte Teilnahme an den HEWIG Workshops und die lebhaften Diskussionen führten zu verschiedenen Anregungen, die in der Datenanalyse noch umgesetzt werden konnten. Insbesondere wurden Beziehungsprüfungen zwischen Kennwerten angeregt, die teilweise erste Indikationen zulassen (z.B. das artspezifische Beziehungsgefüge zwischen projektivem Deckungsgrad und (W)LAI), während für andere Kennwertepaare auch im HEDIWG-Datensatz noch unzureichende Datenmengen zur Verfügung stehen.

Besonders hilfreich waren der Hinweis bzw. die Wunschäußerung, aus den Strahlungsbilanzdaten der Messkampagnen Transmission, Absorption, Reflexion (sowie Albedo) darzustellen. Diese Anregungen führten dazu, die verfügbaren Daten noch einmal eingehend zu reflektieren und den

die Strahlungsbilanz für alle HEDWIG-Standorte vollumfänglich abzubilden. Somit stehen die Bilanzdaten inkl. Albedo auch im Datenkatalog sowie in den Kennwertetabellen zur Verfügung.

Die Diskussion der Projektgruppe mit den Expert*innen im Rahmen der Stakeholder*innen-Workshops hat gezeigt, wie komplex die Bewertung ist. Faktoren wie Pflanzenvitalität, Pflegequalität, Materialwahl, Nutzer*innenverhalten, Standortbedingungen und Sensorik beeinflussen die Ergebnisse stark. Standardisierte Messmethoden sind ausschlaggebend, und dynamische Wachstumsmodelle und eine verbesserte Dokumentation sind anzustreben, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse weiter zu erhöhen. Besonders bei Beschattung und Dämmwerten wurde im Expert*innenaustausch deutlich, dass neue, präzisere Bewertungsparameter notwendig sind. Die Aussagen bestätigten, dass das HEDWIG-Ziel, eine Projekt-übergreifende standardisierte Messmethode zu entwickeln, auch von den Stakeholder*innen befürwortet bzw. stark unterstützt wird.

12.2 Erreichung der Forschungsziele

In Tabelle 24 wird die Erreichung der 5 HEDWIG-Projektziele dargelegt.

Tabelle 24: Erläuterungen zur Erreichung der HEDWIG-Projektziele.

HEDWIG-Projektziele	**Erreichung [JA/NEIN]**
Ziel 01: Generierung von Messdaten im Außenraum	**JA**
01.1 | Anwendung und Validierung des HEDWIG-Messkonzepts an 15 Standorten: Dauermessungen und Messkampagnen zur Erfassung von Vegetationsparametern und energiehaushaltsrelevanten Parametern;	Das HEDWIG-Messkonzept kam an 14 Standorten mit i**nsgesamt 16 Objekten** (adulte Dach- und Fassadenbegrünungen) zur Anwendung. Es wurden Dauermessungen im Außen- und im Innenraum durchgeführt. Vegetations- und energiehaushaltsrelevante Parameter wurden im Rahmen von Messkampagnen erhoben.
01.2 | Bewertung des Mikroklimas, thermische Komfort im Außenraum und ihre Zusammenhänge mit den vorhandenen Grünstrukturen an Dach und Fassade sowie den klimatischen Bedingungen.	Das Mikroklima im Außenraum wurde in Abhängigkeit der Grünstrukturen bewertet und in Bezug zu den klimatischen Gegebenheiten gestellt. Als Kenngröße wurde die physiologische Äquivalenztemperatur (PET) gewählt. Diese wurde mit einer Näherungsformel errechnet, welche u.a. die Strahlungsbilanz beinhaltet.
Ziel 02: Generierung von Messdaten im Innenraum	**JA**
02.1 | Anwendung und Validierung des HEDWIG-Messkonzepts im Innenraum:	Das HEDWIG -Messkonzept kam an 6 Standorten, 4 Fassadenbegrünungen und 2

Messkampagnen mit Dauermessungen zur Erfassung des Innenraummikroklimas und Bewertung der thermischen Behaglichkeit;	Dachbegrünungen in insgesamt 7 Räumen in Form von Dauermesssungen zum Einsatz. Es erfolgte eine Berechnung von genormten Behaglichkeitsindizes.
02.2 | Thermische Gebäudesimulation für Referenzszenarien und zur Wirkungsabschätzung mit und ohne Begrünung (Wärmeeinträge, Wärmeverluste).	Es wurden zwei repräsentative Simulationsmodelle entwickelt, welche eine troggebundene Fassadenbegrünung sowie ein klassisches Dachbegrünungssystem abbilden. Sie wurden mit unbegrünten, simulierten Varianten verglichen zur Ermittlung energetischer Differenzwerte.
Ziel 03: Schaffung einer standardisierten Datenbasis	**JA**
03.1 | Entwicklung und Anwendung eines standardisierbaren HEDWIG-Analysekonzepts;	Für die HEDWIG-Daten wurde ein Standard-Analysekonzept getrennt nach Daten aus dem Dauermonitoring und den Messkampagnen für den Außenraum sowie für den Innenraum entwickelt. Dieses wurde für alle Messobjekte zur Anwendung gebracht. In der Analyse berücksichtigt wurden: • Boden-, trog- und wandgebundene sowie modulare Grünfassadensysteme; • extensive, intensive und reduziert-intensive Gründachsysteme; • 8 Gebäudekategorien: Wohnhaus, Bürogebäude, Gewerbe, Dienstleistung, Universität, Hotel, Ausbildungsstätte bzw. (Fort-)Bildungseinrichtung, Amtsgebäude
03.2 | Ableitung eines HEDWIG-Datenkatalogs zu mikroklima- und energiehaushaltsrelevanten Vegetationsparametern	Mit dem **HEDWIG-Datenkatalog** und den **HEDWIG-Kennwertetabellen** aus den Messkampagnen (Kapitel 7) liegt nun ein Datensatz zu insgesamt 16 adulten Dach- und Fassadenbegrünungsobjekten vor. Dieser umfasst die untersuchten Pflanzenarten *Wisteria sinensis, Parthenocissus tricuspidata*, Gräser-Kräuter-Stauden- und Sedumgesellschaften und ihre für Mikroklima und Energiehaushalt relevanten Parameter.
03.3 | Ableitung eines HEDWIG-Datenkatalogs zu Messelementen zur Wirkungsabschätzung von Bauwerksbegrünungen für den Gebäudeinnen- und -außenraum.	Im **HEDWIG-Datenkatalog** und den **HEDWIG-Kennwertetabellen (Kapitel 7)** aus dem Dauermonitoring sind Messelemente und relevante Parameter zur Wirkungsabschätzung von 8 Fassaden- und 8 Dachbegrünungsobjekten abgebildet. **HEDWIG-Datenkatalog:**

	• Energieeintrag Monatssummen • Solare Einstrahlung mit Grünverschattungsfaktor im Jahresverlauf (*Bioshading Coefficient* BSC) • Hitzewellen mit Luft-T, Luft-F und Solarstrahlung (Tagesgänge) • Wärmedurchfluss im Dachsubstrat mit Luft-T und Niederschlag für Sommer- und Winterperioden • ausgewählte Regenereignisse mit Wärmedurchfluss im Dachsubstrat, Luft-T und Niederschlag (Tagesgänge) • Innenraummessungen, thermische Behaglichkeit Sommerfall, Korrelation Raumluft- und Oberflächentemperaturen Sommer/Winter **HEDWIG-Kennwertetabellen:** • Solare Einstrahlung Monatsmittel • *Bioshading Coefficient* BSC Monatsmittel
Ziel 04: Standardisier-, reproduzier- und übertragbare Messmethodik und Analyseverfahren	**JA**
04.1 | Validierung und Optimierung des HEDWIG-Mess- und Analysekonzepts für die Übertragbarkeit und Reproduzierbarkeit;	Das HEDWIG-Messkonzept wurde im Projektverlauf validiert und laufend optimiert. Die Anwendung auf 14 Standorten (Wien und Niederösterreich) mit insgesamt 16 Messobjekten belegt die Übertragbarkeit. Die Reproduzierbarkeit ist durch die detaillierte Dokumentation und Arbeitsanleitung (Kapitel 5) und den Empfehlungen zum praxistauglichen Monitoring/Messkampagnen (Kapitel 10) im vorliegenden Bericht gegeben.
04.2 | Dokumentierte Arbeitsanleitung zum HEDWIG-Mess- und Analyseverfahren zur Wirkungsabschätzung für den gesamten Prozess: Mess-Setup, Datengenerierung, Datenmanagement, Datendarstellung, Interpretation, Ableitung und Bewertung der Kennwerte.	Die HEDWIG-Mess- und Analyseverfahren wurden im vorliegenden Bericht im Detail in Kap. 5 dokumentiert. Damit liegt eine Arbeitsanleitung vor. Konkrete Empfehlungen für ein praxistaugliches Monitoring bzw. Messkampagnen finden sich in Kapitel 10. Die wissenschaftliche Repräsentativität ist bei eingeschränkter Messpunkteanzahl je Standort/Objekt sowie einer Vielzahl von Standorten eingeschränkt. Dies war in HEDWIG vorgegeben durch den budgetären Rahmen.

