

A Allgemeines und Normung

**A 1 Umweltgerechtes Bauen für Mensch, Flora und Fauna
am Beispiel neuer Grünfassadensysteme**

Holger Röseler, Pia Krause, Philip Leistner, Leonie K. Fischer,
Eva Bender und Solène Guenat

COPYRIGHTED MATERIAL

Inhaltsverzeichnis

| | | | | |
|----------|--|-----------|----------|---|
| 1 | Einleitung | 3 | | |
| 2 | Grundlagen und Stand des Wissens | 3 | | |
| 2.1 | Klimawandel | 3 | 4.2 | Prozesse an der Gebäudehülle 17 |
| 2.2 | Prozesse im Außenraum | 4 | 4.2.1 | Wärmeübergang außen 17 |
| 2.2.1 | Charakteristik von naturnahen und urbanen Räumen | 5 | 4.2.1.1 | Wärmeabstrahlung 18 |
| 2.2.2 | Grüne Strukturen und Grünfassaden | 7 | 4.2.1.2 | Verschattung 19 |
| 2.3 | Prozesse an der Gebäudehülle und im Innenraum | 7 | 4.2.1.3 | Strömung 20 |
| 2.3.1 | Wärmeschutz | 8 | 4.2.1.4 | Auswirkung 23 |
| 2.3.2 | Sommerliche Überhitzung | 9 | 4.2.2 | Wärmedurchlass Bauteil 24 |
| 3 | Forschungs- und Erhebungsmethode | 10 | 4.3 | Wirkung auf das Gebäude 25 |
| | | | 4.3.1 | Randbedingungen 25 |
| | | | 4.3.2 | Auswirkung 26 |
| | | | 5 | Von der Forschung in die Praxis 30 |
| | | | 6 | Zusammenfassung und Diskussion 31 |
| 4 | Ergebnisse | 13 | | |
| 4.1 | Prozesse im Außenraum | 13 | | |
| 4.1.1 | Strukturreichtum und Artenvielfalt | 13 | | |
| 4.1.2 | Klimaregulation | 16 | | |
| | | | | Literatur 33 |

FIT FÜR DIE LEBENSZYKLUSBETRACHTUNG PRODUKTE DER ACOUSTICS DIVISION



akustik@regupol.de
www.regupol.com

Mit dem Cradle to Cradle-Zertifikat und der Umweltdeklaration (EPD) zu unseren **REGUPOL** Produkten schaffen wir Transparenz für das nachhaltige Bauen.



Was sind Ihre Schutzziele?

Schallschutz ✓
Erschütterungsschutz ✓
Ressourcenschutz ✓

REGUPOL

Hugo Hens

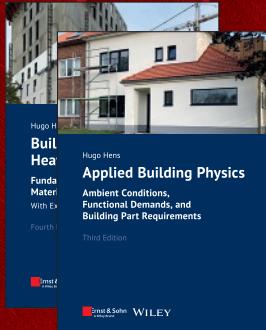
Building Physics – Heat, Air and Moisture

Fundamentals, Engineering Methods, Material Properties. With Exercises.

- combines theory with typical building engineering practice
- equally suitable as a textbook and for practitioners
- with solved problems and examples
- author with solved problems and examples

This book deals with heat air and moisture transport in building structures and whole buildings with a focus on applications in planning practice for energy-saving and sustainable buildings. It has been completely revised and expanded for the new edition.

**Available as a package with
Applied Building Physics**



Hugo Hens
Building Physics – Heat, Air and Moisture
Fundamentals, Engineering Methods, Material Properties With Exercises
Fourth Edition
Ernst & Sohn WILEY

4., revised Edition · 2023 · 384 pages ·
31 figures · 18 tables

| | | |
|------------------------|------------------------|-------|
| Softcover | ISBN 978-3-433-03422-4 | € 69* |
| eBundle (Print + ePDF) | ISBN 978-3-433-03429-3 | € 99* |

| | |
|--|--------|
| PACKAGE Building Physics + Applied Building Physics ISBN 978-3-433-03433-0 | € 119* |
| eBundle (Print + ePDF) PACKAGE ISBN 978-3-433-03434-7 | € 179* |

ORDER

+49 (0)30 470 31-236
marketing@ernst-und-sohn.de
www.ernst-und-sohn.de/en/3422

1 Einleitung

Das sich stetig ändernde Klima führt zu steigenden Herausforderungen bei der Gestaltung von Städten, Quartieren und Gebäuden [1]. Die Auswirkungen des anthropogenen Klimawandels sind mess- und spürbar geworden, auch in Form von Extremwetterereignissen wie Hitze, Starkregen, Sturm und Hagel [1]. Mit der Klimaänderung geht simultan ein drastischer Rückgang der Biodiversität sowohl global als auch in Deutschland einher [2–4], der auch stark durch die Urbanisierung geprägt wird [5].

Die Bauindustrie nimmt in der Klimawandeldebatte eine Schlüsselfunktion ein. Einerseits ist diese aufgrund des hohen Ressourcen- und Energieverbrauchs maßgeblich Mitverursacher für die anthropogenen verursachten klimatischen Veränderungen, andererseits ist die gebaute Umwelt selbst von den Klimaänderungen sowie den einhergehenden Extremwetterereignissen betroffen. Insbesondere urbane Räume sind durch die hohen Verdichtungen und Versiegelungen stark vulnerabel gegenüber den Extremwetterereignissen. Hohe Hitzebelastungen in Städten beeinträchtigen bereits jetzt die Lebens- und Standortqualität von Mensch, Flora und Fauna, die sich prognostisch weiter verschärfen wird [1]. Gleichzeitig sind Städte aber auch gestaltbare Orte, an denen durch eine interdisziplinäre und zukunftsorientierte Planung eine weitere Verschärfung des Klimawandels gebremst und die Resilienz gegenüber seinen Folgen für Mensch, Flora und Fauna gestärkt werden kann.

Ein Baustein für eine nachhaltige und klimaangepasste Gestaltung von urbanen Räumen und Bauwerken stellen grüne Infrastrukturen dar. Begrünte Fassaden als Bestandteil der grünen Infrastruktur haben aufgrund der hohen Flächenverfügbarkeit im Urbanen besondere Potenziale, um durch innovative Gestaltungsansätze zur klimaangepassten Stadtgestaltung für Mensch, Flora und Fauna beizutragen. Gleichzeitig gilt es, die bauphysikalischen Potenziale und Qualitäten dieser Konstruktionen gezielt auszuschöpfen, ohne dabei andere Funktionen, beispielsweise an Brandschutz und (Stand-)Sicherheit, zu beeinträchtigen.

Diese potenziellen und synergetischen Wirkpotenziale eines neuen Grünfassadensystems für Mensch, Flora und Fauna werden in diesem Beitrag vorgestellt und analysiert. Das entwickelte System weist klimaregulierende Effekte im Außenraum auf und integriert vertikale Lebensraumstrukturen insbesondere für eine neuartige Mischung von Kulturpflanzen und einheimischen Pflanzen sowie der potenziellen Förderung von Insekten bei gleichzeitiger Beachtung der bauphysikalischen Anforderungen der Gebäudehülle. Das System entstand als ein Mock-Up auf dem Campus der Universität Stuttgart und diente der ersten Erhebung und Untersuchung bezüglich der Schaffung synergetischer Wirkpotenziale. Basierend auf den Forschungsergebnissen und identifizierten Forschungslücken wurde aufbauend eine zweite, deutlich größere

Grünfassade konzipiert und damit ein erster Schritt zur Implementierung des neuen Grünfassadensystems von der Forschung in die Praxis getätigter.

2 Grundlagen und Stand des Wissens

In diesem Abschnitt werden die Grundlagen und Phänomene der Themenfelder Klimawandel und -anpassung durch grüne Infrastrukturen mit dem Fokus auf Grünfassaden erläutert. Ausgehend von den Auswirkungen des Klimawandels werden in einem ersten Schritt stadtbauphysikalische Prozesse im Außenraum thematisiert. Durch den Vergleich von naturnahen und urbanen Strukturen werden Potenziale zur Förderung von klimaangepassten, resilienten Lebensräumen für Mensch, Flora und Fauna in Städten identifiziert und ausgewählte Anpassungsstrategien durch vertikale Grünstrukturen am Gebäude definiert. Aufbauend wird der Blick auf die bauphysikalischen Prozesse an der Gebäudehülle sowie am Gebäude selbst gerichtet.

2.1 Klimawandel

Das Klima der Erde der vergangenen 10 000 Jahre wird nach [6] als relativ stabil angesehen. Lediglich in den letzten 150 Jahren kam es zu einem stetigen Anstieg der Temperatur. Dieser Anstieg wird allgemein als anthropogener Klimawandel bezeichnet und ist auf menschliche Aktivitäten zurückzuführen [6]. Zukünftige Veränderungen der klimatischen Verhältnisse können mit den sogenannten Representative Concentration Pathways (RCP) des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, häufig als Weltklimarat bezeichnet) prognostiziert werden. Etablierte Szenarien sind RCP 2.6, RCP 4.5 sowie RCP 8.5. Diese Szenarien beschreiben unterschiedliche Entwicklungen der anthropogenen Treibhausgasemissionen. Die Ziffern stehen für den globalen Strahlungsantrieb an der Tropopause, also in ca. 6 km bis 18 km Höhe, gegenüber dem natürlichen bzw. vorindustriellen Niveau (in der Regel 1750) in W/m^2 im Jahr 2100. Mit dem geringsten Strahlungsantrieb stellt das Szenario RCP 2.6 eine optimistische Entwicklung dar und beinhaltet die schnelle und konsequente Substitution fossiler Brennstoffe. RCP 8.5 ist gegenüber RCP 2.6 ein pessimistisches Szenario. RCP 4.5 liegt zwischen diesen beiden Extremen [7]. Bild 1 zeigt die Temperaturänderung der jährlichen Durchschnitts- und Maximaltemperaturen der drei Szenarien in Bezug zu den historischen Datensätzen am Standort Stuttgart. Die dargestellten Datensätze basieren auf dem Modell der Software Meteonorm [8]. Die Durchschnittstemperatur des optimistischen Szenarios RCP 2.6 liegt zukünftig erwartungsgemäß unterhalb der beiden pessimistischeren Szenarien. Ab dem Jahr 2060 prognostiziert RCP 2.6 eine Trendwende und damit abnehmende Temperatu-

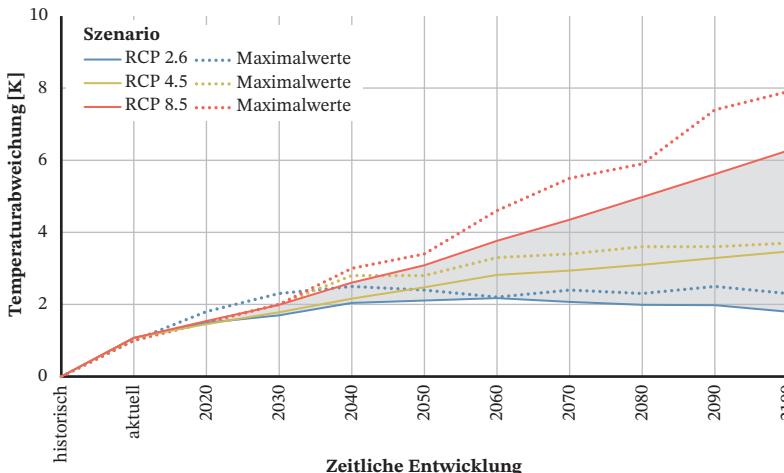


Bild 1. Änderung der prognostizierten Durchschnitts- und maximalen Temperaturen der unterschiedlichen RCP-Szenarien bis 2100 am Standort Stuttgart. Grau hinterlegt ist der mögliche Temperaturbereich der Durchschnittstemperaturen zwischen den beiden extremen Szenarien; berechnet mit Meteonorm [8].

ren. Das pessimistische Szenario RCP 8.5 geht von einem konstant starken, nicht abflachenden Temperaturanstieg aus. Die Differenz zu den Referenzwerten der Vergangenheit beträgt im Jahr 2100 mehr als 6 Kelvin, während es bei dem Szenario RCP 2.6 lediglich 2 Kelvin und bei RCP 4.5 etwa 3,5 Kelvin sind.

Diese klimatischen Änderungen haben auf viele Lebensbereiche, Lebewesen und Prozesse eine signifikante Auswirkung. Besonders urbane Räume weisen in ihrer baulich-räumlichen Gestaltung eine erhöhte Vulnerabilität gegenüber den zunehmenden Klimawandelfolgen auf. Wetterelemente wie Lufttemperatur, Niederschlag und Wind wirken auf Liegenschaften sowie Gebäude und können bei hoher Intensität Schäden und Gefahren verursachen. Durch die Auswirkungen des Klimawandels werden einerseits spezifische Wetterelemente bzw. Klimaänderungssignale zukünftig an Intensität zunehmen, andererseits sind dabei regional unterschiedliche Wandel zu berücksichtigen, siehe Tabelle 1 [1, 9].

In Deutschland wird sich die Hitzebelastung flächen-deckend erhöhen, was vor allem zu Herausforderungen in städtischen Gebieten und einer gesundheitlichen Belastung für die Bewohnerinnen und Bewohner führt. In gleicher Weise ist die urbane Vegetation, insbesondere durch längere Trockenperioden, Hitze und Stürme, stark von den Auswirkungen des Klimawandels betroffen. Bereits jetzt ist die Vulnerabilität von Pflanzen in urbanen Gebieten besonders hoch, da diese den direkten anthropogenen Einflüssen, wie Schadstoffen, sowie verdichteten und salzhaltigen Böden ausgesetzt sind. Zusätzlich beeinträchtigen die (mikro-)klimatischen Bedingungen in Städten sowohl kurz- als auch langfristig das gesunde Pflanzenwachstum. Diese Prozesse haben eine unmittelbare Auswirkung auf die ur-

Tabelle 1. Änderungssignale und regionale Betroffenheit in Deutschland aufgrund der Klimaänderung nach [1, 9]; Legende für die Änderungssignale: ↑↑ = starke Änderung; ↑ = Änderung; – = keine klaren Rückschlüsse

| Wetter-einwirkung | Änderungs-signal | regionale Betroffenheit |
|-------------------|------------------|--|
| Sommerhitze | ↑↑ | ganz Deutschland; insbesondere der Südwesten, Flusstäler von Rhein, Neckar, Main, Mosel |
| Starkregen | ↑ | Mittelgebirge und Alpenvorland; abhängig von Topografie; Details in Starkregen Gefahrenkarten von Kommunen |
| Hochwasser | ↑ | in der Nähe von Gewässern; Details in Hochwassergefahrenkarten der Bundesländer |
| Hagel | – | ganz Deutschland; Süddeutschland höchste Betroffenheit |
| Wind | – | ganz Deutschland; insbesondere Küsten und Norddeutschland |

bane Fauna. Neben dem Verlust an quantitativen und qualitativen Lebensräumen ist die Fauna in Städten selbst vom Klimawandel und einer damit einhergehenden Bedrohung der Artenvielfalt betroffen [10].

2.2 Prozesse im Außenraum

Urbane Räume unterscheiden sich in ihrer Charakterisierung, aber auch in ihren Funktionen und Anforderungen signifikant von natürlichen und naturna-

hen Strukturen. Folgend werden die Charakteristika von naturnahen und urbanen Räumen auf Grundlage aktueller Literaturergebnisse herausgearbeitet und in Vergleich gesetzt. Neben der Bedeutung der Strukturvielfalt zur Förderung der Biodiversität, werden fokussiert und vergleichend die Grundlagen der Energiebilanz behandelt. Durch den direkten Vergleich von naturnahen und urbanen Räumen werden resiliente Gestaltungsmöglichkeiten identifiziert und schließlich am Beispiel der Entwicklung eines neuartigen Grünfassadensystems von den theoretischen Forschungsansätzen in die Praxis transferiert.

2.2.1 Charakteristik von naturnahen und urbanen Räumen

Manche naturnahen Ökosysteme, wie beispielsweise Wälder, weisen durch ihre Artenzusammensetzung eine hohe strukturelle Komplexität auf einer fein aufgelösten räumlich-zeitlichen Skala auf. Diese strukturelle Komplexität fördert die Entstehung von heterogenen Mikroklimata, was wiederum mit einer erhöhten Artenvielfalt und Biodiversität einhergeht [11–18]. In der Forschungsdisziplin der Waldökologie ist es allgemein anerkannt, dass es eine positive Beziehung zwischen heterogenem Mikroklima, Strukturvielfalt und Artenvielfalt gibt [15, 17, 18]. So ist die dreidimensionale Schichtung von Tier- und Pflanzengemeinschaften in Wäldern ein anschauliches Beispiel, wie Mikroklimata und Mikrohabitatem nicht nur miteinander interagieren [14], sondern zu physiognomisch differenzierten Lebensraumnischen für verschiedene Organismen auf kleinstem Raum führen (Bild 2). Vom Wurzelwerk bis zur Baumkrone spielt jede Schichtung nicht nur eine bedeutende Rolle zur Erhaltung der klimatischen und ökologischen Funktionen im Gesamtsystem, sondern es resultiert daraus auch fortlaufend die

Entstehung von qualitativ wertvollen Lebensraumnischen mit thermischen Refugien für vielzählige Lebewesen [14]. Die Baumkronen in Wäldern bilden einen vertikalen Wärmeschutz und puffern die mikroklimatischen Bedingungen unterhalb der Krone, wodurch ökologische Prozesse oberhalb, innerhalb und unterhalb des Kronenbereichs unterschiedlich beeinflusst werden [19, 20]. Gleichzeitig folgen Flora und Fauna ihren Umweltpräferenzen bzw. den thermischen Refugien und besiedeln dabei unterschiedliche Nischen auf kleinstem Raum, die sie wiederum selbst durch ihre Strukturen und Lebensweisen prägen [20]. Entsprechend konnte in Waldstrukturen nachgewiesen werden, dass der Einfluss des Mikroklimas auf die lokale Biodiversität signifikant ist und sich gesamte Gemeinschaften entlang eines Mikroklimagradianten von nur wenigen Metern abrupt verändern können [12]. Die Aufrechterhaltung bzw. Ausbildung dieser heterogenen, mikroklimatischen Bedingungen ist daher von größter Bedeutung, um sowohl quantitative als auch qualitative Lebensräume für unterschiedliche Gemeinschaften, auch auf kleinem Raum, auszubilden. Die mikroklimatische Heterogenität naturnaher Räume wird innerhalb der urbanen Strukturen nahezu komplett unwirksam gemacht. Die Dominanz von versiegelten, monofunktional gestalteten Flächen reduziert die strukturelle Vielfalt, was einen großen Einfluss auf die Ausgestaltung der Artenvielfalt nimmt. Durch die Überbauung und Versiegelung offener Böden in undurchlässige Schichten wie Asphalt, Beton oder Pflaster geht die ökologische Funktion der naturnahen Flächen verloren. Klimaregulation, Versickerung und Verdunstung, Gasaustausch und weitere biotische Prozesse werden weitgehend unterbunden und die Bodenfunktion nahezu ausschließlich auf das Tragen von Siedlungs- und Infrastrukturen reduziert [10].

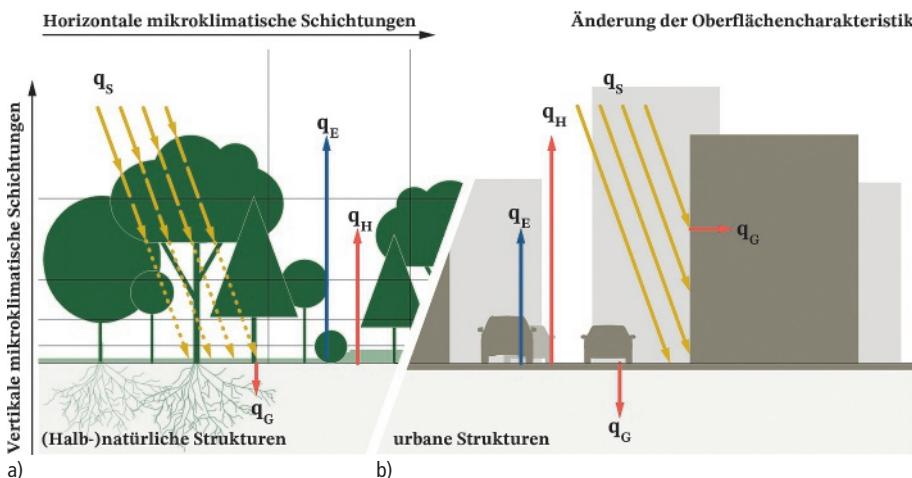


Bild 2. Schematische Darstellung der Energiebilanz im Vergleich zwischen naturnahen Strukturen (a) und urbanen Strukturen (b). Ergänzend ist die Entstehung eines heterogenen Mikroklimas durch die Ausbildung von horizontalen und vertikalen Schichtungen bei den naturnahen Strukturen illustriert.

