

Deutsche Bundesstiftung Umwelt
 Frau Sabine Djahanschah
 An der Bornau 2
49090 Osnabrück

Schlussbericht zum Projektfortschritt

(Beantwortung in Stichworten genügt, falls erforderlich bitte Zusatzblätter verwenden)

Aktenzeichen 37018/01-25	Bewilligungsempfänger ZAE	
Projekttitel Energieeffiziente Raumklimatisierung mit Pflanzen: Ressourcenschonende Konditionierung der Innenraumlufte durch dezentrale Vertikalbegrünungen – green4indoor		
Projektbeginn 01.03.2021	Projektlaufzeit 24	

AP 1: Identifizierung von Pflanzenarten, Pflanz-Substraten, Begrünungssystemen und Materialien mit zu erwartender hoher Verdunstungsrate und Kühlleistung

Material und Methoden AP 1

Pflanzenauswahl

Die Versuchspflanzen, die für die Messung der Photosyntheseparameter und in der Folge auch für die Begrünung der vertikalen Systeme verwendet werden sollen, wurden nach folgenden Kriterien ausgewählt:

- Hinweise in der Literatur auf eine hohe Transpirationsrate
- Eignung für eine flächige, deckende Begrünung in der Vertikalen mit nur einer Pflanzenart (Solitär)
- in der Praxis bewährt und häufig verwendet
- keine Probleme mit zu starkem, bzw. zu schwachem Wachstum, Brüchigkeit, Schädlingsanfälligkeit
- robuste Pflanze, die auch kurzfristig Trockenheit (Pumpenausfall) verträgt.

Ausgewählte Arten (H. = Kultur in Hydrokultur mit Blähton; E. = Kultur in Torfsubstrat): *Chlorophytum comosum* (H.), *Cissus rotundifolia* (H.), *Epipremnum aureum* 'Enjoy' (H.), *Epipremnum aureum* 'Marble Queen' (H.), *Ficus pumila* (H.), *Microsorium diversifolium* (H.), *Pellionia repens* (E.), *Philodendron hederaceum* 'Brasil' (H., E.), *Philodendron hederaceum* grün (H.), *Scindapsus pictus* (H.), *Syngonium podophyllum* (E.), *Tradescantia zebrina* (E.) (*Abbildung 1*).

Für die Begrünung der Vertikalsysteme wurde *Philodendron hederaceum* 'Brasil' verwendet, da diese Art robust und dicht wachsend ist. Die Pflanzen sind geeignet, innerhalb kurzer Zeit eine vertikale Fläche lückenlos zu begrünen und werden daher

in der Praxis häufig verwendet. Folglich habe die zu ermittelnden Daten Praxisrelevanz. In ersten Tastversuchen wiesen *Philodendron hederaceum* 'Brasil' eine im Vergleich der Arten mittlere Transpirationsrate auf.

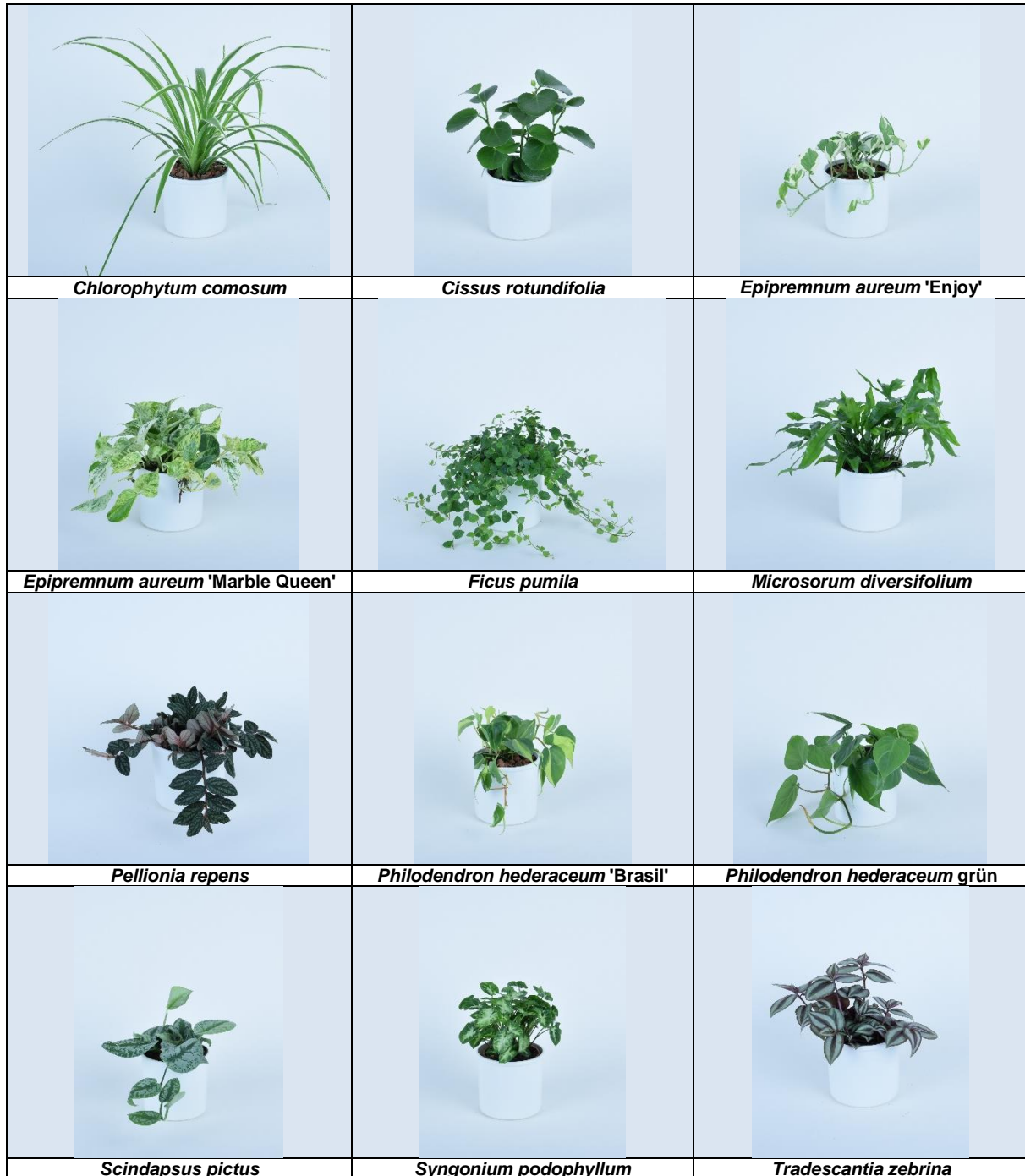


Abbildung 1: Für die Messung der Photosyntheseparameter verwendete Pflanzenarten (Zustand zum Termin des Kaufs 6/21)

Versuchszeitraum / Messzeitraum:

Juni 2021 bis August 2022

Kultur der Pflanzen im Gewächshaus:

Heizung 20°C/18°C, Lüftung 24°C, Dauerschattierung

Bewässerungsdüngung: Von 6/21 bis 1/22 wurde 50 % Leitungswasser + 50 % VE-Wasser mit 0,5 g/l Ferty 9 Hydro (15+7+22+6+Mikronährstoffe) + 0,01 g/l Ferty 10 Spezial (Mikronährstoffe) eingesetzt. Von 1/22 bis 3/22 wurde 100 % VE-Wasser mit 0,35 g/l Ferty Basis 1 (0+14+38+5+Mikronährstoffe) + 0,65 g/l Calciumnitrat Tetrahydrat (12 % N) verwendet. Ab 3/22 wurde mit reduzierten Nährstoffgehalten von 0,2 g/l Ferty Basis 1 + 0,35 g/l Calciumnitrat Tetrahydrat in 100 % VE-Wasser gearbeitet. Zur Vermeidung von Nitritanreicherungen wurden die Nährlösungen belüftet. pH-Werte über 7,5 wurden durch Zugabe von Schwefelsäure auf den Zielwert von pH 5,5 abgesenkt.

Begrünungssysteme

Systemauswahl

Folgende Auswahlkriterien wurden für die Wahl der zu untersuchenden Begrünungssysteme zugrunde gelegt:

- große Verdunstungsfläche / hohe potentielle Wasserabgabe
- automatisierbare Bewässerung / Sensoren einbaubar → Regelung der Bewässerung und Wasserabgabe möglich
- positive Praxis-Erfahrungen hinsichtlich gärtnerischer Eignung, Dauerhaftigkeit, Akzeptanz
- mobiles, geschlossenes System (keine Wandbefestigung)
- bevorzugt mineralische Substrate (dauerhaft strukturstabil, weniger hygienische Probleme als bei organischem Anteil)
- passive Verdunstung / Befeuchtung (kein aktives Verteilen von Keimen aus dem Substrat in die Raumluft)

Auf Basis dieser Kriterien wurden zwei Systeme mit unterschiedlichen Substraten ausgewählt, die potentiell eine hohe Wasserabgabe erwarten lassen, die sich hinsichtlich der Bewässerung automatisieren und regeln lassen und mit denen in der Praxis positive Erfahrungen gemacht wurden. Dabei handelt es sich um

1. Filz/Vlies-System: Vertiko (Fa. Vertiko GmbH, Deutschland).

2. Steinwollsystem: Wallflore-Prototyp (Fa. Cloud Garden B.V., Niederlande).

Von der Untersuchung von Topf- und Rinnensystemen wurde abgesehen, da sie im Vergleich eine geringere Verdunstungsfläche haben und eine Regelung der Verdunstung kaum zu realisieren ist, da der Wasservorrat in den Töpfen bzw. Rinnen ständig vorhanden sein muss.

Vertiko

Das Gerüst der Vertiko-Pflanzenwand besteht aus Alu-Vierkantrrohr (40/40/3mm) und einer Alu-Verbundplatte, die an dem Wasserbecken aus schwarzem PE (mit Deckel) befestigt sind (*Abbildung 2*). Als Vegetationsträger dienen genähte Vliese und Glas-Basaltgestrick, deren Taschen mit Vertiko-Spezial-Substrat „Indoor“ gefüllt sind (*Abbildung 3*). In das Vlies sind Tropfschläuche zur Bewässerung integriert, die über eine Tauchpumpe mit Zeitschaltuhr aus dem Wasserbecken versorgt werden. Die bepflanzbare Vlies-Fläche weist auf 1,00 m x 1,65 m (= 1,65 m²) 8 Taschen auf.