Ziel 05: Ableitung von Kennwerten zur Wirkungsabschätzung von Gründächern und -fassaden	**JA**
05.1 | Generierung vergleichbarer, standort-unabhängig gültiger Kennwerte zur mikroklimatischen Performanz im Innen- und im Außenraum als Open-Content-Verfügbarkeit;	Im HEDWIG-Projekt wurden wertvolle, bisher nicht verfügbare Kennwerte zur Performanz von Gebäudebegrünungen im Innen- und im Außenraum generiert, die eine **wegweisende Grundlage und Orientierung** darstellen. Es ist zu betonen, dass diese Kennwerte weder standort- noch objektunabhängig sind, sondern ganz klar durch die individuellen Orts-, Gebäude und Raumsituationen und die Systeme bzw. Systemtechnologien beherrscht sind. Dennoch haben sie hohe Aussagekraft, und die Gebäudebegrünungstypen werden damit untereinander vergleichbar. Die Kennwerte und Datensätze sind als Open Content im vorliegenden Bericht sowie in 3 Zenodo-Datenpublikationen (Bintinger et al. 2026, Jalits et al. 2026, Mezger et al. 2026) verfügbar.
05.2 | Ableitung von wirkungsrelevanten Kenngrößen und Wechselwirkungen von Grünstrukturen im Außenraum;	Aus den HEDWIG-Dauermonitoring- und Messkampagnen konnten wirkungsrelevante Kenngrößen anhand von exemplarischen Messobjekten abgeleitet werden, die die Wechselwirkungen von Grünstrukturen im Außenraum aussagekräftig beschreiben. Im **HEDWIG-Datenkatalog** und in den **HEDWIG-Kennwertetabellen (Kapitel 7)** liegt ein Set von Kenngrößen für die Pflanzenarten *Wisteria sinensis, Parthenocissus tricuspidata*, Gräser-Kräuter-Stauden- und Sedumgesellschaften vor. Diese umfassen: • Pflanzenvitalität (Vit); • Zieldeckungsgrad und projektiver Deckungsgrad (DG_{Ziel}, DG_{proj}); • (Wand-)Blattflächenindex (W)LAI; • kubisches Pflanzenvolumen (V_{kub}); • stomatäre Leitfähigkeit (g_s) und Transpirationsrate (E); • Blatttemperatur $T_{leaf;}$ • Oberflächentemperatur am Infrarotwärmebild; • Strahlungsbilanzdaten (kurzwellig, langwellig, eingehend und emittierend);

	• Transmission; Reflexion (sowie Albedo) und Absorption.
05.3 | Rückschlüsse auf die Verringerung von Wärmeeinträgen oder Wärmeverlusten durch Gründächer und -fassaden im Innenraum;	Auf Basis von Messdaten-validierten thermischen Gebäudesimulationen wurde die Bandbreite potenzieller Wärmegewinne und Wärmeverluste für den Sommer- und Winterfall detailliert quantifiziert (Kapitel 6.2).
05.4 | Empfehlungen für standardisierte Kenngrößen, für ihre praxistaugliche Erhebung (indirekte Verfahren) und Bewertungsansätze sowie zur Weiterentwicklung bzw. Integration in bestehende Modelle und Bewertungsverfahren (z.B. Energieausweis, Passivhaus-Standard, div. Nachhaltigkeitsstrategien).	Es wurden Empfehlungen zur praxistauglichen, einfach anwendbaren Erhebung von standardisierten Kenngrößen abgeleitet und bewertet (Kapitel 10). Die Integration der Ergebnisse in etablierte Bewertungsverfahren lässt sich primär durch die Anwendung des in Kapitel 8 hergeleiteten dynamischen Verschattungskoeffizienten F_{bs} realisieren. Dieser Kennwert ermöglicht eine differenzierte Berücksichtigung Verschattungs-elemente mit Pflanzen in Energieausweis-berechnungen. Darüber hinaus bilden die Berechnungen aus Kapitel 7 und die Kennwertetabellen aus Kapitel 8 eine belastbare Datenbasis für die Parametrisierung und Weiterentwicklung thermischer Gebäudesimulationen.

12.3 *Learnings* und Empfehlungen für weitere Feldstudien an Realobjekten zur Erhöhung/Erreichung der wissenschaftlichen Validität

Feldstudien an Realobjekten ermöglichen wichtige Erkenntnisse und Aussagen bezüglich konkreter Effekte und sind eine unverzichtbare Datengrundlage für Simulationen, Modellierungen und deren Kalibrierung bzw. Validierung. Gleichzeitig liegt hier nicht die Möglichkeit für ungestörte Messungen und konsistente Datenlagen vor, wie sie in Laboren unter kontrollierten Bedingungen erreicht werden könne.

Limitationen, die im Rahmen von HEDWIG transparent wurden, wurden in Kap. 11 adressiert. Insbesondere die nicht realisierbare Messpunktwiederholung bedeutet eine Einschränkung der wissenschaftlichen Validität. Um statistisch und wissenschaftlich valide Daten zu generieren, wird daher empfohlen, bei künftigen Monitoringvorhaben die Standortanzahl begrenzt zu halten (oder ein dafür ausreichend hohes Budget zur Verfügung zu stellen) und die Standorte mit ausreichenden Messpunktwiederholungen auszustatten.

Nach den Erfahrungen im HEDWIG-Projekt ist dies vermutlich weniger leicht bis nicht an Realstandorten umzusetzen, alternativ können dafür geeignete Feldversuchsstationen oder Prüfstandorte zum *Long-term-Monitoring* eingerichtet werden. Voraussetzung sind jedoch auch geeignete

Standortsituationen (Schutz vor Vandalismus/Diebstahl, mechanische Einwirkungen) und ausreichende Budgetausstattung, Ressourcenverfügbarkeit bzw. adaptierte Forschungsziele.

Insgesamt lassen sich aus den bisher angeführten Herausforderungen und Limitationen bezüglich Messtechnik und Sensorik folgende Learnings feststellen bzw. Anpassungen ableiten:

1. Das parallel im selben Programm beauftragte **„Schwestern-"-Projekt MARGRET** stellt eine wertvolle und bedeutsame Ergänzung zum Projekt HEDWIG dar. Nicht nur ergänzen sich die Projekte hervorragend durch die unterschiedlichen Schwerpunkte auf adulte (HEDWIG) vs. juvenile (MARGRET) Bauwerksbegrünungen, sondern die Messungen an standardisierten Prüfboxen ermöglichen die Bewertung der Messdaten gegenüber ident ausgestatteter Referenzräume, die bei Realobjekten nicht verfügbar sind. Außerdem ist die Sensorausstattung an den MARGRET-Prüfboxen ungleich besser und umfangreicher bei deutlich weniger Ressourcenaufwand und Kosten.
2. Umgekehrt besteht die **Schwierigkeit bei Prüfboxen und mobilen, juvenilen Strukturen, dass sich die Grünkörper nicht ungestört etablieren können** und keine bodengebundenen Systeme eingesetzt werden können. Es können daher keine Kennwerte und Einschätzungen der Wirkungen für optimal entwickelte Begrünungsstrukturen erzielt werden und Störungen im Monitoring-Verlauf müssen in Kauf genommen werden.
3. **1 Vegetationsperiode ist jedenfalls zu kurz**, um valide und verlässliche Daten zu generieren, sei es durch Einschränkungen in der Standortzugänglichkeit, Sensorverfügbarkeit, Start- oder Installationsschwierigkeiten oder ungeplante Datenausfälle, oder auch durch Ausfälle der Grünstrukturen, Einschränkungen ihrer Vitalität bzw. durch ungeplante Eingriffe.
4. Es sind unbedingt **Vorlaufzeiten** einzurichten und notwendig, um die Sensorpositionen, -installationen, Messpunktprüfungen, Messabläufe ect. zu optimieren und den gewünschten Messzeitraum vollständig und ungestört abdecken zu können. Für Messanlagen mit juvenilen Strukturen sind jedenfalls mind. 2 vollständige Vegetationsperiode einzuplanen für die Vorkultur.
5. Für HEDWIG stellte der Budgetrahmen eine **Limitation hinsichtlich der hohen Anzahl an Messstandorten** dar, was wiederum die Anzahl der Sensorik vor Ort limitierte. Da die hier vorgestellten Ergebnisse nur punktuelle Messungen abbilden, stellen die ermittelten Werte lediglich **Indikatorwerte** dar. Für Folgeprojekte ist daher anzudenken, entweder das zur Verfügung stehende Budget aufzustocken oder die Anzahl der Messparameter so weit zu reduzieren, dass aussagekräftige und belastbare Erhebungen mit Messpunktwiederholungen auch bei Dauermessungen ermöglicht werden.

Forschungsbedarf besteht:

(A) in der **hygrothermischen Kopplung,** also dem direkten Einfluss des Wasserhaushalts bei Gründächern auf die energetische Performanz. Es fehlen **belastbare Kennwerte zur Evapotranspiration und zur Abflussdynamik unter sommerlichen Hitze- und Trockenperioden**, um die tatsächliche Verdunstungsleistung gegenüber der rein passiven Verschattung quantifizieren zu können. Zudem ist die **komplexe Strahlungsbilanz** begrünter Fassaden und Dächer unzureichend dokumentiert. Darüber hinaus besteht eine signifikante Datenlücke bei den

substratspezifischen Kennwerten (Wärmeleitfähigkeit, spez. Wärmekapazität) in Abhängigkeit vom Sättigungsgrad. Da die thermische Trägheit und die Dämmwirkung des Aufbaus direkt vom aktuellen Feuchtegehalt gesteuert werden.

(B) Der Vergleich unterschiedlicher Forschungsprojekte zeigt, dass unterschiedliche Messgeräte zur Ermittlung des gleichen Parameters zum Einsatz kommen. Dies ist zum einen durch finanzielle Ressourcen, Verfügbarkeit sowie Handhabung beim Einsatz zu begründen. Wie sich dies jedoch auf Messergebnisse auswirkt, ist bislang unklar. Vergleicht man nun daher selbst erhobene Messdaten mit anderen Publikationen, bleibt es unsicher, wie valide die Werte sind. Aus diesem Grund gilt es anzudenken, diesen Umstand zum Forschungsfokus zu machen, indem man pro **Parameter die am häufigsten verwendeten Messgeräte einem direkten Vergleich** zuführt.

(C) Projektintern wurde mehrfach diskutiert, dass es ratsam ist, möglichst viel eintreffende Sonnenstrahlung durch die horizontale Ausrichtung der Strahlungssensoren abzubilden. Für Fassaden ist jedoch die vertikale Ausrichtung zu empfehlen (vergleiche Projekt GLASGrün, Stangl et al. 2025) allein schon wegen dem Öffnungswinkel der Sensorik. Bei horizontalen Solarstrahlungsmessungen könnte man ein Umrechnung ins Auge fassen, wenn man den vertikalen Einfall wissen möchte, das führt aber zu Ungenauigkeiten und zusätzlichem Aufwand. Um Messwerte zu generieren und aussagekräftige Empfehlungen treffen zu können, ist ein **direkter Vergleich von waagrecht sowie senkrecht ausgerichteten Strahlungssensoren** an einer oder mehreren vertikalen Begrünungsobjekten durchzuführen. Prinzipiell wird vorgeschlagen, die vertikale Ausrichtung als Standard einzurichten, da sich dies mittlerweile auch in internationalen Studien etabliert hat.

(D) Innerhalb des HEDWIG-Projektes konnten keine eindeutigen **Muster bezüglich Trockenstress** abgeleitet werden. Hier bedarf es konkreter Beforschung, um die Reaktionen und die Hintergründe zu verstehen. Reaktionen verschiedener Pflanzenarten und -typen auf **Trockenstress, als auch auf verschiedene Bewässerungsszenarien** sowie Effekte verschiedener Aufbauten, Substrattypen und Dynamiken bei freier Umwitterung sind weitgehend unbeforscht, jedoch wichtige Grundlagen, um einerseits die Leistung von Gründächern konkret steuern und optimieren zu können, und andererseits die Wirkungen bezüglich Abstrahlung und Einfluss auf die Gebäudehülle im Detail zu verstehen.