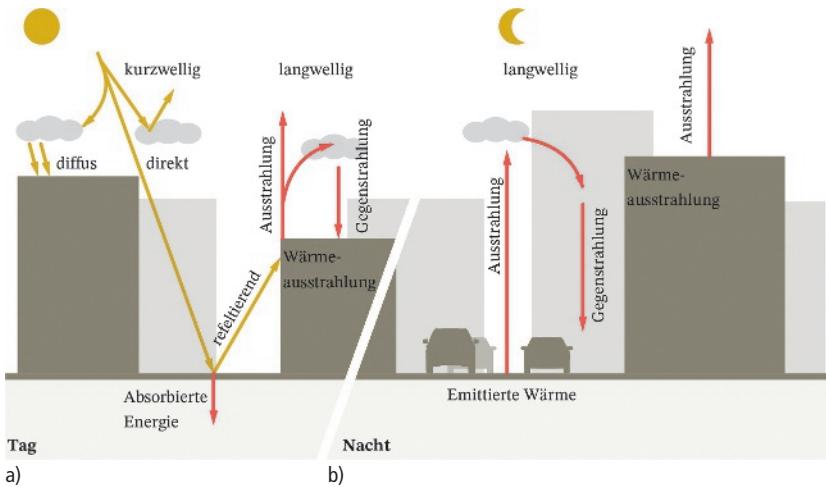


Bild 3. Schematische Darstellung der Strahlungsbilanzprozesse am Tag (a) sowie in der Nacht (b) mit kurzwelliger Einstrahlung sowie langwelliger Wärmeausstrahlung

Auch die atmosphärischen Energiebilanzen und Strahlungsaustauschprozesse ändern sich durch die Bebauungsstruktur signifikant und führen zu der Ausbildung eines Wärmeinseleffekts in Städten. Bild 2 stellt die Energiebilanzen von naturnahen und urbanen Räumen vergleichend dar.

Die Energiebilanz einer natürlichen und künstlichen bzw. urbanen Oberfläche setzt sich aus der Strahlungsbilanz, der latenten und sensiblen Wärmestromdichte sowie der Wärme- und Speicherfähigkeit des Materials zusammen. Es gilt [21]:

$$0 = q_S + q_E + q_H + q_G \quad \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (1)$$

mit

q_S Strahlungsbilanz $[W/m^2]$

q_E latente Wärmestromdichte $[W/m^2]$

q_H sensible Wärmestromdichte $[W/m^2]$

q_G Bodenwärmestromdichte $[W/m^2]$

Basierend auf dem Energie- und Massenerhaltungssatz wird in Gl. (1) ein Gleichgewicht zwischen der Strahlungsbilanz q_S , der latenten und sensiblen Wärmestromdichten q_E , q_H sowie der Bodenwärmestromdichte q_G definiert [22]. Die latente Wärmestromdichte des städtischen Standortes ist infolge eines geringeren Grünflächenanteils und damit einhergehend einer geringeren Verdunstungsleistung deutlich reduziert. Daraus resultiert nach Gl. (1), dass der sensible, fühlbare Wärmestrom und damit die Erwärmung der Atmosphäre innerhalb der Städte höher ist.

Gleichzeitig ist die Strahlungsbilanz durch die vergrößerte und veränderte Oberflächencharakteristika im Urbanen stark verändert. Bild 3 illustriert die Strahlungsbilanz vergleichend am Tag (Bild 3a) sowie in der Nacht (Bild 3b). Die Sonne stellt die primäre Energiequelle dar. Die eintreffende kurzwellige Strahlung differenziert sich in Direkt-, Diffus- und reflektierende Strahlung. Die Baumassen absorbieren die

eintreffende kurzwellige Strahlung während des Tages und speichern diese. Durch eine niedrige Albedo der Oberflächen wird die Strahlungsabsorption und damit Energiespeicherung zusätzlich erhöht. Die gespeicherte Energie wird in Form von langwelliger Wärmeausstrahlung zeitversetzt wieder an die Umgebung abgegeben. Gemäß dem Stefan-Boltzmann-Gesetz steigt die Intensität der Abstrahlung entsprechend der absoluten Oberflächentemperatur in der vierten Potenz und mit dem Emissionskoeffizienten der Oberfläche gewichtet, siehe Gl. (2). Unter der Berücksichtigung des Emissionsgrads von Himmel und Bebauung stellt sich ein resultierender Wärmestrom nach Gl. (3) ein.

$$q_{\text{lang}} = \sigma \cdot \epsilon \cdot T^4 \quad \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (2)$$

$$q_{r,\text{lang}} = \sigma \cdot T^4 \cdot (\epsilon_H - \epsilon_B) \quad \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (3)$$

mit

σ Stefan-Boltzmann-Konstante:

$$5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$$

ϵ_H Emissionsgrad Himmel [-]

ϵ_B Emissionsgrad Bebauung [-]

T absolute Temperatur [K]

Durch Schadgas in der Atmosphäre, beispielsweise durch Kohlendioxid, wird die effektive Abstrahlung reduziert. Dieser Effekt sowie zusätzliche Wärmequellen, beispielsweise durch Automobile und Gebäude, erwärmen die Atmosphäre der Stadt weiter.

Gleichzeitig sind Städte, trotz der Versiegelung und Verdichtung im Vergleich zum landwirtschaftlich geprägten Umland, oftmals deutlich artenreicher [23, 24]. In [23] wurde nachgewiesen, dass urbane Lebensräume Populationen seltener und gefährdeter einheimischer Arten beherbergen. Das Vorkommen von Flora und Fauna und ihre Verbreitung zeigen dabei, dass für viele Artengruppen mit Erhöhung des Struktur-

reichtums der Umgebung auch die Artenvielfalt zunimmt. Vor diesen Hintergründen gewinnt die Frage an Bedeutung, inwieweit städtische Strukturen nicht ausschließlich als Verursacher für Klimawandel und der Gefährdung des Artenreichtums anzusehen sind, sondern auch aktiv zur Klimaanpassung sowie zum Erhalt und die Förderung der biologischen Vielfalt beitragen können.

2.2.2 Grüne Strukturen und Grünfassaden

Als Reaktion auf den Klimawandel sowie die städtischen Wärmeinseleffekte und die damit verbundene Vulnerabilität urbaner Strukturen gewinnen urbane, grüne Infrastrukturen zur Förderung einer zukunftsorientierten und resilienten Stadtgestaltung zunehmend an Bedeutung. Urbane grüne Infrastrukturen werden in der Strategie der Europäischen Union als „*ein strategisch geplantes Netzwerk von natürlichen und naturnahen Gebieten mit anderen Umweltmerkmalen, die so konzipiert und gemanagt werden, dass sie eine breite Palette von Ökosystemdienstleistungen wie Wasserreinigung, Luftqualität, Erholungsraum sowie Klimaschutz und -anpassung erbringen [...]*“ [25] definiert. Dabei sind urbane grüne Infrastrukturen nicht als Gegenspieler der grauen Infrastrukturen, sondern als Ergänzung letzterer innerhalb der Stadtstruktur zu betrachten. Ziel ist, die Transformation grauer Infrastrukturen zu mehr Grün voranzutreiben, ohne jedoch die Anforderungen an z. B. Funktion, Sicherheit, Barriere- und Schadensfreiheit zu beeinträchtigen und Synergien bei der Entwicklung der Städte hinsichtlich Klimaanpassung zu nutzen.

Im Kontext der urbanen grünen Infrastruktur gewinnt auch die vertikale Gebäudebegrünung in Forschung und Praxis an Relevanz. Sie hat insbesondere aufgrund des großen Flächenangebotes ein erhebliches Potenzial zur Unterstützung einer klimaangepassten und biodiversitätsfördernden Stadtgestaltung, deren Grenzen sowohl aus wissenschaftlicher als auch aus praktischer Sicht noch lange nicht ausgeschöpft sind. Trotz des enormen Flächenpotenzials existieren in der Praxis aktuell keine Grünfassadensysteme, die das Zusammenspiel von Mikroklima, Klimaanpassung sowie die gezielte Förderung des Strukturreichtums unterstützen. Wenn Grünfassaden in der Stadtgestaltung berücksichtigt werden, dominiert oftmals ein rein gestalterischer Ansatz mit nicht heimischen, arten- und strukturarmen Systemen [26]. Die klimatischen und standortspezifischen Anforderungen der Pflanzen werden in den marktgängigen Vegetationen hingegen nicht hinreichend berücksichtigt, da diese oftmals unter ästhetischen Gesichtspunkten, d. h. ausschließlich als „grüne Dekoration“ innerhalb von Planungsprozessen integriert werden. Gleichzeitig existieren hohe Anforderungen an den zugrundeliegenden Gartenbau, der die Auswahl der Pflanzen für solche Systeme mitsteuert. Auch die Missachtung von faunistischen Anforderungen bei der Grünpflege hat zur Folge, dass die För-

derung und Entwicklung sowohl der floristischen als auch faunistischen Artenvielfalt stark eingeschränkt bleiben.

Dieses Bild spiegelt sich auch in der Forschungslandschaft wider. Es finden sich Einzelstudien sowie Literaturreviews über Grünfassadensysteme, die auf die differenzierten Ausprägungen und Gestaltungsmöglichkeiten der Systeme eingehen und einen Überblick über die vorhandenen Potenziale geben. Maßgeblich werden in den Studien die thermischen Wirkungen von Grünfassaden auf das Mikro- und Raumklima, beispielsweise in [27–34], thematisiert, mitunter deren Potenziale zur Luftreinhaltung [28] oder deren Beitrag zur Reduzierung von Lärm [27–29]. Die Übertragung der Funktionen naturnaher Strukturen zur gezielten Ausbildung eines mikroklimatischen Strukturreichtums zur gleichzeitigen Förderung der Biodiversität werden hingegen nicht fokussiert behandelt. Zwar werden die Synergien zwischen den stadt- und bauphysikalischen Effekten sowie zur Förderung der Biodiversität benannt, aber nicht weiter analysiert [28, 35–37].

Die wenigen bestehenden Studien, die das Zusammenspiel von Grünfassaden und Biodiversität in unterschiedlichen Regionen untersuchten, illustrieren, dass die Förderung der Artenvielfalt von dem Mikroklima [26, 38], der Pflanzenzusammensetzung [38, 39] und dem Strukturreichtum [26, 39] beeinflusst wird. In [26] wird ergänzend herausgearbeitet, dass die Strukturvielfalt bei bewachsenen mineralischen Wänden höher ist als bei Grünfassaden. Dies zeigt auch den Zusammenhang mit den jeweiligen Begrünungssystemen auf (direkt auf einer Wand wachsend, durch Kletterhilfen vor die Wand gesetzt oder als „lebende Wand“ modular aufgebaut). Neben heterogenen Pflanzengemeinschaften kann beispielsweise die gezielte Ergänzung von mineralischen Strukturen, u. a. durch sandige und lehmhaltige Flächen die Heterogenität maßgeblich erhöhen. Dennoch bleiben diese Erkenntnisse und Ansätze aktuell in der (Bau)Praxis der Fassadenbegrünungen unberücksichtigt.

2.3 Prozesse an der Gebäudehülle und im Innenraum

Grünfassaden wirken klimatisch nicht nur auf den Außenraum, sondern beeinflussen auch die thermischen Vorgänge an sowie in der Gebäudehülle und dadurch auch das Gebäude selbst. Aktuelle Ergebnisse zeigen ein hohes Potenzial zur Verbesserung des Wärmedurchlasswiderstands begrünter Konstruktion [40, 41]. Eine nach Strahlungs- und Strömungsprozessen differenzierte Betrachtung der Oberflächeneigenschaften erfolgt hierbei kaum. Unter Abschnitt 2.3.1 werden die Phänomene am Bauteil und unter Abschnitt 2.3.2 die Quantifizierung des Hitzeintrags im Sommerfall beschrieben, um über diese Mechanismen nachfolgend vertiefte Erkenntnisse der thermischen Wirkpotenziale aus den Untersuchungen des entwickelten, biodiversitätsfördernden Fassadensystems zu generieren.

2.3.1 Wärmeschutz

Die Wärmetransportmechanismen, die fallweise im Inneren von Bauteilen bzw. an deren Oberflächen auftreten, sind Wärmeleitung, Wärmekonvektion und Wärmestrahlung. Die treibende Kraft des Wärmetransports ist stets ein Temperaturgefälle. Im Inneren von Baustoffen sowie zwischen direkt miteinander verbundenen Materialien findet eine Wärmeübertragung durch Leitung statt. Unter Annahme eines stationären Zustands lässt sich der resultierende Wärmedurchlasswiderstand R_c eines aus n Schichten bestehenden Bauteils in Abhängigkeit der Dicken d sowie der Wärmeleitfähigkeiten λ nach Gl. (4) berechnen. Der Wärmedurchgangskoeffizient einer Konstruktion berechnet sich allgemein nach den Gln. (5) und (6) [42]:

$$R_c = \sum_{i=1}^n R_i = \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_i} \quad \left[\frac{m^2 K}{W} \right] \quad (4)$$

$$U = \frac{1}{R_{\text{tot}}} = \frac{1}{R_{\text{si}} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{\text{se}}} \quad \left[\frac{W}{m^2 K} \right] \quad (5)$$

$$R_s = \frac{1}{h_c + h_r} \quad \left[\frac{m^2 K}{W} \right] \quad (6)$$

mit

R_c Wärmedurchlasswiderstand eines Bauteils [$m^2 K/W$]

R_i Wärmedurchlasswiderstand der Schicht i [$m^2 K/W$]

U Wärmedurchgangskoeffizient [$W/(m^2 K)$]

R_{tot} Wärmedurchgangswiderstand [$m^2 K/W$]

d Bauteildicke [m]

λ Wärmeleitfähigkeit [$W/(m K)$]

R_s Wärmeübergangswiderstand [$m^2 K/W$]

h_c, h_r Wärmeübergangskoeffizient konvektiv, strahlungsbezogen [$W/(m^2 K)$]

Die Wärmeübergangskoeffizienten nach Tabelle 8 der DIN EN ISO 13789:2018-04 [43] bzw. Wärmeübergangswiderstände nach Tabelle 7 der DIN EN ISO 6946:2018-03 [44] sind in Tabelle 2 dargestellt. Die Randbedingungen entsprechend der dargestellten Werte sind eine Windgeschwindigkeit $v = 4 \text{ m/s}$ und eine mittlere dynamische Temperatur $T_{mn} = 0^\circ\text{C}$ für den Außenraum sowie $T_{mn} = 20^\circ\text{C}$ für den Innenraum mit einem Emissionsgrad der Oberflächen von $\varepsilon = 0,9$.

Der strahlungsbedingte Wärmeübergangskoeffizient für ebene Oberflächen für eine mittlere thermodynamische Temperatur zwischen der Oberfläche und ihrer Umgebung wird vereinfacht nach [44] mittels den Gln. (7) und (8) ermittelt [45].

$$h_r = \varepsilon \cdot h_{r0} \quad \left[\frac{W}{m^2 K} \right] \quad (7)$$

$$h_{r0} = 4 \cdot \sigma \cdot T_{mn}^3 \quad \left[\frac{W}{m^2 K} \right] \quad (8)$$

mit

h_{r0} Wärmeübergangskoeffizient durch Strahlung des schwarzen Körpers [$W/(m^2 K)$]

T_{mn} mittlere thermodynamische Temperatur Oberfläche und Umgebung [K]

Tabelle 2. Normwerte Wärmeübergangskoeffizienten für Konvektion und Strahlung in Abhängigkeit der Richtung des Wärmestroms [43, 44]

| Übertragungsmechanismus | Oberfläche | Richtung Wärmestrom | | |
|-------------------------|------------|------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| | | aufwärts [W/(m ² K)] | horizontal [W/(m ² K)] | abwärts [W/(m ² K)] |
| Konvektion | innen | 5,0 | 2,5 | 0,7 |
| | außen | 20 | 20 | 20 |
| Strahlung | innen | 5,13 | 5,13 | 5,13 |
| | außen | 4,14 | 4,14 | 4,14 |

Nicht berücksichtigt wird bei dieser Betrachtung nach Norm der langwellige Wärmestrahlungsaustausch zwischen einer freistehenden Bauteiloberfläche und dem Himmel nach Gl. (3) (vgl. Abschnitt 2.2.1). Nach [42] ist der Einfluss dieser Wärmeabstrahlung auf die Energiebilanz eines Gebäudes und dessen Raumlufttemperatur tendenziell gering anzusehen, jedoch können sich die Oberflächen, vor allem in klaren Nächten, kurzfristig stark auskühlen.

Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient h_c beschreibt die Wärmeübertragung zwischen zwei sich relativ zueinander bewegenden thermodynamischen Systemen [45]. Dies ist beispielsweise an Gebäuden bei der Wärmeübertragung von einem Medium, also der Luft, an Wandoberflächen oder Dächern der Fall [42]. Die Höhe der Wärmeübertragung hängt maßgeblich von den Temperaturen des Bauteils und des Mediums, dessen Strömungsgeschwindigkeit und der Oberflächenbeschaffenheit ab. Die sich einstellende, konvektiv bedingte Wärmestromdichte lässt sich durch Gl. (9) beschreiben.

$$q_c = h_c \cdot (θ_s - θ_u) \quad \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (9)$$

mit

q_c Wärmestromdichte infolge Konvektion [W/m^2]
 $θ_s, θ_u$ Temperatur der Oberfläche bzw. des strömenden Mediums [$^\circ\text{C}$]

Mithilfe der Nusselt-Zahl lässt sich nach Gl. (10) der konvektive Wärmeübergangskoeffizient h_c bestimmen [46]. Die Nusselt-Zahl gibt den Faktor an, um welchen der Wärmeübergang eines strömenden Mediums gegenüber der Wärmeleitung des ruhenden Mediums größer ist. Für die Berechnung der Nusselt-Zahl nach Gl. (11) werden die Reynolds-Zahl Re (Verhältnis von Trägheits- zu Reibungskräften bei erzwungenen Konvektion) nach Gl. (12) und die Prandtl-Zahl Pr (Verhältnis der kinematischen Zähigkeit zur Temperaturleitfähigkeit zweier Stoffwerte) nach Gl. (13) benötigt [42, 45, 46].

$$h_c = \frac{Nu \cdot λ}{1} \quad [-] \quad (10)$$

Tabelle 3. Stoffwerte von Luft bei einem bar Druck zur Ermittlung der Wärmeübergangskoeffizienten [46]

| θ [°C] | λ [W/(m K)] | v [$10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$] | Pr [-] |
|------------------|------------------------|--|-----------|
| -20 | 0,0226 | 11,78 | 0,72 |
| 0 | 0,0242 | 13,52 | 0,72 |
| 20 | 0,0257 | 15,35 | 0,71 |
| 40 | 0,0272 | 17,26 | 0,71 |

$$Nu = \sqrt{0,441 \cdot Re^{0,667} + \frac{Re^{1,6} \cdot Pr^2}{[27,027 + 66,027 \cdot Re^{-0,1} \cdot (Pr^{0,667} - 1)]^2}} \quad (11)$$

$$Re = \frac{v \cdot l}{v} \quad [-] \quad (12)$$

$$Pr = \frac{v \cdot \rho \cdot c_p}{\lambda} \quad [-] \quad (13)$$

mit

Nu Nusselt-Zahl [-]

l Charakteristische Länge der überströmten Ebene [m]

λ Wärmeleitfähigkeit des strömenden Mediums [W/(m K)]

Re Reynolds-Zahl [-]

Pr Prandtl-Zahl [-]

v Strömungsgeschwindigkeit Medium [m/s]

v kinematische Viskosität [m^2/s]

c_p spezifische Wärmekapazität [J/(kg K)]

ρ Dichte des Fluides [kg/m^3]

Für die Berechnung der Kenngrößen werden die in Tabelle 3 hinterlegten Stoffwerte für Luft verwendet [46]. Als Randbedingungen ist ein Luftdruck von einem bar festgelegt.

Die normierten Werte für den konvektiven Wärmeübergang nach DIN EN ISO 6946 [44] werden mithilfe von Gl. (14) vereinfacht, lediglich in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit ermittelt. Weitere Näherungen werden in [46] beschrieben. Gleichung (15) nach Recknagel ist für Strömungsgeschwindigkeiten unter 5 m/s definiert. Die Näherung mittels Gl. (16) nach Jürges hat Gültigkeit für eine Reynolds-Zahl $Re > 500\,000$ und eine Temperatur der unbeeinflussten Umgebung zwischen 0 °C und 50 °C. Gl. (17) nach Glück kann für Strömungsgeschwindigkeiten von 1 m/s bis 3 m/s, einer Temperatur der unbeeinflussten Umgebung von 20 °C und Überströmlängen zwischen einem und zehn Metern angewandt werden.

$$h_{c,DIN} = 4 + 4 \cdot v \left[\frac{W}{\text{m}^2 \text{K}} \right] \quad (14)$$

$$h_{c,Recknagel} = 6,2 + 4,2 \cdot v \left[\frac{W}{\text{m}^2 \text{K}} \right] \quad (15)$$

$$h_{c,Jürges} = 6,4 \cdot \frac{v^{0,8}}{l^{0,2}} \left[\frac{W}{\text{m}^2 \text{K}} \right] \quad (16)$$

$$h_{c,Glück} = 6,9 \cdot \frac{v^{0,72}}{l^{0,26}} \left[\frac{W}{\text{m}^2 \text{K}} \right] \quad (17)$$

Die verschiedenen Ansätze zur Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten sind in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeiten in Bild 4 gegenübergestellt. Die Berechnung über die Nusselt-Zahl nach Gl. (11) für eine Lufttemperatur von 20 °C und eine Überströmlänge von einem Meter führt zu einer sehr hohen Übereinstimmung mit der Näherung nach DIN EN ISO 6946. Bei einer Lufttemperatur von 0 °C und vier Metern Überströmlänge führt der Ansatz über die Nusselt-Zahl zu durchgängig niedrigeren Wärmeübergangskoeffizienten, gleichbedeutend mit rechnerisch geringeren anzunehmenden Wärmeverlusten im Winterfall. Die vereinfachten Ansätze nach Jürges und Glück liegen für Überströmlängen von einem Meter ebenfalls relativ nahe am Ansatz der DIN EN ISO 6946. Sie liefern jedoch für größere Überströmlängen, hier beispielsweise für 4 Meter dargestellt, niedrigere Werte für den konvektiv bedingten Wärmeübergangskoeffizienten. Lediglich der vereinfachte Ansatz nach Recknagel mittels Gl. (15) ermittelt durchgängig höhere Werte des Wärmeübergangskoeffizienten als die DIN EN ISO 6946 und würde rechnerisch zu größeren Wärmeverlusten im Winter führen.

