



PLANUNG EINES REALLABORS ZUM INTERDISZIPLINÄREN MONITORING VON MIKROKLIMA, HYGROTHERMIK UND GRAUWASSERAUFBEREITUNG AN GRÜNFASSADEN

Maria Hartmann¹, Gloria Kohlhepp², Hayder Alsaad¹, Silvio Beier², Conrad Völker¹

¹ Professur Bauphysik, Bauhaus-Universität Weimar, Deutschland,

E-Mail: maria.hartmann@uni-weimar.de

² Professur Siedlungswasserwirtschaft und Technologien urbaner Stoffstromnutzungen, Bauhaus-Universität Weimar, Deutschland,

E-Mail: gloria.maria.kohlhepp@uni-weimar.de

Kurzfassung

Fassadenbegrünungen wirken sich positiv auf das urbane Mikroklima aus, ergänzen die thermische Gebäudehülle und können darüber hinaus der Grauwasseraufbereitung dienen. Jedoch werden die physikalischen und chemischen Effekte an Grünfassaden selten über mehrere Monate messtechnisch erfasst. Auch Referenzmessungen sind häufig nicht realisierbar. Daher entsteht an einem Bestandsgebäude in Weimar im April 2024 ein Reallabor bestehend aus einer wandgebundenen Grünfassade, einer bogengebundenen Begrünung sowie einer Referenzwandfläche. Inhalt dieser Studie ist die Datenerfassung und -verarbeitung zur Bewertung des lokalen Mikroklimas, des Tauwasserrisikos, des Wärmetransports durch die Außenwand und der Grauwasserreinigungsleistungen der Grünfassaden.

Abstract

Facade greening has a positive impact on urban microclimates, enhances the thermal efficiency of buildings, and can also contribute to greywater treatment. However, the physical and chemical effects on green facades are rarely measured over extended periods. Consequently, in Weimar, Germany, a living laboratory including a wall-mounted greening, a ground-based green facade, and a reference wall will be constructed in April 2024. This study aims to collect measurement data to assess the local microclimate, condensation risk, heat transport through the exterior wall, and greywater purification performance of both greening systems.

Einleitung

Erhöhte Jahresdurchschnittstemperaturen, Extremwetterereignisse und Ressourcenknappheit bei zugleich steigendem Energie- und Trinkwasserbedarf stellen insbesondere wachsende Städte immer wieder vor neue Herausforderungen. Doch viele dieser Umweltkonflikte können durch Grünfassaden

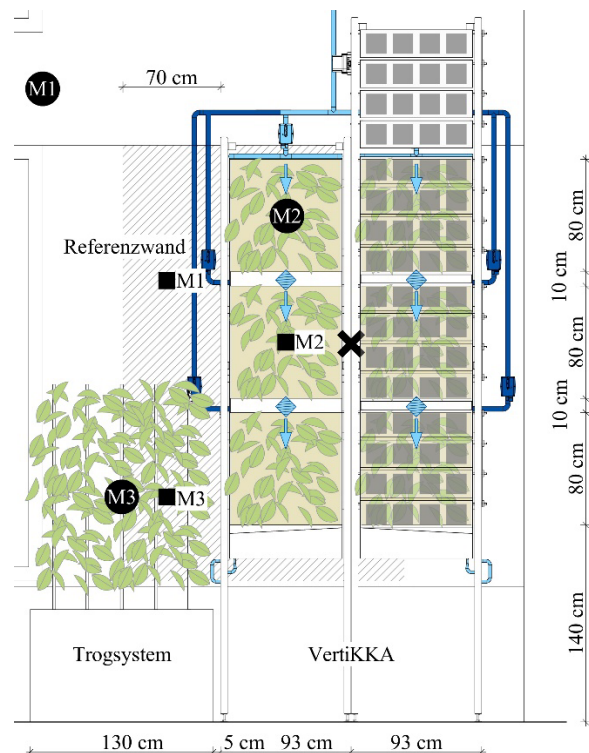
nachhaltig reduziert werden. Beispielsweise verbessern sie das sommerliche Mikroklima, indem sie die Oberflächentemperaturen der Umgebung und damit die mittlere Strahlungstemperatur reduzieren (Alsaad et al., 2022a). Die verringerten Oberflächentemperaturen wirken sich nicht nur auf das Mikroklima, sondern auch auf den Kühlbedarf positiv aus (Hartmann et al., 2023). Die Verbesserung der thermischen Eigenschaften im Winter konnte bereits durch die Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) auf Basis von Messwerten gezeigt werden (Alsaad et al., 2022a; Tudiwer et al., 2019). Eine Begrünung beeinflusst zudem auch das Feuchteverhalten der Fassade. Für warme Tage in gemäßigttem sowie tropischem Klima zeigten Studien einen Anstieg der relativen Luftfeuchte im Luftspalt, sowie eine Abnahme unter winterlichen Bedingungen (Alsaad et al., 2022b; Chen et al., 2013).

Ein weiterer eingangs erwähnter Umweltkonflikt ist der steigende Trinkwasserbedarf. Die begrenzte, aber lebensnotwendige Ressource Trinkwasser sollte stets verantwortungsvoll genutzt werden. Häusliche Abwasserressourcen verschiedener Quellen werden jedoch überwiegend gemeinsam entsorgt, obwohl das aus Duschen, Waschbecken, Wasch- und Spülmaschinen stammende Grauwasser, welches bis zu 80% des kommunalen Abwassers ausmacht, vergleichsweise geringfügig mit Schadstoffen belastet ist (van de Walle et al., 2023). Durch spezielle Grünfassadensysteme mit vorgeschalteten Filtern und Reinigungssubstrat kann das Grauwasser lokal aufbereitet und anschließend als Betriebs- oder Bewässerungswasser wiederverwendet werden. Vorangegangene Messungen an einem Prototyp der Grünfassade VertiKKA (vertikale Klimakläranlage) zeigten bereits maximale Reinigungsleistungen von 92% für den chemischen Sauerstoffbedarf (CSB), bis zu 52% für Gesamtphosphor (TP) und 59% des gesamten gebundenen Stickstoffs (TN_b) (Aicher et al., 2022).