13 Verzeichnisse

13.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prozessgrafik Projekt HEDWIG (© IBLB). 20

Abbildung 2: Messkonzept Fassadenbegrünungen, Beispiel modulares Begrünungssystem (© IBLB). 21

Abbildung 3: Messkonzept Fassadenbegrünungen, Beispiel extensives Gründach (© IBLB). 21

Abbildung 4: Auszug Übersichtsmatrix für die Standortbewertung (© IBLB). 23

Abbildung 5: Prozessbaum zur Auswahl der Fassadenbegrünungsobjekte (© IBLB). 24

Abbildung 6: Prozessbaum zur Auswahl der Dachbegrünungsobjekte (© IBLB). 25

Abbildung 7: Schematische Verortung der Messobjekte für Dauermessung (grün) sowie Messkampagnen (blau) (© IBLB). 25

Abbildung 8: MS WRS305 [Wetterstation] und EKO ML-02-5P [Pyranometer], in 1,5m von Pflanzkörper entfernt (©IBLB). 31

Abbildung 9: links: Luft-T und Luft-F-Sensor: SenseCAP S2101, Mitte: Boden-T und Boden-F-Sensor: SenseCAP S2104, rechts: Wärmedurchflusssensor Hukseflx HPF01 (©IBLB). 31

Abbildung 10: Sensorergänzung (2024): Pyranometer hinter dem Pflanzenkörper (©IBLB). 32

Abbildung 11: Strahlungsintensität der Sonnenstrahlung mit Strahlungssensor Spektrum (Bildquelle: wikicommons, verändert). 42

Abbildung 12: Amtshaus Margareten, Verortung Messpunkte (©IBLB). 43

Abbildung 13: Bürogemeinschaft Kräftner, Verortung Messpunkte (©IBLB). 44

Abbildung 14: Kraftwerk Simmering, Verortung Messpunkte (©IBLB). 45

Abbildung 15: MA 48, Verortung Messpunkte (©IBLB). 46

Abbildung 16: Lichtblau Wagner, Verortung Messpunkte (©IBLB). 47

Abbildung 17: Privathaus Ternitz, Verortung Messpunkte (©IBLB). 48

Abbildung 18: BH Korneuburg, Verortung Messpunkte (©IBLB). 49

Abbildung 19: Hotel Gilbert, Verortung Zugangspunkte (©IBLB). 50

Abbildung 20: Steinbauer Development, extensiv - Verortung Messpunkte (Bildquelle: Google Maps Dezember 2025, verändert) 51

Abbildung 21: Steinbauer Development, intensiv - Verortung Messpunkte (Bildquelle: Google Maps Dezember 2025, verändert) 52

Abbildung 22: HTL St. Pölten, extensive Dachbegrünung - Verortung Messpunkte (Bildquelle: Google Maps Dezember 2025, verändert). 53

Abbildung 23: HTL St. Pölten, reduziert-intensive Dachbegrünung - Verortung Messpunkte (Bildquelle: Google Maps Dezember 2025, verändert)..... 54

Abbildung 24: Ilse-Wallentin-Haus BOKU University, extensive Dachbegrünung - Verortung Messpunkte (Bildquelle: Google Maps Dezember 2025, verändert)..... 55

Abbildung 25: Klangforum Wien, reduziert-intensive Dachbegrünung - Verortung Messpunkte (Bildquelle: Google Maps Dezember 2025, verändert)..... 56

Abbildung 26: Die Garten Tulln, extensive Dachbegrünung - Verortung Messpunkte (Bildquelle: Google Maps Dezember 2025, verändert)..... 57

Abbildung 27: Gregor-Mendel-Haus BOKU University, extensive Dachbegrünung - Verortung Messpunkte (Bildquelle: Google Maps Dezember 2025, verändert)..... 58

Abbildung 28: Monatliche Gegenüberstellung der mittleren Lufttemperatur beim Messobjekt Steinbauer Development GmbH, extensiv und intensiv [DB1-e und DB1-i] und jener der GeoSphere Austria, Wien Innere Stadt (© IBLB). 71

Abbildung 29: Regression von Lufttemperatur und Luftfeuchte am Beispiel Steinbauer Development GmbH, extensiv sowie intensiv [DB1-e und DB1-i] sowie den Messdaten der Geosphere, Wien Innere Stadt (© IBLB). 73

Abbildung 30: Monatliche Gegenüberstellung der mittleren Lufttemperatur beim Messobjekt HTL St. Pölten, extensiv und reduziert-intensiv [DB2-e und DB2-ri] und jener der GeoSphere Austria (© IBLB)..... 74

Abbildung 31: Monatliche Gegenüberstellung der mittleren relativen Luftfeuchte beim Messobjekt HTL St. Pölten, extensiv und reduziert-intensiv [DB2-e und DB2-ri] und jener der GeoSphere Austria (© IBLB)..... 76

Abbildung 32: Monatliche Gegenüberstellung der mittleren Solarstrahlung beim Messobjekt HTL St. Pölten, extensiv und reduziert-intensiv [DB2-e und DB2-ri] und jener der GeoSphere Austria (© IBLB)..... 78

Abbildung 33: Regressionen der Tagesmittelwerte von Lufttemperatur, relativer Luftfeuchtigkeit und solarer Einstrahlug zwischen den untersuchten Wetterstationen HTL St. Pölten Extensivdach (EX), Intensivdach (INT), Referenzdach (REF) und der Geosphere Landhaus St. Pölten (GS) (© IBLB). 81

Abbildung 34: Übertemperatur und Übertemperaturgradstunden bei einer Temperaturschwelle von 25°C, Sommer 2024 (© IBO). 84

Abbildung 35: links: Frontansicht Messobjekt Amtshaus Margareten, rechts: Darstellung Simulationsmodell IDAICE (© IBO)..... 85

Abbildung 36: Scatterplot Juli-August 2024, Oberflächentemperaturen; Fassadenbegrünung troggebunden, *W. sinensis*, Amtshaus Margareten [FB1-tW] (© IBO). 86

Abbildung 37: Kühlbedarf und Einsparung, Simulationsergebnisse bei unterschiedlichen Wandstärken; Fassadenbegrünung troggebunden, *W. sinensis*, Amtshaus Margareten [FB1-tW] (© IBO)..... 87

Abbildung 38: Kühlbedarf und Einsparung, Simulationsergebnisse: Vergleich mit Fenster ohne Sonnenschutz; Fassadenbegrünung troggebunden, *W. sinensis*, Amtshaus Margareten [FB1-tW] (© IBO). 88

Abbildung 39: links: Simulationsmodell Zone 1, rechts: reduziert-intensive Dachbegrünung, HTL St. Pölten [DB2-ri] (© IBO). 90

Abbildung 40: Einfluss der Albedo, Simulationsergebnisse; reduziert-intensive Dachbegrünung, HTL St. Pölten [DB2-ri] (© IBO). 91

Abbildung 41: Mittlere quadratische Abweichung der Simulationsergebnisse zu Oberflächentemperaturmessungen; reduziert-intensive Dachbegrünung, HTL St. Pölten [DB2-ri] (© IBO). 92

Abbildung 42: Systematische Abweichung der Simulationsergebnisse zu Oberflächentemperaturmessungen; reduziert-intensive Dachbegrünung, HTL St. Pölten [DB2-ri] (© IBO). 93

Abbildung 43: Temperaturverläufe der Simulationsvarianten zu in-situ Messung; reduziert-intensive Dachbegrünung, HTL St. Pölten [DB2-ri] (© IBO). 94

Abbildung 44: Simulationsergebnisse monatlicher Kühlenergiebedarf; reduziert-intensive Dachbegrünung (ohne Dämmung) im Vergleich zur Referenz gedämmtes Kiesdach HTL St. Pölten [DB2-ri] (© IBO). 95

Abbildung 45: Simulationsergebnisse monatlicher Heizenergiebedarf; reduziert-intensive Dachbegrünung (ohne Dämmung) im Vergleich zur Referenz (gedämmtes Kiesdach), HTL St. Pölten [DB2-ri] (© IBO). 96

Abbildung 46: Eigenauswertung, Wärmeleitfähigkeit und spez. Wärmekapazität Substrat Optigrün, intensiv-Substrat; Datenquelle: Häusler et al. 97

Abbildung 47: Diagramm für 2024: Simulationsergebnisse, Variation Substratfeuchte, Klimadaten 2024; reduziert-intensive Dachbegrünung, HTL St. Pölten [DB2-ri] (© IBO). 98

Abbildung 48: Diagramm für 2025: Simulationsergebnisse, Variation Substratfeuchte, Klimadaten 2025; reduziert-intensive Dachbegrünung, HTL St. Pölten [DB2-ri] (© IBO). 98

Abbildung 49: Überblick über die HEDWIG-Fassaden- und Dachbegrünungssysteme (© IBLB). 99

Abbildung 50: Schematische Verortung und geografische Lage der HEDWIG Messstandorte (© IBLB). 100

Abbildung 51: Diversität der untersuchten Gebäudetypen (1 Wohnhaus, 2 Bürogebäude, 3 Gewerbe, 4 Dienstleistung, 5 Universität, 6 Hotel, 7 Ausbildungsstätte bzw. (Fort-)bildungseinrichtung, 8 Amtsgebäude) (© IBLB). 100

Abbildung 52: Kennwertetabelle 1 von 2 aus den Tages-Messkampagnen für Fassadenbegrünung mit Vegetationsparametern und mikroklimatischen Parametern (Tagesmittelwerte) (© IBLB). .. 102

Abbildung 53: Kennwertetabelle 2 von 2 aus den Tages-Messkampagnen für Fassadenbegrünung mit Vegetationsparametern und mikroklimatischen Parametern (Tagesmittelwerte) (© IBLB). .. 103

Abbildung 54: Kennwertetabelle 1 von 2 aus Tages-Messkampagnen für Dachbegrünungen mit Vegetationsparametern und mikroklimatischen Parametern (Tagesmittelwerte) (© IBLB). 105

Abbildung 55: Kennwertetabelle 2 von 2 aus Tages-Messkampagnen für Dachbegrünungen mit Vegetationsparametern und mikroklimatischen Parametern (Tagesmittelwerte) (© IBLB). 106

Abbildung 56: Kennwertetabelle Solarstrahlung (Monatsmittel) für Fassadenbegrünungen aus dem Dauermonitoring (© IBLB). 108

Abbildung 57: Kennwertetabelle *Bioshading Coefficient* (Monatsmittel) für Fassadenbegrünungen und dem Messobjekt Dachbegrünung in St. Pölten aus dem Dauermonitoring (© IBLB). 109