Die beschriebenen Phänomene dienen der nachfolgenden Untersuchung des entwickelten Fassadensystems. Es werden die Auswirkungen des begrünten Systems differenziert auf die Strahlungs- und Strömungsprozesse an der Fassadeoberfläche (Abschnitt 4.2.1) sowie des Wärmetransports im Bauteil (Abschnitt 4.2.2) inklusive der Auswirkung auf den Energiebedarf (Abschnitt 4.3) untersucht.

2.3.2 Sommerliche Überhitzung

Die in Abschnitt 2.3.1 aufgezeigten Mechanismen und Kenngrößen dienen primär der stationären Charakterisierung des thermischen Verhaltens von Gebäuden im Heiz- (Winter) und Kühlfall (Sommer). Die Beschreibung der Leistungsfähigkeit eines nicht gekühlten Gebäudes bei Hitzeeintrag im Sommer kann gemäß DIN 4108 Teil 2 über die Übertemperaturgradstunden erfolgen. Sie werden in Kelvin-Stunden [K h] angegeben und resultieren aus den Temperaturüberschreitungen eines definierten Grenzwertes der Operativtemperatur im Innenraum je Zeiteinheit, die in der Regel ein Jahr beträgt. Sie sind nach Gl. (18) [47] die Summe aller Produkte aus Dauer und jeweiliger Höhe der Temperaturüberschreitungen [1].

$$Gh = \sum_{i=1, \theta_{o,i} > \theta_B}^{8760} (\theta_{o,i} - \theta_B) \cdot 1h \quad [\text{K h/a}] \quad (18)$$

mit

Gh Übertemperaturgradstunden [K h/a]

θ_B Bezugstemperatur [°C]

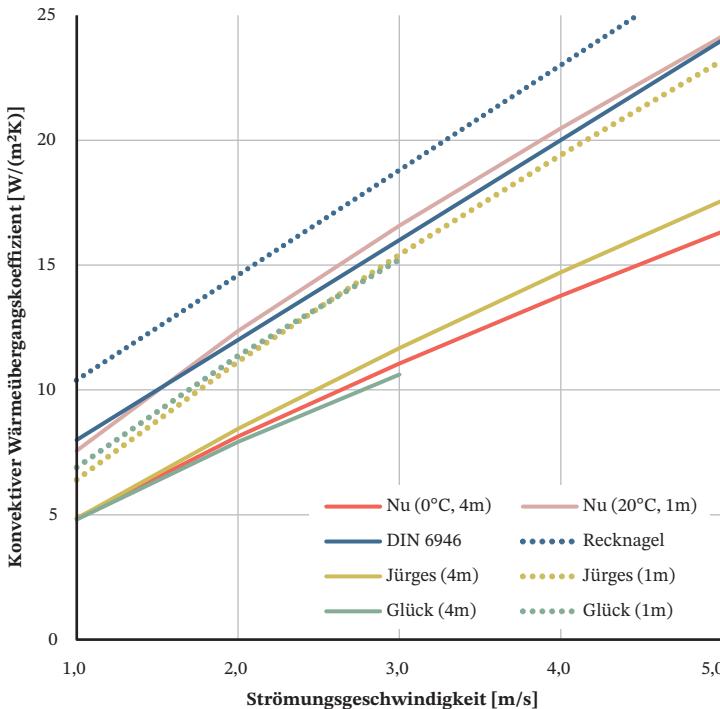


Bild 4. Resultierende Wärmeübergangskoeffizienten der unterschiedlichen Ansätze über die Nusselt-Zahl (Nu), die DIN EN ISO 6946 sowie über die vereinfachten Ansätze nach Recknagel, Jürges und Glück in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit

Der Temperatur-Grenzwert ist abhängig von der Sommerklimaregion des Gebäudestandorts und liegt nach DIN 4108 Teil 2 [48] für Potsdam bei 26 °C. Für kühle Regionen Deutschlands beträgt der Wert 25 °C, für warme Regionen 27 °C. Zur Einhaltung der Anforderungen dürfen die Übertemperaturgradstunden den Wert von 1200 K h/a bei Wohngebäuden für Anwesenheitszeiten von täglich 24 Stunden und 500 K h/a bei Nichtwohngebäuden bei Anwesenheit von Montag bis Freitag von 7 Uhr bis 18 Uhr nicht überschreiten. Die Ermittlung erfolgt durch eine thermische Gebäudesimulation. Randbedingungen für die simulativen Berechnungen werden in der genannten DIN definiert, wie beispielsweise anzusetzende interne Wärmeeinträge oder die Berücksichtigung des Nachtluftwechsels. Über die Übertemperaturgradstunden wird die Wirkung des untersuchten Grünsystems auf den Hitzeeintritt in den Innenraum im Sommerfall, auch vor dem Hintergrund eines sich ändernden Klimas, untersucht (Abschnitt 4.3). Alternativ kann nach [48] der Nachweis über ein vereinfachtes Verfahren erfolgen, das lediglich bauliche und organisatorische Maßnahmen bewertet und somit für die Bewertung des entwickelten Fassadensystems ungeeignet ist.

3 Forschungs- und Erhebungsmethode

Im Fokus der Entwicklung eines neuen Grünfassadensystems stehen die Aktivierung integraler Wirkpotenziale für Mensch, Flora und Fauna. Die Untersuchung umfasst demnach die Bereiche Klimaanpassungspotenzial für Außen- und Innenräume sowie die Ausbildung bzw. Unterstützung eines Strukturenreichtums, welche in dieser Kombination bisher kaum erforscht wurden. In einem ersten Schritt wird in diesem Abschnitt die entwickelte Grünfassaden-Konstruktion vorgestellt sowie aufbauend die Methodik zur Erfassung der integralen Wirkpotenziale illustriert.

Bild 5 zeigt eine fotografische Aufnahme der entwickelten Fassade unmittelbar nach der Installation im Februar 2022. Das Demonstrator-System wurde im Rahmen der UNA-TERRA-Förderung der Universität Stuttgart an einer 8 m² großen Südfassadenfläche auf dem Campus Vaihingen installiert. Folgend wird daher von der UNA-TERRA-Fassade gesprochen.

Der konstruktive Aufbau des UNA-TERRA-Systems ist inkl. dem Messkonzept in Bild 7 dargestellt. Grundlage bildet ein bestehendes Living-Wall-System (Biomura, HELIX Pflanzensysteme GmbH [49]). Die Tragschicht besteht aus einer wetterfesten Trägerplatte. In einer Substratschicht aus Steinwolle werden die Pflanzen bzw. die Wurzelballen in der Vertikalen angesiedelt. Die Bewässerung erfolgt über horizontale Tropfschläuche. Die Wasserverteilung wird durch ein Drainagevlies zwischen Trägerplatte und Substrat unter-



Bild 5. Fotografische Aufnahme der UNA-TERRA-Fassade unmittelbar nach der Installation im Februar 2022

stützt. Bei der Pflanzenwahl wurden Pflanzen mit einem hohem Nektar- und Pollengehalt von den Monaten April bis November berücksichtigt. In Summe wurden 32 unterschiedliche Arten in das System gepflanzt. Tabelle 4 listet zusammenfassend die Pflanzen sowie die hinzukommende Spontanvegetation inklusive Blütezeit, aufgeschlüsselt in Monaten.

Neben den Pflanzen sind in der Fassade verschiedene Nisthilfesysteme und -materialien für hohlräumbrütende Wildbienenarten sowie halbhöhlenbrütende Vogelarten integriert. Die äußeren Nisthilfe-Kästen aus witterungsfestem Hochdruck-Schichtpressstoff (vgl. Bild 6) orientierten sich an der Größe des modularen Biomura-Living Wall Systems. Einzelne Module sind damit nicht als Grünmodule ausgestaltet, sondern sind als Nisthilfe-Kästen aufgebaut. Dadurch entsteht ein synergetisches System zwischen Pflanzen und weiteren organischen oder mineralischen Materialkomponenten, die je nach Bedarf und Standort unterschiedlich besetzt werden können. Bei dem UNA-TERRA-System wurden die Nisthilfen, um möglichst heterogene Strukturen zu schaffen, mit verschiedenen Materialien und der Berücksichtigung unterschiedlicher Nistgangdurchmesser erprobt. Bild 6 zeigt die drei verbauten Nisthilfekästen. Folgende Materialien fanden Verwendung:

1. unbehandeltes Buchen-Hartholz mit Bohrungen unterschiedlicher Durchmesser,
2. Röhrchen aus Bambus, Schilf und Pappe unterschiedlicher Durchmesser,
3. Lehm-Sandgemisch,
4. Ton mit Bohrungen unterschiedlicher Durchmesser,
5. Ziegel aus Ton sowie
6. Futterstation und Nisthilfe für Halbhöhlenbrüter.

Tabelle 4. Gesamtaartenliste der gepflanzten und spontanen (mit * markiert) Pflanzenarten auf dem UNA-TERRA-System inkl. der Blütezeit in drei Erhebungszeiträumen im Frühjahr und Spätsommer 2022 und im Frühsommer 2023

| Art (lateinischer Name) | Blütenzeit in Monaten | | | | | | | | | | | |
|--|-----------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| <i>Achillea millefolium</i> | | | | | | | • | • | • | • | | |
| <i>Alchemilla epipsila</i> | | | | | | | • | • | | | | |
| <i>Armeria maritima „Alba“</i> | | | | • | • | • | | | | | | |
| <i>Astilbe chinensis</i> | | | | | | | • | • | • | | | |
| <i>Bromus spec.*</i> | | | | • | • | • | | | | | | |
| <i>Calamagrostis spec.*</i> | | | | | | • | • | • | • | | | |
| <i>Campanula carpatica</i> | | | | • | • | • | • | • | • | | | |
| <i>Carex foliosissima „Icedance“</i> | | | | | | • | • | | | | | |
| <i>Carex hachijoens „Evergold“</i> | | • | • | | | | | | | | | |
| <i>Cerastium tomentosum</i> | | • | • | • | | | | | | | | |
| <i>Coreopsis verticillata</i> | | | • | • | • | • | • | • | | | | |
| <i>Dianthus gratianopolitanus „Grandiflorus“</i> | | | • | • | | | | | | | | |
| <i>Epilobium spec.</i> | | | | • | • | • | | | | | | |
| <i>Galium spec.*</i> | | | | • | • | • | • | • | | | | |
| <i>Geranium x cantabrigiense „Cambridge“</i> | | | • | • | • | • | • | • | | | | |
| <i>Hedera helix</i> | | | | | | • | • | • | • | • | | |
| <i>Helianthemum hybr.</i> | | | | | | • | • | • | | | | |
| <i>Herniaria glabra</i> | | | | | | • | • | • | | | | |
| <i>Heuchera villosa</i> | | | | | • | • | • | | | | | |
| <i>Iberis sempervirens</i> | • | • | | | | | | | | | | |
| <i>Koeleria glauca</i> | | | | | • | • | • | | | | | |
| <i>Linaria vulgaris</i> | | | | | • | • | • | • | • | • | | |
| <i>Luzula sylvatica</i> | | | | | • | • | | | | | | |
| <i>Mukdenia rossii</i> | | | | • | • | | | | | | | |
| <i>Pachysandra terminalis</i> | | | | • | • | | | | | | | |
| <i>Potentilla fructosa</i> | | | | • | • | | | | | | | |
| <i>Stachys byzantina</i> | | | | | • | • | • | • | • | | | |
| <i>Sympphytum officinale</i> | | | | • | • | • | • | | | | | |
| <i>Teucrium chamaedrys</i> | | | | | | | • | • | • | | | |
| <i>Trifolium pratense</i> | | | | | • | • | • | • | • | • | | |
| <i>Trifolium repens</i> | | | | | • | • | • | • | • | • | | |
| <i>Veronica spicata var. nana</i> | | | | | | • | • | • | | | | |

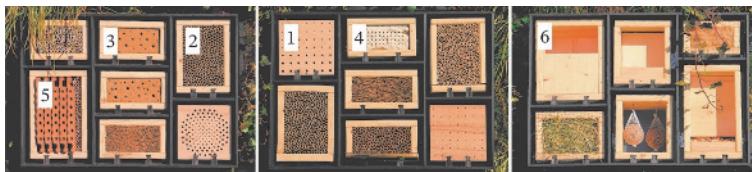


Bild 6. Fotografische Aufnahme der unterschiedlichen verbauten Nisthilfesysteme an der UNA-TERRA-Fassade auf dem Campus Vaihingen der Universität Stuttgart

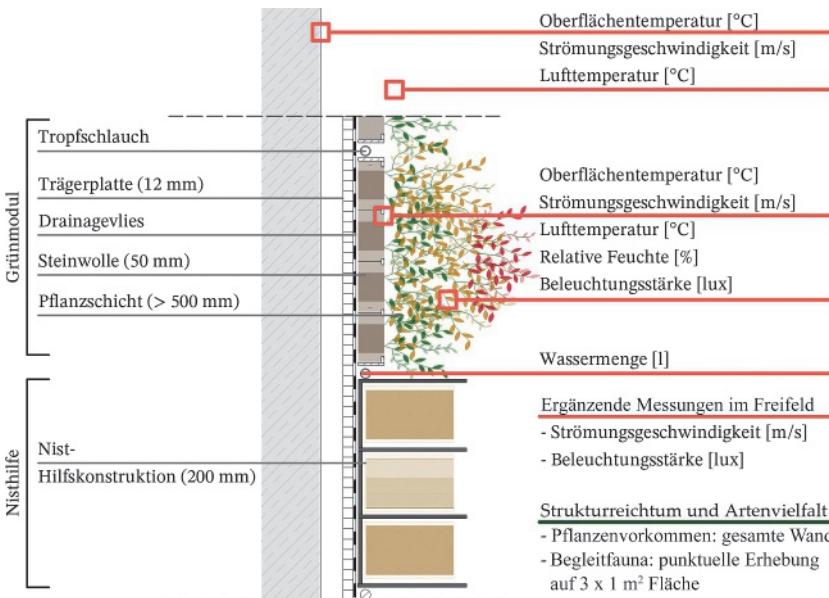


Bild 7. Vertikaler Schnitt durch das UNA-TERRA-System basierend auf dem bestehenden Living-Wall-System Biomura der HELIX Pflanzensysteme GmbH. Ergänzend ist das Messkonzept dargestellt mit der Datenerhebung zur Quantifizierung der Wirkpotenziale auf die Klimaregulation.

Tabelle 5. Übersicht der erfassten Messwerte an der UNA-TERRA-Grünfassade

| Messgröße | Position | Zeitraum |
|--------------------------------|-----------------|----------------|
| Lufttemperatur [°C] | in Grünstruktur | kontinuierlich |
| | vor Betonwand | manuell |
| Oberflächentemperatur [°C] | im Substrat | kontinuierlich |
| | an Betonwand | manuell |
| Luftfeuchte | in Grünstruktur | kontinuierlich |
| Strömungsgeschwindigkeit [m/s] | vor Substrat | manuell |
| | im Freifeld | |
| | vor Betonwand | manuell |
| Beleuchtungsstärke [lux] | in Grünstruktur | manuell |
| | im Freifeld | |

Die Analyse der klimaregulierenden und biodiversitätsfördernden Wirkungen des UNA-TERRA-Fassadensystems fokussiert den potenziellen qualitativen sowie quantitativen Beitrag der begrünten Oberfläche zu nachfolgenden Phänomenen und Prozessen:

Außenraum:

- Steigerung eines heterogenen Mikroklimas sowie des Strukturreichtums,
- Verringerung der Hitzebelastung in der fassadennahen Umgebung.

Gebäudehülle:

- Beeinflussung des Wärmeübergangs an der Fassadenoberfläche,
- Verbesserung des Wärmedurchlasswiderstands der Fassade.

Gebäude:

- Auswirkungen auf den flächenbezogenen Heizenergiebedarf,
- Potenziale zur Verringerung des Hitzeintrags in ein Gebäude.

Bild 7 illustriert einen Schnitt durch das UNA-TERRA-System sowie das Messkonzept zur Datenerfassung. Ergänzend zu Bild 7 dient Tabelle 5. Zur Ana-

lyse der Wirkungen des Systems werden die Datensätze über verschiedene Sensoren an der Fassade ermittelt. Dauerhaft erfolgt die Ermittlung der Luft- und Oberflächentemperatur über kabellose NB-IoT Sensoren. Diese erfassen die Parameter Lufttemperatur und Luftfeuchte ca. 40 cm vor dem Substrat, in der Vegetation sowie die Oberflächentemperatur des Substrates stetig in 5 Minuten-Intervallen. Als Referenz und zur weiteren Einschätzung der Datengüte wird die Lufttemperatur sowie die Oberflächentemperatur der darüberliegenden und ungedämmten Betonwand gemessen. Strömungsgeschwindigkeiten an unterschiedlichen Stellen in der Pflanzschicht sowie an ungestörten Bereichen werden mithilfe mehrerer Hitzedrahtanemometer manuell erfasst. Für Rückschlüsse auf die Vegetationsdichte erfolgen an diesen Stellen zeitgleich Messungen der Beleuchtungsstärke mittels Luxsonden.

Des Weiteren erfolgten Thermografieaufnahmen der Grünfassade sowie der nichtbegrünten Betonwand. Ergänzend werden Wetterdaten einer nah gelegenen Wetterstation zur Beurteilung der städtischen, klimatischen Bedingungen zum Zeitpunkt der Untersuchung genutzt. Neben Temperaturen und der Luftfeuchte werden auch Strahlungsdaten und Niederschläge erfasst. Die Daten werden an der Wetterstation Lauchäcker [51] auf dem Campus in Vaihingen in ca. 2 km Entfernung der Wand aufgezeichnet. Die Station wird vom Lehrstuhl für Hydrologie und Geohydrologie des Instituts für Wasser- und Umweltsystemmodellierung der Universität Stuttgart betrieben.

Mittels der erfassten Messwerte wurden die Wirkpotenziale des biodiversitätsfördernden UNA-TERRA-Systems untersucht. Die Forschungsergebnisse flossen in die Konzeption von deutlich größeren Testfassaden ein, um weitere, identifizierte Fragestellungen zu untersuchen. Die Entwicklung dieser Fassade wird unter Abschnitt 5 näher beschrieben.

4 Ergebnisse

Der Beitrag der UNA-TERRA-Fassade zur Förderung des Strukturreichtums, zur Klimaregulation sowie zu bauphysikalischen Prozessen an der Gebäudehülle und im Innenraum werden nachfolgend erörtert. Dies erfolgt nach den unter Abschnitt 3 genannten Phänomenen und Prozessen im Außenraum, an der Gebäudehülle sowie im Innenraum.

4.1 Prozesse im Außenraum

Die Wirkung der Testfassade zur Steigerung des Strukturreichtums und damit verbunden eines heterogenen Mikroklimas wird im Abschnitt 4.1.1 untersucht. Abschnitt 4.1.2 befasst sich mit den Auswirkungen der Fassade auf das Mikroklima der nahen Umgebung.

4.1.1 Strukturreichtum und Artenvielfalt

Bild 8 zeigt die Entwicklung der Vegetation der UNA-TERRA-Fassade über den Verlauf eines Jahres, erweitert zu [50]. Die Pflanzen haben den vertikalen Lebensraum angenommen und sind durch die Unterstützung der automatisierten Bewässerung inklusive Nährstoffzugabe innerhalb eines kurzen Zeitraums deutlich gewachsen. Bei einer floristischen Erhebung im Juli 2022, d. h. nach einer fünfmonatigen Standzeit, wurden neben den bewusst eingesetzten Pflanzen weitere Arten also Spontanvegetation, wie *Taraxacum* sect. *Ruderalia* (Gewöhnlicher Löwenzahn) und *Cirsium arvense* (Acker-Kratzdistel) auf der Wand entdeckt [50]. Im Dezember erfolgte ein behutsamer Rückschnitt ausgewählter Pflanzen. Bei der Pflegetätigkeit wurde darauf geachtet, potenzielle Lebensraumstrukturen nicht zu zerstören. Das Ziel des Rückschnittes bestand ausschließlich in der Erhaltung bzw. Förderung der Gesundheit der Pflanzen, um ein Austreiben der Pflanzen im Frühling zu unterstützen. Entsprechend war der Rückschnitt nicht, wie sonst üblich, aus optischen Gründen motiviert. Aus diesem Grund blieben abgestorbene, markhaltige Pflanzenstängel wie die von *Cirsium arvense* (Ackerkratzdistel) und *Achillea millefolium* (Schafgarbe), die potenziell von verschiedenen Wildbienenarten zur Eiablage genutzt werden, über die Wintermonate stehen.