Da die bisherigen Messungen an Grünfassaden jedoch überwiegend auf kleine, lokale Flächen einer Begrünungsvariante und wenige Tage begrenzt sind, können die jahreszeitlichen Auswirkungen auf das bauphysikalische Verhalten, das Mikroklima und die Grauwasserreinigungsleistung nicht erfasst werden. Daher wird im April 2024 an einem Bestandsgebäude in Weimar ein Reallabor, bestehend aus einer wandgebundenen Grünfassade, einer bodengebundenen Begrünung und einer unbegrünten Referenzwandfläche, realisiert. Die Anlage soll über die Dauer einer Vegetationsperiode bis zum frostschutzbedingten Abschalten betrieben werden. Während des gesamten Zeitraumes erfolgen Langzeitmessungen zur Bewertung des Mikroklimas sowie des hydrothermischen Verhaltens der Außenwand in den genannten Wandabschnitten. Beide Begrünungsformen werden mit Grauwasser bewässert, das entlang des Fließweges durch das Reinigungssubstrat physikalisch-biologisch aufbereitet wird. Durch die Beprobung an den Zu- und Abläufen soll die Grauwasserreinigungsleistung beider Begrünungssysteme bestimmt werden. Im Folgenden werden das geplante Reallabor, die Messverfahren, die Datenverarbeitung sowie die erwartbaren Ergebnisse detailliert beschrieben.

Reallabor

Die Westfassade des Bestandsgebäudes, an dem das Reallabor entstehen soll, grenzt an einen dreieckig bebauten, gepflasterten und unbegrünten Hof. Mit $14,2^\circ$ ist die Fassade leicht aus Westen Richtung Süden rotiert. An der homogenen, gedämmten Außenwand entstehen auf $10,7 \text{ m}^2$ Wandfläche drei Testabschnitte: 1. eine Referenzwandfläche ohne Begrünung, 2. die wandgebundene und modular aufgebaute Anlage VertiKKA und 3. das bodengebundene, sogenannte Trogsystem (Abbildung 1, oben). Die VertiKKA besteht aus sechs quadratischen Modulen je $80 \times 80 \times 48 \text{ cm}$, die sich aus einem Reinigungssubstratkörper und Pflanzentaschen zusammensetzen. Weiterhin sind drei dieser Module mit beweglichen Photovoltaik-Elementen (PV) versehen, welche je nach Sonnenstand und Windverhältnissen ausgerichtet werden können (Abbildung 1, unten). Für zusätzliche Referenzmessungen ist auch eine PV-Fläche ohne dahinter befindliche Begrünung vorgesehen. Auch das Trogsystem besteht analog zur VertiKKA aus einer Reinigungs- sowie einer Pflanzsubstratschicht, welche über ein Vlies miteinander verbunden sind. Zudem unterstützen Rankhilfen den Pflanzenbewuchs. Sämtliche Begrünung wird vor der Bepflanzung der Systeme vorkultiviert, um ein hinreichendes Pflanzenvolumen bereits zur Inbetriebnahme des Systems zu gewährleisten.



- Messkette Mikroklima
- Messkette Wärmestrom
- ✘ Anemometer-Messung
- Hauptbeschickungsweg
- Zweiter Beschickungsweg
- ◆ Wasserprobenahmepunkte

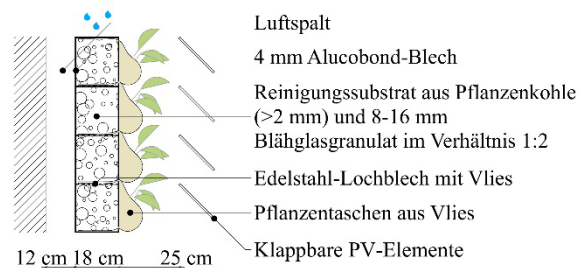


Abbildung 1: Reallabor (oben) und Aufbau der VertiKKA (unten)

Im Innenraum des Bestandsgebäudes befindet sich ein Tank welcher das Grauwasser zur Beschickung vorhält sowie zwei weitere Tanks, die das gereinigte Grauwasser aus dem Ablauf des Trogsystems und der VertiKKA auffangen.

Bauphysikalische Messungen

Die bauphysikalischen Sensoren werden im Innen- und Außenraum des Reallabors sowie innerhalb aller drei Testwandabschnitte montiert. An der VertiKKA erfolgen die Messungen aus praktischen Gründen an den Modulen ohne PV.

Mikroklima

Das Reallabor ermöglicht es, die Lufttemperatur und relative Luftfeuchte an den drei beschriebenen Wandabschnitten zu messen und zu vergleichen. Dafür werden zuvor kalibrierte kapazitive Feuchtfühler, die

über einen eingebauten Thermistor mit negativem Temperaturkoeffizienten (NTC Typ N) verfügen, verwendet (Genauigkeit $\pm 0,4$ K (-20°C bis 0°C) und $\pm 0,2$ K (0°C bis 70°C) bzw. $\pm 4\%$ r.H. (5% bis 98% r.H. und 18°C bis 28°C), Auflösung 0,01 K bzw. 0,1% r.H.). Diese werden in jedem Wandabschnitt jeweils an einer horizontal auskragenden Schienenkonsole in 6 cm, 45 cm, 95 cm und 135 cm Abstand zur Wand montiert (Abbildung 1, oben und Abbildung 2). Somit ergeben sich insgesamt zwölf Messpunkte. Die formstabilen Schienenkonsolen bestehen aus Metall. Daher können sie sich unter andauernder Sonneneinstrahlung stark erhitzen und folglich durch Strahlung und Konvektion Wärme an die Umgebung abgeben. Somit kann die bei Windstille leicht ansteigende Lufttemperatur in der Nähe des Kragarms die Messungen verfälschen. Um dies zu vermeiden, werden die Konsolen mit einem Vlies umwickelt und die Messköpfe der Feuchtefühler mit einem seitlichen Versatz von 20 cm zur Konsole befestigt. Um die Feuchtefühler weiterhin vor direkter Sonneneinstrahlung, Witterung, Staub und Insekten zu schützen, werden sie mit einem Schutzgehäuse aus UV-beständigem, weißem Kunststoff versehen und die werkseitigen Schutzkappen durch eine staubdicht abschließende Doppellage aus Pollenschutzgaze ergänzt. Das Schutzgehäuse reicht über die Unterkante des Sensorkopfes, sodass dieser auch vor Schlagregen geschützt ist. Gleichzeitig sind die Öffnungsfläche des Gehäuses und das Gehäusevolumen hinreichend groß, um die Luftzirkulation um den Sensor nicht zu behindern.