Abbildung 2: Mobile Vertiko-Pflanzenwand



Abbildung 3: Vertiko-Spezial-Substrat „Indoor“ in Pflanztasche aus Vlies und Glas-Basaltgestrick

Wallflore

Das Wallflore-System besteht aus und einem Wassertank und einer Aluminium-Unterkonstruktion in die die Pflanzenpaneele - bestehend aus einem verzinktem, beschichteten Stahldrahtkorb, gefüllt mit Steinwolle als Substrat und einer Umhüllung mit HDPE-Folie - eingehängt werden. Die einseitig bepflanzbare Variante weist auf einer Fläche von 0,9 m x 1,35 m (= 1,215 m²) 66 vorgebohrte Pflanzlöcher in der Steinwolle und Folie auf (Abbildung 4).



Abbildung 4: Wallflore-System

Weiterentwicklung Wallflore-System → Perforation der HDPE-Folie

Fa. Cloud Garden / Wallflore hat Interesse an Weiterentwicklung des Systems hinsichtlich erhöhter Wasserabgabe. Aus Brandschutzgründen kann die HDPE-Folie zur Abdeckung der Steinwolle nicht ausgetauscht werden, eine Perforation ist allerdings zulässig und soll im Projekt untersucht werden.

Nach Ausbau der HDPE-Folie, die die Steinwolle im Wallflore-System abdeckt, wurde deren Vorderseite mit den Nadeln eines erhitzten Fleischzartmachers perforiert (*Abbildung 5*), nachdem sich diese Methode in Vorversuchen als geeignet herausgestellt hatte (*Abbildung 6*). Die Größe der so erzeugten Löcher betrug im Mittel etwa $3,54 \text{ mm}^2$ und der Anteil perforierte Löcher an der Gesamtfläche $4,13 \%$. Zusammen mit der Fläche der vorgegebenen Pflanzlöcher ($10,99 \%$) ergab sich ein Anteil von $15,11 \%$ Lochfläche an der gesamten Systemvorderseite.

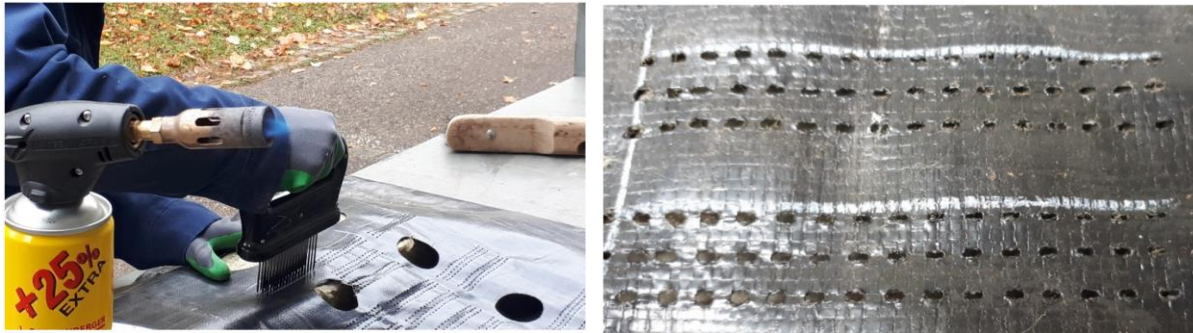


Abbildung 5: Erhitzen des Fleischzartmachers (links) und die damit perforierte Folie (rechts).

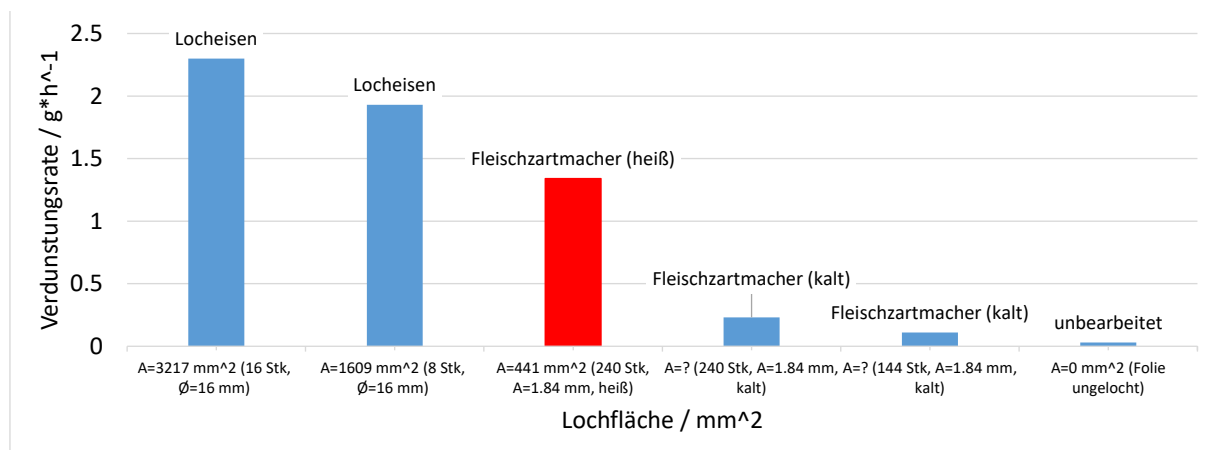


Abbildung 6: Verdunstungsrate der gesättigten Steinwolle durch unterschiedlich perforierte Folien

Pflanzen für vertikale Begrünungssysteme und Bepflanzung der Systeme

Zukauf (10/2021) von *Philodendron hederaceum* 'Brasil' in Torfsubstrat („Erde“), 9 cm Topf.

Bepflanzung Wallflore-System (11/2021): Ausgebaute Steinwollplatten auf Gewächshaustisch legen und vor Bepflanzung über mehrere Tage durchdringend bewässern (50 % Leitungswasser + 50 % VE-Wasser + wenige Tropfen Spülmittel). Händisches Entfernen des Torfsubstrates ohne die Wurzeln zu beschädigen.

Wurzelballen in vorgegebenes Pflanzloch setzen, andrücken und angießen.

Einwurzelung bei $20^\circ\text{C}/18^\circ\text{C}$ Heizungstemperatur, 24°C Lüftungstemperatur, 40-50% relative Luftfeuchte, schattiert. Bepflanzte Steinwollplatten müssen 10-12 Wochen in der Waagerechten liegen, damit Pflanzen einwachsen können, anschließend können die Platten in das System eingehängt werden. Die Bewässerungsdüngung erfolgte wie bei der Kultur der Pflanzen im Gewächshaus beschrieben.

Die Pflanzen für Vertiko-System werden über gleiche Zeit und mit gleicher Behandlung im Topf kultiviert.

Ende 3/22 erfolgte die Bestückung der vertikalen Systeme. Wallflore: bewachsene, eingewurzelte Steinwollplatten einhängen (Summe 66 Pflanzen). Vertiko:

Bepflanzung erfolgte wurzelnackt, dazu musste die vorhandene Erde gründlich durch mehrfaches Waschen entfernt werden. 66 Pflanzen in den Taschen verteilen, mit

Drucklufttacker Taschen eng um die Pflanzen schließen und angießen (Vorgabe von Fa. Vertiko).

Ende 4/22 Pilzbefall an Pflanzen in Vertiko-System durch zu geringe Luftbewegung und zu engen Stand der Pflanzen. Stark befallene Pflanzen entfernt, Desinfektion des Systems mit 3 % H₂O₂-Lösung. In der Folge hellerer, luftiger Standort gewählt. Vermehrung von *Philodendron hederaceum* 'Brasil' im Gewächshaus als Ersatz. 7/22 Einsetzen von ca. 40 kleinen Ersatzpflanzen in Vertiko-System, nach 3 Wochen Einwurzelung wurden die Taschen zugetackert.

Bewässerung und Düngung der Vertikal-Systeme

Nach Empfehlungen des Herstellers ist für das Wallflore-System ein Bewässerungsintervall von 12 - 14 Minuten jeden 2. Tag ausreichend. Das Vertiko-System soll nach Anbieterangaben 3 x täglich für 6 – 8 Minuten bewässert werden. Diese Empfehlungen wurden bei der Bewässerung zugrunde gelegt. Bei dem Vertiko-System wurde die Bewässerung nach dem Pilzbefall auf 2 x täglich 4 Minuten reduziert um ein Wiederauftreten zu vermeiden. In den Versuchen in Büroräumen wurde die Bewässerung an den Pflanzenbedarf und das Raumklima angepasst: Vertiko: 3x täglich 3 – 5 Min (0, 8, 16 Uhr), Wallflore: alle 1-2 Wochen ca. 3 Min, je nach Trockenheit.

Die Bewässerung erfolgte bei beiden Systemen kontinuierlich mit Nährlösung (0,2 g/l Ferty 1 Basis (0+14+38+5+Mikronährstoffe) + 0,35 g/l Calciumnitrat Tetrahydrat (12 % N) in 100 % VE-Wasser). Eine Umstellung der Nährlösung erfolgte 11/22 auf eine praxisüblichere Variante: 0,233 g/l Peters Excel Hard Water Grow Special (18+10+18+2+Mikronährstoffe) in 75 % Leitungswasser + 25 % VE-Wasser. Angestrebt wurden pH-Werte zwischen 4,5 und 7,5. Bei Überschreitung des Maximalwertes erfolgte eine Absenkung durch Zugabe von Schwefelsäure. Die Leitfähigkeit der Nährlösung wurde zwischen 0,5 und 2,0 mS cm⁻¹ eingestellt. Zu hohe Werte wurden durch Gaben von Wasser ohne Nährstoffzusatz reduziert.

MS 1: Es wurde eine Auswahl an Pflanzenarten und Substraten, die eine hohe Verdunstungsrate erwarten lassen und für die vertikale Begrünung geeignet sind, ausgewählt und charakterisiert. Zusammen mit den beiden ermittelten Begrünungssystemen stellen sie die Basis für die weiteren Untersuchungen dar.

AP 2: Optimierung der zwei Begrünungssysteme hinsichtlich Regelbarkeit der Verdunstungsrate und Kühlleistung

Methoden AP2

Einstellungen Phytokammer

Die Messungen der Photosyntheseparameter erfolgten in einer klimatisierbaren Phytokammer. Ziel-Temperatur 22°C wurde meist nicht erreicht, real etwa 25°C. Ziel-Luftfeuchte in Kammer 20 % nahezu erreicht mit real 21 - 23 % rel. Luftfeuchte. Tägliche Belichtungszeit von 6:00 bis 18:00 Uhr. Ziel-Lichtintensität (PAR) auf zu messender Blattoberfläche 80 μmol m⁻² s⁻¹ durch Abstand zur LED-Leuchte eingestellt und erreicht. Überwachung der Klimaparameter in der Phytokammer mit Almemo 2590-4S V5 (loggt Temperatur, relative Feuchte, Luftdruck, PAR).