Die floristische Erhebung im Juli zeigte weiter, dass sich auf der Wand ein Pflanzbedeckungsgrad von > 100 % ausgebildet hat [50]. Vergleichbar mit der Entwicklung unterschiedlicher Schichten anderer naturnaher Räume entlang ihren Umweltpräferenzen bzw. thermischen Refugien (Abschnitt 2.2.1) bildeten sich auf der UNA-TERRA-Fassade zwei Pflanzschichten aus (Bild 9). Ausgehend vom Außenraum etablierten sich Halblicht- bis Volllichtpflanzen, wie z. B. *Linaria vulgaris* (Echtes Leinkraut) in der ersten, äußeren Schicht. In der zweiten, inneren Schicht zogen sich hingegen Pflanzen zurück, die mit einem schattigen Standort zuretkommen, wie z. B. *Hedera helix* (Gemeiner Efeu). Der Vergleich der Luft- und Oberflächentemperatur vor und in der Grünfassade sowie der Substrattemperatur über eine Sommerwoche im Juli 2022 zeigt, dass sich innerhalb der Fassade unterschiedliche thermische Bedingungen einstellten (Bild 10). Vergleichbar mit der thermischen Pufferung von Baumkronen bei naturnahen Räumen fungiert die Blattschicht als ein thermischer Puffer auf kleinstem Raum und reduziert die einfallende kurzwellige Solarstrahlung. Die Lufttemperatur in der Grünfassade ist daher deutlich und insbesondere am Tag gegenüber der Lufttemperatur vor der Grünfassade reduziert. Eine weitere thermische Pufferung stellt sich in der Substratschicht ein.

Die Ausbildung heterogener thermischer Refugien zeigt sich ergänzend durch thermographische Aufnahmen der Fassade, siehe Bild 11. Die Aufnahme erfolgte in den späten Abendstunden nach einem strahlungsreichen Tag im Juli 2022. Im Bild 11a ist die gesamte



Bild 8. Fotografische Ansichten der UNA-TERRA-Fassade über den Verlauf von über einem Jahr. Die Fotos zeigen die Fassade unmittelbar nach der Installation sowie nach zwei, drei, fünf, elf sowie dreizehn Monaten Standzeit.



Bild 9. Fotografische Detailaufnahme der Pflanzschicht an der UNA-TERRA-Fassade. Durch die Anpassung der Pflanzen entlang ihrer Umweltpräferenzen haben sich zwei Pflanzschichtungen ausgebildet [50].

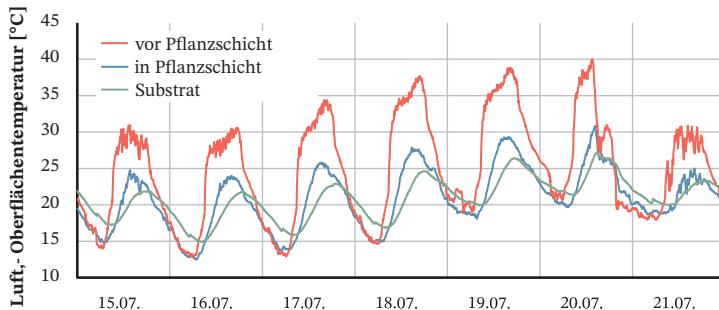


Bild 10. Vergleich der gemessenen Lufttemperaturen vor der Pflanzschicht, in der Pflanzschicht sowie der Oberflächentemperatur des Substrats über eine Sommerwoche im Juli 2022

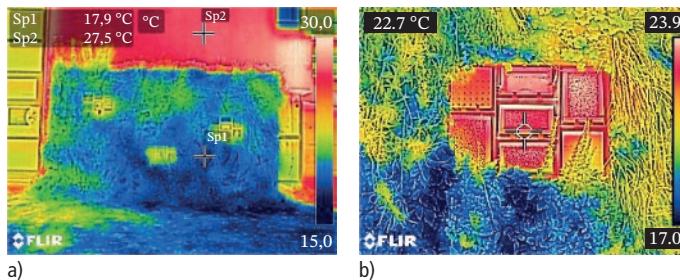


Bild 11. Thermographische Aufnahme der UNA-TERRA-Fassade in den Abendstunden nach einem strahlungsreichen Tag im Juli 2022;
a) die gesamte Fassade,
b) eine Detailaufnahme der Nisthilfe

UNA-TERRA-Fassade inkl. einem Ausschnitt der unbegrünten Betonwand dargestellt. Im Bild 11b ist ergänzend eine Detailaufnahme der Nisthilfen illustriert. Die Aufnahmen zeigen erstens, dass die Oberflächentemperatur der Grünfassade im Mittel deutlich kühler als die Oberflächentemperatur der Betonwand ist. Auf das klimaregulierende Wirkpotenzial wird vertiefend in Abschnitt 4.1.2 eingegangen. Zweitens ist bei der Grünfassade gegenüber der Betonwand eine deutlich größere mikroklimatische Heterogenität zu identifizieren. Die Oberflächentemperatur der Betonwand ist nahezu gleichmäßig und beträgt ca. 27 °C. Hingegen bilden sich bei der UNA-TERRA-Fassade durch die heterogenen Pflanzbestände mit unterschiedlichen Oberflächenbeschaffenheiten Temperaturdifferenzen von > 10 K. Durch die Nisthilfen und die Integration von organischen und mineralischen Materialien vergrößert sich der Effekt bzw. die mikroklimatische Heterogenität weiter (Bild 11b).

Im Juli 2022 fand eine punktuelle Erhebung der Insektenvielfalt auf der UNA-TERRA-Fassade statt. Über einen Beobachtungszeitraum von 15 Minuten wurden auf drei abgesteckten Quadraten mit je 1 m² die anfliegenden Insekten gezählt. Details zum Monitoring und zur Erfassung der Insektenvielfalt sind in [48] dokumentiert. Während des Monitorings von 15 Minuten wurden 62 Tiere auf den Quadraten gesichtet. Dabei machten Wildbienen mit insgesamt 29 Sichtungen den größten Anteil aus, gefolgt von Hummeln (spe-

zifische Gattung der Wildbienen) und Schwebfliegen. Auf der Betonwand wurden über den gleichen Beobachtungszeitraum hingegen keine Insekten gesichtet. Die Annahme der Nisthilfen durch Wildbienen erfolgte unmittelbar nach der Installation und bis in den September hinein. Besonders beliebt war der Hartholzblock mit einem Lochdurchmesser von < 2 mm. Im Herbst des Jahres 2022 waren alle Nisteingänge dieser Niststruktur verschlossen. Weiter konnten ab März des Jahres 2023 vielzählige geöffnete Nistverschlüsse sowie Wildbienen an den Nisthilfen beobachtet werden. Bild 12 illustriert eine exemplarische fotografische Zusammenstellung von Tierarten, die zu der Erhebung im Juli 2022, explorativ/ergänzend auf der Fassade gesichtet wurden. Neben den Wildbienen nutzten insbesondere Spinnen und Ohrwürmer die Niststrukturen. Auch die glatte, außenseitige Oberfläche der Nisthilfen wurde insbesondere von der gefleckten Weinbergschnecke zur Ruhephase genutzt (Bild 12, unten links). Diese zogen sich am Tag in die schattige und feuchte Pflanzschicht zurück, wohingegen unterschiedliche pollensuchende Insekten die (blühenden) Pflanzen anflogen.



Bild 12. Fotografische Aufnahmen der faunistischen Vielfalt auf der UNA-TERRA-Fassade mit Taubenschwänzchen, Gartenkreuzspinne, blau Holzbiene, grünes Heupferd, gescheckte Weinbergschnecke, Wildbiene in Sand/Lehm-Niststruktur, Feuerwanzen in abgestorbenen Pflanzstämmeln sowie Wildbiene in Hartholz-Niststruktur. Ergänzend ist der Hartholzblock mit komplett verschlossenen Nisteingängen illustriert (oben rechts).

4.1.2 Klimaregulation

Die klimaregulierenden Wirkungen im Außenraum der UNA-TERRA-Fassade resultieren aus der Modifizierung der Energiebilanz und im Besonderen der Strahlungsbilanz [11]. Bild 13 stellt die identifizierten Effekte im Vergleich zur Betonwand zusammenfassend dar. Durch die Evapotranspiration der Oberfläche, d. h. der Verdunstung von Wasser über die Substratoberfläche

sowie den Pflanzenblättern leitet sich unmittelbar die Erhöhung der latenten Wärmestromdichte und damit einhergehend das Kühlpotenzial der Fläche ab. Die UNA-TERRA-Fassade bezog im Juli 2022 eine kumulierte Wassermenge von 1710 Litern. Dies entspricht einem Wasserverbrauch von 6,9 Litern pro Tag und Quadratmeter. Der hierfür benötigte Energiebedarf für Verdunstungsprozesse kann durch die spezifische Ver-

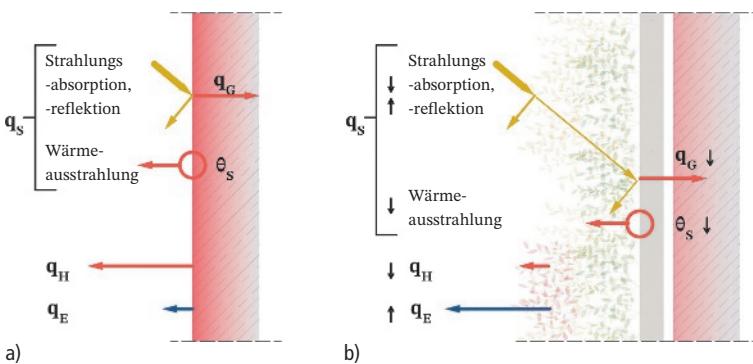


Bild 13. Gegenüberstellung der Wirkungseffekte zur Klimaregulation einer Betonfassade (a) sowie der UNA-TERRA-Fassade (b). Legende für die Änderungen gegenüber der Betonfassade: \uparrow = Zunahme; \downarrow = Abnahme

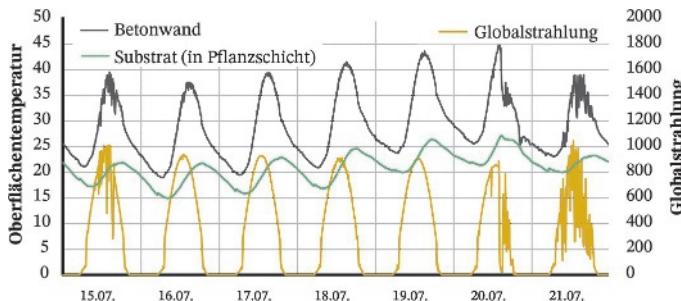


Bild 14. Vergleich der gemessenen Oberflächentemperaturen am Substrat (in Pflanzschicht) sowie der Betonwand über eine Sommerwoche im Juli 2022. Ergänzend ist die Globalstrahlung im Diagramm eingetragen.

dampfungswärme (von Wasser) ausgedrückt werden. Ist die Menge des verdunstenden Wasservolumens bekannt, kann die hierfür benötigte latente Wärmeenergie durch die Multiplikation mit der spezifischen Verdampfungsenthalpie bestimmt werden. Bei Wasser beträgt diese bei einer Ausgangstemperatur von 20 °C 2453 kJ/kg. Unter Annahme, dass das Wasser in der UNA-TERRA-Fassade eine Temperatur von ca. 20 °C hatte, ergibt sich bei der UNA-TERRA eine latente Wärmestromdichte im Juli von etwa 196 W/m² und damit nach Gl. (1) die unmittelbare Reduzierung der sensiblen (fühlbaren) Wärmestromdichte.

Weiter fungiert die Vegetation als thermischer Puffer (vgl. Abschnitt 2.2.1). Die kurzwellige solare Einstrahlung auf das Substrat bzw. Bauteil wird insbesondere durch die Blätter abgeschirmt und die Strahlungsabsorption (siehe auch Abschnitt 4.2.1.1) reduziert. Dies beeinflusst einerseits die Wärmespeicherung und andererseits die Oberflächentemperaturen von Substrat bzw. Bauteil. Bild 14 zeigt den Vergleich der Oberflächentemperaturen von Betonwand und Substratschicht einer Juliwoche im Jahr 2022. Ergänzend ist die Globalstrahlung im Diagramm eingetragen. Die Temperaturen der Substratschicht sind deutlich mit bis zu 18 K gegenüber der Betonwand reduziert. Durch die hohe Strahlungsabsorption reagiert die Betonwand unmittelbar auf die Solarstrahlung und folgt deren Verlauf. Dieser Zusammenhang lässt sich beispielsweise im Bild 14 am 15. Juli oder am 20. Juli beobachten. Sobald die Globalstrahlung aufgrund von Wolkenbildung abnimmt, reduziert sich die Oberflächentemperatur. Dieses Phänomen wird durch die Vegetation signifikant abgepuffert.

Aus der Temperatur einer Oberfläche leitet sich nach Gl. (2) unmittelbar die Intensität der langwellige Wärmeausstrahlung der Flächen ab. Je höher die Oberflächentemperatur, desto höher die Ausstrahlung bzw. umgekehrt. Die Reduzierung der langwigen Wärmeausstrahlung trägt daher unmittelbar zur Reduzierung des Hitzeinseleffektes bei und rückt als Baustein einer klimaangepassten Gestaltung von urbanen Räumen und Oberflächen in den Fokus.

4.2 Prozesse an der Gebäudehülle

Boden gebundene und fassadenintegrierte Grünsysteme, zu letzteren zählt das UNA-TERRA-System, wirken auf den Wärmefluss durch die Fassade auf unterschiedliche Weisen. In Tabelle 6 ist die Interaktionsmöglichkeit der Systeme auf ausgewählte bauphysikalische Phänomene dargestellt. Die Untersuchungen zu diesen Einflüssen erfolgen nachfolgend.

4.2.1 Wärmeübergang außen

Die Vegetation der Grünwand beeinflusst den Wärmeübergangswiderstand an der äußeren Fassadenoberfläche. Zur Untersuchung dieser Aussage wurden durch mehrere Messreihen Daten gemäß Abschnitt 3 an der UNA-TERRA-Fassade erhoben.

Zur Ermittlung des Einflusses der Grünfassade auf die bauphysikalischen Kenngrößen des Wärmeübergangswiderstands wurde der Einfluss auf die Wärmeabstrahlung sowie der Zusammenhang zwischen Vegetationstiefe, also Dicke/Stärke der oberirdischen Biomasse und der Verschattung, analysiert. Weitere Untersuchungen erfolgten bezüglich der Strömungsverhältnisse hinter der Vegetation an der Fassade.

Tabelle 6. Beeinflussungsmöglichkeit bodengebundener und fassadenintegrierter Systeme auf bauphysikalische Phänomene des Wärmedurchgangs von Fassaden

| Phänomen | boden gebundenes System | fassadenintegriertes System |
|---|-------------------------|-----------------------------|
| langwellige Wärmeabstrahlung außen | × | × |
| konvektiver Wärmeübergang außen | × | × |
| strahlungsbedingter Wärmeübergang außen | × | × |
| Wärmedurchlass Bauteil | – | × |

4.2.1.1 Wärmeabstrahlung

Bei der in Abschnitt 2.3.1 erläuterten Berechnung des Wärmeübergangswiderstands nach DIN EN ISO 6946 [44] fließen nach Gl. (6) der konvektive und der strahlungsbedingte Wärmeübergangskoeffizient ein, die sich wiederum näherungsweise nach DIN entsprechend der beiden Gln. (7) und (14) bestimmen lassen. In Bild 15 ist der resultierende Wärmeübergangswiderstand in Abhängigkeit unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeiten sowie mittlerer thermodynamischer Temperaturen dargestellt. Es zeigt sich zunächst erwartungsgemäß mit steigenden Strömungsgeschwindigkeiten sowie mit steigenden mittleren thermodynamischen Temperaturen ein abnehmender Wärmeübergangswiderstand. Ebenfalls wird bei steigenden

Strömungsgeschwindigkeiten ein fallender Einfluss der thermodynamischen Temperatur ersichtlich. Während bei angenommener Windstille (0 m/s) der Wärmeübergangswiderstand im Temperaturbereich zwischen -20°C und 30°C zwischen $0,10 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ und $0,14 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ liegt, ergibt sich bei 4 m/s, also den der Norm zugrundeliegenden Bedingungen, ein annähernd konstanter Wert von $0,04 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ über diesen Temperaturbereich.

Wie in Abschnitt 2.3.1 beschrieben, berücksichtigt der Wärmeübergangskoeffizient der Norm den langwellige Wärmestrahlungsaustausch zwischen einer freistehenden Bauteiloberfläche und dem Himmel nicht. Bild 16 zeigt den durch langwellige Abstrahlung resultierenden Wärmestrom einer horizontalen Fläche

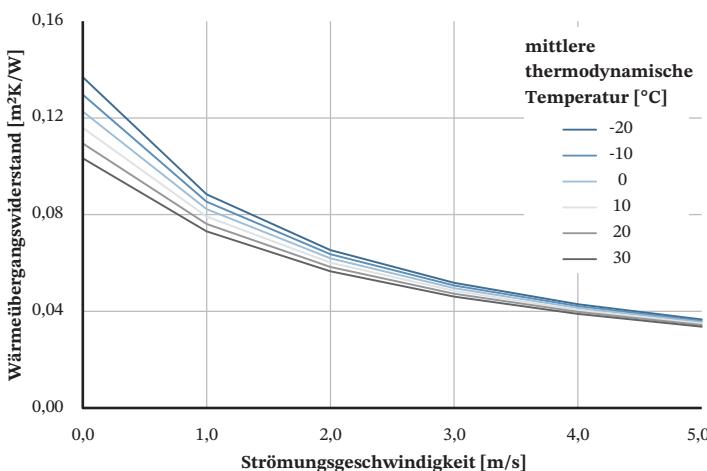


Bild 15. Darstellung des resultierenden Wärmeübergangswiderstands nach DIN EN ISO 6946 [44] in Abhängigkeit unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeiten sowie mittlerer thermodynamischer Temperaturen

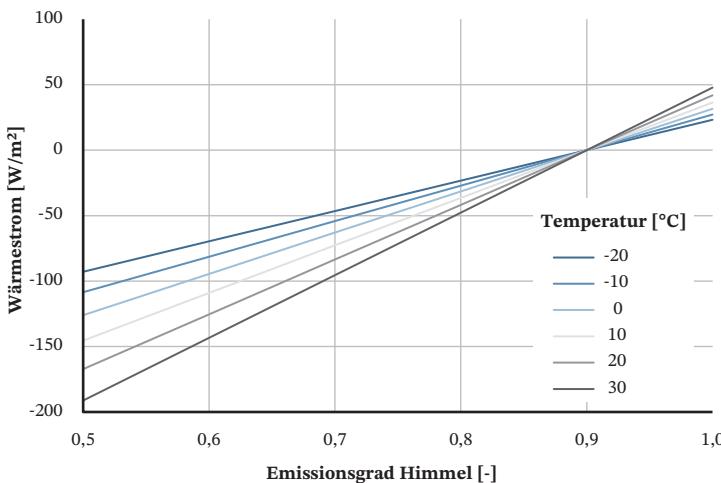


Bild 16. Darstellung der resultierenden Abstrahlung einer horizontalen Fläche in Abhängigkeit unterschiedlicher Temperaturen sowie Emissionsgrade des Himmels. Angenommen werden näherungsweise gleiche Temperaturen der Bauteiloberfläche und der Umgebung und ein Emissionsgrad der Bauteiloberfläche von 0,9. Realistische Werte für den Emissionsgrad des Himmels liegen nach [42] zwischen 0,95 bei einem bedeckten Himmel und 0,55 bei einem klarer Himmel (Standort Dresden).

in Abhängigkeit unterschiedlicher Temperaturen sowie Emissionsgrade des Himmels auf Grundlage der Gl. (3). In dieser Betrachtung wurden näherungsweise gleiche Temperaturen der Bauteiloberfläche ($\epsilon = 0,9$) und der Umgebung angenommen. Nach [42] liegen für den Standort Dresden realistische Werte zwischen 0,55 bei einem klaren Himmel und 0,95 bei einem bedeckten Himmel. Es zeigen sich Werte für die langwellige Abstrahlung von bis zu 170 W/m^2 (klarer Himmel bei warmen Temperaturen). Mit abnehmender Temperatur und zunehmenden Emissionsgrad des Himmels (gleichbedeutend mit zunehmender Bewölkung) wird die Abstrahlung geringer. Bei einem Emissionsgrad des Himmels von ca. 0,9 findet näherungsweise keine Abstrahlung mehr statt. Ebenfalls ist zu beachten, dass für geneigte und vertikale Bauteilflächen die langwellige Abstrahlung geringer ist als für horizontale Flächen, da der Himmelsflächenanteil gegenüber Boden, Bewuchs und angrenzenden Bauwerken geringer wird [42]. Die Begrünung von Fassaden weist nach [21] einen Emissionsgrad von ca. 0,9 auf. In Situationen mit klarem Himmel kann sich durch die Begrünung mit ihrem Emissionsgrad die Abstrahlung des dahinterliegenden Bauteils deutlich verringern. Es findet demnach im Winter eine geringere Auskühlung bei klarem Himmel statt. Durch dieses Phänomen kann sich auch der Energiebedarf des Gebäudes verringern.