Die Messdaten werden in einem 10-Minuten-Intervall erfasst. Die spätere Auswertung erfolgt für eine Hitze- und eine Kälteperiode sowie für einen Tagesverlauf mit Betrachtung der potentiellen Sonnenstunden ohne Verschattung durch Nachbargebäude, der Stunden mit Verschattung sowie der Nachtstunden. Zum einen werden die stündlichen Mittelwerte über den Tagesverlauf für die Sensorpositionen 1–4 abgebildet. Zum anderen werden horizontale Temperatur- und Feuchteprofile entlang der Messketten 1–3 (Abbildung 2) für einen definierten Zeitraum erstellt. Erwartet werden eine leichte Reduktion der Lufttemperatur an warmen Tagen sowie ein Anstieg der relativen Luftfeuchte durch beide Begrünungsformen wie in Alsaad et al. (2022c). Diese Effekte sollten bei direkter Sonneneinstrahlung am größten sein, gleichzeitig aber mit zunehmendem Wandabstand abnehmen. An kalten Tagen sowie nachts kann sich zu Beginn der Wärmespeichereffekt des Substrats abzeichnen. Dieser kann einen leichten Anstieg der Lufttemperatur nahe der Begrünungen bewirken. Die größten Unterschiede sind für die Sensorposition 2 zu erwarten. Dort ist die Luftzirkulation durch die Begrünung verringert, sodass sich die feuchte, warme Luft stauen kann.

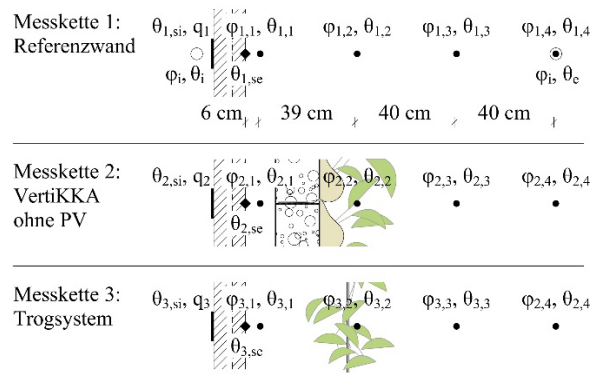


Abbildung 2: Messpunkte der Lufttemperatur, Luftfeuchte, Wärmestromdichte und Oberflächentemperatur

Hygrothermik der Außenwand

Sinkende Lufttemperaturen führen zu einem Anstieg der relativen Luftfeuchte (bei konstanter absoluter Luftfeuchte). Werden die Taupunkttemperatur bzw. die Sättigungsfeuchte erreicht, kondensiert das in der Luft enthaltene Wasser an der Bauteiloberfläche und kann die Fassade auf lange Sicht schädigen. Daher erfolgt ein hygrothermisches Monitoring der drei Testwandabschnitte. Die Oberflächentemperaturen der Wandaußenseite werden durch Thermistoren (vgl. oben) bestimmt. Diese werden mit witterungsbeständigem Kunststoffklebeband, welches einen der Wand ähnlichen Emissionsgrad aufweist, an der Wandoberfläche befestigt. Die Haftung der Sensoren wird während des Messzeitraumes regelmäßig überprüft. Die Lufttemperaturen, relativen und absoluten Luftfeuchten sowie die Taupunkttemperaturen (Auflösung 0,1 K) der angrenzenden Luftschicht werden durch die kapazitiven Feuchtefühler in Position 1 (Abbildung 2) gemessen bzw. berechnet. Die Datenerfassung erfolgt im 10-Minuten-Intervall.

Das Tauwasserrisiko kann anschließend leicht über die Differenz aus der äußeren Wandoberflächentemperatur θ_{se} und der Taupunkttemperatur θ_{TP} abgeschätzt werden:

$$D = \theta_{se} - \theta_{TP} \quad (1)$$

Wird $D \leq 0$, kann sich Tauwasser an der Fassade niederschlagen. Die äußere Wandoberflächentemperatur wird maßgeblich durch die einfallende Solarstrahlung beeinflusst. Auch der Strahlungsaustausch mit der Umgebung und die Strömungsgeschwindigkeit der angrenzenden Luftschicht wirken sich auf die Oberflächentemperatur aus. Folglich sind für sommerliche und winterliche Verhältnisse sowie für Tag- und Nachtstunden unterschiedliche Ergebnisse zu erwarten (Alsaad et al., 2022c). Konkret wird während der Sonnenstunden eine erhöhte Luftfeuchte hinter der VertiKKA im Vergleich zur

Referenzwand erwartet, während nachts bzw. zur kälteren Jahreszeit sogar von einer vergleichsweise verringerten relativen Luftfeuchte hinter der VertiKKA und damit einem reduzierten Tauwasserrisiko ausgegangen werden kann. Diese Effekte sollten durch die Begrünung des Trogsystems in abgeschwächter Form beobachtbar sein.