Messung Photosyntheseparameter

Transpirationsrate (E) in $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, Photosyntheserate (A) in $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, CO_2 -Aufnahme (ΔCO_2) in vpm und stomatäre Leitfähigkeit (G_s) in $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ wurden mit dem tragbaren LCpro-SD und ab 12-2021 mit LCpro T (ADC BioScientific) ermittelt. Das LCpro arbeitet dabei in einem offenen System, in dem frische Luft kontinuierlich durch die Blattkammer(Küvette) geführt wird und das Klima (Luftfeuchte, Temperatur, CO_2 , PAR) innerhalb der Blattkammer reguliert werden kann. Die einströmende Luft fungiert dabei als Referenz. Das LCpro nutzt zur Gasanalyse bei der Bestimmung der Gaskonzentrationen die nichtdispersive Infrarottechnologie (NDIR) (ADC BioScientific Ltd., 2004).

Vorgehensweise Messungen:

Die Pflanzen wurden vor der Messung für mindestens 16 h an die Bedingungen in der Phytokammer akklimatisiert und der Beginn der Messungen erfolgte 2 h nach Einschalten der Belichtung. Bei Messungen ohne Belichtungsaufsatz wurde mit einer LED-Lampe eine Lichtintensität von $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ auf der zu messenden Blattoberfläche eingestellt. Temperatur, Luftfeuchte, CO_2 wurden je nach Versuchsfrage in der Küvette adjustiert. Mit Hilfe des LED-Belichtungsaufsatzes auf der Küvette konnten Belichtungscurven gefahren werden. Messungen wurden immer an mittelalten Blättern (in Testmessungen höchste Aktivität) und so vorhanden mit vergleichbarer Panaschierung vorgenommen.

Messung von Photosyntheseparametern an einzelnen Blättern (Sommer bzw. Winter): 3 Pflanzen pro Art, je 3 Blätter = 9 Wiederholungen. PAR $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, Blatttemperatur 24°C , Luftfeuchte, CO_2 ambient. Dwell 25 Minuten, Mittelwert aus 6 Messungen im Abstand von 1 Minute.

Photosynthesemessung mit definierter Luftfeuchte und Lichtintensität als Sequenz (Sommer): Luftfeuchte in Blattküvette 5, 10, 15 mbar (= 15, 30, 45 % rel. Luftfeuchte bei 26°C) kombiniert jeweils mit PAR 40, 90, 170, $260 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Temperatur 26°C in Küvette, CO_2 ambient. An 3 Pflanzen je Art je 1 Blatt = 3 Wiederholungen; Dwell 40 Minuten für jede Stufe, Mittelwert aus 6 Messungen im Abstand von 1 Minute.

Photosynthesemessung mit definierter Luftfeuchte (Sommer): Luftfeuchte in Blattküvette 5, 10, 15 mbar (= 15, 30, 45 % rel. Luftfeuchte bei 26°C), 3 Pflanzen pro Art, je 3 Blätter = 9 Wiederholungen. PAR: $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, CO_2 ambient. Pro Luftfeuchte-Stufe: Dwell 25 Minuten, Mittelwert aus 6 Messungen im Abstand von 1 Minute.

Photosynthesemessung mit definierter Temperatur als Sequenz (Sommer): Temperatur (Tleaf) 18, 20, 22, 24, 26°C , 3 Pflanzen pro Art, je 1 Blatt = 3 Wiederholungen. PAR $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, CO_2 ambient, Luftfeuchte: 10 mbar. Pro Temperatur-Stufe: Dwell 40 Minuten, Mittelwert aus 6 Messungen im Abstand von 1 Minute.

Photosynthesemessung mit definierter Luftfeuchte und Lichtintensität als Sequenz an gleicher Pflanze mit feuchtem und trockenem Substrat (Sommer): Luftfeuchte in Blattküvette 5, 10, 15 mbar (= 15, 30, 45 % rel. Luftfeuchte bei 26°C) kombiniert jeweils mit PAR 40, 90, 170, $260 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Temperatur 26°C , CO_2 ambient in Küvette. An 2 Pflanzen je Art je 1 Blatt = 2 Wiederholungen, Dwell 40 Minuten pro Stufe, Mittelwert aus 6 Messungen im Abstand von 1 Minute. Tag 1: Sequenz an normal feuchter Pflanze mit Wasservorrat in Hydro messen, Blatt markieren, Wasser entleeren, Pflanze auf Gitter über Nacht abtropfen lassen. Tag 2: An gleichem Blatt Sequenzmessung wiederholen.

Testung von Bodenfeuchtesensoren hinsichtlich ihrer Eignung für den Einsatz in dem Wallflore- (Steinwolle) und dem Vertiko-System (Filz-Vliesaufbau)

Getestete Bodenfeuchtesensoren:

SMT-100 (Truebner GmbH, Deutschland)

Kapazitative Messung (FDR Sensor) des volumetrischen Wassergehaltes.

Empfehlung für mineralische Böden und Kultursubstrate

Technische Daten:

- Maßeinheit: m³ Wasser / m³ Boden, Vol. %, Temperatur in °C
- Messbereich: Wassergehalt: 0-100 %
- Genauigkeit mit Standardkalibrierung: bis zu ±3%

ECHO2-EC5 (Meter Group, Inc., USA)

Kapazitative Messung (FDR Sensor) des volumetrischen Wassergehaltes.

Empfehlung für geschützter Anbau im gewachsenen Boden sowie Anbau in Substraten (Growbags, Töpfe) und auf Steinwolle

Technische Daten:

- Maßeinheit: m³ Wasser / m³ Boden, Vol. %
- Messbereich: 0-100 % Wassergehalt
- Auflösung: 0,01% in mineralischen Böden, 0,25% in Substraten
- Genauigkeit mit Standardkalibrierung: ±3%

Waterscout SM-100 (Spectrum Technologies, Inc., USA)

Kapazitative Messung (FDR Sensor) des volumetrischen Wassergehaltes von Böden und Substraten mit vorgegebener Kalibrierung für Standard (Boden) und Substrat (soilless).

Technische Daten:

- Messbereich: 0% bis ca. 65% vol. Wassergehalt (mit Kalibrierung für Substrate)
- Auflösung: 0,1% vol. Wassergehalt
- Genauigkeit: 3% vol. Wassergehalt bei EC < 8 mS/cm

Teros 12 (Meter Group, Inc., USA)

Kapazitive Messung (FDR Sensor) des volumetrischen Wassergehaltes, speziell zum Einsatz in allen üblichen Kultursubstraten (Growbags, Töpfe) und Steinwolle konzipiert. Zusätzliche Messung von elektrischer Leitfähigkeit und Temperatur des Bodens.

Technische Daten:

- Maßeinheit: m³ Wasser / m³ Boden: Vol. %
- Messbereich: Wassergehalt: 0-100%
- Auflösung: Wassergehalt: 0,1% in Substraten
- Genauigkeit mit Standardkalibrierung: Substrate Wassergehalt: ±3%
Bodenspezifische Kalibrierung: Mindestens ±1 bis 2% in allen Substraten und porösen Materialien

Handlesegeräte zur Auswertung der Sensorsignale:

- Combi 6000 von Truebner GmbH (SMT-100)
- ProCheck von Decagon Devices, Inc. (ECHO2-EC5, TEROS 12)
- Field Scout Soil Sensor Reader von Spectrum Technologies, Inc. (SM-100)

Eignungstest der Bodenfeuchtsensoren

Die 4 Sensoren wurden jeweils in kleinen Probestücken der in den vertikalen Systemen verwendeten Substrate (Wallflöre: Steinwolle ohne Abdeckung; Vertiko: Filz-Vlies-Taschenaufbau gefüllt mit mineralischem Vertiko-Substrat) untersucht. Dazu wurden die Substrate zunächst mit Wasser gesättigt und anschließend für 30 Min. auf ein Gitter zum Abtropfen gestellt. Die Sensoren wurden an definierten Orten (Oben, Mitte, Unten) in den senkrecht stehenden Substraten platziert. Der Verlauf

der Wassergehalte wurde durch tägliches Ablesen mit Hilfe der Handgeräte festgehalten bis die Substrate trocken waren und 0 % Wassergehalt angezeigt wurden. Soweit durch die Handgeräte vorgegeben, wurden unterschiedliche Kalibrierungen für Boden und Substrat betrachtet.

In weiteren Versuchen wurden die Sensoren Echo2-EC5, SMT-100 und SM-100 jeweils paarweise eingesetzt, um den Trocknungsverlauf in den Substraten feststellen zu können. Ein Sensor steckte dabei im oberen Drittel und der zweite im unteren Drittel der senkrecht stehenden Substratproben. Zusammen mit der täglichen Dokumentation der Messwerte wurde der Feuchtegehalt der Substrate mit der Fingerprobe bonitiert, um für Schaltpunkte für die nächste Bewässerung nach gärtnerischen Erfahrungen festlegen zu können.

In einem dritten Schritt wurden die Substratproben mit *Philodendron hederaceum* bepflanzt und wiederum die Trocknung nach Wassersättigung und 30 Min. Abtropfen mit den paarweisen Sensoren (oben, unten) Echo2-EC5, SMT-100 und SM-100 und der Fingerprobe 1 x täglich dokumentiert.

An der Substratprobe des Vertiko-Systems wurden die Sensoren zusätzlich zu variierten Einbauposition in der Höhe auch in unterschiedlichen Schichten des Substrataufbaus getestet – zwischen Vlies und mineralischem Substrat, zwischen den Vliesschichten, im mineralischen Substrat. Zusätzlich wurde bei Vertiko auch der Sensor Teros 12 in paarweiser Konfiguration verwendet.

ECHO2-EC5 und SM-100 (soiless) waren sowohl für die Messung der Substratfeuchte in dem Wallflore- als auch in dem Vertiko-Substrat (Messpunkt im mineralischen Substrat oder hinter dem Vlies) gut geeignet und werden daher für die weiteren Versuche eingesetzt. SMT-100 erscheint für die Anwendung in Steinwolle weniger geeignet, wurde aber zu Vergleichszwecken eingesetzt.