Abbildung 58: Kennwertetabelle Wärmedurchfluss unter Substrat- und Substratfeuchte (Monatsmittel mit Standardabweichungen) für Dachbegrünungen aus dem Dauermonitoring (© IBLB)..... 110

Abbildung 59: Kennwertetabelle Raumlufttemperatur sowie Oberflächentemperatur für den Innenraum aus dem Dauermonitoring der Fassadenbegrünungsobjekte (© IBO)..... 111

Abbildung 60: Kennwertetabelle Raumlufttemperatur sowie Oberflächentemperatur für den Innenraum aus dem Dauermonitoring der Dachbegrünungsobjekte (© IBO). 112

Abbildung 61: Punktwolke und linearer Regressionsfit von WLAI und PC (projektiver Deckung) aus dem Datensatz HEDWIG für *W. sinensis* und *P. tricuspidata* (© IBLB). 115

Abbildung 62: Punktwolke und linearer Regressionsfit von WLAI und PC aus dem Datensatz HEDWIG und GLASGrün für *W. sinensis* und *P. tricuspidata* aus HEDWIG (© IBLB)..... 116

Abbildung 63: Punktwolke und linearer Regressionsfit von WLAI und PC aus dem Datensatz HEDWIG + GLASGrün + TrögeWien (Zieldeckungsgrad PCTa) für *W. sinensis* und *P. tricuspidata* aus HEDWIG (© IBLB). 116

Abbildung 64: Punktwolke und linearer Regressionsfit von WLAI und PC aus dem Datensatz HEDWIG + GLASGrün + TrögeWien (projektiver Deckungsgrad PCPj) für *W. sinensis* und *P. tricuspidata* aus HEDWIG (© IBLB)..... 117

Abbildung 65: Transpirationsraten (2024) für die Fassadenbegrünungen im Vergleich in l/h/m², sowie hochgerechnet mit LAI und projektivem Deckungsgrad am Quadratmenter (© IBLB)..... 118

Abbildung 66: Tagesgänge der physiologisch äquivalenten Temperatur (PET) an zwei Standorten. Oben: MA48 [FB4-w] am 19.06.2024 mit Referenzfassade und Grünfassade, jeweils „vor“ und „hinter“ der Begrünung; Unten: Steinbauer am 05.07.2024 mit Intensiv- und Extensivdach [DB1-e, DB1-i] (© IBO). 124

Abbildung 67: Adaptive thermische Behaglichkeit nach ÖNORM EN 16798-1, alle Dauermessstandorte (FB1-tW, FB2-bP, FB3-m, FB4-w, DB1-e, DB1-i, DB2-e, DB2-ri) (© IBO). 127

Abbildung 68: Thermische Behaglichkeit nach Freymark und Leusden (1951), alle Dauermessstandorte (© IBO). 127

Abbildung 69: Übersicht der Veranstaltungen für konstruktiven Fachaustausch im Rahmen des Forschungsprojektes HEDWIG. 137

Abbildung 70: Gegenüberstellung Absolute und Relative Luftfeuchte, Hitzewelle 29.06. - 03.07.2025 [Wien Energie Kraftwerk Simmering] (© IBLB). 152

Abbildung 71: kurzwellige Strahlungsbilanz als Mittelwerte der in 2024 untersuchten boden- und troggebundenen Begrünungsobjekte (© IBLB). 159

Abbildung 72: kurzwellige Strahlungsbilanz als Mittelwert der in 2024 untersuchten modularen und wandgebundenen Begrünungsobjekte (© IBLB). 160

13.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kerninformationen aller Dauermessobjekte (Fassade sowie Dach). 26

Tabelle 2: Kerninformationen aller Objekte für Messkampagnen (Fassade sowie Dach). 26

Tabelle 3:Dauermesssensorik Fassadenbegrünungen. 28

Tabelle 4: Dauermesssensorik Dachbegrünung. 29

Tabelle 5: Übersicht der berücksichtigten ZAMG-Stationen in Wien und Umgebung. 30

Tabelle 6: Übersicht Erhebung und Sensorik der Vegetationsparameter und mikroklimatische Parameter während der Messkampagnen an Fassadenbegrünungen. 33

Tabelle 7: Übersicht Erhebung und Sensorik der Vegetationsparameter und mikroklimatischen Parameter während der Messkampagnen an Dachbegrünungen. 35

Tabelle 8: Verwendete Sensorik für die Innenraummessungen. 60

Tabelle 9: Rahmenbedingungen Simulationsparameter (Fassadenbegrünung troggebunden, Amtshaus Margareten). 65

Tabelle 10: Definition der Simulationsszenarien Fassadenbegrünung, thermische Trägheit und Begrünungseffekte. 66

Tabelle 11: Definition der Simulationsparameter (Dachbegrünung reduziert-intensiv, HTL St. Pölten). 66

Tabelle 12: Unterschiede in Temperatur (Δ Temp) und Luftfeuchtigkeit (Δ Airh) zwischen den untersuchten Wetterstationen Steinbauer Extensivdach (EX) und Intensivdach (INT) und GeoSphere Austria Innere Stadt (GS). 71

Tabelle 13: Unterschiede der Temperatur (Δ Temp) zwischen den untersuchten Wetterstationen HTL St. Pölten Extensivdach (EX), Intensivdach (INT), Referenzdach (REF) und der Geosphere Landhaus St. Pölten (GS). 75

Tabelle 14: Unterschiede in Luftfeuchtigkeit (Δ Airh) zwischen den untersuchten Wetterstationen HTL St. Pölten Extensivdach (EX), Intensivdach (INT), Referenzdach (REF) und der Geosphere Landhaus St. Pölten (GS). 77

Tabelle 15: Unterschiede der solaren Einstrahlung (Δ Isol) zwischen den untersuchten Wetterstationen HTL St. Pölten Extensivdach (EX), Intensivdach (INT), Referenzdach (REF) und Geosphere Landhaus St. Pölten (GS)..... 79

Tabelle 16: Zuordnung der Bereiche der physiologischen Äquivalenztemperatur (PET) nach thermischer Wahrnehmung und Belastungsgrad nach Matzarakis et Mayer 1996). 125

Tabelle 17: Empfehlungen zur effizienten und einfach anwendbaren Erhebung von Vegetationsparametern und Kennwerten des Vegetationskörpers über Messkampagnen (methodische Details siehe Kapitel 5, *jedenfalls zu erheben; Erhebungszeitpunkt erfolgt optimalerweise zum saisonalen Peak der Vegetationsperiode, kann aber auch zu anderen definierten und dokumentierten Zeitpunkten erfolgen). 139

Tabelle 18: Empfehlungen zur Erhebung von mikroklimatischen Kennwerten über Dauermonitoring (methodische Details siehe Kapitel 5, *jedenfalls zu erheben; Erhebungszeitpunkt erfolgt optimalerweise zum saisonalen Peak der Vegetationsperiode, kann aber auch zu anderen definierten und dokumentierten Zeitpunkten erfolgen). 141

Tabelle 19:Empfehlungen zur Erhebung der thermischen Behaglichkeit über Dauermonitoring oder Messkampagnen (methodische Details siehe Kapitel 5)..... 145

Tabelle 20: Gegenüberstellung Mittelwerte der absoluten und relativen Luftfeuchte, Hitzewelle 29.06. - 03.07.2025 [Wien Energie Kraftwerk Simmering]. 153

Tabelle 21: Ermittelte Strahlungsdaten aus 2024 der bodengebundenen Begrünungsobjekte..... 159

Tabelle 22: Ermittelte Strahlungsdaten aus 2024 des troggebundenen Begrünungsobjekts. 159

Tabelle 23: Ermittelte Strahlungsdaten aus 2024 der modularen und wandgebundenen Begrünungsobjekte. 160

Tabelle 24: Erläuterungen zur Erreichung der HEDWIG-Projektziele. 161

13.3 Literaturverzeichnis

ASHRAE (2023): ASHRAE Guideline 14-2023 – Measurement of Energy, Demand, and Water Savings. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Peachtree Corners, GA.

Austrian Standards International (2010): ÖNORM L 1131 - Gartengestaltung und Landschaftsbau - Begrünung von Dächern und Decken auf Bauwerken - Anforderungen an Planung, Ausführung und Erhaltung. Wien (idF. 2010 06 01).

Austrian Standards International (2021): ÖNORM L 1136 - Vertikalbegrünung im Außenraum - Anforderungen an Planung, Ausführung, Pflege und Kontrolle. Wien (i.d.F. 2021 04 01).

Austrian Standards International (2023): Ergonomie der thermischen Umgebung - Instrumente zur Messung physikalischer Größen (ISO/DIS 7726:2023). (i.d.F. 2023 06 15).

Austrian Standards International (2024): ÖNORM EN 16798-1 - Energetische Bewertung von Gebäuden - Lüftung von Gebäuden - Teil 1: Eingangsparameter für das Innenraumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden bezüglich Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik - Module M1-6 (i.d.F. 2024 03 01).

Bintinger, Rudolf; Majcen, Martina; Pitha, Ulrike; Buttinger, Udo; Diekmann, Fridtjof; Leitner, Elisabeth; Formanek, Susanne (unveröffentlicht): Projekt HEDWIG Erhebung von Mess-Daten zur Wirkungsabschätzung von begrünten Gebäuden. Ergebnisbericht. Berichte aus Energie und Umwelttechnologie. Unveröffentlicht.

Blecha, Mirjam; Scharf, Bernhard; Stangl, Rosemarie (2022): Zustand und Leistungen von Fassadenbegrünungen aus Trögen am Standort AH Schönbrunnerstrasse 54 [Projektbericht], Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau, BOKU University. Wien. Unveröffentlicht.

BMIMI (Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur) (2025): GreenFDT – Green Facade Digital Twin – Fassadenbegrünung mit digitalem Zwilling. OPEN4INNOVATION | Klimaneutrale Stadt. Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur. Online: https://klimaneutralestadt.at/de/projekte/tiks/green-fdt-green-facade-digital-twin.php [abgerufen am 28.03.2026, 14:55].

Bretschneider, Betül; Scharf, Bernhard (2018): Greening Aspang - Entwicklung eines Verfahrens zur gesamtenergetischen Optimierung von Stadtgebieten am Beispiel der Aspangstraße; Blue Globe Report Smart Cities 8, Klima and Energy Fonds Austria.

Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) (2019): The International System of Units - 9th edition. Doi: 10.59161/AUEZ1291.

Buttinger, Udo Emanuel (2024): Analyse photosynthetischer Aktivitäten an grünen Infrastrukturen im Wiener Stadtgebiet. Masterarbeit, Universität für Bodenkultur Wien.