Zu den hygrothermischen Untersuchungen zählt auch die Bestimmung der Transmissionswärmeverluste durch die drei Wandabschnitte. Diese werden durch den U-Wert beschrieben. Um diesen empirisch zu ermitteln, wird in jedem Wandabschnitt innenseitig eine Wärmeﬂussplatte mit integriertem Thermistor (Messﬂäche aus 12×12 cm Epoxidharzplatte, Genauigkeit $\pm 5\%$ (bei 23°C) bzw. $\pm 0,5$ K (0°C bis 80°C), Auflösung $0,1$ W/m² bzw. $0,01$ K) an der Wand befestigt. Durch die Verwendung einer Wärmeleitpaste wird der Kontakt zwischen Wärmeﬂussplatte und Wand erhöht. Dabei wird darauf geachtet, keine Luﬂeinschlüsse in der Paste zu erzeugen. Die Wärmeﬂussplatte befindet sich auf einer lotrechten Achse mit dem bereits beschriebenen Thermistor zur Bestimmung der Außenoberﬂächentemperatur. Innenseitig begrenzt ein Wandversatz den homogenen Wandbereich und damit auch den Schutzbereich um die Wärmeﬂussplatte auf eine Breite von 70 cm (Wandstärke von $31,5$ cm im schraffierten Bereich in Abbildung 1, oben). Innerhalb dieses Schutzbereichs sollten die Wärmeströme mit denen der Messﬂäche übereinstimmen, sodass seitliche Wärmeströme vernachlässigt werden können. Zur Überprüfung der maximalen Schutzbreite von 29 cm rechts bzw. links der Messﬂäche wurde daher eine Wärmebrückensimulation mit Psi-Therm 3D (Version 9) durchgeführt, die das Ausreichen der Schutzbreite bestätigte. Da durch das Südfenster die Sonnenstrahlen direkt auf die Innenwand des Reallabors einfallen können, wird das Fenster durch einen dauerhaften, lichtundurchlässigen und unbeweglichen Vorhang verschattet, um die Wärmeﬂussplatten vor der direkten Sonneneinstrahlung zu schützen. Des Weiteren werden die Innen- und Außenlufttemperatur über die Thermistoren der Feuchtefühler gemessen. Analog zu den Messungen des Mikroklimas werden die Daten im 10-Minuten-Intervall erfasst.

Der anschließend zu ermittelnde U-Wert ist für den stationären Zustand, d. h. unter Annahme konstanter Wandoberﬂächentemperaturen, deﬁniert, welche in situ jedoch nicht realisierbar sind. Da die Messungen aber über einen längeren Zeitraum erfolgen, kann ein quasi-stationärer Zustand angenommen werden, sofern die Messdaten bestimmte Kriterien erfüllen.

Zunächst werden die Messdaten vorgefiltert, um verschiedene Störfaktoren auszuschließen. Eliminiert werden:

1. Negative Wärmestromdichten (DIN EN 12494). Somit wird nur der Wärmetransport nach außen betrachtet. Außerdem werden Fehler, bspw. durch Berühren der Wärmeﬂussplatte, ausgeschlossen.
2. Nicht erklärbare Spitzen der Oberﬂächentemperaturen bzw. Wärmestromdichten, die durch den Vergleich der Daten untereinander auftreten und nicht von der Außentemperatur abhängen.
3. Plötzliche Schwankungen der Innenraumtemperatur, die durch das Öffnen von Türen und Fenstern auftreten.

Anschließend werden weitere Filterkriterien angewandt. In vorangegangenen Arbeiten von Alsaad et al. (2022a) erwies sich die Vorgehensweise nach Tudiwer et al. (2019) als sinnvoll. Damit werden gleichzeitig die Kriterien der DIN EN 12494 für schwere Bauteile erfüllt:

4. $\theta_{i,j} - \theta_{e,j} > 15$ K mit $|\Delta(\theta_{i,j} - \theta_{e,j})| < 2$ K innerhalb der letzten 24 Stunden.
5. $\theta_{si,j} - \theta_{se,j} > 15$ K im Mittel mit $|\Delta(\theta_{si,j} - \theta_{se,j})| < 2$ K innerhalb der letzten 24 Stunden.

Durch die Anforderungen an die Temperaturdifferenzen werden einerseits nur deutlich messbare Wärmestromdichten in die Berechnung einbezogen und andererseits die Fehler der absoluten Temperaturen auf weniger als 5% reduziert (DIN EN 12494). Des Weiteren können Wärmespeichereffekte, die den U-Wert ebenfalls verfälschen würden, nahezu ausgeschlossen werden. Außerdem wird von einem konstanten Wärmedurchlasswiderstand der Wand ausgegangen, bei dem kein Feuchtetransport stattfindet.

Die Daten werden für ganzzahlige Vielfache von 24 Stunden ausgewählt. Nach der Datenfilterung werden gleitende U-Werte [W/m²K] nach dem Mittelwertverfahren der DIN EN 12494 berechnet:

$$U = \frac{\sum_{j=1}^n q_j}{\sum_{j=1}^n (\theta_{i,j} - \theta_{e,j})} \quad (2)$$

Dabei ist q die Wärmestromdichte [W/m²], θ_i die Innentemperatur [$^\circ\text{C}$] und θ_e die Außentemperatur [$^\circ\text{C}$].

Aufgrund der bereits beschriebenen Auswirkungen der Begrünungen auf die Oberﬂächentemperaturen sind besonders durch die VertiKKA verringerte Transmissionswärmeverluste und eine Verringerung des U-Wertes zu erwarten (Alsaad et al., 2022c). Für das Trogsystem sind geringere Effekte erwartbar, die im Gegensatz zur VertiKKA maßgeblich von der Blattﬂächendichte (LAD) beeinflusst sein werden. Aufgrund der höheren Wandstärke und der Dämmung der Außenwand könnten die U-Werte deutlich weniger als in Alsaad et al. (2022a) reduziert werden.