Ergebnisse AP2

1 Einflussfaktoren auf Transpiration und Stomataöffnung

Die Transpirationsrate wird durch die Stomataöffnung bedingt. Somit beeinflussen alle Faktoren, die auf die Stomataöffnung einwirken auch die Transpirationsrate von Pflanzen. In erster Linie sind dies Lichtintensität, Luftfeuchte, Lufttemperatur, Wasserversorgung (Substratfeuchte), CO₂-Konzentration und die Windgeschwindigkeit, aber auch die Jahreszeit als Summenparameter kann einen Einfluss haben. Daneben sind pflanzenartspezifische Unterschiede zu erwarten. Mit Hilfe von Gaswechselfmessungen wurden die stomatäre Leitfähigkeit (Gs) als Maß für die Stomataöffnung und die Transpirationsrate verschiedener Pflanzenarten unter differierenden Klimabedingungen bestimmt. Ziel der Untersuchungen war festzustellen, ob es Pflanzenarten gibt, die auch bei niedriger Luftfeuchte und niedriger Lichtintensität, d.h. Bedingungen wie sie in Büroräumen häufig anzutreffen sind, die Stomata geöffnet halten und somit eine hohe Transpirationsrate aufrechterhalten können.

1.1 Licht (Photosynthetisch aktive Strahlung = PAR in $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

Stomataöffnungen und Transpirationsraten wurden systematisch für die vorhandenen Pflanzenarten mit Hilfe von kombinierten Sequenzen für Luftfeuchte und Lichtintensität gemessen.

Die Steigerung der Lichtintensität im Bereich von 40 bis 260 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ wirkte sich signifikant förderlich auf die Transpirationsrate und Stomataöffnung von *Philodendron hederaceum* `Brasil` aus (Abbildung 7, Abbildung 8). Dieser Effekt trat

besonders deutlich bei niedrigen relativen Luftfeuchten von 15 % auf und schwächte sich mit steigender Luftfeuchtigkeit auf 30 und 45 % ab.

Ähnlich wie von *Philodendron hederaceum* 'Brasil' verhielt sich auch die grüne Form von *Philodendron hederaceum* und tendenziell die Arten *Microsorium diversifolium* und *Syngonium podophyllum*. Dagegen zeigten *Ficus pumila*, *Chlorophytum comosum*, *Pellionia repens*, *Epipremnum aureum* 'Enjoy', *Scindapsus pictus* und *Tradescantia zebrina* keine signifikanten Unterschiede in der Transpirationsrate und Stomataöffnung in Abhängigkeit von der Lichtintensität. Teilweise war eine ähnliche Tendenz wie bei *Philodendron hederaceum* erkennbar, die aber aufgrund großer Abweichungen zwischen den Wiederholungen nicht signifikant war.

In der Innenraumbegrünung werden Mindestlichtintensitäten von etwa $20 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ angestrebt, um ein Erhaltungswachstum sicher zu stellen, dieser Wert führt aber wie gezeigt nicht zu optimalen Transpirationsleistungen. $260 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ entsprechen der unteren Grenze für Wachstumsbedingungen von Araceae, wie sie in der Produktion vorgesehen sind (Chen et al. 2005).

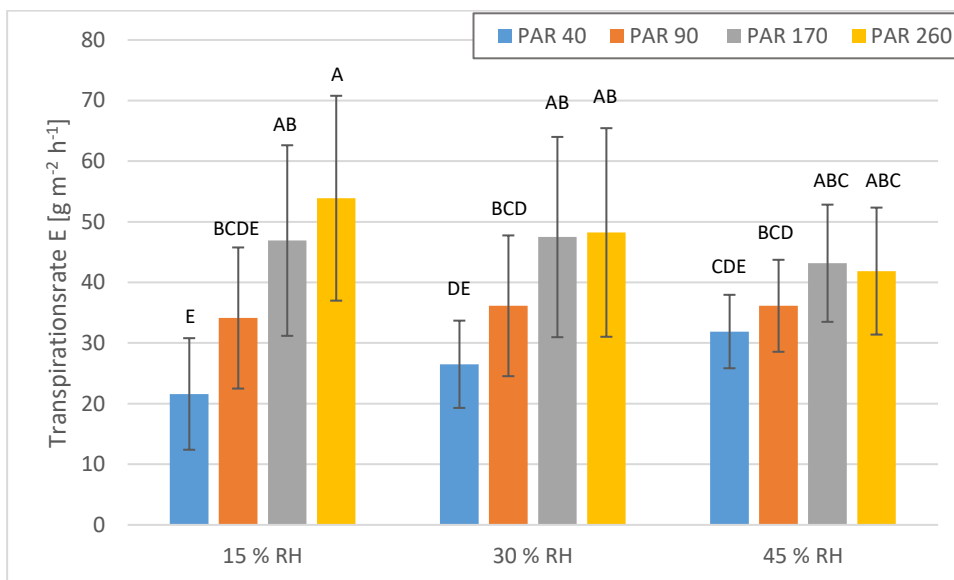


Abbildung 7: Vergleich der Transpirationsrate (in $\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$) von *Philodendron hederaceum* 'Brasil' (Erde) bei definierten Luftfeuchten (RH) und Lichtintensitäten (PAR).

Mittelwerte (aus 3 Wiederholungen), die keinen gemeinsamen Gruppierungsbuchstaben haben, unterscheiden sich signifikant im Tukey-Test ($p < 0,05$) bezogen auf RH x PAR.

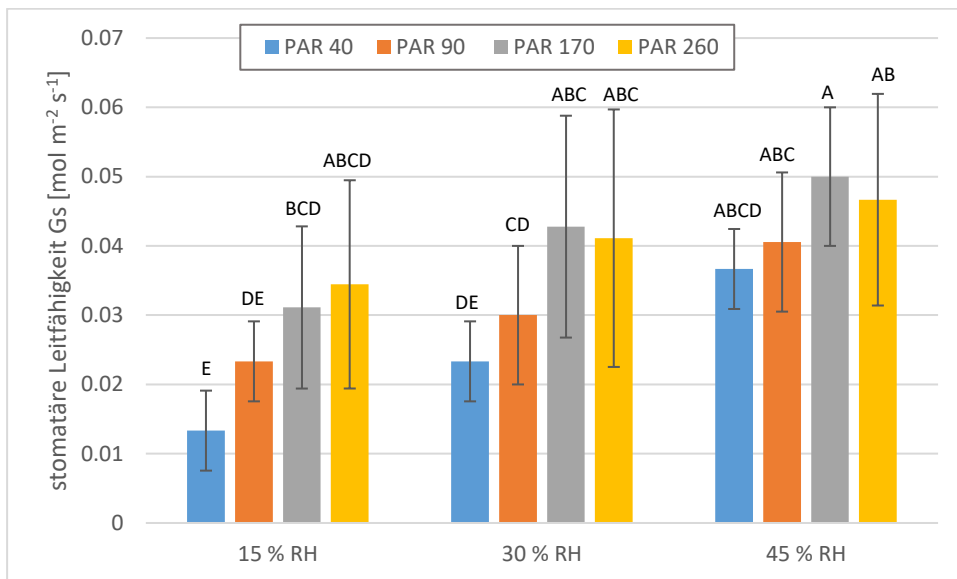


Abbildung 8: Vergleich der Stomataöffnung (= stomatare Leitfähigkeit) von *Philodendron hederaceum* 'Brasil' (Erde) bei definierten Luftfeuchten (RH) und Lichtintensitäten (PAR). Mittelwerte (aus 3 Wiederholungen), die keinen gemeinsamen Gruppierungsbuchstaben haben, unterscheiden sich signifikant im Tukey-Test ($p < 0,05$) bezogen auf RH x PAR

1.2 Luftfeuchte

Bei Lichtintensitäten von 40, 90 und 170 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ führte eine Erhöhung der relativen Luftfeuchte von 15 auf 45 % zu einer signifikant größeren Stomataöffnung bei *Philodendron hederaceum* 'Brasil' (Abbildung 9), die theoretisch zu einer höheren Transpirationsrate führen sollte.

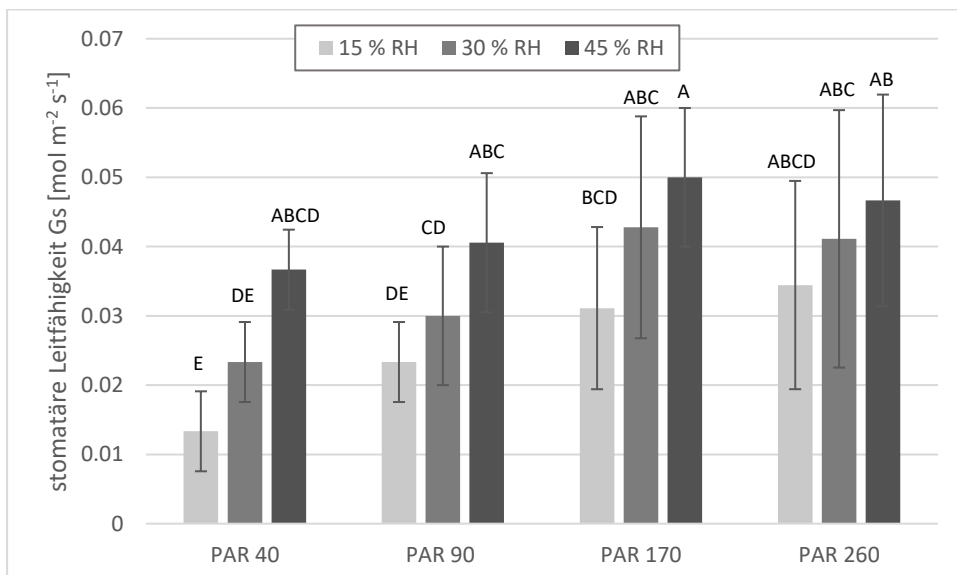


Abbildung 9: Vergleich der Stomataöffnung (= stomatare Leitfähigkeit) von *Philodendron hederaceum* 'Brasil' (Erde) bei definierten Lichtintensitäten (PAR) und Luftfeuchten (RH). Mittelwerte (aus 3 Wiederholungen), die keinen gemeinsamen Gruppierungsbuchstaben haben, unterscheiden sich signifikant im Tukey-Test ($p < 0,05$) bezogen auf RH x PAR

Allerdings wurden bei *Philodendron hederaceum* 'Brasil' innerhalb einer Belichtungsstufe keine signifikanten Unterschiede in den Transpirationsraten bei variierten Luftfeuchten gemessen (Abbildung 10), vermutlich weil die Abweichungen zwischen den Wiederholungen relativ hoch sind.