D'Ambrosio Alfano, Francesca Romana; Dell'isola, Marco; Ficco, Giorgio; Palella, Boris, Igor; Riccio, Guiseppe (2021): On the measurement of the mean radiant temperature by means of globes: An experimental investigation under black enclosure conditions. Building Environment, Volume 193, Doi: 10.1016/j.buildenv.2021.107655.

De Bock, Anouk; Belamans, Bert; Vanlanduit, Steve; Blom, Johan; Alvarado-Alvarado, Allan Augusto; Audenert, Amaryllis (2023): A review on the leaf area index (LAI) in vertical greening systems. Building and Environment, Volume 229, Doi: 10.1016/j.buildenv.2022.109926.

Ellen MacArthur Foundation (2024): Building Prosperity, Unlocking the potential of a nature-positive, circular economy for Europe, online: https://content.ellenmacarthurfoundation.org/m/62e7613596a2d12f/original/Building-Prosperity-July-2024.pdf [abgerufen am 08.01.2026, 07:55].

Estreguil, C.; Dige, G.; Kleeschulte, S.; Carrao, H.; Raynal, J.; Teller, A. (2019): JOINT SCIENCE FOR POLICY REPORT, Strategic Green Infrastructure and Ecosystem Restoration, Geospatial methods, data and tools, European Union, Doi: 10.2760/06072.

Europäische Kommission (2019): Mitteilung der Kommission, Der europäische Grüne Deal. https://commission.europa.eu/system/files/2019-12/european-green-deal-communication_en.pdf

Europäische Union (2014): Eine Grüne Infrastruktur für Europa. ISBN 978-92-79-39999-2. DOI:10.2779/26307. Online: https://ec.europa.eu/environment/nature/ecosystems/docs/GI-Brochure-210x210-DE-web.pdf [abgerufen am 11.10.2025; 16:41].

European Commission (2021): Evaluating the Impact of Nature-based Solutions: A Handbook for Practitioners. Publications Office of the European Union: Luxembourg. ISBN978-92-76 -22821-9. Online: https://data.europa.eu/doi/10.2777/244577 [abgerufen am 11.10.2025, 16:39].

Fang, Hongliang; Baret, Frédéric; Plummer, Stephen; Schaepman-Strub, Gabriela (2019): An Overview of Global Leaf Area Index (LAI): Methods, Products, Validation, and Applications. Reviews of Geophysics, Volume 57, pp. 739 - 799, Doi: 10.1029/2018RG000608.

Fensterseifer, Paula; Gabriel, Elaise; Tassi, Rutineia; Gustavo, Daniel; Piccilli, Allasia (2022): A year-assessment of the suitability of a green façade to improve thermal performance of an affordable housing, Ecological Engineering, Volume 185. Doi: 10.1016/j.ecoleng.2022.106810.

Forschungsentwicklung Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL) (2018): Fassadenbegrünungsrichtlinien. Richtlinien für die Planung, Ausführung und Pflege von Wand- und Fassadenbegrünungen. Bonn.

Gräf, Michael; Immitzer, Markus; Hietz, Peter; Stangl, Rosemarie (2021): Water-Stressed Plants Do Not Cool: Leaf Surface Temperature of Living Wall Plants under Drought Stress. Sustainability, Volume 13(7), Doi: 10.3390/su13073910.

Häusler, Lukas; Hoffmann, Karin; Körner, Werner, Nehls, Thomas; Ullerich, Leslie; Weinläder, Helmut; Reim, Michaela; Schwartengräber, Reinhild; Stark, Cornelia; Weber, Kai; Weiglein, Christian (2024): Bauphysikalische Bewertung von Fassaden- und Dachbegrünungen [Forschungsdaten]. DepositOnce. (Verbundvorhaben EnOB: U-green). Online: https://depositonce.tu-berlin.de/items/69c6b9e0-a054-4572-84c5-f6f278d4d0b3 [abgerufen am 26.02.2025, 09:11].

Höppe, Peter (1999): The physiological equivalent temperature - a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. International Journal of Biometeorology, Volume 43, pp. 71 – 75. Doi: 10.1007/s004840050118.

Jalits; Nicole; Mezger, Lars; Spörl, Philipp; Scharf, Bernhard; Poiss, Maximilian; Pitha, Ulrike; Bintinger, Rudolf; Stangl, Rosemarie (2026): Projekt HEDWIG Erhebung von Mess-Daten zur Wirkungsabschätzung von begrünten Gebäuden. HEDWIG-Berichtsserie: Teilbericht Datenkatalog. Berichte aus Energie und Umweltforschung 59b/2026. Wien.

Jalits, Nicole; Stangl, Rosemarie (2026): Studie im Rahmen des Projekts HEDWIG zur Abbildung des aktuellen Wissenstands im Bereich Dach- und Fassadenbegrünung. HEDWIG-Berichtsserie: Teilbericht Studie. Berichte aus Energie und Umweltforschung 59c/2026. Wien.

John, Henriette; Marrs, Christopher; Neubert, Marco (2019): Handbuch Grüne Infrastruktur Konzeptioneller und theoretischer Hintergrund, Begriffe und Definitionen, österreichische Kurzfassung. Interreg Central Europe Projekt MaGICLandscapes. Output O.T1.1, Dresden. Mit Beiträgen von: Danzinger, Florian; John, Henriette; Marrs, Christopher; Neubert, Marco; Uhlemann, Kathrin. Online: https://www.interreg-central.eu/Content.Node/MaGICLandscapes-Handbuch-Gruene-Infrastruktur-AUT.pdf [abgerufen am: 18.01.2022, 11:03].

Jones, Hamlyn (1998): Stomatal control of photosynthesis and transpiration. Journal of Experimental Botany, Volume 49, pp. 387 – 398, Doi: 10.1093/jxb/49.Special_Issue.387.

Kresser, Carmen; Schriefl, Ernst; Schöberl, Helmut; Mühlbauer, Isabell; Formanek, Susanne; Scharf, Bernhard; Frühwirth, Günther (2021): Integration von Begrünung in den österreichischen Energieausweis. (GREENergieausweis) Projektbericht Stadt der Zukunft. Schriftenreihe 43/2021.

Kuttler, Willhelm (2013): Klimatologie. 2., aktualisierte und erg. Auflage, Paderborn: Schöningh.

Leitner, Elisabeth; Formanek, Susanne; Jalits, Nicole; Mezger, Lars; Bintinger, Rudolf; Stangl, Rosemarie (2026). Projekt HEDWIG Erhebung von Mess-Daten zur Wirkungsabschätzung von begrünten Gebäuden. HEDWIG-Berichtsserie: Teilbericht Ergebnisse aus dem Stakeholder*innenworkshop. Berichte aus Energie und Umweltforschung 59d/2026. Wien.

Leusden, F.; Freymark, H. (1951): Darstellung der Behaglichkeit für den Menschen. In: Gesundheits-Ingenieur 72 (1951), Heft 16, pp. 271–273.

Liu, Kuixing; You, Weijie; Chen, Xiyue; Liu, Wenyu (2022): Study on the Influence of Globe Thermometer Method on the Accuracy of Calculating Outdoor Mean Radiant Temperature and Thermal Comfort. Atmosphere 13. Doi: 10.3390/atmos13050809.

Magistrat der Stadt Wien (2009): Klimaschutzprogramm der Stadt Wien, Fortschreibung 2010–2020. Online: https://www.wien.gv.at/umwelt/klimaschutz/programm/index.html [abgerufen am 18.01.2022, 16:21].

Marot, Naja; Kostanjšek, Barbara; Penko Seidl, Nadja; Harfst, Joern (2024): Implementing the green infrastructure concept in practice: an example of the EU-strategy for Alpine Region, Journal of Environmental Policy & Planning, vol. 26, issue 4, p. 325-338, Doi: 10.1080/1523908X.2024.2383685.

Matzarakis, Andreas; Mayer, Helmut; Iziomon, M.G., (1999). Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. International Journal of Biometeorology, Volume 43, pp. 76 – 84. Doi: 10.1007/s004840050119.ASHRAE (1997). ASHRAE Handbook of Fundamentals. Atlanta: American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, Peachtree Corners, GA.

Matzarakis, Andreas; Rutz, Franz; Mayer, Helmut (2007): Modelling radiation fluxes in simple and complex environments - application of the RayMan model. International Journal of Biometeorology, Volume 51(4), pp. 323 – 334. Doi: 10.1007/s00484-006-0061-8.

Matzarakis, Andreas; Rutz, Franz; Mayer, Helmut (2010): Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: basics of the Ray Manmodel. International Journal of Biometeorology, Volume 54(2), pp. 131 – 139. Doi: 10.1007/s00484-009-0261-0.

Nakamura, Futoshi (2022): Green Infrastructure and Climate Change Adaptation. Function, Implementation and Governance, Japan, Springer Verlag.

Navarrete-Hernandez, P.; Laffan, K (2019): A greener urban environment: Designing green infrastructure interventions to promote citizens' subjective wellbeing, Landscape and Urban Planning, vol. 191, article 103618, Doi: 10.1016/j.landurbplan.2019.103618.

Nehls, Thomas; Hoffmann, Karin; Weinläder, Helmut; Reim, Michaela; Häusler, Lukas (Contributor); Körner, Werner (Contributor); Schwartengräber, Reinhild (Contributor); Stark, Cornelia (Contributor); Ullerich, Leslie (Contributor); Weber, Kai (Contributor); Weiglein, Christian (2024): Bauphysikalische Bewertung von Fassaden- und Dachbegrünungen. Generic Research Data. Technische Universität Berlin. Deposit Once. Doi: 10.14279/depositonce-21983.

Ostendorf, Mark; Morgan, Susan; Retzlaff, William; Celik, Serdar (2025): Evaluating Plant Coverage and Thermal Benefits of Green Walls for Sustainable Design. Journal of Ecological Engineering Design, Volume 3, Doi: 10.70793/jeed.21.

Österreichisches Institut für Bautechnik (OIB) (2023): Richtlinie 6: Energieeinsparung und Wärmeschutz (Ausgabe April 2023). Wien.

Pérez, Gabriel; Coma, Juliá; Chàfer, Marta, Cabeza, Luisa F. (2022): Seasonal influence of leaf area index (LAI) on the energy performance of a green facade. Building Environment 207. Doi: 10.1016/j.buildenv.2021.108497.

Pfoser, Nicole; Jenner, Nathalie; Henrich, Johanna; Heusinger, Jannik; Weber, Stephan; Schreiner, Johannes; Unten Kanashiro, Carlos (2013): Gebäude Begrünung Energie–Potenziale und Wechselwirkungen. Interdisziplinärer Leitfaden als Planungshilfe zur Nutzung energetischer, klimatischer und gestalterischer Potentiale sowie zu den Wechselwirkungen von Gebäude, Bauwerksbegrünung und Gebäudeumfeld. Abschlussbericht August.