Hinterlüftung

Die Außenwand und die VertiKKA-Rückseite tauschen Wärme durch Strahlung sowie durch Konvektion der dazwischen befindlichen Luftschicht aus. Die Luftwechselrate (LWR) beschreibt die Belüftungseffizienz und hängt von vielen verschiedenen Faktoren ab. Die Geometrie des Luftspalts und der Öffnungsflächen, die Orientierung der Öffnungsflächen zum Wind, die Windgeschwindigkeit sowie die abschirmende Wirkung von Gebäuden und Vegetation bestimmen den Druckgradienten an den Öffnungen des Luftspalts und damit die erzwungene Konvektion. Weiterhin führen die Temperaturgradienten innerhalb der Luft zu freier Konvektion und schließlich bestimmt auch die Oberflächenrauigkeit die resultierende Mischkonvektion. Aufgrund der Vielzahl von Einflussfaktoren reichen die numerisch bestimmten LWR hinterlüfteter Fassaden von 100–1800 h⁻¹ für Spaltbreiten von 4–15 cm. Empirisch ermittelte LWR liegen bei 10–1300 h⁻¹ für Spaltbreiten bis 10 cm (Rahiminejad und Khovalyg, 2021). Die Strömungsgeschwindigkeiten sind hingegen eher gering. Nach Paskert et al. (2022) ergaben sich für eine vierseitig offene Hinterlüftung und eine Öffnungsbreite von 5 cm Strömungsgeschwindigkeiten bis maximal 0,2 m/s. Für eine Breite von 10 cm ermittelten Souza et al. (2018) maximal 0,36 m/s. Die LWR für einen konkreten Fall korrekt einzuschätzen, erweist sich als offensichtliche Herausforderung. Da die Hinterlüftung die bauphysikalischen Auswirkungen von Grünfassaden jedoch maßgeblich beeinflusst und die LWR gleichzeitig ein wichtiger Eingabeparameter für energetische Simulationen darstellt, werden die Strömungsgeschwindigkeiten und LWR hinter der VertiKKA empirisch bestimmt.

Die Strömungsgeschwindigkeit im Luftspalt wird durch ein omnidirektionales Thermo-Anemometer mit einem Messbereich von 0,05 bis 2,5 m/s (Genauigkeit ±(3% v. Mw. + 0,5% v. Mw./K Abweichung von 23°C + 1% v. Ew + 2 Digit), Auflösung 0,001 m/s) erfasst. In Voruntersuchungen wurde die Omnidirektionalität des Anemometers mit einer laminaren Strömung, die durch ein Rohr innerhalb einer Klimakammer erzeugt wurde, messtechnisch überprüft. Wie zu erwarten war, zeigten die Ergebnisse eine gute Rotationssymmetrie entlang der Sensorachse. Allerdings stieg der relative Fehler mit größer werdendem Winkel zwischen Sensorachse und Strömungsrichtung. Gleichzeitig wurde die winkelabhängige Abweichung umso größer, je höher die Strömungsgeschwindigkeit war (bis zu 65,5% für 180° und 1,8 m/s).

Um die Messabweichungen so gering wie möglich zu halten, wird das Anemometer senkrecht zu den Hauptströmungsrichtungen im Luftspalt positioniert. Dazu

wird es zwischen den zwei Modulsträngen auf mittlerer Höhe so in den Luftspalt eingeschoben, dass die Sensorspitze bis zur Mitte in die 12 cm breite Hinterlüftung ragt. Für die Berechnung des Volumenstroms nach Gleichung 3 bleibt die Hinterlüftung nur seitlich geöffnet. Die obere und untere Öffnung sowie die horizontalen und vertikalen Spalte zwischen den Modulen werden verschlossen, um eine laminare Strömung über die ganze Anlagenfläche zu begünstigen. Verwendet werden PVC-Lamellen, um die Grauwasserbeprobung an den Modulauslässen nicht zu behindern. Die Messungen zur Bestimmung des Volumenstroms und der LWR erfolgen im April sowie im Juli 2024 über einen Zeitraum von jeweils 14 Tagen, wobei die Messdaten in einem 10-Sekunden-Intervall aufgezeichnet werden.

Unter der Annahme, dass die Luft abhängig von der Windrichtung immer nur durch eine der Öffnungsflächen eintritt, können der Volumenstrom Q [m³/s] sowie die Luftwechselrate ACH [h⁻¹] nach Falk und Sadin (2013) berechnet werden:

$$Q = v \cdot A \quad (3)$$

$$ACH = \frac{v}{x} \cdot 3600 \text{ mit } v = 0,67 \cdot v_{max} \quad (4)$$

Dabei sind v bzw. v_{max} die mittlere bzw. maximale Strömungsgeschwindigkeit [m/s], A die Öffnungsfläche [m²] und x die Ausdehnung des Luftspalts orthogonal zur Öffnungsfläche [m]. Die Gleichungen 3 und 4 gelten für Hohlräume, die aus einer konstanten Richtung belüftet werden. Für variierende Windrichtungen wird die LWR überschätzt. Bei laminaren Strömungen zwischen zwei parallelen Platten entspricht das Geschwindigkeitsprofil der Strömung einer Parabel mit maximalen Geschwindigkeiten in der Mitte des Luftspalts und minimalen Geschwindigkeiten an den Grenzflächen (Haftbedingung). Das Verhältnis zwischen maximaler und gemittelter Strömungsgeschwindigkeit beträgt 0,67 für laminare Strömungen mit Reynoldszahlen bis 5700 (Falk und Sandin, 2013). Für die Hinterlüftung der VertiKKA ergibt sich bei 20°C Lufttemperatur, einer Spaltbreite von 12 cm und einer Strömungsgeschwindigkeit von maximal 2,5 m/s eine Reynoldszahl von 1950 (laminarer Bereich). Dennoch handelt es sich bei den Gleichungen 3 und 4 um eine grobe Näherung, nicht zuletzt, da die laminare Strömung durch die Verstrebungen der Unterkonstruktion, die 5 cm tief in den Spalt reichen, gestört wird und die Strömungsgeschwindigkeit lediglich an einem Punkt gemessen werden kann.