4.2.1.2 Verschattung

Um die Vegetationsdichte und die damit verbundene Verschattung unter der Blattschicht zu ermitteln, erfolgten Messungen der Beleuchtungsstärke in der Vegetation und gleichzeitig an einem Referenzpunkt au-

Berhalb der Begrünung. Aus diesen Messwerten wird ein Beleuchtungsstärkequotient in Analogie zu dem Verschattungskoeffizienten nach [33] durch das Verhältnis der Beleuchtungsstärke unter der Vegetation zur Beleuchtungsstärke am Referenzpunkt jeweils in horizontaler Richtung ermittelt. Bild 17 zeigt das Messergebnis einer Messreihe mit ca. 3000 Messpunkten unter einer ca. 25 cm dicken Vegetationschicht. Es zeigt sich eine starke Abhängigkeit zwischen der Beleuchtungsstärke unter der Vegetation zur Referenzbeleuchtungsstärke. Ausgehend von einem Ausgangspunkt im Koordinatenursprung (bei 0 Lux Referenzstrahlung ergibt sich 0 Lux unter dem Grün) ergibt sich ein linearer Zusammenhang mit einem Bestimmtheitsmaß von über 96,6 %. Dementsprechend lässt sich der Beleuchtungsstärkenquotient $\text{EQ}_{25\text{cm}}$ bei 25 cm Vegetationsstärke annähernd aus jedem Punktpaar der Messung entsprechend Gl. (19) ermitteln.

$$\text{EQ}_{25\text{cm}} = \frac{E_{25,n}}{E_{25,n\text{Ref}}} \quad [-] \quad (19)$$

mit

$E_{25,n}$ Beleuchtungsstärkequotient bei einer Vegetationsstufe von 25 cm

$E_{25,n}$ Beleuchtungsstärke unter Vegetationsstufe von 25 cm bei Zeitschritt n der Messung

$E_{25,n\text{Ref}}$ Beleuchtungsstärke am Referenzpunkt bei Zeitschritt n der Messung

In einem weiteren Schritt werden alle nach dem erläuterten Schema ermittelten Beleuchtungsstärkequotienten im Bezug zur Vegetationsstufe untersucht. Das Ergebnis ist in Bild 18 grafisch dargestellt. Es zeigt sich ein stark in Abhängigkeit der Dicke der Grünstruktur ab-

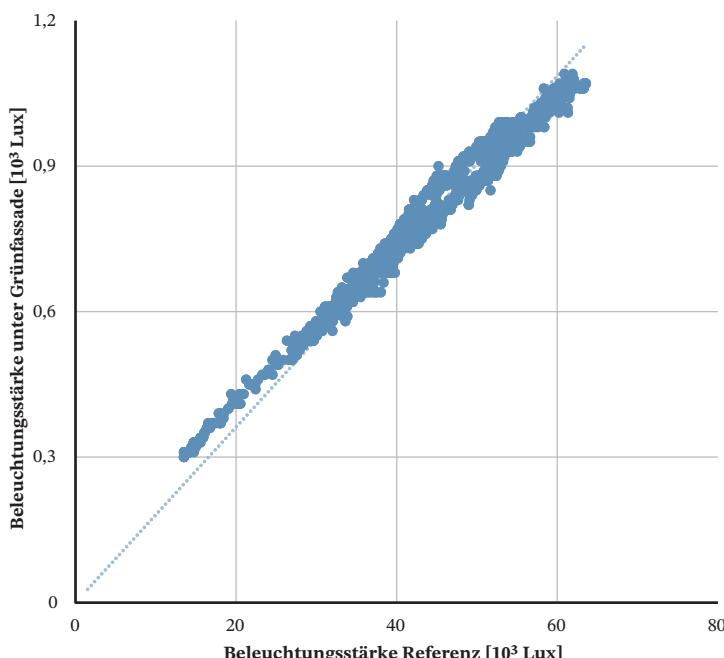


Bild 17. Darstellung des Zusammenhangs der Beleuchtungsstärken bei 25 cm Vegetationsstufe in Abhängigkeit der unverschatteten Referenzbeleuchtungsstärke

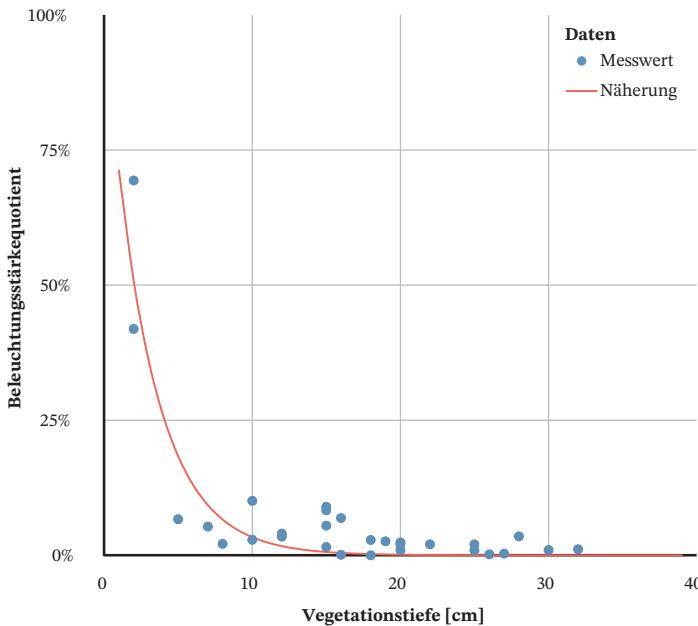


Bild 18. Darstellung des Zusammenhangs der Beleuchtungsstärkequotienten in Abhängigkeit der Vegetationstiefe über alle Messpunkte der Messreihen

nehmender Beleuchtungsstärkequotient. Der Zusammenhang lässt sich für die ermittelten Messwerte näherungsweise mit der in Gl. (20) dargestellten reziproken quadratischen Funktion mit einem Bestimmtheitsmaß von ca. 88 % abbilden.

$$EQ(d) = \frac{1}{1 + 0,2169 \cdot d^2} \quad [-] \quad (20)$$

Die Messreihen erfolgten an unterschiedlichen Tagen im März und im Mai 2023. In Bild 19 ist die fotografische Ansicht der Wand in den beiden Monaten dargestellt. Es zeigt sich eine deutlich unterschiedliche Vegetationsstruktur in den beiden dargestellten Zeiträumen. Während im März noch die braunen Strukturen der verwelkten sommergrünen Pflanzen sichtbar sind, zeigen sich im Mai bereits die nachwachsenden grünen Blätter. Dies bedingt auch eine unterschiedliche Dichte der Vegetationsschicht, sodass der Beleuchtungsquotient bei gleicher Vegetationstiefe im März bei einer weitgehend laublosen Struktur höher ausfällt als im Mai mit dichtem Bewuchs. Dieser Effekt ist in Bild 20 ersichtlich, in dem die Näherungskurven für die Monate März und Mai vergleichend dargestellt sind. Im Mai resultieren bei vergleichbaren Vegetationstiefen höhere Verschattungen, also niedrigere Beleuchtungsstärkequotienten, als im März. Weiterhin unberücksichtigt bleiben bei den Näherungsfunktionen die unterschiedlichen Pflanzenarten der biodiversitätsfördernden Fassade, die aufgrund unterschiedlicher Wuchs- und Blattstrukturen ebenfalls einen Einfluss auf den Beleuchtungsquotienten und damit auf die Vegetationsdichte nehmen. Der Einfluss der Jahreszeit und der Pflanzenart konnte an dieser Testfassade bisher nicht abschließend untersucht werden und bedarf weiterer Forschung.

4.2.1.3 Strömung

Die angenommene Abminderung der Anströmung der Fassade durch Wind infolge der Vegetation wird durch die Messung der Strömungsgeschwindigkeiten untersucht. Erfasst wurden in unterschiedlichen Messreihen die Strömungsgeschwindigkeiten an verschiedenen Stellen innerhalb der Vegetation sowie an zwei Referenzpunkten, im ungestörten Freiraum ca. einen Meter vor der Fassade und direkt vor der Betonwand des Treppenhauses. In Bild 21 sind die Ergebnisse einer Messreihe mit 8262 Werten (Sekundenschritte) als Box-Whisker-Diagramm dargestellt. Mit diesem Diagrammtyp werden mehrere Eigenschaften des Datensatzes gleichzeitig visualisiert. Der Kasten (Box) wird durch das 1. und 3. Quartil des Datensatzes, dem Interquartilbereich, definiert, in dem sich der Median als Linie befindet. Die Antennen (Whisker) stellen Grenzwerte dar, die in der Regel dem 1,5-fachen des Interquartilbereichs entsprechen, jedoch früher enden, sofern der Maximal- oder Minimal- bzw. der letzte Datenwert innerhalb des Whiskers erreicht ist. Werte außerhalb der Whisker werden als Punkte dargestellt, die in der Regel als Ausreißer zu behandeln sind [51]. Eine Abminderung der Strömungsgeschwindigkeit wird aus Bild 21 an allen Punkten an der Fassade, auch vor der Betonwand ohne Vegetation, ersichtlich. Die Nusselt- und Näherungsgleichungen nach [46] (vgl. Abschnitt 2.3.1) gehen jeweils von der Strömungsgeschwindigkeit in der unbeeinflussten Umgebung aus und berücksichtigen daher bereits diesen Effekt. Die Abminderung unter der Vegetation ist erwartungsgemäß deutlich höher als vor der Betonwand. Ausgehend vom oberen Whisker sowie vom Interquartilbereich wird ersichtlich, dass die Abminderung mit zu-



Bild 19. Fotomontage der UNATERRA-Fassade zur Visualisierung der unterschiedlichen Vegetationsstruktur im Vergleich für die Monate März und Mai

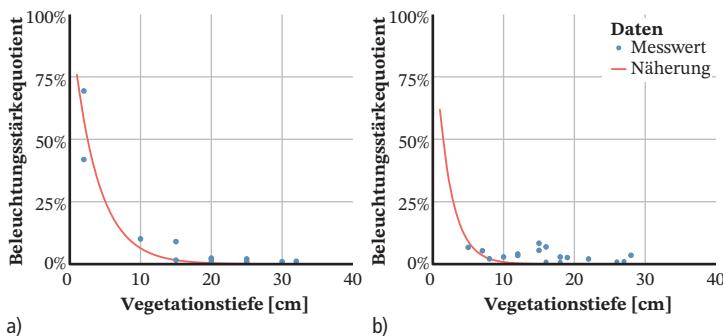


Bild 20. Darstellung der Näherungsfunktionen der Beleuchtungsstärke in Abhängigkeit der Vegetationstiefe; a) für den Monat März, b) für den Monat Mai

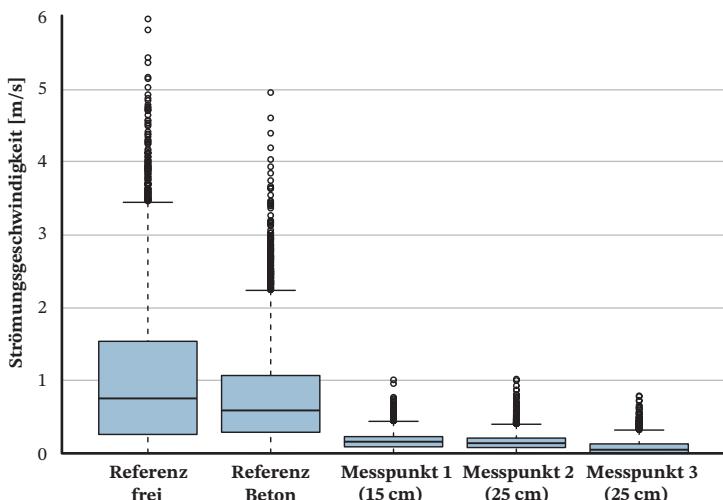


Bild 21. Darstellung der Ergebnisse einer Messreihe der Strömungsgeschwindigkeiten als Box-Whisker-Diagramm; die Werte in Klammer stellen die Vegetationstiefe der Messpunkte dar

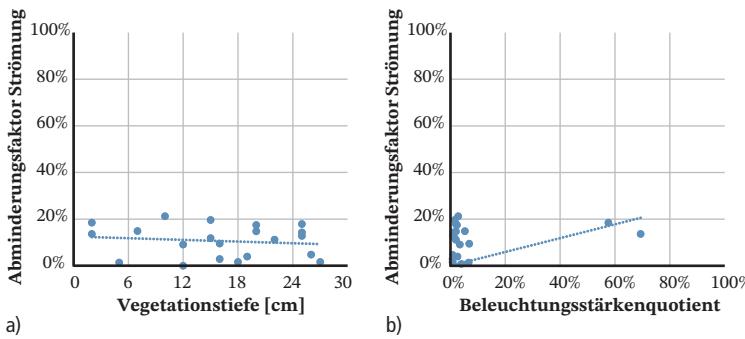


Bild 22. Visualisierung des Zusammenhangs zwischen dem Abminderungsfaktor Strömung in Abhängigkeit der Vegetationstiefe (a) bzw. des Beleuchtungsstärkenquotienten (b)

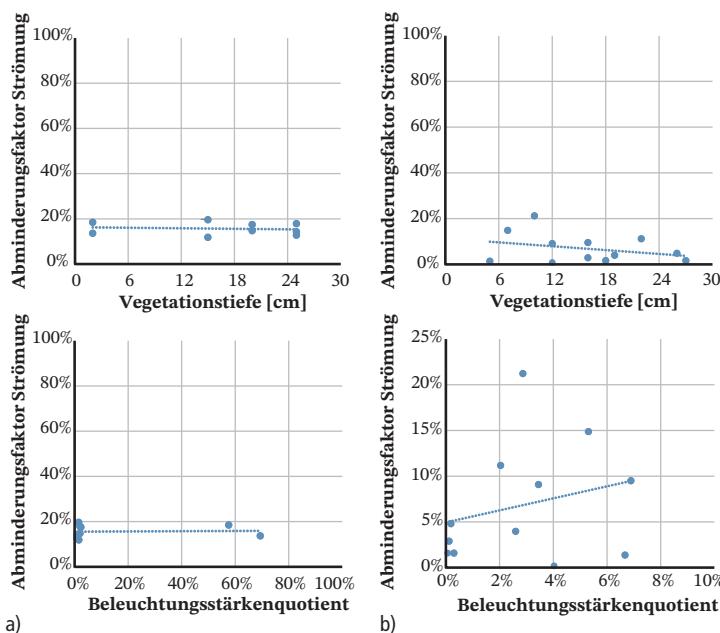


Bild 23. Darstellung des Zusammenhangs zwischen dem Abminderungsfaktor der Strömung in Abhängigkeit der Vegetationstiefe (oben) bzw. des Beleuchtungsstärkenquotienten (unten) für die Messreihen der Monate März (a) und Mai (b)

nehmender Vegetationstiefe größer wird. Jedoch ist aus diesem Beispiel auch erkennbar, dass bei gleicher Vegetationstiefe, wie in Messpunkt 2 und Messpunkt 3, eine abweichende Abminderung vorliegen kann. Der Abminderungsfaktor für die Strömungsgeschwindigkeit an einem bestimmten Messpunkt wird nach Gl. (21) ermittelt. Die Berechnung erfolgt auf Basis der oberen Whisker, da diese, wie zuvor beschrieben, die Grenze zu den Ausreißern darstellen. Die Strömungswerte unter der Vegetationsschicht werden zu denen vor der nicht begrünten Betonwand ins Verhältnis gesetzt, da der Faktor den Einfluss der Begrünung im Vergleich zu einer herkömmlichen Fassade ausdrückt.

$$FQ_{R1} = \frac{v_{Whup,R1}}{v_{Whup,Ref}} \quad [-] \quad (21)$$

mit

FQ Abminderungsfaktor Strömung

$R_{1,Ref}$ Messreihe 1 bzw. Referenz

$v_{Whup,R}$ numerischer Wert des oberen Whiskers eines Datensatzes R

Die Ergebnisse der durchgeführten Messreihen zum Abminderungsfaktor der Strömung sind in Bild 22 dargestellt. Der Abminderungsfaktor liegt bei allen Messungen die ab einer Vegetationstiefe von 2 cm beginnen bei maximal 20%. Mit steigender Vegetationstiefe (Bild 22a) nimmt die Abminderung der Strömung zu (niedrigerer Abminderungsfaktor). In Abhängigkeit zu dem im Abschnitt 4.2.1.1 bestimmten Beleuchtungsstärkequotienten ergibt sich eine Zunahme des Abminderungsfaktors bei zunehmenden Beleuchtungsstärkenquotienten (Bild 22b).

Wie bereits beim Beleuchtungsstärkenquotienten diskutiert, werden auch bei dieser Betrachtung die unterschiedlichen Strukturen der Begrünung in Abhängigkeit der Jahreszeit sowie der Pflanzenart nicht berücksichtigt. Differenzierte Ergebnisse für die Monate März und Mai sind in Bild 23 ersichtlich. Im Monat März (Bild 23a) zeigen sich durchweg annähernd konstante Abminderungsfaktoren für die Strömung, die

sich weitgehend unabhängig von der Vegetationstiefe bzw. des Beleuchtungsstärkequotienten ergeben. Die braune, noch vom Winter verwelkte und weniger dichte Struktur der teilweise sommergrünen Bepflanzung scheint zu einer konstanten Abminderung der Strömung zu führen. Die Ergebnisse der Messreihen im Monat Mai (Bild 23b) zeigen im Vergleich ein differenziertes Ergebnis. Die Abminderungsfaktoren nehmen zunächst im Vergleich zum März niedrigere Werte an, es erfolgt demnach eine höhere Abminderung der Strömung. Die Abminderung der Strömung zeigt nun auch einen Zusammenhang zur Vegetationstiefe (oben) bzw. zum Beleuchtungsstärkequotienten (unten). Eine zunehmende Tiefe der Begrünung führt zu einer höheren Abminderung, also niedrigeren Abminderungsfaktoren. In Bezug zur Vegetationsdichte, ermittelt über die Größe des Beleuchtungsstärkequotienten, ergibt sich eine Zunahme des Abminderungsfaktor bei zunehmenden Beleuchtungsstärkequotienten. Zusammenfassend ist festzustellen, dass grüne Strukturen die Strömungsgeschwindigkeiten an der Fassadenoberfläche mindern. Je nach Betrachtungszeitraum erfolgt eine Abminderung auf ca. 12% bis 20% (Mittelwert 0,16) im März bzw. maximal eine annähernd vollständige Abminderung im Monat Mai (Mittelwert 0,07) im Vergleich zur Betonfassade. Mittels Gl. (22) kann folglich die anzusetzende Strömungsgeschwindigkeit

über den Abminderungsfaktor FQ bei grünen Systemen für die Gleichungen gemäß Abschnitt 2.3.1 angepasst werden.

$$v_{\text{grün}} = FQ \cdot v_{\text{ohne}} \quad [-] \quad (22)$$

mit

$v_{\text{grün}}$ Strömungsgeschwindigkeit unter der Vegetation
 v_{ohne} Strömungsgeschwindigkeit ohne Vegetation

4.2.1.4 Auswirkung

In Bild 24 ist der Einfluss der grünen Struktur auf den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten ersichtlich. Sowohl bei der Berechnung mittels der Näherungsformel nach DIN EN ISO 6946 [44] als auch über die Nusselt-Zahl nach Gl. (10) für eine Lufttemperatur von 10 °C und eine Überströmlänge von einem Meter ergeben sich deutlich geringere Werte des Koeffizienten im Gegensatz zu einer nichtbegrünten Fassade. Ausgehend von den Randbedingungen (Windgeschwindigkeit $v = 4 \text{ m/s}$ und mittlere thermodynamische Temperatur zwischen Oberfläche und Umgebung $T_{mn} = 10^\circ\text{C}$) ergeben sich unter Verwendung der im Abschnitt 4.2.1.3 ermittelten mittleren Abminderungsfaktoren für die Strömung der Monate März und Mai die in Tabelle 7 dargestellten Wärmeübergangswiderstände zur Anwendung bei einer Begrünung.

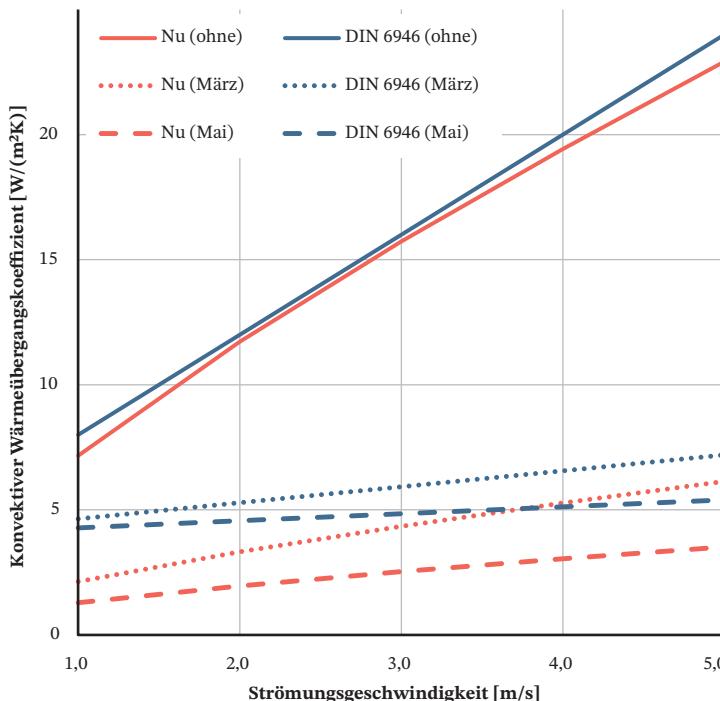


Bild 24. Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit berechnet mit der Näherungsformel nach DIN EN ISO 6946 [44] sowie über die Nusselt-Zahl (Nu) nach Gl. (10) für eine Lufttemperatur von 10 °C und eine Überströmlänge von einem Meter jeweils ohne und mit Berücksichtigung des ermittelten Abminderungsfaktors für die Monate März und Mai.