Pucher, Bernhard; Zluwa, Irene; Spörl, Philipp;Pitha, Ulrike; Langergraber, Günther (2022): Evaluation of the multifunctionality of a vertical greening system using different irrigation strategies on cooling, plant development and greywater use. Science of The Total Environment, Volume 849, Doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.157842.

Scharf, Bernhard (2020): Plants in Cities Effects of Green Infrastructure on Urban Energy and Water Balance. Dissertation - Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau (IBLB), BOKU-Universität für Bodenkultur, pp 1220.

Scharf, Bernhard; Stangl, Rosemarie (2021): GRÜNER SCHUTZSCHIRM FÜR GEBÄUDE, Beitrag von Dach- und Fassadenbegrünung zum Energiehaushalt von Gebäuden. Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift, OIAZ 166, 1-11. Online: https://www.oiav.at/wp-content/uploads/2021/09/15_schutzschirm.pdf [abgerufen am: 26.01.2022, 19:28].

Schmauck, Sebastian (2019): Dach- und Fassadenbegrünung - neue Lebensräume im Siedlungsbereich: Fakten, Argumente und Empfehlungen. BfN Skripten, Bundesamt für Naturschutz, Bonn.

Schmidt, Marco (2010): Ecological design for climate mitigation in contemporary urban living. International Journal Water, Volume 5, Doi: 10.1504/ IJW.2010.038727.

Stangl, Rosemarie; Medl, Aleaxandra; Scharf, Bernhard; Pitha, Ulrike (2019): Wirkungen der grünen Stadt. Studie zur Abbildung des aktuellen Wissenstands im Bereich städtischer Begrünungsmaßnahmen. In: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (Hrsg.), Berichte aus Energie-und Umweltforschung 12/2019, 65; Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien.

Stangl, Rosemarie; Briefer, Anna; Poiss, Maximilian; Wultsch, Thomas, Scharf, Bernhard, Pitha, Ulrike; Smetschka, Barbara; Wang, Juliane; Haas, Willi; Baumgart André, Sebastian; Bintinger, 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: https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/sdz_pdf/schriftenreihe-2025-60a-glasgruen.pdf, [abgerufen am 17.01.2026, 12:09].

Steiner, Tobias (2021): Wiener Hitzewellentage. Maßnahmen für mehr Komfort am Arbeitsplatz. IBO - Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH: Wien. Online: https://www.ibo.at/wissensverbreitung/ibomagazin-online/ibo-magazin-artikel/data/wiener-hitzewellentage [abgerufen am 21.01.2022, 16:21].

Teitelbaum, Eric; Alsaad, Hayder; Aviv, Dorit; Kim, Alexander; Voelker, Conrad; Meggers, Forrest; Pantelic, Jovan (2022): Addressing a systematic error correcting for free and mixed convection when measuring mean radiant temperature with globe thermometers. Scientific Reports, Volume 12, Doi: 10.1038/s41598-022-10172-5.

Thomsit-Ireland, Faye.; Essah, Emmanuel; Hadley, Paul; Blanusa, Tijana (2020): The impact of green facades and vegetative cover on the temperature and relative humidity within model buildings. Building and Environment 181, Doi: 10.1016/j.buildenv.2020.107009

Tudiwer, David (2019): Einflüsse vertikaler Gebäudebegrünung auf Wärmeschutz, Sommerliche Überwärmung und hygrothermische Behaglichkeit. Dissertation, Technische Universität Wien.

UK Green Building Council (2020): Practical how-to guide: Developing and implementing a green infrastructure strategy, online: https://www.ukgbc.org/wp-content/uploads/2019/03/Practical-how-to-guide-Developing-and-Implementing-a-GI-Strategy-UKGBC-Jan-2019-Final-v4-web.pdf [abgerufen am 08.01.2026, 08:47].

Ville de Paris (2025): PARIS CLIMATE ACTION PLAN 2024-2030, Faster, more local, fairer, online: https://cdn.paris.fr/paris/2025/06/25/plan-climat-en-9E8O.pdf [abgerufen am 08.01.2026, 08:14].

Voss, Karsten; Herkel, Sebastian; Kalz, Doreen; Lützkendorf, Thomas; Maas, Anton, Wagner, Andreas (2016): Performance von Gebäuden, Kriterien, Konzepte, Erfahrungen. Wagner: FIZ Karlsruhe, BINE Informationsdienst, Fraunhofer IRB Verlag, Bonn.

Walther, Edouard, Goestchel, Quentin (2018): The P.E.T. comfort index: Questioning the model. Building Environment, Volume 137, pp. 1 – 10. Doi: 10.1016/j.buildenv.2018.03.054

Weiss, Oliver; Minixhofer, Pia; Werner, Nadine; Riedenbauer, Stefan; Olesko, Elisabeth; Lübke, Katharina; Scharf, Bernhard; Pitha, Ulrike (2021): Alternative Engineered Soils and Seed Mixes Used for Seepage Troughs. Land, Volume 10, Doi: 10.3390/land10111152.

Willems, Wolfgang., Schild, Kai; Dinter, Simone (2022). Lehrbuch der Bauphysik: Schall – Wärme – Feuchte – Licht – Brand – Klima (9. Auflage). Wiesbaden: Springer Vieweg.

Zhao, Qian; Zhu, Zaichun; Zeng, Hui; Myneni, Ranga B.; Zhang, Yao; Peñuelas, Josep; Piao, Shilong (2022): Seasonal peak photosynthesis is hindered by late canopy development in northern ecosystems. Nature Plants, Volume 8, pp. 1484 – 1492. Doi: 10.1038/s41477-022-01278-9.

14 Anhang

14.1 Data Management Plan (DMP)

14.1.1 Datenerstellung und Dokumentation

Für sämtliche erhobene Daten im Innenraum ist das IBO – Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie verantwortlich. Die Rohdaten sind unter der DOI: 10.5281/zenodo.21981452 (Bintinger et al. 2026) öffentlich verfügbar. Die Hauptverantwortliche für die Daten ist unter der E-Mail-Adresse: rudolf.bintinger@ibo.at erreichbar.

Für sämtliche erhobene Daten im Außenraum ist das BOKU IBLB verantwortlich. Die Rohdaten sind unter der DOI: 10.5281/zenodo.20525116 (Mezger et al. 2026) sowie der DOI: 10.5281/zenodo.21980849 (Jalits et al. 2026) öffentlich verfügbar. Die Hauptverantwortliche für die Daten ist unter der E-Mail-Adresse: rosemarie.stangl@boku.ac.at erreichbar. Mitwirkende bei der Datenerhebung im Außenraum waren Philipp Spörl; Lars Mezger sowie Anna Briefer.

14.1.2 Ethische, rechtliche und Sicherheitsaspekte

Alle erhobenen Daten im Außenraum sind Eigentum des Instituts für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau (IBLB) des Departments für Landschaft, Wasser und Infrastruktur (LAWI) der Universität für Bodenkultur Wien (BOKU). Alle erhobenen Daten im Innenraum sind Eigentum der IBO GmbH (Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie).

14.1.3 Datenspeicherung und -erhalt

Monitoringrohdaten zu dieser Studie sind openaccess über das EU Open Research Repository Zenodo verfügbar:

Außenraum-Dauermonitoring: Jalits, Nicole; Spörl, Philipp; Mezger, Lars; Poiss, Maximilian; Scharf, Bernhard; Stangl, Rosemarie (2026). HEDWIG - Collection of measurement data to assess the impact of green buildings | Continuous measurements [Dataset]. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.21980849.

DOI: 10.5281/zenodo.21980849 (Jalits et al. 2026).

Außenraum-Messkampagnen: Mezger, Lars; Spörl, Philipp; Poiss, Maximilian; Buttinger, Udo; Reynaerts, Laura; Jalits, Nicole; Scharf, Bernhard; Stangl, Rosemarie (2026). HEDWIG - Collection of measurement data to assess the impact of green buildings | Measurement Campaigns [Dataset]. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.20525116.

DOI: 10.5281/zenodo.20525116 (Mezger et al. 2026).

Innenraum-Dauermonitoring: Bintinger, Rudolf; Stangl, Rosemarie; Scharf, Bernhard (2026): HEDWIG - Collection of measurement data to assess the impact of green buildings | Continuous indoor monitoring [Dataset]. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.21981452.

DOI: 10.5281/zenodo.21981452 (Bintinger et al. 2026)

14.1.4 Wiederverwendbarkeit der Daten

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

14.2 Dokumentation Sensorinstallationen

Dokumentation Sensorinstallationen an den Messobjekten mit Angaben zur Inbetriebnahme und Abweichungen (Luft-T: Temperatur, Luft-F: Feuchte, WD: Wärmedurchfluss).

	Messobjekt [Codierung]	**Sensorenbezeichnung**	**Datum Sensorinbe-triebnahme [2023]**	**Sensorpositionierung bzw. etwaige Änderungen**	**Nachinstallationen [2024] oder Änderungen**
Fassadenbegrünung	Amtshaus Margareten [FB1-tW]	Atmos41 (Wetterstation) SenseCAP S2101 (Luft-T und Luft-F)	01.07.2023 (Zentra-Cloud) und 24.08.2023 (SenseCAP)	1. OG, Exposition: S Wetterstation 1,5 m vor Pflanzenkörper an Traverse befestigt; übrige Sensoren hinter Pflanzenkörper an Fassade angebracht	keine
	Bürogemeinschaft Kräftner [FB2-bP]	SenseCAP S2101 (Luft-T und Luft-F) MS WTS305 (Wetterstation) EKO ML-02-5P (Pyranometer)	04.08.2023	Fassade 1. OG Exposition: W, Wetterstation 1,5 m vor Pflanzenkörper an Traverse befestigt, übrige Sensoren hinter Pflanzenkörper an Fassade angebracht	23.07.2024 Installation des Pyranometers (EKO ML-02-5P), hinter dem Pflanzenkörper
	Wien Energie – Kraftwerk Simmering [FB3-m]	SenseCAP S2101 (Luft-T und Luft-F) MS WTS305 (Wetterstation) EKO ML-02-5P (Pyranometer) SenseCAP S2104 (Luft-T und Luft-F) Hukseflux HPF01 (Wärmedurchfluss)	30.11.2023	Fassade: 1. OG Exposition: S-O, Wetterstation in 1,5 m vor Pflanzenkörper an Traverse befestigt, SenseCAP S2101 hinter Pflanzenkörper an Pflanzpanelen angebracht, EKO ML-02-5P Über Mini-Traverse 11,5 cm von Wand entfernt befestigt, SenseCAP S2104 und Hukseflux HPF01 im Substrat der Paneele	13.05.2024 Installation des Pyranometers (EKO ML-02-5P), hinter dem Pflanzenkörper