Daher wird ein weiterer Ansatz nach Rahiminejad et al. (2021) verfolgt, bei dem der Volumenstrom nicht aus der Strömungsgeschwindigkeit im Luftspalt, sondern aus einer horizontalen Windkomponente und

einer vertikalen thermischen Komponente (Kamineffekt) unter Verwendung der lokalen Windgeschwindigkeit und -richtung resultiert. Daher werden im oben genannten Messzeitraum zusätzlich ein Schalenanemometer mit einem Messbereich von 0,5 bis 50 m/s (Genauigkeit $\pm 0,5$ m/s $\pm 3\%$ v. Mw., Auflösung 0,1 m/s) sowie ein Windrichtungsgeber (Genauigkeit $\pm 5^\circ$, Auflösung $11,25^\circ$) am Reallabor auf mittlerer Höhe der VertiKKA mit einem Wandabstand von 40 cm installiert. Aus den Messdaten erfolgt die Berechnung des Volumenstroms durch:

$$Q_{Wind+Therm} = \sqrt{Q_{Wind}^2 + Q_{Therm}^2} \quad (5)$$

$$\text{mit } Q_{Wind} = [0,04 + 0,12 \cdot \cos(\pi + W)] \quad (6)$$

$$\text{und } Q_{Therm} = C_D A \sqrt{\frac{2g\Delta H_{NPL}|\theta_{e,cav} - \theta_e|}{\theta_e}} \quad (7)$$

Dabei ist W die lokale Windrichtung [$^\circ$], C_D der Auslasskoeffizient [-], welcher abhängig von der Öffnungsgeometrie zwischen 0 und 1,5 liegt (ASHRAE, 2009), g die Erdfallbeschleunigung [m/s^2] und ΔH_{NPL} die Höhe des neutralen Druckniveaus ab der Unterkante der Öffnungsfläche [m], welche laut ASHRAE (2009) mit der halben Öffnungshöhe abgeschätzt werden kann. $\theta_{e,cav}$ ist die durchschnittliche Lufttemperatur im Spalt $\theta_{2,1}$ (Abbildung 2) und θ_e die Lufttemperatur der Umgebung [$^\circ C$]. Die Berechnung kann für stündliche Werte oder unter Verwendung der Software EnergyPlus automatisiert für jeden Zeitschritt erfolgen. Die ermittelten Volumenströme werden anschließend miteinander verglichen und diskutiert.

Grauwasseraufbereitung

Die Grauwasserreinigung der VertiKKA basiert auf der Kombination des Biofilmverfahrens mit der Filterwirkung des Reinigungssubstrats und kann mit traditionellen Systemen wie Tropfkörpern und bepflanzten Bodenfiltern verglichen werden. Zunächst besteht das Ziel darin, zu überprüfen, ob das aufbereitete Grauwasser den Anforderungen für eine direkte Einleitung den Vorgaben der Abwasserverordnung Anhang I (BGBI. I 2004, 1118 - 1119), Größenklasse I entspricht. Eine weitergehende Überprüfung erfolgt im Hinblick auf die Möglichkeit der Wasserwiederverwendung. Dabei werden die Kriterien und Vorgaben der EU-Verordnung 2020/741 zur Wasserwiederverwendung, die DIN EN 16941-2 und die Empfehlung der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall DWA-M 277 berücksichtigt.

Grauwassercharakteristik

Die Grauwassersammlung erfolgt in einem Kellerraum eines Mehrfamilienhauses in Weimar. Der angeschlossene Strang ermöglicht die Sammlung von 100% des anfallenden Grauwassers, das sowohl stark als auch schwach belastetes Grauwasser von durchschnittlich 16,5 Personen beinhaltet. Der Tank verfügt über ein Fassungsvermögen von 750 L und wird durch das anfallende Grauwasser von 60 L/Pers/d innerhalb eines Tages vollständig gefüllt. Diese Menge reicht aus, um das Reallabor für ca. 3,5 Tage zu beschicken.

Die Vorbehandlung des Grauwassers erfolgt durch einen Absetztank, der zunächst die Entfernung eines Großteils der Feststoffe ermöglicht, während Fette aufschwimmen und in einen nachgeschalteten Entnahmetank gelangen. Die Entnahme aus dem zweiten Tank erfolgt von unten, um die Fettschicht zu umgehen. Nach jedem Abpumpen des Grauwassers wird der Entnahmetank gereinigt, während die Reinigung des Absetztanks einmal monatlich durchgeführt wird. Das Grauwasser wird zunächst in einen mobilen Tank gepumpt und zum Reallabor transportiert. Am Standort des Reallabors wird das Grauwasser in einen Vorlagetank im Innenraum des Bestandsgebäudes überführt. Vor der Beschickung der Begrünungssysteme erfolgt eine weitere Vorbehandlung des Grauwassers durch ein Sieb, das zusätzliche Feststoffe entfernt. Diese Maßnahmen stellen sicher, dass das Reinigungssubstrat über einen längeren Zeitraum genutzt werden kann und die Lochbleche der VertiKKA zur Verteilung des Wassers sowie das Vlies nicht verstopfen.

Für eine Einordnung des realen Grauwassers aus Weimar und im Hinblick auf die zu erwartende Reinigungsleistung am Reallabor in Abhängigkeit der Grauwasserzusammensetzung wurden die Parameter CSB, biochemischer Sauerstoffbedarf nach 5 Tagen (BSB₅), TN_b und TP analysiert und mit dem synthetisch hergestellten Grauwasser aus den Voruntersuchungen von Aicher et al. (2022) verglichen. Der Vergleich deutet auf eine ähnliche Zusammensetzung der beiden Grauwässer hin. Der CSB ist im Median nahezu identisch mit der Konzentration des synthetischen Grauwassers. Das Grauwasser aus Weimar weist eine marginal höhere Konzentration an TP auf, dahingegen eine geringere Menge an TN_b, sowie eine minimal niedrigere Konzentration an BSB₅. Die Abschätzung der biologischen Abbaubarkeit kann durch das Verhältnis von Kohlenstoff (C), Stickstoff (N) und Phosphor (P) beschrieben werden. Das vorliegende C:N:P-Verhältnis lässt darauf schließen, dass im Reinigungssubstrat möglicherweise nur ein geringer biologischer Abbau zu erwarten ist, während die Filterwirkung überwiegen könnte. Dieser Effekt

konnte bereits von Aicher et al. (2022) beobachtet werden. Zu berücksichtigen ist, dass durch das mehrfache Umpumpen des Rohgrauwassers zum Reallabor zusätzlicher Sauerstoff in das System eingetragen wird und somit bereits im Vorfeld ein aerober Abbau der Grauwasserinhaltsstoffe stattfinden könnte.