Tabelle 7. Wärmeübergangskoeffizienten außen ohne und mit Berücksichtigung einer Begrünung für die Monate März (FQ = 0,16) und Mai (FQ = 0,07) berechnet mit der Näherungsformel der DIN EN ISO 6946 sowie über die Nusselt-Zahl für eine Lufttemperatur von 10 °C und eine Überströmlänge von einem Meter

| Situation | DIN EN ISO 6946 [m ² K/W] | Nusselt [m ² K/W] |
|--------------------|---|---------------------------------|
| ohne Begrünung | 0,04 | 0,04 |
| mit Begrünung März | 0,09 | 0,10 |
| mit Begrünung Mai | 0,10 | 0,13 |

Mit diesen Erkenntnissen erfolgen die im Abschnitt 4.3 dargestellten Simulationen zu den Auswirkungen der Grünfassade auf den Energiebedarf und den Hitzeeintrag eines fiktiven Raumes. Kritisch anzumerken ist bei dieser Betrachtung die geringe Anzahl der bisher erfassten Messpunkte. Für den Monat März liegen lediglich 9 und für den Monat Mai 12 Messdaten vor. Dies führt bei der Betrachtung des Zusammenhangs über eine lineare Regression zu geringen Bestimmtheitsmaßen von maximal 9,2 %. Zukünftig werden analog zur Untersuchung des Beleuchtungsstärkequotienten neben der vertieften Betrachtung des jahreszeitlichen Einflusses auch die unterschiedlichen Bepflanzungen der heterogenen, biodiversitätsfördernden Fassade detailliert untersucht werden.

4.2.2 Wärmedurchlass Bauteil

Ein fassadengebundenes Grünsystem kann im Gegensatz zu einem bodengebundenen System (Tabelle 6) durch zusätzliche Bauteilschichten den Wärmedurchlasswiderstand nach Gl. (4) und dementsprechend nach Gl. (5) den Wärmedurchgangskoeffizienten verbessern. Es kann sich je nach Systemaufbau zwischen (ursprünglicher) Fassade des Gebäudes und dem Grünsystem ein Luftraum ausbilden, der den Wärmetransport durch die Wand beeinflusst. Des Weiteren bildet das Fassadensystem selbst eine weitere Bauteilschicht aus. Beide Mechanismen werden nachfolgend näher diskutiert.

Sofern sich zwischen dem Grünfassadensystem und der ursprünglichen Wandkonstruktion eine Luftschicht ausbildet, wird diese entsprechend DIN EN ISO 6946 [44] zwischen ruhender, schwach belüfteter und stark belüfteter Schicht unterschieden. Als Differenzierungsmerkmal dient bei vertikalen Luftschichten in Fassaden die Öffnungsfläche je Meter Länge in horizontaler Richtung. Beträgt diese weniger als 5 cm² erfolgt der Ansatz als ruhende und bei mehr als 15 cm² als stark belüftete Luftschicht. Dazwischen handelt es sich um eine schwach belüftete Luftschicht.

Der anzusetzende Wärmedurchlasswiderstand einer ruhenden, vertikalen Luftschicht einer Fassade bei horizontalem Wärmestrom weist nach [44] einen schnel-

len Anstieg des Wertes bei geringen Dicken bis etwa 1,5 cm auf. Ab einer Luftsichtdicke von 2,5 cm tritt bei einem Wert von 0,18 m² K/W keine Änderung des Widerstands mehr ein. Dieser Widerstand wird als weitere Schicht in den Gln. (5) und (4) bei der Berechnung berücksichtigt [44]. Ein anderer Ansatz wird bei der Berücksichtigung einer stark belüfteten Luftsicht gewählt. Bei der Berechnung des Wärmedurchlasswiderstands der Konstruktion werden der Wärmedurchlasswiderstand der Luftsicht und der weiteren Schichten bis zur Außenumgebung vernachlässigt und es wird ein äußerer Wärmeübergangswiderstand unter Annahme einer ruhenden Luftsicht verwendet. Alternativ kann der entsprechende Wärmeübergangswiderstand für den Innenraum, bei horizontalem Wärmestrom $R_s = 0,13 \text{ m}^2 \text{ K/W}$, angesetzt werden. Der Wärmedurchlasswiderstand von Konstruktionen mit schwach belüfteten Luftsichten wird schließlich mittels Gl. (23) aus dem Wärmedurchlasswiderstand der Konstruktion unter Annahme einer ruhenden Luftsicht und dem Wärmedurchlasswiderstand der Konstruktion unter Annahme einer stark belüfteten Luftsicht in Abhängigkeit der Öffnungsfläche je Meter Länge in horizontaler Richtung gebildet [44]. Bild 25a gibt den Zusammenhang grafisch wieder. Es zeigt sich, dass ruhende bzw. schwach belüftete Schichten im Gegensatz zu solchen mit einer starken Belüftung in der Regel zu einem höheren Wärmedurchlasswiderstand führen.

$$R_{\text{tot}} = \frac{15 - A_{\text{ve}}}{10} R_{\text{tot,nve}} + \frac{A_{\text{ve}} - 5}{10} R_{\text{tot,ve}} \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \right] \quad (23)$$

mit

A_{ve} Öffnungsfläche je Meter Länge in horizontaler Richtung

$R_{\text{tot,nve}}$ Wärmedurchlasswiderstand unter Annahme einer ruhenden Luftsicht

$R_{\text{tot,ve}}$ Wärmedurchlasswiderstand unter Annahme einer stark belüfteten Luftsicht

Das eigentliche Begrünungssystem, also die Konstruktion inklusive Substrat, kann durch zusätzliche Bauteilschichten den U-Wert der Konstruktion weiter verbessern. Beim vorliegenden System der UNA-TERRA-Fassade besteht das Substrat aus Steinwolle, die regelmäßig bewässert wird. Mittels der Bewässerung werden an die Bepflanzungsstruktur angepasste Nährstoffe dem Grünsystem zugeführt. Gleichzeitig führt Feuchtigkeit zu einer Verschlechterung der Wärmeleitfähigkeit. Dieser Effekt ist exemplarisch für einen Faserdämmstoff in Bild 25b dargestellt. Über diesen Effekt kann sich ein dynamischer U-Wert im Verlauf des Jahres einstellen, da eine stärkere Bewässerung im Sommer zu einem höheren Feuchtegehalt im Substrat des Grünfassadensystems als im Winter führt.

Die Simulationen zu den Auswirkungen der Grünfassade auf den Energiebedarf und den Hitzeeintrag in Abschnitt 4.3 berücksichtigen exemplarisch verschiedene Aufbauten der Fassaden hinsichtlich der Luftsicht sowie des Feuchtegehalts des Substrats. Weitere

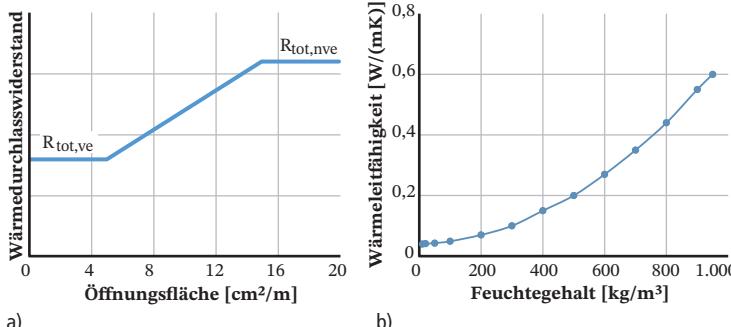


Bild 25. Systematische Darstellung des Zusammenhangs nach [44] zwischen Öffnungsfläche pro Meter Länge in horizontaler Richtung einer Luftsicht und dem Wärmedurchlasswiderstand basierend auf den Wärmedurchlasswiderständen unter Annahme einer ruhenden Luftsicht $R_{\text{tot},\text{nve}}$ (a) und Darstellung der Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit eines exemplarischen Dämmstoffes von seinem Feuchtegehalt [52] (b)

Untersuchungen mit Messung der sich real einstellenden Hinterlüftung und Feuchtegehalte werden als sinnvoll erachtet und sind für die weitere Forschungsarbeit am Folgeobjekt (Abschnitt 5) vorgesehen.

4.3 Wirkung auf das Gebäude

Der Einfluss des Grünsystems auf das Gebäude wird anhand der Analyse der energetischen Qualität sowie des Hitzeintrags fiktiver Gebäude mit und ohne Begrünung untersucht. Mittels den in Abschnitt 4.2.1 ermittelten bauphysikalischen Kenngrößen des Grünsystems erfolgt eine simulative Parameterstudie.

4.3.1 Randbedingungen

Als Zielgrößen bei der Untersuchung des thermischen Wirkpotenzials der Grünfassaden dienen der flächenbezogene Heizwärmeverbrauch für den winterlichen und der Hitzeintrag über die Übertemperaturgradstunden für den sommerlichen Wärmeschutz. Das Untersuchungsobjekt ist ein Gebäude, dessen Außenbauteile den gegenwärtigen Anforderungen nach Anlage 7 des GEG [53] entsprechen. Mit einer Betonkonstruktion sowie einem Wärmedämmverbundsystem wird eine für Deutschland gängige Konstruktionsart gewählt. Weiter kommen Alu-Fenster mit hohem Wärmestandard zum Einsatz. Für eine allgemeinere Einschätzung wird zusätzlich der Raum eines Altbau untersucht. Die Außenwandkonstruktion entspricht einer sogenannten Normalwand, wie sie zu Beginn des 20. Jahrhunderts gängig war [54]. Diese 38 cm dicke, beidseitig verputzte Ziegelwand besitzt einen U-Wert von 1,47 W/(m² K). Die entsprechend der damaligen Zeit großen Raumhöhen führen bei vergleichbarer Grundfläche zu einem etwas höheren Volumen. Die weiteren Eigenschaften der beiden Räume sind Tabelle 8 zu entnehmen.

Für die beiden Gebäude werden unterschiedliche Varianten bezüglich der Fassadenbegrünung gebildet. Untersucht wird das Gebäude ohne Fassadenbegrünung,

Tabelle 8. Zusammenstellung der Randbedingungen und Eingabeparameter der hygrothermischen Gebäudesimulation der beiden untersuchten Räume

| Parameter | Gebäude | |
|---|--|------|
| | Altbau | GEG |
| Grundfläche A _G [m ²] | 27,8 | 25,0 |
| Volumen V [m ³] | 89 | 60 |
| Fassadenfläche [m ²] | 18,56 | 14,4 |
| Fensterfläche A _W [m ²] | 5,0 | 6,0 |
| Fensterflächenanteil A _W /A _G | 12 % | 24 % |
| U-Wert Fassade [W/m ² K] | 1,47 | 0,24 |
| U-Wert Fenster | 2,73 | 1,3 |
| g-Wert Fenster | 0,6 | 0,46 |
| Grundluftwechsel n [1/h] | 1 | 0,6 |
| erhöhter Luftwechsel (Tag und Nacht) [1/h] | 3 | |
| interne Lasten | 2 Personen (Wärme: 202 Watt; Feuchte: 86 g/h) | |
| Simulationsdauer und -schritte | 1.1. bis 31.12., 30 Tage Initialisierung, 1 Stunde | |

nung, mit einem bodengebunden sowie mit einem fassadenintegrierten System. Die numerische Abbildung der Grünstruktur auf die Oberflächeneigenschaften der Fassade erfolgt über den konvektiven und strahlungsbedingten Wärmeübergangskoeffizienten sowie über den Beleuchtungsstärkequotienten. Diese Parameter wurden entsprechend Abschnitt 4.2.1 differenziert für die Monate März (mit $T_{mn} = 0^\circ\text{C}$) sowie Mai ($T_{mn} = 20^\circ\text{C}$) und für Vegetationstiefen von 5 cm und 20 cm ermittelt. Nach Bild 23 stellt sich für die Begrünung im März über die Tiefe ein konstanter Abmin-

Tabelle 9. Eingangsparameter der Oberflächeneigenschaften für die Gebäudesimulation in Abhängigkeit der Vegetationsstiefe und des Betrachtungszeitraums

| Begrünung | Wärmeübergangskoeffizient [W/(m ² K)] | | Beleuchtungsstärkequotient [%] |
|------------------------|--|-------------------|--------------------------------|
| | konvektiv | strahlungsbedingt | |
| ohne | 19,43 | 4,15 | 100,00 |
| Vegetation 5 cm, März | 5,27 | 4,15 | 25,20 |
| Vegetation 20 cm, März | 5,27 | 4,15 | 0,40 |
| Vegetation 5 cm, Mai | 3,81 | 5,13 | 9,08 |
| Vegetation 20 cm, Mai | 2,66 | 5,13 | 0,01 |

derungsfaktor der Strömung in Höhe von 0,16 ein, im Mai nimmt dieser mit zunehmender Tiefe ab und beträgt bei 5 cm etwa 0,10 sowie bei 20 cm etwa 0,06. In Tabelle 9 werden die Eingangsparameter der Oberflächeneigenschaften für die Gebäudesimulation aufgelistet. Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient wird nach Gl. (10) und der strahlungsbedingte Wärmeübergangskoeffizient nach Gl. (7) bestimmt.

Das fassadenintegrierte System wird mit einem Luftraum von 5 cm vor der tragenden Konstruktion beim Altbau bzw. vor der thermisch wirksamen Schicht beim Gebäude nach GEG angebracht. Für die Ausbildung des Luftraums wird jeweils eine ruhende Schicht und eine Hinterlüftung (mittlere Luftwechselrate für Stadt und freies Gelände nach [55]) simuliert. Ebenfalls untersucht wird der Einfluss des Feuchtegehalts des bewitterten Substrats mit und ohne Berücksichtigung der Bewässerung über den Jahresverlauf. Die Bewässerungsmenge wurde an der UNA-TERRA-Fassade erfasst. Eine weitere Variante bildet die Ausrichtung der Fassade mit den untersuchten Orientierungen Süd und West. Abschließend wurde das Außenklima hinsichtlich des sich ändernden Klimas (vgl. Ziffer 2.1) variiert, da die Nutzungsdauer von Gebäuden oft 50 und mehr Jahre beträgt. Mittels der Software Meteonorm [8] wurden Klimadatensätze für die Simulation generiert, die die Gegenwart sowie prognostizierte Werte für die Jahre 2050 und 2100 repräsentieren. In die Untersuchung flossen die beiden extremen Szenarien RCP 2.6 und RCP 8.5 ein. Die Übersicht aller variierten Parameter des Grünfassadensystems ist in Tabelle 10 zu finden. Hinzu kommt eine unbegrünte Variante als Referenz für die fünf Klimaszenarien. Somit wurden in Summe 205 unterschiedliche Varianten jeweils für den Altbau und für das Gebäude nach GEG gebildet.

Das energetische und raumklimatische Verhalten der betrachteten Gebäude wird exemplarisch für einen

Tabelle 10. Übersicht der variierten Parameter der Untersuchung zum Energiebedarf und zum Hitzeeintrag

| Parameter | Varianten | Anzahl | Summe |
|----------------------------|--|--------|-------|
| Klima | aktuell, 2050 RCP 2.6 und RCP 8.5, 2100 RCP 2.6 und RCP 8.5 | 5 | 5 |
| Begrünungs- system | boden gebunden, fassaden integriert (mit/ohne Hinterlüftung, mit/ohne Bewässerung) | 5 | 25 |
| Oberflächen- eigenschaften | März und Mai | 2 | 50 |
| Vegetations- tiefe | 5 cm und 20 cm | 2 | 100 |
| Orientierung | Süd und West | 2 | 200 |

Raum mit dem dynamischen Simulationsprogramm Wufi® Plus [56] untersucht und ausgewertet. Das Tool berücksichtigt den gekoppelten Wärme- und Feuchte- transport im Bauteil und simuliert das sich einstellende Innenraumklima in Abhängigkeit von Außenklima, Hüllflächen sowie innerer Lasten, Quellen und Senken (Nutzende, HLK-Anlagen und Feuchte- oder Wärmequellen) unter instationären Randbedingungen. Über die Bewitterung und Bewässerung des Substrats hinaus bleibt die im Abschnitt 4.1.2 exemplarisch ermittelte latente Wärmestromdichte durch die Pflanzen noch unberücksichtigt. Weitere relevante Eingabeparameter für beide Modelle orientieren sich an den Anforderungen und Randbedingungen an thermische Gebäude- simulationen der DIN 4108-2 [48].

4.3.2 Auswirkung

Der direkte Vergleich des flächenbezogenen Heizenergiebedarfs (Bild 26, Übergangswiderstände Mai bei 5 cm Vegetation) zwischen Altbau und dem Gebäude nach GEG-Standard zeigt erwartungsgemäß einen deutlich höheren Energiebedarf des Altbaus. Ebenfalls ersichtlich wird der Einfluss der Fassadenorientierung. Die Ausrichtung nach Süden führt bei allen Fassaden- ausbildungen durchweg zu geringeren Energiebedarfen. Der Einfluss der bodengebundenen Grünsysteme auf den Energiebedarf ist bei dieser Betrachtung gering. Beim Altbau stellt sich nominell eine Verbesserung von 2 kW h/m² a bei der nach Westen orientierten Variante ein. Dies entspricht jedoch lediglich einer Verbesserung von etwa 2 %. Beim GEG-Gebäude kommt es hingegen zu einer Verschlechterung, jedoch von lediglich 0,4 %. Der insgesamt geringe Einfluss der bodengebundenen Systeme ist in seinem ausschließlichen Einfluss auf die Oberflächeneigenschaften begründet, also den Wärmeübergangswiderstand und den Verschattungsfaktor. Beim Altbau kompensieren die positiven Effekte auf den Wärmeübergangswiderstand die

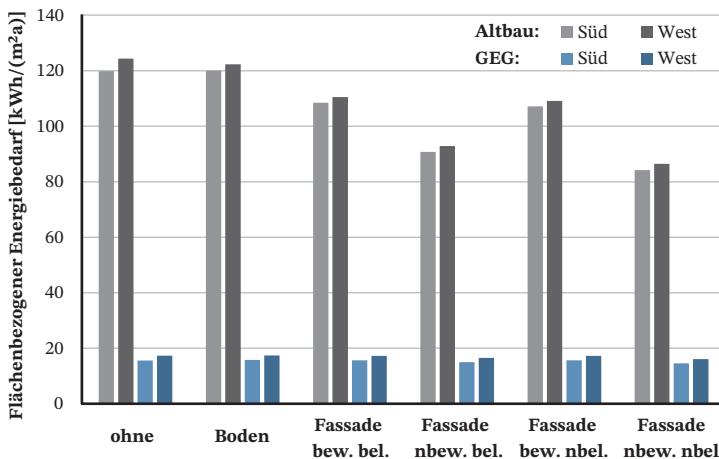


Bild 26. Auswirkungen der Fassadenbegrünung (Boden: bodengebundenes System, Fassade: fassadenintegriertes System, (n)bew.: (nicht) bewässertes Substrat, (n)bel.: (nicht) hinterlüftet) auf den flächenbezogenen Energiebedarf der untersuchten Räume. Als Referenz sind die Werte ohne Begrünung dargestellt.

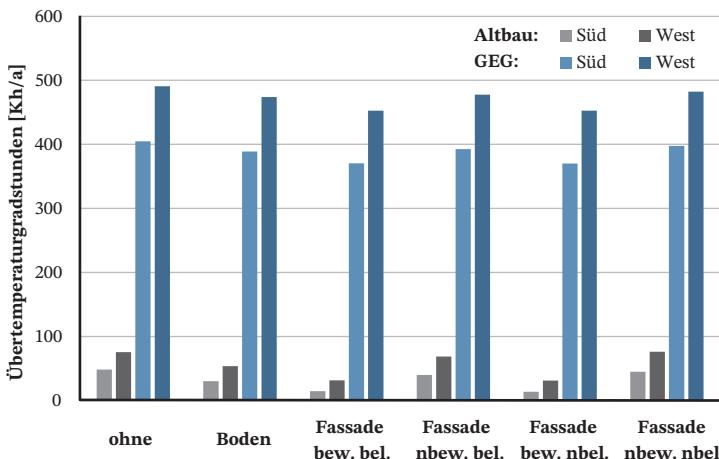


Bild 27. Auswirkungen der Fassadenbegrünung (Boden: bodengebundenes System, Fassade: fassadenintegriertes System, (n)bew.: (nicht) bewässertes Substrat, (n)bel.: (nicht) hinterlüftet) auf den sommerlichen Wärmeschutz anhand der Übertemperaturgradstunden der untersuchten Räume. Als Referenz sind die Werte ohne Begrünung dargestellt.

geringeren solaren Gewinne durch eine erhöhte Verschattung des Grünsystems. Beim GEG-Gebäude ist dieser Effekt auf geringem Niveau umgekehrt. Die fassadenintegrierten Systeme führen, vor allem beim Altbau, durch eine Verbesserung des Wärmedurchgangskoeffizienten aufgrund zusätzlicher Schichten zu höheren Energieeinsparungen. Die Variante mit nicht-bewässertem Substrat zeigt deutliche Einsparungen. Diese Variante führt bei ruhend ausgebildeter Luftschicht zu einer Reduzierung von bis zu 31 %, bei einer Hinterlüftung von 25 %. Beim Neubau ließe sich noch eine Verbesserung von bis zu 7 % erreichen. Jedoch handelt es sich um einen theoretischen Fall, da die Vegetation auf die Bewässerung angewiesen ist. Es weisen aber

auch die bewässerten Varianten ein Einsparpotenzial beim Altbau von bis zu 12 % bei ruhender Luftschicht auf. Beim Gebäude nach GEG-Standard ist der Einfluss zu vernachlässigen.