	MA48 [FB4-w]	SenseCAP S2101 (Luft-T und Luft-F) MS WTS305 (Wetterstation) EKO ML-02-5P (Pyranometer) SenseCAP S2104 (Boden-T und Boden-F) Hukseflux HPF01 (Wärmedurchfluss)	11.10.2023	Fassade: 3. OG, Exposition: Süden, Wetterstation in 1,5 m vor Pflanzenkörper an Traverse befestigt, SenseCAP S2101 hinter Pflanzenkörper an Pflanzpanelen angebracht, EKO ML-02-5P Über Mini-Traverse 11,5 cm von Wand entfernt befestigt, SenseCAP S2104 und Hukseflux HPF01 im Substrat der Paneele	09.04.2024 Pyranometer (EKO ML-02-5P), hinter Pflanzenkörper, Versetzung des Lufttemperatursensors hinter des Pflanzenkörpers um 2 Pflanztröge nach oben, da ursprüngliche Positionierung nach Pflegemaßnahmen keinen dichten Pflanzenwuchs zeigt
Dachbegrünung	Steinbauer Development GmbH, extensiv [DB1-e]	SenseCAP S2101 (Luft-T und Luft-F) MS WTS305 (Wetterstation) EKO ML-02-5P (Pyranometer) SenseCAP S2104 (Boden-T und Boden-F) Hukseflux HPF01 (Wärmedurchfluss)	20.09.2023 (Luft-T und -F, Boden-T und -F sowie Wärmedurch-fluss) bzw. 04.10.2023 (Wetter-station, Pyranometer)	EG + 3 OG, SenseCAP S2101 und EKO ML-02-5P im Bereich des abschließenden Blechdaches abgebracht, Hukseflux HPF01 in ca. 16 cm Tiefe eingegraben	26.06.2024 Ergänzung um eine Konstruktion zur Beschattung der bodennahen Luft-T (SenseCAP S2101) sowie Änderung der Luft-T-Sensorposition – Schaffung eines räumlichen Abstands zur Blecheinfassung, da starke solare Abstrahlung gegeben
	Steinbauer Development GmbH , intensiv [DB1-i]	SenseCAP S2101 (Luft-T und Luft-F) MS WTS305 (Wetterstation) EKO ML-02-5P (Pyranometer) SenseCAP S2104 (Boden-T und Boden-F) Hukseflux HPF01 (WD)	20.09.2023 (Luft-T und -F sowie Boden-T und -F) bzw. 04.10.2023 (Wetter-station, Pyranometer, Wärmedurch-fluss)	EG + 3 OG, SenseCAP S2101 und EKO ML-02-5P in der Strauchschicht installiert, Hukseflux HPF01 ebenfalls im Bereich der Strauchschicht in ca. 16 cm Tiefe eingegraben	keine
	HTL St. Pölten, extensiv [DB2-e]	SenseCAP S2101 (Luft-T und Luft-F) MS WTS305 (Wetterstation) EKO ML-02-5P (Pyranometer) SenseCAP S2104 (Boden-T und -F) Hukseflux HPF01 (WD)	21.09.2023	EG + 3 OG, SenseCAP S2101, EKO ML-02-5P sowie Hukseflux HPF01 mittig in der begrünten Fläche angebracht	keine
	HTL St. Pölten, red. intensiv [DB1-ri]	SenseCAP S2104 (Boden-T und -F) Hukseflux HPF01 (WD)	21.09.2023	EG + 3 OG, SenseCAP S2101 und EKO ML-02-5P neben dem Treppengeländer installiert, Hukseflux HPF01 ebenfalls in diesem Bereich eingegraben	19.06.2024 Pyranometer (EKO ML-02-5P) und bodennahe Luft-T (SenseCAP S2101)

14.3 PET-Code aus der Python-Bibliothek pythermalcomfort 3.9.1

.py PET Berechnung MA48

```
from __future__ import annotations
import pandas as pd
import numpy as np
import numpy.typing as npt
from scipy import optimize
from pythermalcomfort.classes_input import PETSteadyInputs
from pythermalcomfort.classes_return import PETSteady
from pythermalcomfort.utilities import Postures, Sex, body_surface_area, p_sat
import os

# ============================================================
# 1. KERN-LOGIK (WALTHER & GOESTCHEL 2018)
# ============================================================

def pet_steady(
    tdb: float | list[float],
    tr: float | list[float],
    v: float | list[float],
    rh: float | list[float],
    met: float | list[float],
    clo: float | list[float],
    p_atm: float | list[float] = 1013.25,
    position: str | list[str] = Postures.sitting.value,
    age: int | list[int] = 23,
    sex: int | list[int] = Sex.female.value,
    weight: float | list[float] = 75,
    height: float | list[float] = 1.8,
    wme: float | list[float] = 0,
) -> PETSteady:
    PETSteadyInputs(tdb=tdb, tr=tr, v=v, rh=rh, met=met, clo=clo, p_atm=p_atm,
                    position=position, age=age, sex=sex, weight=weight, height=height, wme=wme)

    return PETSteady(
        pet=_pet_steady_vectorised(tdb, tr, v, rh, met, clo, p_atm, position, age, sex, weight, height, wme)
    )

@np.vectorize
def _pet_steady_vectorised(tdb, tr, v, rh, met, clo, p_atm, position, age, sex, weight, height, wme):
    met_factor = 58.2
    met_val = met * met_factor

    def vasomotricity(t_cr, t_sk):
        tc_set, tsk_set = 36.6, 34
        sig_skin, sig_core = max(0, tsk_set - t_sk), max(0, t_cr - tc_set)
        m_blood = min(90.0, (6.3 + 75.0 * sig_core) / (1.0 + 0.5 * sig_skin))
        alpha = 0.0417737 + 0.7451833 / (m_blood + 0.585417)
        return {"m_blood": m_blood, "alpha": alpha}

    def sweat_rate(t_body):
        tbody_set = 0.1 * 34 + 0.9 * 36.6
        return min(500, max(0, 304.94 * (t_body - tbody_set)))
```

```
    def solve_pet(t_arr, _tdb, _tr, _v=0.1, _rh=50, _met=80, _clo=0.9, actual_environment=False):
        e_skin, e_clo, h_vap, sbc, cb = 0.99, 0.95, 2.42 * 10**6, 5.67 * 10**-8, 3640
        t_cr, t_sk, t_clo = t_arr
        a_dubois = body_surface_area(weight, height)
        met_correction = 3.45 * weight**0.75 * (1.0 + 0.004 * (30.0 - age) + 0.01 * (height * 100.0 / weight ** (1.0 / 3.0) - 43.4)) if sex ==
            Sex.male.value else 3.19 * weight**0.75 * (1.0 + 0.004 * (30.0 - age) + 0.018 * (height * 100.0 / weight ** (1.0 / 3.0) - 42.1))
        he = (_met + met_correction) / a_dubois
        h_work = he * (1.0 - wme)
        fcl = 1 + 0.31 * _clo
        f_a_cl = (173.51 * _clo - 2.36 - 100.76 * _clo**2 + 19.28 * _clo**3) / 100
        a_clo = a_dubois * (f_a_cl + fcl - 1.0)
        f_eff = 0.696 if position == Postures.standing.value else 0.725
        a_r_eff = a_dubois * f_eff
        vpa = 12 if not actual_environment else (_rh / 100.0 * p_sat(_tdb) / 100)
        hc = max(3.0 * (p_atm / 1013.25)**0.53, (2.26 + 7.42 * _v**0.67 if position == Postures.standing.value else 2.67 + 6.5 * _v**0.67))
            * (p_atm / 1013.25)**0.55
        t_exp = 0.47 * _tdb + 21.0
        d_vent_pulm = he * 1.44 * 10**-6
        ere = (1010 * (_tdb - t_exp) + 0.623 * h_vap / p_atm * (vpa - p_sat(t_exp)/100)) * d_vent_pulm
        alpha_vaso = vasomotricity(t_cr, t_sk)["alpha"]
        tbody = alpha_vaso * t_sk + (1 - alpha_vaso) * t_cr
        r_cl, p_v_sk, lr = _clo / 6.45, p_sat(t_sk) / 100, 0.167
        esw = h_vap / 1000 * sweat_rate(tbody) / 3600
        fecl = 1 / (1 + 0.92 * hc * r_cl)
        w_wet = min(1, esw / max(0.001, hc * lr * fecl * (p_v_sk - vpa)))
        evap = -((1 - w_wet) * (p_v_sk - vpa) / ((1 / (fcl * hc) + r_cl) / (lr * 0.38)) + esw)
        r_sum = (a_r_eff * (1.0 - f_a_cl) * e_skin * sbc * ((_tr + 273.15)**4 - (t_sk + 273.15)**4) + f_eff * a_clo * e_clo * sbc * ((_tr +
            273.15)**4 - (t_clo + 273.15)**4)) / a_dubois
        c_sum = (hc * (_tdb - t_sk) * a_dubois * (1.0 - f_a_cl) + hc * (_tdb - t_clo) * a_clo) / a_dubois
        m_bl = vasomotricity(t_cr, t_sk)["m_blood"] / 3600 * cb + 5.28
        if actual_environment:
            return [h_work + ere - m_bl * (t_cr - t_sk), r_sum + c_sum + evap + m_bl * (t_cr - t_sk) - (r_cl * a_clo / a_dubois)**-1 * (t_sk -
            t_clo), 0]
        return h_work + ere + r_sum + c_sum + evap

    t_stable = optimize.fsolve(solve_pet, [36.7, 34, 0.5*(tdb+tr)], args=(tdb, tr, v, rh, met_val, clo, True))
    def f_pet(tx): return solve_pet(t_stable, tx, tx, actual_environment=False)
    return round(optimize.fsolve(f_pet, t_stable[2])[0], 2)

# ==========================================================
# 2. DATEN-VERARBEITUNG (FIX FÜR KEYERROR)
# ==========================================================

FILE_NAME = 'PET calculation MA48.xlsx'
SHEET_NAME = 'Tabelle3'

if not os.path.exists(FILE_NAME):
    print(f"ERROR: Datei '{FILE_NAME}' wurde im Ordner nicht gefunden!")
else:
    # 1. Excel laden
    df = pd.read_excel(FILE_NAME, sheet_name=SHEET_NAME)

    # 2. Spaltennamen reinigen (entfernt Leerzeichen, Tabs, Zeilenumbrüche)
    df.columns = df.columns.str.strip().str.replace('\n', ' ').str.replace('  ', ' ')

    # Anzeige der verfügbaren Spalten zur Kontrolle
    print("--- Gefundene Spalten in Tabelle3 ---")
    print(df.columns.tolist())
    print("-------------------------------------")
```

```
# 3. PET Berechnungen durchführen
try:
    print("Berechne PET Szenarien... das kann einen Moment dauern.")

    # Standardwerte für die MA48 Auswertung
    MET_VAL = 1.2  # stehend
    CLO_VAL = 0.5  # Sommerkleidung

    # Szenario 1: REF vor (Referenz-Klima + Referenz-Strahlung)
    df['PET_REF_vor'] = pet_steady(
        tdb=df['WTS004_Temp'], tr=df['MRT REF'], v=df['WTS004_Wvel'],
        rh=df['WTS004_Airh'], p_atm=df['WTS004_Apre'],
        met=MET_VAL, clo=CLO_VAL, position="standing"
    ).pet

    # Szenario 2: REF hinter (Begrünungs-Klima + Referenz-Strahlung)
    df['PET_REF_hinter'] = pet_steady(
        tdb=df['SCT005_Temp'], tr=df['MRT REF'], v=df['WTS004_Wvel'],
        rh=df['SCT005_Airh'], p_atm=df['WTS004_Apre'],
        met=MET_VAL, clo=CLO_VAL, position="standing"
    ).pet

    # Szenario 3: VEG vor (Referenz-Klima + Begrünungs-Strahlung)
    df['PET_VEG_vor'] = pet_steady(
        tdb=df['WTS004_Temp'], tr=df['MRT VEG'], v=df['WTS004_Wvel'],
        rh=df['WTS004_Airh'], p_atm=df['WTS004_Apre'],
        met=MET_VAL, clo=CLO_VAL, position="standing"
    ).pet

    # Szenario 4: VEG hinter (Begrünungs-Klima + Begrünungs-Strahlung)
    df['PET_VEG_hinter'] = pet_steady(
        tdb=df['SCT005_Temp'], tr=df['MRT VEG'], v=df['WTS004_Wvel'],
        rh=df['SCT005_Airh'], p_atm=df['WTS004_Apre'],
        met=MET_VAL, clo=CLO_VAL, position="standing"
    ).pet

    # 4. Ergebnisse speichern
    output_file = 'Ergebnisse_PET_MA48.xlsx'
    df.to_excel(output_file, index=False)
    print(f"ERFOLG: Datei '{output_file}' wurde erstellt!")

    # Kurze Statistik für dich:
    avg_red = (df['PET_REF_vor'] - df['PET_VEG_hinter']).mean()
    print(f"Mittlere PET-Reduktion durch Begrünung: {avg_red:.2f} °C")

except Exception as e:
    print(f"FEHLER während der Berechnung: {e}")
```