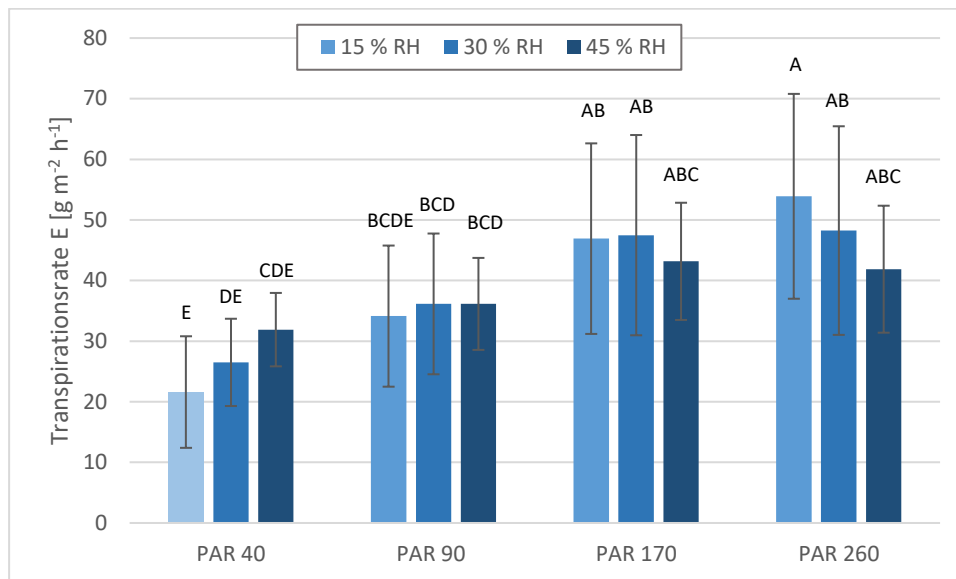


Abbildung 10: Vergleich der Transpirationsrate (in $g\ m^{-2}\ h^{-1}$) von *Philodendron hederaceum* 'Brasil' (Erde) bei definierten Lichtintensitäten (PAR) und Luftfeuchten (RH). Mittelwerte (aus 3 Wiederholungen), die keinen gemeinsamen Gruppierungsbuchstaben haben, unterscheiden sich signifikant im Tukey-Test ($p < 0,05$) bezogen auf RH x PAR

Auch bei *Ficus pumila*, *Microsorium diversifolium* und *Scindapsus pictus* wurden bei einer Erhöhung der Luftfeuchte auf 45 % größere Stomataöffnungen gemessen, die sich nicht in einer erhöhten Transpirationsrate niederschlugen. Lediglich bei der grünen *Philodendron hederaceum* Variante wurde sowohl eine Erhöhung der Stomataöffnung als auch eine erhöhte Transpiration bei 45 % relativer Luftfeuchte im Vergleich zu niedrigeren Luftfeuchten festgestellt. Bei *Chlorophytum comosum*, *Epipremnum aureum* 'Enjoy', *Tradescantia zebrina*, *Syngonium podophyllum* und *Pellionia repens* waren weder ein signifikanter Einfluss der Luftfeuchte auf die Stomataöffnung noch auf die Transpirationsrate messbar (Ergebnisse nicht dargestellt).

Im Gegensatz zu den Messungen mit den kombinierten Sequenzen für Luftfeuchte und Lichtintensität (Abbildung 10) wurde bei den Messungen mit definierter Luftfeuchte an jeweils 3 Blättern von je 3 Pflanzen nur bei *Philodendron hederaceum* 'Brasil' in Erde ein signifikanter Einfluss der Luftfeuchte auf die Transpirationsrate festgestellt (Abbildung 11), wobei sich die Werte nur geringfügig von den nicht signifikanten Unterschieden bei der Hydro-Variante unterscheiden, da alle Standardabweichungen vergleichsweise groß sind.

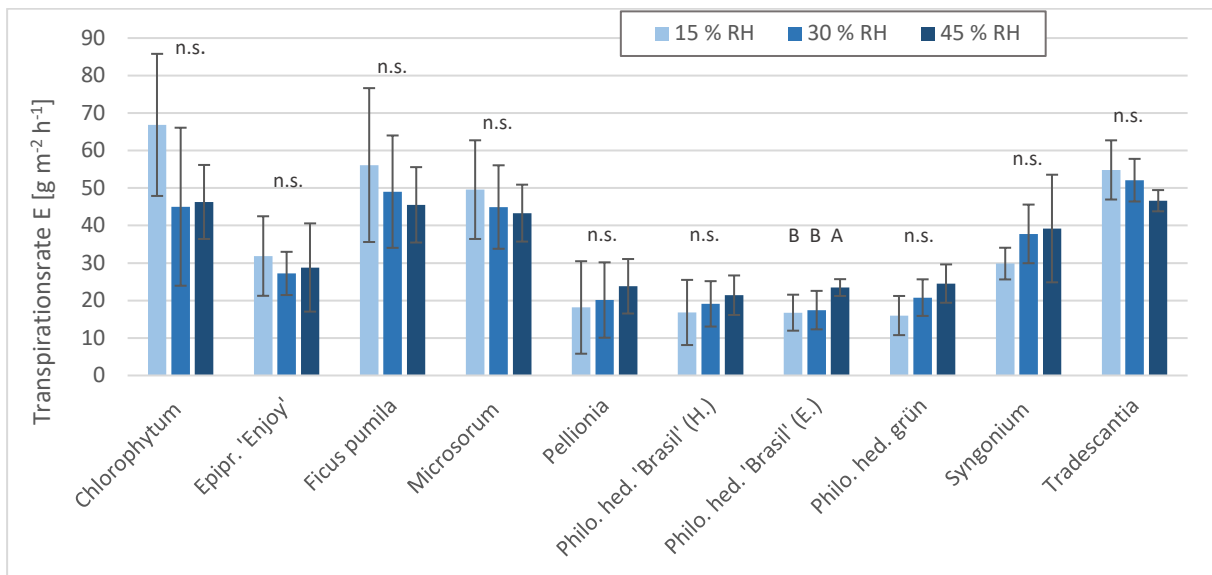


Abbildung 11: Vergleich der Transpirationsrate (in $g\ m^{-2}\ h^{-1}$) verschiedener Pflanzenarten bei Messung im Sommer mit definierten Luftfeuchten.

Mittelwerte einer Art (aus 3 Pflanzen mit je 3 Blättern = 9 Wdh.), die keinen gemeinsamen Gruppierungsbuchstaben haben, unterscheiden sich signifikant im Tukey-Test ($p < 0,05$)

Obwohl der Einfluss der Luftfeuchte auf die Transpirationsrate gering war zeigte sich bei der Analyse der Stomataöffnungen der verschiedenen Pflanzenarten ein differenziertes Bild (Abbildung 12): Tendenziell wiesen alle Pflanzenarten eine reduzierte Stomataöffnungsweite bei niedrigeren Luftfeuchten auf, allerdings waren die Unterschiede nur zwischen 15 und 45 % relativer Luftfeuchte bei *Ficus pumila*, *Microsorium diversifolium*, *Pellionia repens*, *Philodendron hederaceum* 'Brasil' (H., E.), *Philodendron hederaceum* grün und *Tradescantia zebrina* signifikant.

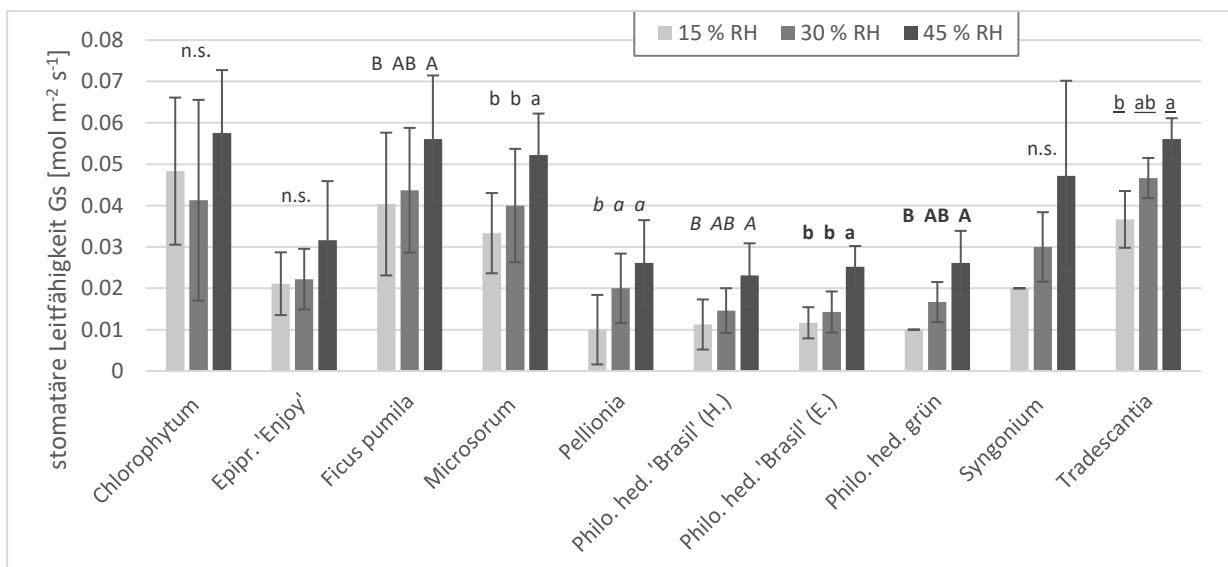


Abbildung 12: Vergleich der Stomataöffnung (= stomatäre Leitfähigkeit) verschiedener Pflanzenarten bei Messung im Sommer mit definierten Luftfeuchten.

Mittelwerte einer Art (aus 3 Pflanzen mit je 3 Blättern = 9 Wdh.), die keinen gemeinsamen Gruppierungsbuchstaben haben, unterscheiden sich signifikant im Tukey-Test ($p < 0,05$)

Die Frage, ob es Pflanzen gibt, die bei niedriger Luftfeuchte (Bürobedingungen) die Stomata geöffnet halten und somit eine hohe Verdunstungsrate aufrechterhalten muss daher differenziert beantwortet werden, da bei den untersuchten Arten die Stomataöffnung empfindlicher auf die reduzierte Luftfeuchte zu reagieren scheint als

die Transpirationsrate. Es lässt sich festhalten dass die untersuchten Pflanzen überwiegend keine Reaktion der Transpirationsrate auf die relative Luftfeuchte in der Messküvette zeigten. Zu beachten ist, dass bei den Messungen lediglich die relativen Luftfeuchten in der Messküvette eingestellt wurden. Die Raumlufffeuchten konnten nicht definiert eingestellt werden, hatten aber möglicherweise einen Einfluss auf die Physiologie der gesamten Pflanze.

1.3 Temperatur

Abbildung 13 zeigt am Beispiel von *Philodendron hederaceum* `Brasil`, dass eine Erhöhung der Blatt-Temperatur in der Messküvette im Bereich von 18 bis 26°C zu einer signifikanten Reduktion der Transpiration führte. Dies wird durch die signifikant geringere Stomataöffnung bei höheren Blatt-Temperaturen hervorgerufen (Abbildung 14). Die Stomataöffnungen und Transpirationsraten von den ebenfalls untersuchten *Philodendron hederaceum* grün und *Ficus pumila* verhielten sich genauso.