Beschickung und Durchfluss

Das Grauwasser wird intervallweise auf das Tropfblech über dem Reinigungssubstrat des obersten Moduls der VertiKKA aufgebracht und nach dem Ablauf des ersten Moduls über das Lochblech flächig auf das darunterliegende Modul weitergeleitet (Reihenschaltung, Hauptbeschickungsweg in Abbildung 1, oben). Zudem besteht die Möglichkeit, jedes Modul einzeln zu beschicken sowie am Ablauf separat zu beproben (Parallelschaltung, zweiter Beschickungsweg in Abbildung 1, oben).

In einem vorangegangenen Projekt wurde die VertiKKA mit 75 L/m²/d beschickt (Aicher et al., 2022; Börmel et al., 2021). Aufgrund des aufwändigen Antransports des Grauwassers an das Reallabor ist jedoch eine Reduzierung der Beschickung auf 55 L/m²/d notwendig. Es wird erwartet, dass die Reinigungsleistung der Anlage durch die Verringerung der Zulaufmenge steigt, da sich die Aufenthaltszeit des Grauwassers im System erhöht und eine geringere Schadstofffracht vom System aufgenommen werden muss. Die Beschickung erfolgt stündlich über zwei Minuten. Somit ergibt sich eine Durchflussrate von 0,65 L/Modul/min und 1,94 L/Strang/min.

Die Durchflussmengen am Reallabor werden mittels magnetisch-induktiver Durchflusssensoren (Messbereich 5 bis 3000 mL/min, Genauigkeit $\pm(2\%$ v. Mittelwert + 0,5% v. Messbereichsendwert), Auflösung 1 mL/min) im Zulauf und Ablauf der Anlage gemessen. Durch Langzeitmessungen während des Regelbetriebs kann aus der Differenz des Zu- und Ablaufs die Verdunstung des Wassers durch Substrat und Pflanzen (Evapotranspiration) abgeschätzt werden. Zu erwarten sind deutliche Schwankungen, die vom Klima aber auch von der Wachstumsperiode der Pflanzen abhängen. Um die Nährstoffzufuhr für die Pflanzen zu gewährleisten, können die unteren Module über den zweiten Beschickungsweg zusätzlich mit Rohgrauwasser versorgt werden (Abbildung 1, oben). Zum Erhalt des Biofilms wird jedoch eine möglichst konstante Beschickung der Anlage angestrebt.

Grauwasseranalyse

Vor dem Regelbetrieb der Anlage ist eine Einfahrzeit zu berücksichtigen. In dieser Zeit baut sich der Biofilm auf und die Ablaufwerte stabilisieren sich. Für

die VertiKKA wird eine Einlaufphase von 55 Tagen basierend auf den bisher erfolgten Untersuchungen (Börmel et al., 2021) angenommen und messtechnisch überprüft. Während der Einfahrzeit wird die Anlage zweimal wöchentlich sowie im Regelbetrieb einmal wöchentlich jeweils am Zu- und Ablauf der Module beprobt. Bei den Abläufen der jeweils oberen zwei Module handelt es sich um Stichproben. Am Gesamtablauf jedes Stranges wird eine 24-Stunden-Mischprobe entnommen. Die Probenmengen variieren abhängig von den analysierten Parametern, wobei Zulauf und Ablauf der 24-Stunden-Mischprobe 2–3 L und Stichproben 1 L umfassen.

Die überwiegend nasschemischen Analysen erfolgen mit Hilfe von Küvettentests und einem Photometer. Dabei werden Parameter wie CSB, CSB_{filtriert}, TP, ortho-P, TN_b, Ammonium (NH₄-N), Nitrat (NO₃-N) und Nitrit (NO₂-N) untersucht. Die notwendigen Messbereiche der Küvetten für die Abläufe der Module werden anhand der Ablaufergebnisse vorheriger Messungen abgeschätzt. Da sich die Beschickungsmenge, die Modulmaße und die Grauwasserzusammensetzung von den Voruntersuchungen unterscheiden, kann zur Festlegung der Messbereiche ein iterativer Prozess notwendig werden. Darüberhinaus erfolgen Messungen des pH-Werts (Messbereich 0 bis 14 pH, Genauigkeit $\pm 0,004$ pH, Auflösung 0,001 pH) der Leitfähigkeit (Messbereich 1 μ S/cm bis 2000 mS/cm, Genauigkeit $\pm 0,5\%$ v. Mw., Auflösung 0,01 bis 1 je nach Messbereich), der Trübung (Messbereich 0 bis 4000 FNU, Genauigkeit 0,0 bis 999,9 FNU/NTU: 0,3 FNU oder $\pm 2\%$ v. Mw., 1000,0 bis 4000,0 FNU/NTU: $\pm 5\%$ v. Mw., Auflösung 0,1 FNU/NTU) und der O₂-Sättigung (Messbereich 0 bis 20 mg/L O₂, Genauigkeit $\pm 1,5\%$ v. Mw., Auflösung 1 mg/L O₂) mittels Messsonden. Zusätzlich werden die mikrobiologischen Parameter E-Coli und Gesamtcoliformen ermittelt. Auch die Analyse von BSB₅ und Feststoffen sind Bestandteil der Untersuchungen.