.py PET Berechnung Steinbauer

```
from __future__ import annotations
import pandas as pd
import numpy as np
import numpy.typing as npt
from scipy import optimize
from pythermalcomfort.classes_input import PETSteadyInputs
from pythermalcomfort.classes_return import PETSteady
from pythermalcomfort.utilities import Postures, Sex, body_surface_area, p_sat
import os

# ============================================================
# 1. KERN-LOGIK (WALTHER & GOESTCHEL 2018)
```

```
# ============================================================

def pet_steady(
    tdb: float | list[float],
    tr: float | list[float],
    v: float | list[float],
    rh: float | list[float],
    met: float | list[float],
    clo: float | list[float],
    p_atm: float | list[float] = 1013.25,
    position: str | list[str] = Postures.sitting.value,
    age: int | list[int] = 23,
    sex: int | list[int] = Sex.male.value,
    weight: float | list[float] = 75,
    height: float | list[float] = 1.8,
    wme: float | list[float] = 0,
) -> PETSteady:
    PETSteadyInputs(
        tdb=tdb, tr=tr, v=v, rh=rh, met=met, clo=clo,
        p_atm=p_atm, position=position,
        age=age, sex=sex, weight=weight,
        height=height, wme=wme
    )

    return PETSteady(
        pet=_pet_steady_vectorised(
            tdb, tr, v, rh, met, clo,
            p_atm, position, age, sex, weight, height, wme
        )
    )

@np.vectorize
def _pet_steady_vectorised(
    tdb, tr, v, rh, met, clo,
    p_atm, position, age, sex, weight, height, wme
):

    met_factor = 58.2
    met_val = met * met_factor

    def vasomotricity(t_cr, t_sk):
        tc_set, tsk_set = 36.6, 34
        sig_skin = max(0, tsk_set - t_sk)
        sig_core = max(0, t_cr - tc_set)
        m_blood = min(90.0, (6.3 + 75.0 * sig_core) / (1.0 + 0.5 * sig_skin))
        alpha = 0.0417737 + 0.7451833 / (m_blood + 0.585417)
        return {"m_blood": m_blood, "alpha": alpha}

    def sweat_rate(t_body):
        tbody_set = 0.1 * 34 + 0.9 * 36.6
        return min(500, max(0, 304.94 * (t_body - tbody_set)))

    def solve_pet(t_arr, _tdb, _tr, _v=0.1, _rh=50,
                  _met=80, _clo=0.9, actual_environment=False):

        e_skin, e_clo = 0.99, 0.95
        h_vap = 2.42 * 10**6
        sbc = 5.67 * 10**-8
        cb = 3640

        t_cr, t_sk, t_clo = t_arr
```

```
a_dubois = body_surface_area(weight, height)

met_correction = (
   3.45 * weight**0.75 *
   (1.0 + 0.004 * (30.0 - age) +
    0.01 * (height * 100.0 / weight ** (1.0 / 3.0) - 43.4))
   if sex == Sex.male.value else
   3.19 * weight**0.75 *
   (1.0 + 0.004 * (30.0 - age) +
    0.018 * (height * 100.0 / weight ** (1.0 / 3.0) - 42.1))
)

he = (_met + met_correction) / a_dubois
h_work = he * (1.0 - wme)

fcl = 1 + 0.31 * _clo
f_a_cl = (
   173.51 * _clo - 2.36 - 100.76 * _clo**2 +
   19.28 * _clo**3
) / 100

a_clo = a_dubois * (f_a_cl + fcl - 1.0)
f_eff = 0.696 if position == Postures.standing.value else 0.725
a_r_eff = a_dubois * f_eff

vpa = 12 if not actual_environment else (
   _rh / 100.0 * p_sat(_tdb) / 100
)

hc = max(
   3.0 * (p_atm / 1013.25)**0.53,
   (2.26 + 7.42 * _v**0.67
    if position == Postures.standing.value
    else 2.67 + 6.5 * _v**0.67)
) * (p_atm / 1013.25)**0.55

t_exp = 0.47 * _tdb + 21.0
d_vent_pulm = he * 1.44 * 10**-6

ere = (
   (1010 * (_tdb - t_exp) +
    0.623 * h_vap / p_atm *
    (vpa - p_sat(t_exp)/100))
   * d_vent_pulm
)

alpha_vaso = vasomotricity(t_cr, t_sk)["alpha"]
tbody = alpha_vaso * t_sk + (1 - alpha_vaso) * t_cr

r_cl, p_v_sk, lr = _clo / 6.45, p_sat(t_sk) / 100, 0.167

esw = h_vap / 1000 * sweat_rate(tbody) / 3600

fecl = 1 / (1 + 0.92 * hc * r_cl)

w_wet = min(
   1,
   esw / max(
      0.001,
      hc * lr * fecl * (p_v_sk - vpa)
```

```
            )
        )

        evap = -(
            (1 - w_wet) * (p_v_sk - vpa) /
            ((1 / (fcl * hc) + r_cl) / (lr * 0.38))
            + esw
        )

        r_sum = (
            (a_r_eff * (1.0 - f_a_cl) * e_skin * sbc *
             ((_tr + 273.15)**4 - (t_sk + 273.15)**4) +
             f_eff * a_clo * e_clo * sbc *
             ((_tr + 273.15)**4 - (t_clo + 273.15)**4))
            / a_dubois
        )

        c_sum = (
            (hc * (_tdb - t_sk) * a_dubois * (1.0 - f_a_cl) +
             hc * (_tdb - t_clo) * a_clo)
            / a_dubois
        )

        m_bl = vasomotricity(t_cr, t_sk)["m_blood"] / 3600 * cb + 5.28

        if actual_environment:
            return [
                h_work + ere - m_bl * (t_cr - t_sk),
                r_sum + c_sum + evap +
                m_bl * (t_cr - t_sk) -
                (r_cl * a_clo / a_dubois)**-1 * (t_sk - t_clo),
                0
            ]

        return h_work + ere + r_sum + c_sum + evap

    t_stable = optimize.fsolve(
        solve_pet,
        [36.7, 34, 0.5*(tdb+tr)],
        args=(tdb, tr, v, rh, met_val, clo, True)
    )

    def f_pet(tx):
        return solve_pet(t_stable, tx, tx, actual_environment=False)

    return round(optimize.fsolve(f_pet, t_stable[2])[0], 2)


# ============================================================
# 2. DATENVERARBEITUNG – STEINBAUER FILE
# ============================================================

FILE_NAME = "PET calculation Steinbauer.xlsx"
SHEET_NAME = "Tabelle1"

if not os.path.exists(FILE_NAME):
    print(f"ERROR: Datei '{FILE_NAME}' nicht gefunden!")
else:
    df = pd.read_excel(FILE_NAME, sheet_name=SHEET_NAME)

    df.columns = df.columns.str.strip()
```

```
print("--- Gefundene Spalten ---")
print(df.columns.tolist())
print("-------------------------")

try:
    print("Berechne PET...")

    MET_VAL = 1.2
    CLO_VAL = 0.5

    # Innenraum = INT, Außenklima = EX
    df["PET_INT"] = pet_steady(
        tdb=df["INT_Temp"],
        tr=df["MRT INT"],
        v=df["Wvel"],
        rh=df["INT_Airh"],
        p_atm=df["Apre"],
        met=MET_VAL,
        clo=CLO_VAL,
        position="standing"
    ).pet

    df["PET_EX"] = pet_steady(
        tdb=df["EX_Temp"],
        tr=df["MRT EX"],
        v=df["Wvel"],
        rh=df["EX_Airh"],
        p_atm=df["Apre"],
        met=MET_VAL,
        clo=CLO_VAL,
        position="standing"
    ).pet

    output_file = "Ergebnisse_PET_Steinbauer.xlsx"
    df.to_excel(output_file, index=False)

    print(f"ERFOLG → {output_file} erstellt")

    print(
        "Mittlere PET Differenz (INT - EX):",
        (df["PET_INT"] - df["PET_EX"]).mean()
    )

except Exception as e:
    print("FEHLER:", e)
```