Bei der Betrachtung des sommerlichen Wärmeschutzes nach DIN 4108 Teil 2 für ein Wohngebäude, dargestellt durch die Übertemperaturgradstunden in Bild 27 mit den Übergangswiderständen für Mai bei 5 cm Vegetationsstiefe, weist der untersuchte Altbau eine bessere Performance auf als der Neubau. Bei beiden Gebäuden ist wiederum die Südorientierung günstiger als eine nach Westen ausgerichtete Fassade. Die relativen Auswirkungen eines Grünfassadensystems sind auch hier beim Altbau größer. So führt das boden-

gebundene System, hauptsächlich bedingt durch die Verschattungseigenschaften, zu einer Reduzierung um bis zu 38 % beim Altbau bzw. 4 % beim Neubau (jeweils Südorientierung). Die besten Eigenschaften weisen die fassadenintegrierten Systeme mit bewässertem Substrat auf. Bei der nach Süden orientierten Fassade des Altbaus reduzieren sich die Gradstunden um maximal 72 %, beim Neubau sind es ca. 9 %. Die Art der Luftsicht beeinflusst das Ergebnis gering, ruhende Schichten sind geringfügig besser zu bewerten. Die theoretische Variante mit nicht bewässertem Substrat könnte beim sommerlichen Wärmeschutz, vor allem in Verbindung mit einer ruhenden Luftsicht, sogar zu einer minimalen Verschlechterung bei einem nach Westen orientierten Altbau aufgrund des höheren Wärmeschutzes führen.

Der Einfluss der verschiedenen Oberflächeneigenschaften in Abhängigkeit des Betrachtungszeitraums und der Vegetationstiefe nach Tabelle 9 auf den flächenbezogenen Energiebedarf sind gering. Der sich einstellende Energiebedarf ist exemplarisch für die Westorientierung jeweils für das bodengebundene und das fassadenintegrierte System (bewässertes Substrat und Hinterlüftung) in Bild 28 dargestellt. Das bodengebundene System führt beim Altbau zu rechnerischen Verbesserungen zwischen 1 % und 2 % gegenüber der unbegrünten Fassade, das fassadenintegrierte System erreicht Verbesserungen zwischen 10 % und 11 %. Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Oberflächenparametern für unterschiedliche Vegetationstiefen und Betrachtungszeiträume sind beim Altbau gering. Es zeigt sich der Einfluss dichterer Vegetation, der aufgrund höherer Verschattung und damit verbundenen geringeren solaren Wärmegewinnen zu einem höheren Energiebedarf führt. Im Betrachtungszeitraum März steigt der flächenbezogene Energiebedarf bei einer 20 cm dicken wandgebundenen Vegetation um etwa 1,5 % im Gegensatz zu 20 cm Vegetation beim bodengebundenen System. Auch der Einfluss des Wärmeübergangs wird lediglich gering ersichtlich. Bei einer Vegetationstiefe von 20 cm zeigt sich eine Verbesserung um knapp 1 % durch den im Betrachtungszeitraum Mai ermittelten, im Vergleich zum Wert des Monats März geringeren Wärmeübergangskoeffizienten. Beim Neubau nach GEG-Standard sind die Effekte der unterschiedlichen Oberflächeneigenschaften mit einer Auswirkung von weniger als 0,5 % zu vernachlässigen.

Deutlicher zeigt sich der Einfluss der Oberflächeneigenschaften auf den sommerlichen Wärmeschutz, dargestellt in Bild 29 anhand der Übertemperaturgradstunden. Die Verbesserungen betragen beim Altbau zwischen 20 % und 35 % beim bodengebundenen und zwischen 58 % und 64 % beim fassadenintegrierten System. Es wird hauptsächlich der Einfluss der Vegetationstiefe durch die Verschattung ersichtlich, da die Varianten mit 20 cm Vegetationstiefe jeweils zu besseren Werten führen. Beim Gebäude nach GEG-Standard betragen die Verbesserungen zwischen 2 % und

4 % beim bodengebundenen und zwischen 5 % und 6 % beim fassadenintegrierten System, wiederum mit den besten Werten bei hoher Vegetationstiefe.

Der Energiebedarf der untersuchten Gebäude wird sich bei Betrachtung der zukünftigen Klimaszenarien aufgrund steigender Temperaturen gegenüber heute reduzieren (Abschnitt 2.1). In Bild 30 sind die berechneten Energiebedarfe drei verschiedener Fassadentypen (ohne Begrünung, mit bodengebundenem und mit fassadenintegriertem System, jeweils westorientiert, Oberflächeneigenschaften für 5 cm Vegetation im Mai), ausgehend von den aktuellen klimatischen Verhältnissen, exemplarisch für die Jahre 2050 und 2100 jeweils für das optimistische Szenario RCP 2.6 und das pessimistische Szenario RCP 8.5 dargestellt. Bei RCP 2.6 reduziert sich der prognostizierte Energiebedarf bei allen Varianten im Jahr 2050 und steigt bis 2100 wieder an, jedoch ohne den aktuellen Wert zu erreichen. Beim Altbau beträgt die Reduktion im Jahr 2050 bei RCP 2.6 ca. 9%; beim GEG-Gebäude 15 %. Beim pessimistischen Szenario RCP 8.5 tritt keine Trendwende ein und die Reduzierung beträgt bis im Jahr 2100 beim Altbau 40 % sowie beim Gebäude nach GEG-Standard 62 %. Diese relativen Einsparungen ändern sich bei den unterschiedlichen Fassadenbegrünungssystemen nur minimal (weniger als 0,5 %).

Beim sommerlichen Wärmeschutz zeigen sich die Auswirkungen des sich ändernden Klimas drastischer (Bild 31). Der Grenzwert von 1200 K h/a wird bei allen Varianten beim Szenario RCP 8.5 im Jahr 2100 überschritten. Während es beim Altbau lediglich zwischen 3670 K h/a (fassadenintegriertes Grünsystem) und 4690 K h/a (ohne Begrünung) sind, erreichen die Werte beim Neubau zwischen 7900 K h/a (fassadenintegriertes Grünsystem) und 8220 K h/a (ohne Begrünung). Beim optimistischen Szenario liegen der Altbau mit Werten zwischen 95 K h/a und 195 K h/a sowie der Neubau mit Werten zwischen 755 K h/a und 820 K h/a unter dem Grenzwert. Im prognostizierten Jahr 2050 bleibt der Altbau bei beiden Szenarien unter dem Grenzwert, während das Gebäude nach GEG-Standard darüber liegt. Das fassadenintegrierte Grünsystem ist bei beiden Gebäudetypen und allen untersuchten Klimavarianten die beste Lösung.

Wie bereits erörtert, werden weitere Forschungen hinsichtlich nach Struktur und Jahreszeit differenzierter Eigenschaften des heterogenen Systems als notwendig erachtet. Auch der konkrete Einfluss der konstruktiven Ausbildung (Hinterlüftung) sowie der Bewässerung und der latenten Wärmestromdichte durch die Pflanzstruktur sind weiter zu quantifizieren. Hierzu erfolgte die nachfolgend dargestellte Implementierung einer weiteren Grünfassade.

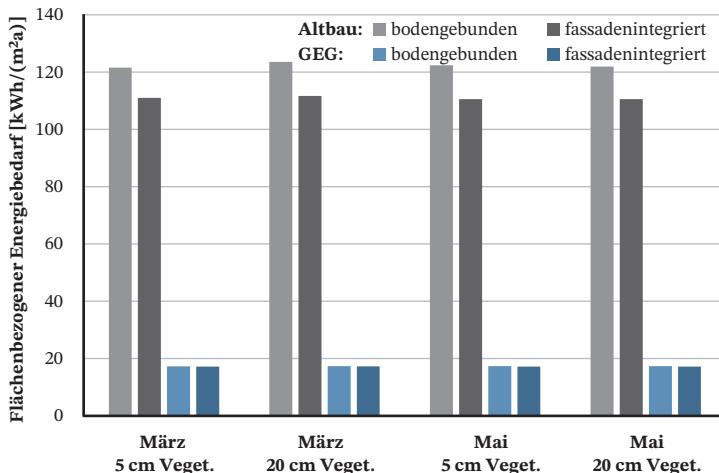


Bild 28. Auswirkungen der Oberflächeneigenschaften in Abhängigkeit der Vegetationsstiefe und des Betrachtungszeitraums auf den flächenbezogenen Heizenergiebedarf der untersuchten Räume

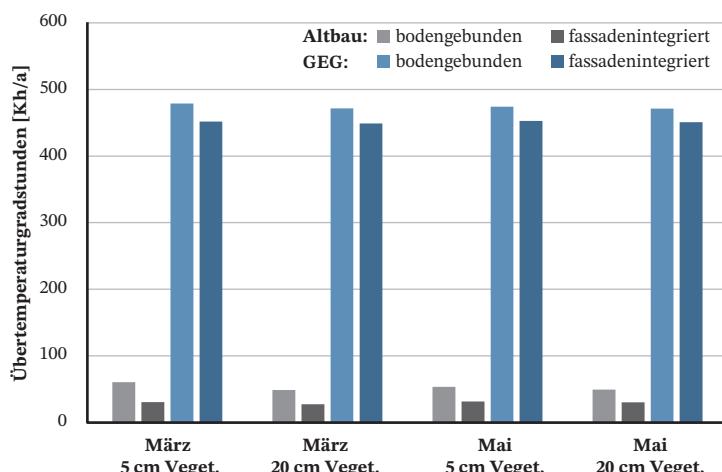


Bild 29. Auswirkungen der Oberflächeneigenschaften in Abhängigkeit der Vegetationsstiefe und des Betrachtungszeitraums auf den fiktiven, jährlichen Hitzeeintrag in die untersuchten Räume, dargestellt anhand der Ühertemperaturgradstunden

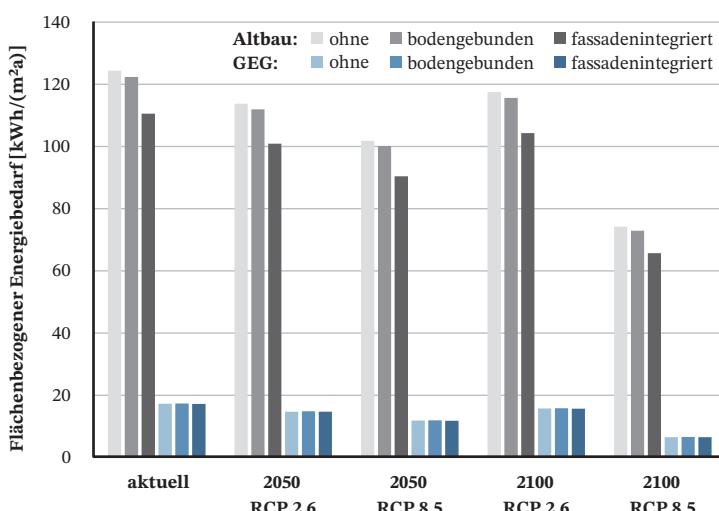


Bild 30. Auswirkungen bodengebundener und fassadenintegrierter Systeme auf den flächenbezogenen Energiebedarf bei aktuellen und in die Zukunft prognostizierten klimatischen Bedingungen

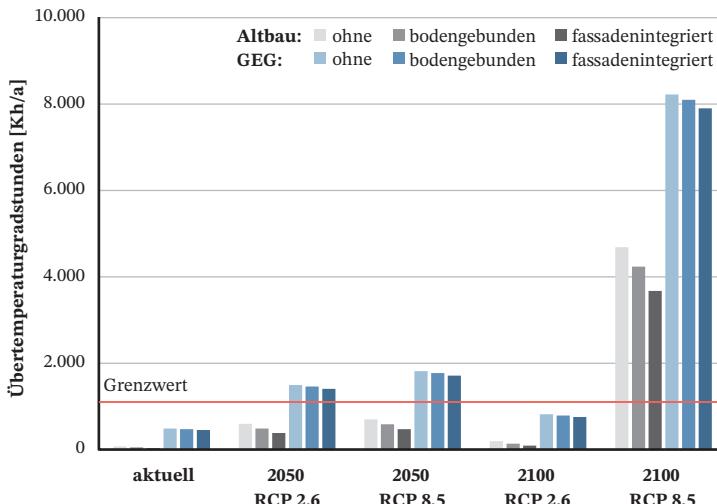


Bild 31. Auswirkungen boden-gebundener und fassadenintegrierter Systeme auf den sommerlichen Wärmeschutz, dargestellt durch die Übertemperaturgradstunden bei aktuellen und in die Zukunft prognostizierten klimatischen Bedingungen

5 Von der Forschung in die Praxis

Die kleinflächige UNA-TERRA-Forschungsgrünfassade zeigt vielversprechende Ansätze hinsichtlich Klimaausgleichsfunktionen, der Förderung des Strukturreichtums sowie den bauphysikalischen Qualitäten in städtischen Gebieten. Um diese Potenziale weiter und vertiefend zu erforschen, wurde auf dem Campus der Fraunhofer-Gesellschaft in Stuttgart ab April 2023 das entwickelte System an zwei 115 m² großen Bestandsfassaden mit Ausrichtung nach Osten und Süden installiert. Das UNA-TERRA-System wurde hierfür weiterentwickelt und optimiert. Neben den bereits erprobten Habitat-Systemen für Insekten und Vögel wurden ergänzend individuelle Fledermauskästen und Nahrungsquellen speziell für Fledermäuse berücksichtigt. Die Bepflanzung der 115 m² umfasst über 70 verschiedene Pflanzenarten mit knapp 5000 Pflanzen.

Wie bei dem UNA-TERRA-System standen bei der Auswahl der Pflanzen primär Wildstauden mit einem hohen Nektar- und Pollengehalt im Fokus. Die Installation der Grünfassade betrug inklusive der Montage des Wasserverteilungskastens drei Tage, siehe Bild 32. Bild 33 zeigt ergänzend weitere Detailaufnahmen der Montage. Durch die Vorkultivierung der Pflanzen im Gewächshaus konnte innerhalb kurzer Zeit die Fassade der Bestands-Hallenkonstruktion in eine begrünte Fläche transformiert werden. Bereits eine Woche nach der Installation der Habitatmodule wurden erste verschlossene Nistgänge durch Wildbienen identifiziert. Die Wirksamkeit des Systems ist im Bereich der Niststrukturen unmittelbar nach der Montage gegeben, wobei die Potenziale mit der Entwicklung einer dichten sowie tiefen und blühenden Pflanzschicht, sowohl aus ökologischer als auch aus (stadt-)bauphysikalischer Sicht potenziell im Verlauf der Zeit weiter zunehmen werden.

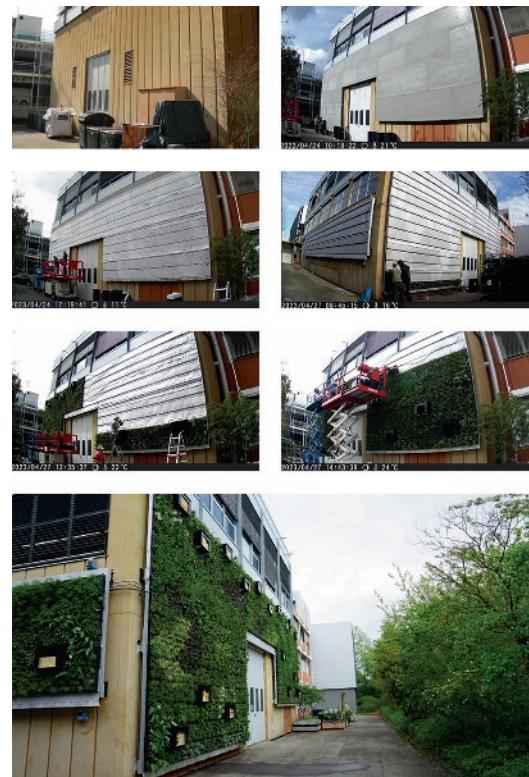


Bild 32. Fotografische Aufnahmen zur Installation der weiterentwickelten biodiversitätsfördernden Grünfassade

Die im Abschnitt 4 identifizierten Wirkpotenziale der UNA-TERRA-Fassade auf Strukturreichtum, Klimaregulation und bauphysikalische Qualitäten werden vertieft und langfristig an der weiterentwickelten, groß-



Bild 33. Fotografische Detailaufnahmen zur Installation der weiterentwickelten biodiversitätsfördernden Grünfassade

flächigen Forschungsgrünfassade untersucht. Die Forschungs- und Erhebungsmethode nach Abschnitt 3 wird fortgeführt und das Messkonzept erweitert. So können an der großflächigen Fassade beispielsweise über ein Ablaufbecken überschüssige Regen- und Bewässerungsmengen quantifiziert werden. Auch erfolgt die Anbringung von Sensoren für eine differenziertere Betrachtung an den nach Osten und Süden ausgerichteten Fassaden. Somit werden langfristig valide Messdaten zur weiteren Erforschung der zuvor aufgeworfenen Fragestellungen generiert:

Außenraum

- heterogenes Mikroklima sowie Strukturreichtum (orientierungsabhängig)
 - Analyse heterogener, thermischer Refugien,
 - Monitoring Insekten-, Vogel- und Fledermausvielfalt.
- Verringerung der Hitzebelastung im urbanen Raum
 - Quantifizierung der Evaporationsleistung sowie resultierendes Kühlpotenzial in Abhängigkeit der Pflanzstruktur,
 - Quantifizierung des Potenzials zur Reduktion urbaner Hitzebelastung.

Fassade

- Oberflächeneigenschaften (differenziert nach Jahreszeit und Bepflanzungsart)
 - Verschattungseigenschaften,
 - Änderung der Anströmung durch Vegetation.
- Wärmedurchgang
 - Quantifizierung Hinterlüftung,
 - dynamischer Feuchtegehalt im Substrat (Jahresverlauf).

Gebäude

- Modellierung und hydrothermische Simulation der dynamischen Fassadeneigenschaften,
- resultierende Auswirkung auf Energiebedarf und Hitzeeintrag.

6 Zusammenfassung und Diskussion

Die Notwendigkeit für eine nachhaltige Gestaltung von Gebäuden und des urbanen Umfelds zeigt sich eindrücklich durch den voranschreitenden Klimawandel, verbunden mit Extremwetterereignissen wie Hitze, Starkregen, Sturm und Hagel und dem Rückgang der Biodiversität. Ein Beitrag einer klimaangepassten Umweltgestaltung stellen urbane grüne Infrastrukturen dar. Die relevantesten Wirkpotenziale grüner Fassadensysteme nach [1, 58, 59] sind in Bild 34 zusammengestellt. Die Analyse der Wirkpotenziale grüner Systeme in diesem Artikel fokussiert die blau hinterlegten Punkte und beinhaltet den Beitrag der begrünten Oberfläche zu Phänomenen und Prozessen im Außenraum (heterogenes Mikroklima, Strukturreichtum der Vegetation, Habitat- und Nahrungsangebot für Fauna, Verringerung Hitzebelastung), an der Gebäudehülle (Wärmeübergang und Wärmedurchlass) sowie resultierend im Gebäude (Energiebedarf und Hitzeeintrag). Die Ergebnisse werden nachfolgend zusammenfassend dargestellt. Untersucht wurde zunächst eine neuentwickelte, biodiversitätsfördernde Testfassade (UNA-TERRA-Fassade) auf dem Campus der Universität Stuttgart. Die gewonnenen Erkenntnisse flossen in die Konzeption und Umsetzung einer größeren Fassade auf dem Fraunhofer-Campus in Stuttgart ein, die in diesem Beitrag ebenfalls thematisiert wird.