Die Reinigungsleistung der jeweiligen Parameter wird anhand folgender Gleichung ermittelt:

$$\eta_x = \frac{C_{x,Zu} - C_{x,Ab}}{C_{x,Zu}} \cdot 100\% \quad (8)$$

C bezeichnet die Konzentrationen des jeweils untersuchten Parameters x im Zu- oder im Ablauf der Begrünungssysteme.

Weiterhin wird die Korrelation zwischen Reinigungsleistung und Substrattemperatur untersucht. Die Substrattemperatur wird in den zwei obersten Modulen sowie im untersten Modul des linken Strangs gemessen. Dafür wird ein Thermistor (vgl. oben) in ein Aluröhrchen geschoben, dessen Innendurchmesser

dem des Sensorkopfes entspricht, und mittig im Substrat positioniert. Die im 10-Minuten-Intervall erfassten Messwerte werden je nach Intervall der Beprobung gemittelt.

Zusammenfassung

Das Reallabor dient dem Langzeitmonitoring der wandgebundenen Grünfassade VertiKKA, des Trogsystems und eines Referenzwandabschnitts, um die Auswirkungen beider Begrünungssysteme auf das hygrothermische Verhalten der Außenwand, das Mikroklima und die Grauwasserreinigungsleistung zu untersuchen. Die vorliegende Beschreibung ist Vorbereitung der wissenschaftlichen Praxis zu betrachten und sichert ein planvolles Vorgehen zur stringenten Datenerfassung mit hoher Messgenauigkeit. Eine umfassende Betrachtung systematischer und zufälliger Fehler erfolgt in der Auswertung während und nach den Messungen. In diesem Rahmen nicht diskutiert werden konnten das Monitoring der Pflanzenvitalität und des Wirkungsgrades der PV-Anlage unter Einfluss der dahinter befindlichen Begrünung bzw. der unbegrünten Wand. Diese Untersuchungen werden jedoch ebenfalls Teil der Messungen am Reallabor sein.

Danksagung

Diese Untersuchungen wurden im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Forschungsprojekts VertiKKA2: Umsetzung, Monitoring und Weiterentwicklung der vertikalen Klima-Klär-Anlage im Rahmen der Förderinitiative Ressourceneffiziente Stadtquartiere (RES:Z), Förderkennzeichen 033W108GN, durchgeführt. Wir bedanken uns für diese Unterstützung.

Literatur

Aicher, A., Börmel, M., Londong, J. und Beier, S. 2022. Vertical green system for gray water treatment: Analysis of the VertiKKA-module in a field test. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 976005.

Alsaad, H., Engelhardt, M. und Völker, C. 2022a. Messtechnische Untersuchung der Auswirkung von Fassadenbegrünungen auf den U-Wert der Außenwand. *Bauphysik*, 44(4), 211–219.

Alsaad, H., Hartmann, M., Hilbel, R. und Voelker, C. 2022b. The potential of facade greening in mitigating the effects of heatwaves in Central European cities. *Building and Environment*, 216, 109021.

Alsaad, H., Hartmann, M. und Voelker, C. 2022c. The effect of a living wall system designated for grey-water treatment on the hygrothermal performance of the facade. *Energy and Buildings*, 255, 111711.

ASHRAE 2009. *Handbook of Fundamentals: Chapter 16: Ventilation and Infiltration*. Atlanta, USA.

BGBI. I 2004, 1118 - 1119 (12-2004). *Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserverordnung - AbwV) Anhang 1 Häusliches und kommunales Abwasser*.

Börmel, M., Aicher, A., & Beier, S. 2021. *Vertikale Klimakläranlage zur Steigerung der Ressourceneffizienz und Lebensqualität in urbanen Räumen (Das Klima wandelt sich! - Was können wir tun?)*. DWA-Landesverband Thüringen/Sachsen.

Chen, Q., Li, B. und Liu, X. 2013. An experimental evaluation of the living wall system in hot and humid climate. *Energy and Buildings*, 61, 298–307.

DIN EN 12494 (11-1996). *Vor-Ort-Messung des Wärmedurchlasswiderstandes von Oberfläche zu Oberfläche*.

DIN EN 16941-2 (02-2021). *Vor-Ort-Anlagen für Nicht-Trinkwasser - Teil 2: Anlagen für die Verwendung von behandeltem Grauwasser*.

DWA-M 277 (10-2017). *Hinweise zur Auslegung von Anlagen zur Behandlung und Nutzung von Grauwasser und Grauwasserteilströmen*.

EU-Verordnung 2020/741 (25.05.20). *Mindestanforderungen an die Wasserwiederverwendung*. (ABl. L 177, S. 32).

Falk, J. und Sandin, K. 2013. Ventilated rainscreen cladding: Measurements of cavity air velocities, estimation of air change rates and evaluation of driving forces. *Building and Environment*, 59, 164–176.

Hartmann, M., Alsaad, H., Mosayebzadeh, M. und Voelker, C. 2023. The reduction of building energy demand by a living wall system in a Central European climate. *Proceedings of Building Simulation 2023*, Shanghai, China.

Paskert, T., Alsaad, H. und Voelker, C. 2022. Airflow through a facade greening system equipped with vertical photovoltaic modules. *Proceedings of BauSim2022*, Weimar, Deutschland.

Rahiminejad, M. und Khovalyg, D. 2021. Review on ventilation eates in the ventilated air-spaces behind common wall assemblies with external cladding. *Building and Environment*, 190, 107538.

Souza, L. C. O., Souza, H. A. und Rodrigues, E. F. 2018. Experimental and numerical analysis of a naturally ventilated double-skin facade. *Energy and Buildings*, 165, 328–339.

Tudiwer, D., Vertal', M., Korjenic, A. und Čakyová, K. 2019. Abbildung der wärmedämmenden Wirkung eines fassadengebundenen Begrünungssysteme in einem Simulationsmodell. *Bauphysik*, 41(3), 155–161.

Van de Walle, A. et al. 2023. Greywater reuse as a key enabler for improving urban wastewater management. *Environmental Science and Ecotechnology*, 100277.