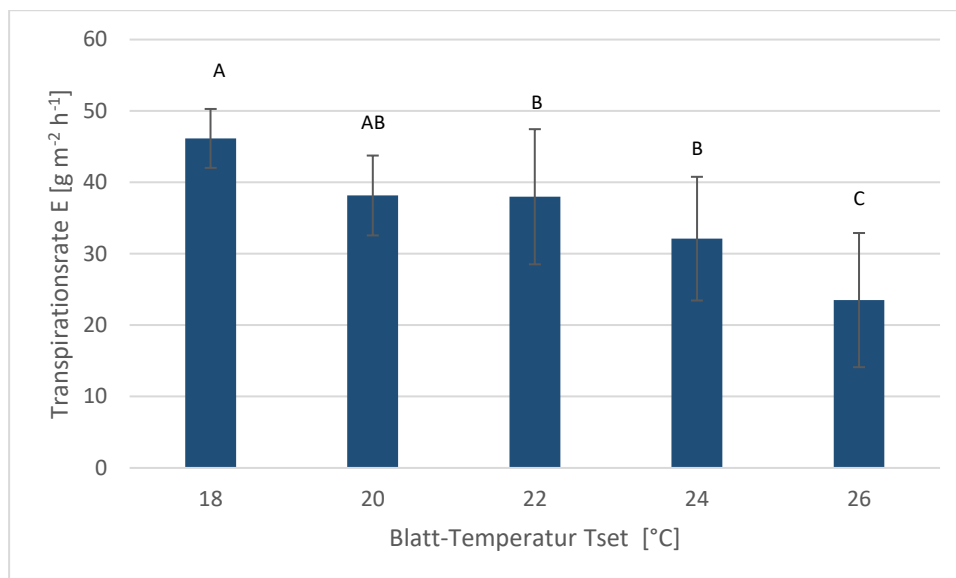


Abbildung 13: Vergleich der Transpirationsrate von *Philodendron hederaceum* `Brasil` bei definierten Blatttemperaturen.

Mittelwerte (aus 3 Wiederholungen), die keinen gemeinsamen Gruppierungsbuchstaben haben, unterscheiden sich signifikant im Tukey-Test ($p < 0,05$)

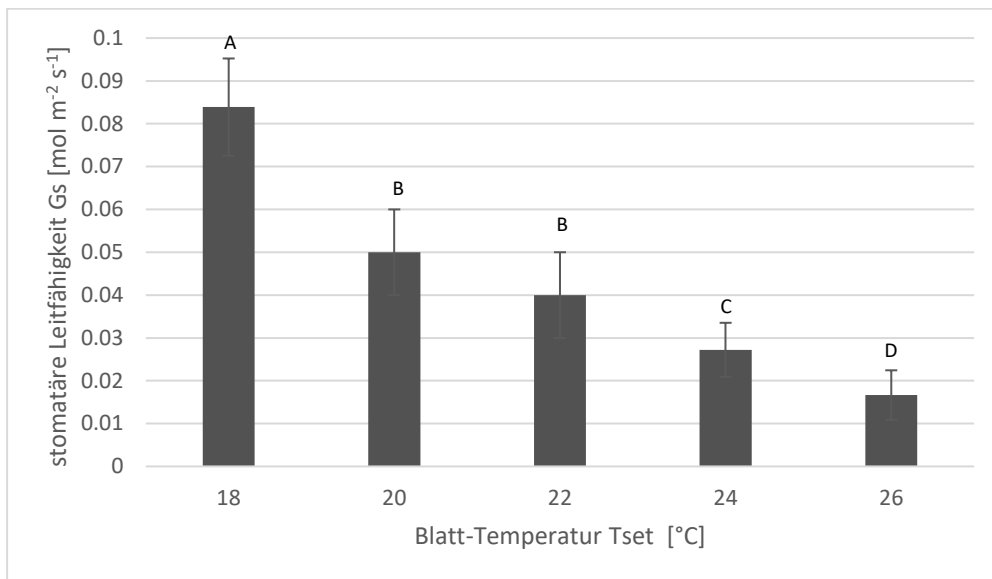


Abbildung 14: Vergleich der Stomataöffnung (= stomatäre Leitfähigkeit) von *Philodendron hederaceum* 'Brasil' bei definierten Blatttemperaturen.

Mittelwerte (aus 3 Wiederholungen), die keinen gemeinsamen Gruppierungsbuchstaben haben, unterscheiden sich signifikant im Tukey-Test ($p < 0,05$)

1.4 Jahreszeit

Epipremnum aureum 'Enjoy', *Ficus pumila*, *Philodendron hederaceum* 'Brasil' und grün, *Scindapsus pictus* und *Syngonium podophyllum* wiesen im Winter signifikant niedrigere Transpirationsraten (Abbildung 15) und stomatäre Leitfähigkeiten (Abbildung 16) auf als im Sommer. Das bedeutet, dass im Winter bei reduzierter Photosyntheseaktivität (nicht dargestellt) auch die Transpirationsraten vernachlässigbar wurden. Obwohl im Vergleich zum Bürostandort die Pflanzen im Gewächshaus bei ausreichend hoher Lichtintensität kultiviert wurden und die Messungen in der Klimakammer unter gleichen Bedingungen (Licht, Luftfeuchte, Temperatur) stattfanden wie im Sommer scheinen die Pflanzen in einer Art von „Winter-Modus“ gewesen zu sein. Der zu erwartende Beitrag der Pflanzen zur Evapotranspiration der Begrünungssysteme war im Winter deutlich geringer als im Sommer und läuft dem höheren Befeuchtungsbedarf der Räume im Winter entgegen. Bei den restlichen Pflanzenarten wurde keine Vergleichsmessung Sommer – Winter vorgenommen.

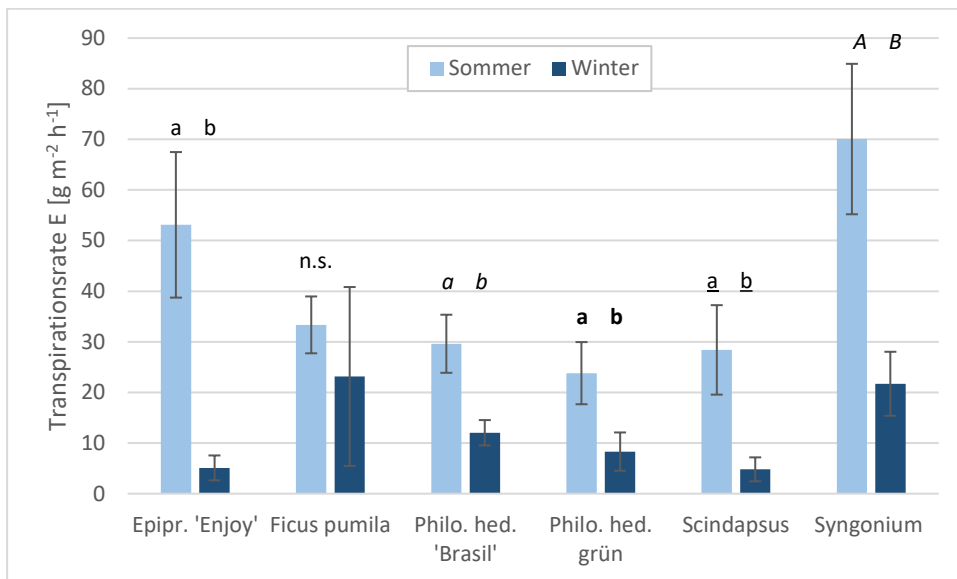


Abbildung 15: Vergleich der Transpirationsrate von verschiedenen Pflanzenarten im Sommer und im Winter. Mittelwerte (aus 3 Pflanzen mit je 3 Blättern = 9 Wdh.), die keinen gemeinsamen Gruppierungsbuchstaben haben, unterscheiden sich signifikant im Tukey-Test ($p < 0,05$)

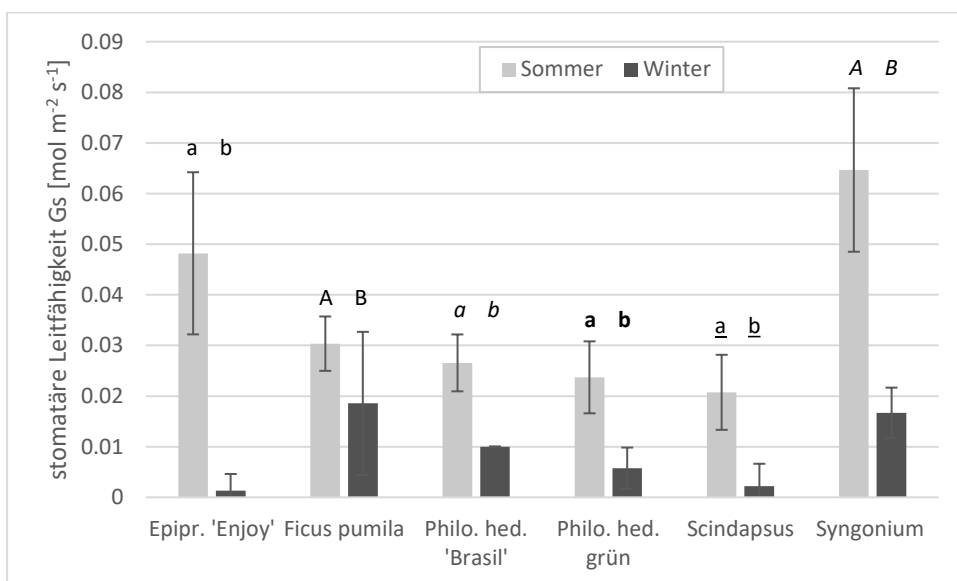


Abbildung 16: Vergleich der Stomataöffnung (= stomatäre Leitfähigkeit) von verschiedenen Pflanzenarten im Sommer und im Winter. Mittelwerte (aus 3 Pflanzen mit je 3 Blättern = 9 Wdh.), die keinen gemeinsamen Gruppierungsbuchstaben haben, unterscheiden sich signifikant im Tukey-Test ($p < 0,05$)