Der Beitrag der untersuchten UNA-TERRA-Fassade zur Steigerung des Strukturreichtums auch durch Schaffung eines heterogenen Mikroklimas wurde identifiziert. Ausgehend von den 34 Pflanzenarten, die bei der Umsetzung der Fassade eingebracht wurden, zeigten sich bei einer floristischen Erhebung nach einer fünfmonatigen Standzeit zusätzliche Pflanzenarten durch den Eintrag von Spontanvegetation. Die untersuchte Fassade war letzten Endes vollständig bedeckt



Bild 34. Zusammenstellung relevanter Wirkpotentiale grüner Fassadensysteme nach [1, 58, 59] ergänzt um die Eigenschaften zur Förderung des Strukturreichtums. Die blau dargestellten Punkte werden in dieser Studie thematisiert.

und es bildeten sich zwei Pflanzschichten aus, in denen sich differenziert Halblicht- bis Volllichtpflanzen etablierten. Durch thermografische Untersuchungen wurde die Ausbildung thermischer Refugien an der Fassade ersichtlich. Diese mikroklimatische Heterogenität ist wiederum ein bedeutender Treiber zur Förderung der Strukturvielfalt. Das punktuelle Monitoring zur faunistischen Vielfalt an der Wand zeigte eine hohe Akzeptanz der UNA-TERRA-Fassade, insbesondere bei Wildbienen. Die integrierten Nisthilfen wurden neben den Wildbienen auch von weiteren Insekten (bspw. Dermaptera) angenommen.

Die klimaregulierende Wirkung der Testfassade auf den Außenraum ergibt sich durch Evapotranspiration über die Substratoberfläche und die Blätter der Pflanzen. Zusätzlich wirkt die Vegetation als thermischer Puffer. Bei der messtechnischen Untersuchung zeigten sich um bis zu 18 K reduzierte Temperaturen in der Substratschicht im Vergleich zu einer Betonwand. Diese reduzierte Temperatur führt zu einer geringeren langwelligen Wärmeausstrahlung der Fassade und damit zur Reduktion urbaner Wärmeinseln.

Auch die bauphysikalischen Oberflächeneigenschaften der Fassade werden maßgeblich durch die Grünstruktur beeinflusst. Zunächst wurde ein Zusammenhang zwischen Vegetationstiefe und Verschattung hergestellt und des Weiteren ein Unterschied zwischen den beiden durchgeföhrten Messperioden identifiziert. So führte die teilweise abgestorbene Bepflanzung nach den Wintermonaten (Erfassung im März) zu einer geringeren Verschattung als die wieder stark vitalen, blühenden Pflanzen (Erfassung im Mai). Dieses bauphysikalische Phänomen bedarf einer weitergehenden Untersuchung, verbunden mit einer differenzierten Betrachtung der Pflanzenarten unter ihrer Entwicklung im Jahresverlauf.

Die untersuchte Abminderung der Strömungsgeschwindigkeit an der Wandoberfläche, also unterhalb

der Bepflanzung, zeigte ebenfalls eine Abhängigkeit vom Betrachtungszeitraum und von der Vegetation. So führte die im März erfasste winterliche Pflanzstruktur zu einer konstanten, aber von der Vegetationstiefe unabhängigen Abminderung, während bei den blühenden Pflanzen mit frisch gewachsener Biomasse (Erfassung im Mai) mit zunehmender Tiefe eine stärkere Abminderung resultierte.

Bei fassadenintegrierten Begrünungen beeinflusst das System durch die Aufbringung weiterer Schichten, den Wärmedurchgangskoeffizienten der Wand. Die theoretische Betrachtung zeigte sich einstellende dynamische Werte in Abhängigkeit der Bewässerung des Systems sowie der Ausbildung einer ggf. vorhandenen Luftsicht. In Summe mit den zuvor erörterten, durch die Vegetation und jahreszeitlich veränderlichen Oberflächeneigenschaften ergibt sich ein höchst dynamisches, thermisches System, das sich kaum über rein stationäre Betrachtungen beschreiben lässt. Hieraus resultieren weitere Forschungsfragen.

Die Aus- und Wechselwirkungen der Grünfassadensysteme und deren diskutierte Eigenschaften auf Gebäude und Innenräume sind vielfältig. Im Rahmen der weiterführenden simulativen Untersuchung wurde der Energiebedarf und der Wärmeeintrag an fiktiven Gebäuden (Altbau und GEG-Standard) untersucht. Die Grünsysteme führten zunächst zu Verschattung und daher zu einer Verringerung der solaren Einträge. Daraus resultierte, bei Betrachtung des hiesigen Winterfalls, die Erhöhung des Heizenergiebedarfs. Gleichzeitig minderte die Begrünung den konvektiven Wärmeverlust an den äußeren Fassadenoberflächen sowie die nächtliche Auskühlung, vor allem in klaren Nächten durch Wärmeabstrahlung. Bei der Untersuchung stellten sich die Effekte der höheren Verschattung und Strömungsabminderung durch die Bepflanzung als sehr gering raus. Beim fiktiven Altbau zeigte sich eine geringfügige Verbesserung, beim Gebäude nach GEG

eine minimale Verschlechterung des Wärmeschutzes bei rein bodengebundenen Systemen. Die fassadenintegrierten Systeme führten durch zusätzliche Schichten zu einer Verbesserung des Wärmedurchgangskoeffizienten und somit zu einer Verbesserung des Wärmeschutzes. Die quantitative Abhängigkeit von der konstruktiven Ausbildung des Grünsystems wurde nachgewiesen sowie ebenfalls der insgesamt größere Einfluss bei einem schlecht gedämmten Altbau im Gegen- satz zum Gebäude nach GEG.

Bei Betrachtung des sommerlichen Wärmeschutzes an- hand der Übertemperaturgradstunden war der Ein- fluss der Grünfassadensysteme deutlich höher. Das bodengebundene System führte zu einer Reduzierung von maximal 38 % beim Alt- und 4 % beim Neubau, das fassadenintegrierte System reduzierte die Übertem- peraturgradstunden um bis zu 72 % bzw. 9 %.

Bei der abschließenden Betrachtung von Klimaszenarien wurde die zukünftig hohe Relevanz des sommerli- chen Wärmeschutzes deutlich. Während sich bei pessi- mistischen Prognosen die Heizenergiebedarfe im Jahr 2100 in Bezug zu heute „lediglich“ in etwa halbierten, erreichten die Übertemperaturgradstunden, gerade bei dem exemplarisch gut gedämmten Neubau, Werte über 8000 K h/a und liegen damit annähernd beim siebenfachen des Grenzwertes. Begrünte Fassadensysteme kön- nen diese Werte zwar reduzieren, nicht jedoch bis unter den Grenzwert.

Insgesamt zeigte sich in dieser Studie das vorhandene Potenzial der Grünfassadensysteme zur Steigerung des Strukturreichtums und der Artenvielfalt, zur Klimaregulation und zur Verbesserung des Wärmeschutzes verbunden mit einer Optimierung des Raumkli- mas. Die Daten beruhen jedoch auf einer geringen Anzahl an Messwerten. Die neu errichtete biodiversi- tätsfördernde Grünfassade auf dem Fraunhofer Cam- pus für Mensch, Flora und Fauna wurde entsprechend gezielt mit Messtechnik ausgestattet. Die geplanten Untersuchungen des jahreszeitlichen Einflusses sowie der Auswirkungen verschiedener Vegetationsstruktu- ren auf den Wärmeschutz könnten die Datenbasis für eine bauphysikalische Optimierung der Grünsysteme liefern.

Die steigende Bedeutung von grünen Strukturen bei der Bewältigung gegenwärtiger und zukünftiger Her- ausforderungen zeigt sich (nicht nur) durch eine deutlich erhöhte Forschungsaktivität zu diesen Themen. Die Vernetzung von strukturreichen Flächen innerhalb der Stadt ist von entscheidender Bedeutung, um ihre Potenziale zur Klimaregulation sowie zur Bildung von Lebensräumen für die urbane Flora und Fauna zu er- schließen [60]. Grüne Fassaden als ein Baustein der ur- banen grünen Infrastruktur können in der Baupraxis zukünftig einen wertvollen Beitrag zur Vernetzung von Grünflächen im Sinne eines verbesserten urbanen Ver- bundes und als Biotopverbund innerhalb der Städte beisteuern. Jedoch stellen die bisher gewonnenen Er- kenntnisse lediglich einige Aspekte für eine ganzheitli- che Betrachtung der Einflüsse und Auswirkungen von

Grünsystemen dar. Schließlich darf auch nicht uner- wähnt bleiben, dass urbane grüne Infrastrukturen nur ein Element einer resilient gestalteten Umwelt mit kli- maangepassten Räumen und Gebäuden darstellen, das vielerorts durch weitere Elemente zur resilienten Stadt- gestaltung ergänzt wird.

Danksagung

In diesem Beitrag werden Ergebnisse aus mehreren Projekt(förderung)en vorgestellt. Wir danken der Uni- versität Stuttgart für die UNA-TERRA-Förderung so- wie für die Möglichkeit, das System auf dem Cam- pus der Universität zu erproben. Unser Dank gilt auch der Gips-Schüle Stiftung für die finanzielle Un- terstützung. Weiter danken wir dem Bundesministeri- um für Ernährung und Landwirtschaft (Projekträger Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung) für die Förderung des Projektes „BioDiv-Fassade“ (Ver- bundprojekt: Entwicklung eines Grünfassadensystems zur Förderung der Biodiversität als Teil der urbanen grünen Infrastruktur (BiodivFassade)-2818908A20). Auch bedanken wir uns bei den Mitarbeitenden der Helix Pflanzensysteme GmbH für die hervorragende Unter- stützung bei der Entwicklung, dem Bau sowie der Pflege des Grünmoduls. Ebenso danken wir Herrn Dr. J. Seidel vom Institut für Wasser- und Umwelt- systemmodellierung für die Bereitstellung der Wetterda- ten des Campus Vaihingen.

Literatur

- [1] Leistner, P. et al. (2022) *Klimaangepasste Gebäude und Liegenschaften – Empfehlungen für Planende, Architekten und Architekten sowie Eigentümerinnen und Eigentümer*. Bonn: Bundesinstitut für Bau- Stadt- und Raumfor- schung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raum- ordnung (BBR).
- [2] Emde, F. et al. (2015) *Artenschutz-Report 2015 – Tiere und Pflanzen in Deutschland* [online]. Berlin: Bundesamt für Naturschutz. https://www.bfn.de/sites/default/files/2021-04/Artenschutzreport_Download.pdf
- [3] Decken, H. v. et al. (2017) *Agrar-Report 2017 – Biolo- gische Vielfalt in der Agrarlandschaft* [online]. Berlin: Bun- desamt für Naturschutz. <https://www.bfn.de/publikation/en/bfn-report/agrar-report> [Zugriff am: 28. Mrz. 2023]
- [4] Bellard, C. et al. (2012) *Impacts of climate change on the future of biodiversity*. Ecology letters 15, Nr. 4, pp. 365–377. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2011.01736.x>
- [5] Semenchuk, P. et al. (2022) *Relative effects of land con- version and land-use intensity on terrestrial vertebrate diver- sity*. Nature communications 13, Nr. 1, p. 615. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-28245-4>
- [6] Häckel, H. (2021) *Meteorologie*. 9. Aufl. Stuttgart: utb GmbH.

- [7] Pachauri, R.K.; Mayer, L. [Hrsg.] (2015) *Climate change 2014 – Synthesis report*. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- [8] Meteotest AG (2020) *Meteonorm Version 8* [Software].
- [9] Fahrion, M.-S.; Draeger, S. et al. (2020) *KLIBAU – Weiterentwicklung und Konkretisierung des Klimaangepassten Bauens – Handlungsempfehlungen für Planer und Architekten* [Endbericht]. Forschungsprogramm Zukunft Bau, ein Forschungsprogramm des BMI.
- [10] Niemelä, J. [Hrsg.] (2011) *Urban Ecology – Patterns, processes, and applications*. Oxford: Oxford University Press.
- [11] Bornschlegl, S. et al. (2023) *Analysis of the Micro-climatic and Biodiversity-Enhancing Functions of a Living Wall Prototype for More-than-Human Conviviality in Cities*. Buildings 13, H. 6, S. 1393. <https://doi.org/10.3390/buildings13061393>
- [12] Frenne, P. de et al. (2021) *Forest microclimates and climate change: Importance, drivers and future research agenda*. Global change biology 27, Nr. 11, pp. 2279–2297. <https://doi.org/10.1111/gcb.15569>
- [13] Halaj, J.; Ross, D.W.; Moldenke, A.R. (2000) *Importance of habitat structure to the arthropod food-web in Douglas-fir canopies*. Oikos 90, H. 1, pp.139–152. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0706.2000.900114.x>
- [14] Ishii, H.T.; Tanabe, S.; Hiura, T. (2004) *Exploring the Relationships Among Canopy Structure, Stand Productivity, and Biodiversity of Temperate Forest Ecosystems*. Forest Science 50, iss. 3, pp. 342–355. <https://doi.org/10.1093/forestscience/50.3.342>
- [15] Oliver, T. et al. (2010) *Heterogeneous landscapes promote population stability*. Ecology letters 13, Nr. 4, pp. 473–484. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2010.01441.x>
- [16] Tinya, F. et al. (2021) *Environmental drivers of forest biodiversity in temperate mixed forests – A multi-taxon approach*. The Science of the total environment 795, p. 148720. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148720>
- [17] Stein, A.; Gerstner, K.; Kreft, H. (2014) *Environmental heterogeneity as a universal driver of species richness across taxa, biomes and spatial scales*. Ecology letters 17, Nr. 7, pp. 866–880. <https://doi.org/10.1111/ele.12277>
- [18] Yang, Z. et al. (2015) *The effect of environmental heterogeneity on species richness depends on community position along the environmental gradient*. Scientific reports 5, p. 15723. <https://doi.org/10.1038/srep15723>
- [19] Haesen, S. et al. (2021) *ForestTemp – Sub-canopy microclimate temperatures of European forests*. Global change biology 27, Nr. 23, pp. 6307–6319. <https://doi.org/10.1111/gcb.15892>
- [20] Spicer, M.E.; Mellor, H.; Carson, W.P. (2020) *Seeing beyond the trees: a comparison of tropical and temperate plant growth forms and their vertical distribution*. Ecology 101, Nr. 4, e02974. <https://doi.org/10.1002/ecy.2974>
- [21] Mehra, S.-R. (2021) *Stadtbauphysik – Grundlagen klima- und umweltgerechter Städte* [EBook]. Wiesbaden: Springer Fachmedien, Imprint: Springer Vieweg.
- [22] Bonan, G. (2019) *Climate Change and Terrestrial Ecosystem Modeling*. Cambridge University Press.
- [23] Kowarik, I. (2011) *Novel urban ecosystems, biodiversity, and conservation*. Environmental pollution (Barking, Essex: 1987) 159, 8–9, pp. 1974–1983. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.02.022>
- [24] Kühn, I.; Brandl, R.; Klotz, S. (2004) *The flora of German cities is naturally rich*. Evolutionary Ecology Research 6, pp. 749–764.
- [25] Europäische Kommission (2019) *Bericht der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Region – Überprüfung des Fortschritts bei der Umsetzung der EU-Strategie für grüne Infrastruktur*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52019DC0236&qid=1562053537296>
- [26] Mayrand, F. et al. (2018) *Vertical Greening Systems as Habitat for Biodiversity*. Nature Based Strategies for Urban and Building Sustainability. Elsevier, pp. 227–237.
- [27] Oquendo-Di Cosola, V.; Olivieri, F.; Ruiz-García, L. (2022) *A systematic review of the impact of green walls on urban comfort: temperature reduction and noise attenuation*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 162, pp. 112463. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112463>
- [28] Radić, M.; Brković Dodig, M.; Auer, T. (2019) *Green Facades and Living Walls – A Review Establishing the Classification of Construction Types and Mapping the Benefits*. Sustainability 11, H. 17, p. 4579. <https://doi.org/10.3390/su11174579>
- [29] Ascione, F. et al. (2020) *Green Walls, a Critical Review: Knowledge Gaps, Design Parameters, Thermal Performances and Multi-Criteria Design Approaches*. Energies 13, H. 9, p. 2296. <https://doi.org/10.3390/en13092296>
- [30] Charoenkit, S.; Yiemwattana, S. (2016) *Living walls and their contribution to improved thermal comfort and carbon emission reduction: A review*. Building and Environment 105, pp. 82–94. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.05.031>
- [31] Hunter, A.M. et al. (2014) *Quantifying the thermal performance of green façades: A critical review*. Ecological Engineering 63, pp. 102–113. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.12.021>
- [32] Besir, A.B.; Cuce, E. (2018) *Green roofs and facades: A comprehensive review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 82, pp. 915–939. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.106>
- [33] Koch, K. et al. (2020) *Urban heat stress mitigation potential of green walls: A review*. Urban Forestry & Urban Greening 55, S. 126843. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126843>

- [34] Köhler, M. (2008) *Green facades—a view back and some visions* in: *Urban Ecosystems* 11, H. 4, pp. 423–436. <https://doi.org/10.1007/s11252-008-0063-x>
- [35] Manso, M.; Castro-Gomes, J. (2015) *Green wall systems: A review of their characteristics*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41, S. 863–871. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.203>
- [36] Chiquet, C.; Dover, J.W.; Mitchell, P. (2013) *Birds and the urban environment: the value of green walls*. *Urban Ecosystems* 16, H. 3, pp. 453–462. <https://doi.org/10.1007/s11252-012-0277-9>
- [37] Francis, R.A.; Lorimer, J. (2011) *Urban reconciliation ecology: The potential of living roofs and walls*. *Journal of environmental management*, vol. 92, iss. 6.
- [38] Madre, F. et al. (2015) *Building biodiversity: Vegetated façades as habitats for spider and beetle assemblages*. *Global Ecology and Conservation* 3, pp. 222–233. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2014.11.016>
- [39] Mayrand, F.; Clergeau, P. (2018) *Green Roofs and Green Walls for Biodiversity Conservation: A Contribution to Urban Connectivity?* *Sustainability* 10, H. 4, p. 985. <https://doi.org/10.3390/su10040985>
- [40] Cebula, M. (2023) *Thermische Auswirkungen von bogengebundener Fassadenbegrünung* [Diplomarbeit]. Technische Universität Wien.
- [41] Tudiwer, D. et al. (2019) *Abbildung der wärmedämmenden Wirkung eines fassadengebundenen Begrünungssystems in einem Simulationsmodell*. *Bauphysik* 41, H. 3, S. 155–161. <https://doi.org/10.1002/bapi.201900009>
- [42] Häupl, P. [Hrsg.] (2013) *Lehrbuch der Bauphysik – Schall – Wärme – Feuchte – Licht – Brand – Klima*. 7. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- [43] DIN EN ISO 13789:2018-04 (2018) *Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Transmissions- und Lüftungswärmevertransfertkoeffizient – Berechnungsverfahren*. Berlin: Beuth.
- [44] DIN EN ISO 6946:2018-03 (2018) *Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren*. Berlin: Beuth.
- [45] Hering, E. et al. (2021) *Physik für Ingenieure*. 13. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- [46] Schramek, E.-R.; Sprenger, E. (2009) *Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik: Einschließlich Warmwasser- und Kältetechnik* [jetzt mit Zusatz-Infos auf CD-ROM]. 74. Aufl. München: Oldenbourg.
- [47] Schild, K.; Willems, W.M. (2013) *Wärmeschutz*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- [48] DIN 4108-2:2013-02 (2013) *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz*. Berlin: Beuth.
- [49] Helix Pflanzensysteme GmbH (2023) *Helix® Biomura* [online]. <https://www.helix-pflanzen.de/pflanzensysteme/produkte/helix-biomura>
- [50] Krause, P. et al. (2023) *Entwicklung und Erprobung eines urbanen Grünfassadensystems für Mensch, Flora und Fauna*. *Bauphysik* 45, H. 1, S. 44–54. <https://doi.org/10.1002/bapi.202200039>
- [51] Seidel, J. (2023) *Wetterdaten der Wetterstation Lauchäcker der Universität Stuttgart*, Institut für Wasser- und Umwelt systemmodellierung, Abt. Hydrologie und Geohydrologie.
- [52] Schneider, M. (2020) *Datenanalyse für Naturwissenschaftler, Mediziner und Ingenieure*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- [53] MASEA Datenbank (02.06.2022) [online]. <https://www.masea-ensan.de> [Zugriff am: 10. Mai. 2023]
- [54] Bundestag (8. August 2020) *Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden – Gebäudeenergiegesetz (GEG)*.
- [55] Röseler, H. et al. (2022) *Bauhaus und Bauphysik – Eine bauphysikalische Untersuchung und Bewertung am Beispiel Haus Oud*. *Bauphysik* 44, H. 2, S. 95–105. <https://doi.org/10.1002/bapi.202200006>
- [56] Hauswirth, S.; Kehl, D. (2010) *Hinterlüftung bei Holzfassaden*. Holzbautag Biel 2010.
- [57] Fraunhofer-Institut für Bauphysik (2019) *WUFI® Plus – Software zur Berechnung des 3.2.0.1* [Software].
- [58] Dettmar, J.; Pfoser, N.; Sieber, S. (2016) *Gutachten Fassadenbegrünung – Gutachten über quartiersorientierte Unterstützungsansätze von Fassadenbegrünungen für das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz (MKUNLV) NRW* [online]. https://www.umwelt.nrw.de/fileadmin/redaktion/PDFs/klima/gutachten_fassadenbegruenung.pdf [Zugriff am: 24. Mai. 2023]
- [59] Hansen, R. et al. (2017) *Urbane grüne Infrastruktur – Grundlage für attraktive und zukunftsfähige Städte* [online]. Bundesamt für Naturschutz [Zugriff am: 24. Mai. 2023].
- [60] Vega, K.A.; Küffer, C. (2021) *Promoting wildflower biodiversity in dense and green cities: The important role of small vegetation patches*. *Urban Forestry & Urban Greening* 62, p. 127165. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127165>