1.5 Substratfeuchte

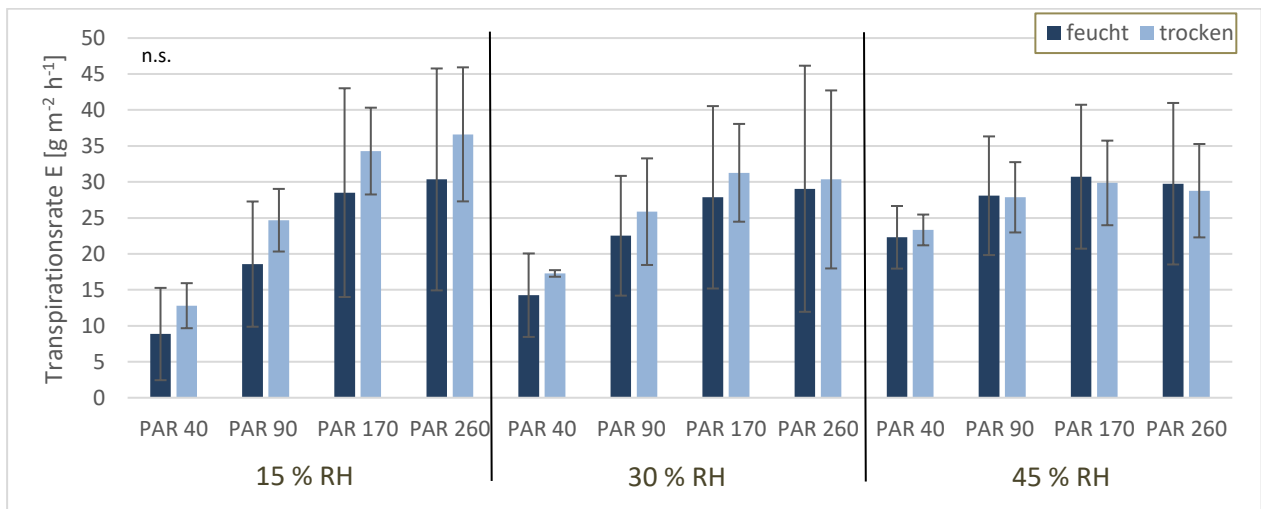


Abbildung 17: Vergleich der Transpirationsrate von *Philodendron hederaceum* 'Brasil' bei definierter Substratfeuchte in Kombination mit variiertes Luftfeuchte (RH) und Einstrahlung (PAR). Mittelwerte (aus 2 Wiederholungen), die keinen gemeinsamen Gruppierungsbuchstaben haben, unterscheiden sich signifikant im Tukey-Test ($p < 0,05$).

Es konnte kein signifikanter Einfluss der Substratfeuchte auf die Transpirationsrate und Stomataöffnung von *Philodendron hederaceum* 'Brasil' bei Messung mit variierten relativen Luftfeuchte und Einstrahlungen festgestellt werden (Abbildung 17, Abbildung 18). Tendenziell zeigte sich bei einer niedrigen relativen Luftfeuchte von 15 % in trockenen Substraten eine etwas höhere Transpirationsrate als in feuchten Substraten. Mit zunehmender Luftfeuchte wird der tendenzielle Unterschied in der Transpirationsrate zwischen trockenem und feuchtem Substrat geringer. Nach Lösch (2001) geht das Zusammenwirken von Wasserverfügbarkeit und Stomataöffnung über den linearen Zusammenhang, d.h. reduzierte Stomataöffnung bei eingeschränkter Wasserverfügbarkeit, hinaus, da diverse Faktoren (z.B. Licht, Osmotika-Gehalt, Phytohormongehalt) auf die Physiologie der Pflanzen einwirken und kann so auch die Beobachtungen erklären.

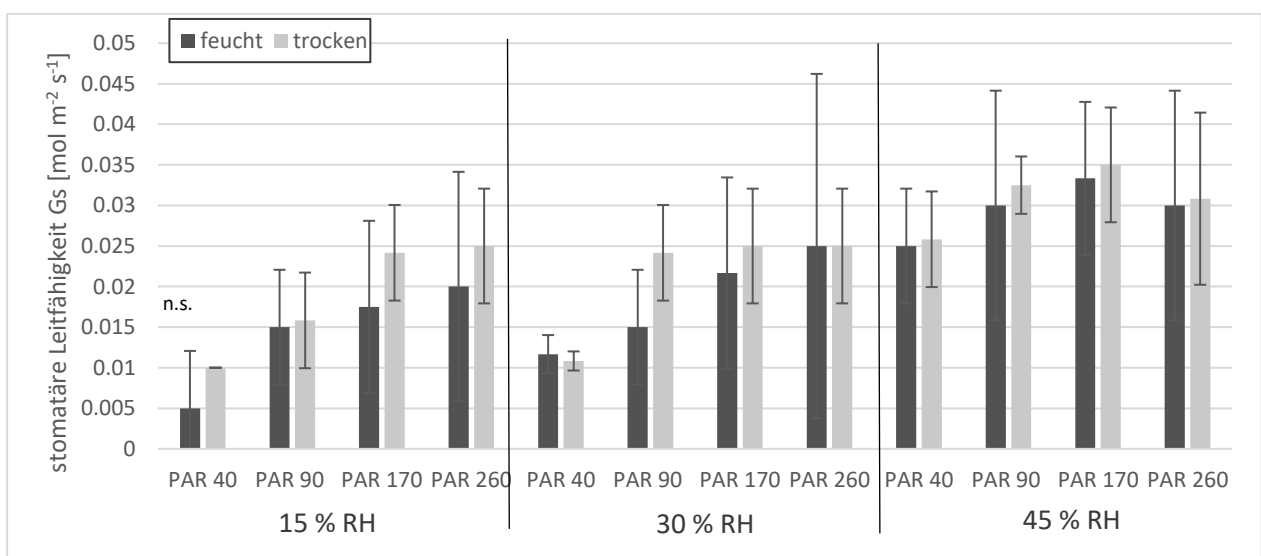


Abbildung 18: Vergleich der Stomataöffnung (= stomatäre Leitfähigkeit) von *Philodendron hederaceum* 'Brasil' bei definierter Substratfeuchte in Kombination mit variiertes Luftfeuchte (RH) und Einstrahlung (PAR). Mittelwerte (aus 2 Wiederholungen), die keinen gemeinsamen Gruppierungsbuchstaben haben, unterscheiden sich signifikant im Tukey-Test ($p < 0,05$).

1.6 Windgeschwindigkeit und CO₂-Konzentration

Eine Variation der Windgeschwindigkeit bei der Ermittlung der Transpirationsrate war aus messtechnischen Gründen nicht möglich, da das LCPro mit einer fixen Durchströmungsrate in der Messkammer arbeitet.

Der Einfluss der CO₂-Konzentration auf die Transpirationsrate wurde nicht systematisch untersucht.

1.7 Pflanzenart

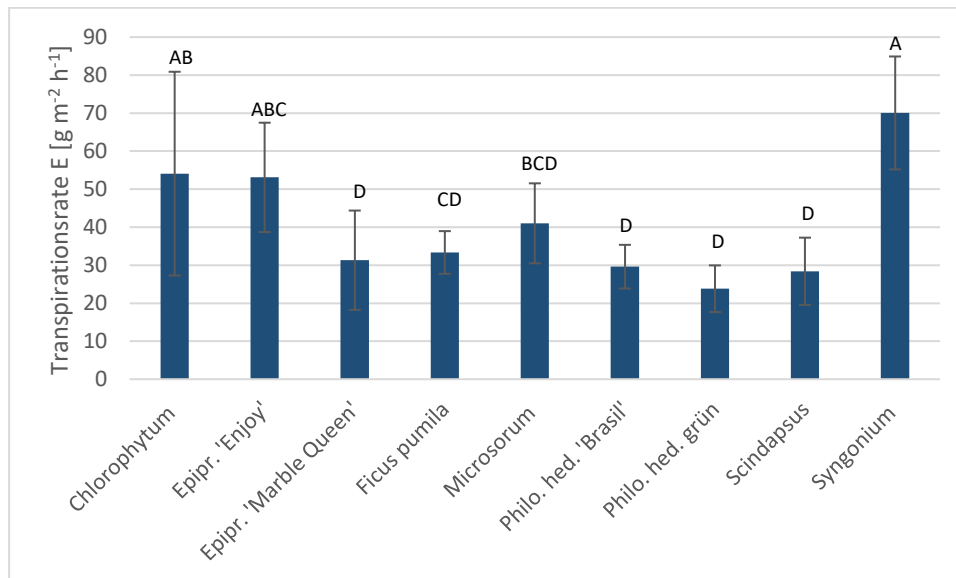


Abbildung 19: Vergleich der Transpirationsrate (in g m⁻² h⁻¹) verschiedener Pflanzenarten bei Messung im Sommer.

Mittelwerte (aus 3 Blättern an je 3 Pflanzen = 9 Wdh.), die keinen gemeinsamen Gruppierungsbuchstaben haben, unterscheiden sich signifikant im Tukey-Test ($p < 0,05$).

Der Vergleich der Transpirationsrate unterschiedlicher Pflanzenarten (Abbildung 19) zeigte, dass signifikante Unterschiede bestanden. So wiesen *Epipremnum aureum* 'Marble Queen', *Philodendron hederaceum* 'Brasil', *Philodendron hederaceum* grün und *Scindapsus pictus* eine signifikant geringere Transpirationsrate als *Chlorophytum comosum*, *Epipremnum aureum* 'Enjoy' und *Syngonium podophyllum* auf.

Dies spiegelt sich tendenziell auch in der Stomataöffnung wider (Abbildung 20). Aufgrund der hohen Standardabweichungen sind hier nur die Stomataöffnungen von *Philodendron hederaceum* 'Brasil', *Philodendron hederaceum* grün und *Scindapsus pictus* signifikant geringer als von *Epipremnum aureum* 'Enjoy' und *Syngonium podophyllum*.

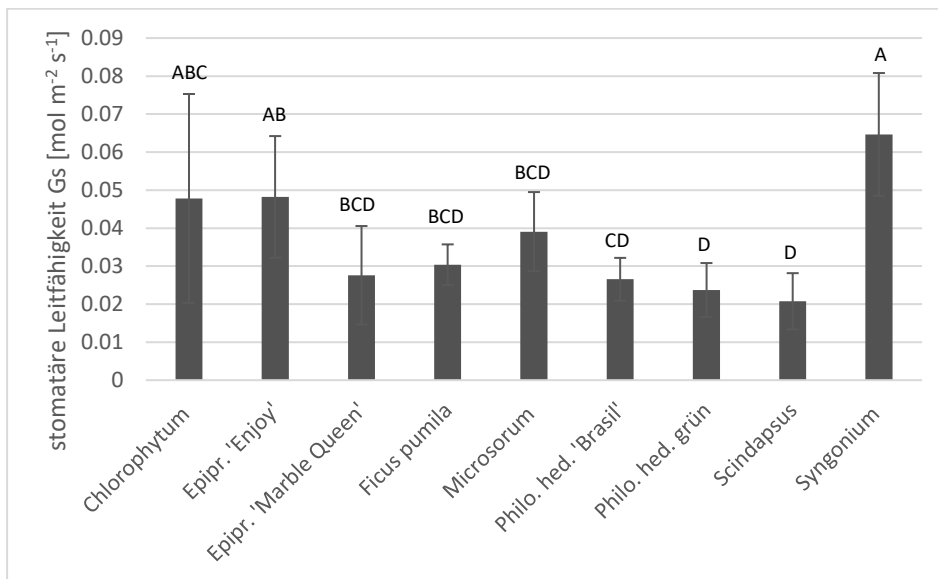


Abbildung 20: Vergleich der stomatären Leitfähigkeit verschiedener Pflanzenarten bei Messung im Sommer.

Mittelwerte (aus 3 Blättern an je 3 Pflanzen = 9 Wdh.), die keinen gemeinsamen Gruppierungsbuchstaben haben, unterscheiden sich signifikant im Tukey-Test ($p < 0,05$)

Eine zweite Messserie (durchgeführt als Mess-Sequenz mit variierten Luftfeuchten und Einstrahlungen) wies bei vergleichbaren Bedingungen (Messung im Sommer, 30 % relative Luftfeuchte und Einstrahlung $90 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) keine signifikanten Unterschiede zwischen den Transpirationsraten der untersuchten Pflanzenarten auf (Abbildung 21).

Die absoluten Höhen der Transpiration waren im Vergleich zu der in Abbildung 19 dargestellten Messung deutlich geringer. Eine Ausnahme stellte *Philodendron hederaceum* 'Brasil' dar, dessen Transpirationsrate mit etwa $36 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ in der gleichen Größenordnung lag.

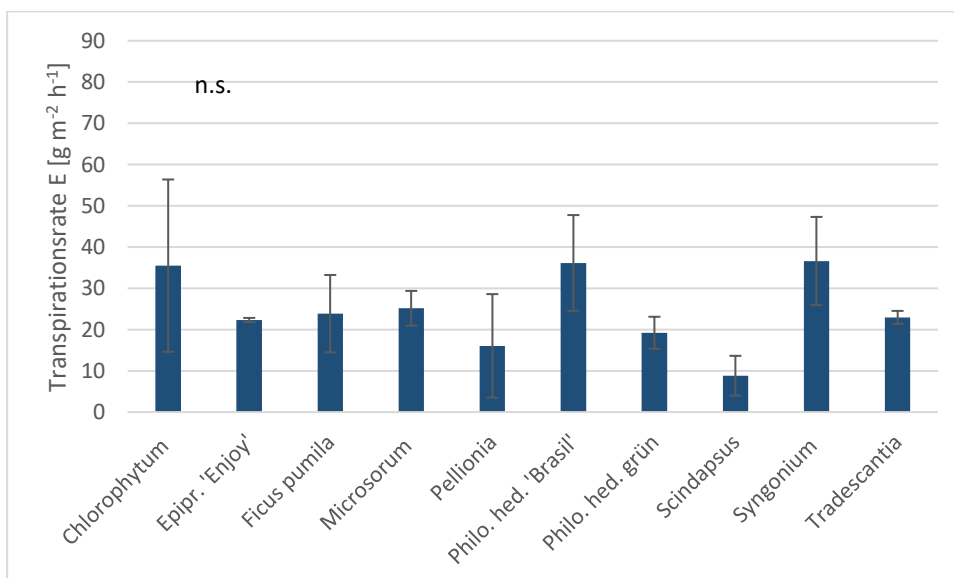


Abbildung 21: Vergleich der Transpirationsrate (in $\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) verschiedener Pflanzenarten bei Messung im Sommer mit einer Sequenz für Luftfeuchte und PAR dargestellt für die Variante 30 % RH und PAR 90.

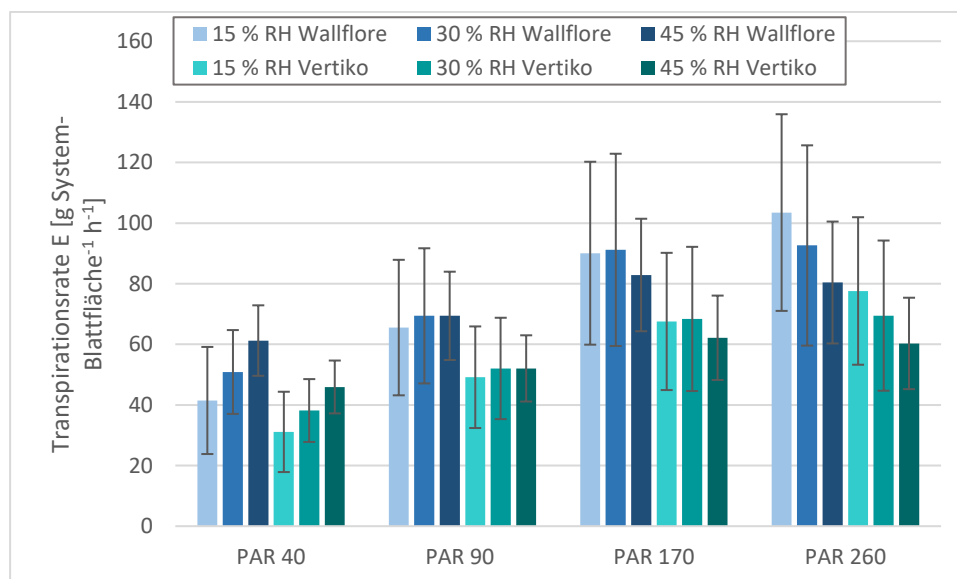
Mittelwerte (aus 3 Wiederholungen), die keinen gemeinsamen Gruppierungsbuchstaben haben, unterscheiden sich signifikant im Tukey-Test ($p < 0,05$).

Am Beispiel von *Philodendron hederaceum* 'Brasil' lässt sich zeigen, dass die absoluten Höhen der Transpirationsraten in den einzelnen Mess-Serien Unterschiede aufwiesen, obwohl versucht wurde, möglichst einheitliche Bedingungen in der Klimakammer für die Messung zu schaffen und nur Werte bei gleichen Lichtintensitäten ($80 - 90 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) verglichen wurden. So ergaben die in [Abbildung 19](#) und [Abbildung 7](#) dargestellten Messungen eine absolute Höhe von 30 bis $36 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ und die in [Abbildung 11](#) dargestellten Messungen nur $18 - 22 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Die Gründe für die Unterschiede sind unbekannt.

In der Literatur gibt es nur wenige Angaben zu Transpirationsraten von tropischen Zierpflanzen. So berichten Wu et al. (2008) für *Epipremnum aureum* (bei PAR 50 bis $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) von Transpirationsraten von $0,3$ bis $1,6 \text{ mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, das entspricht 19 bis $104 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ und ist in der Größenordnung mit der Spannweite der untersuchten Pflanzen vergleichbar. Lösch (2001) gibt für tropische Regenwaldbäume Transpirationsraten von $0,5$ bis $1,9 \text{ mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ($32 - 123 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) an.

2 Abschätzung des Beitrages der Pflanzen zur Luftfeuchtigkeit im Raum (Anteil Transpiration der Pflanzen an Evapotranspiration der Systeme)

Die oben berichteten Transpirationsraten und stomatären Leitfähigkeiten beziehen sich jeweils auf eine normierte Blattfläche (Angabe der Messwerte pro m^2 Blattfläche) und Dauer (Sekunde, Stunde). Um eine Abschätzung des Beitrages des Anteils der Transpiration der Pflanzen an der Evapotranspiration der begrüneten Vertikalsysteme vornehmen zu können wurde die Transpirationsrate für die Fläche aller Blätter auf einem System (System-Blattfläche) pro Stunde berechnet ([Abbildung 22](#)). Als Basis dienen dabei die ermittelten Blattflächen von $1,92 \text{ m}^2$ für das Wallflore-System und $1,44 \text{ m}^2$ für das Vertiko-System. Die errechneten Transpirationsraten stellen nur eine Momentaufnahme dar, da sich die Pflanzen und somit ihre Blattflächen fortwährend verändern.



*Abbildung 22: Vergleich der Transpirationsrate von *Philodendron hederaceum* 'Brasil' (Erde) bezogen auf die errechnete Blattfläche pro Begrünungssystem (= System-Blattfläche) bei definierten Lichtintensitäten (PAR) und Luftfeuchten (RH). (Mittelwerte aus 3 Wiederholungen).*

Ein Vergleich der berechneten Transpirationsraten mit der gemessenen Evapotranspiration der Begrünungssysteme folgt nach Vorstellung der Messergebnisse in einem späteren Abschnitt dieses Berichts.

AP 3: Untersuchung der Begrünungssysteme unter definierten Bedingungen

UNTERSUCHUNG DER VERDUNSTUNGSPERFORMANCE

Im Projekthaus des ZAE befinden sich Zwillingräume, die baugleich und thermisch identisch sind. Hierbei handelt es sich bei beiden Räumen um einen Messraum (siehe Abbildung 23 und Abbildung 24) und einen Referenzraum, so dass durch Vergleich der direkte Einfluss der Systeme auf den Raum erfasst werden kann.

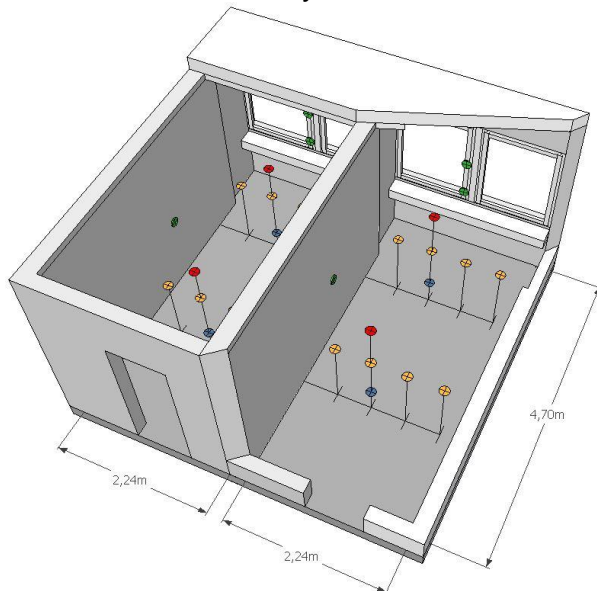


Abbildung 23: Schema der baugleichen Messräume mit kontrollierten, identischen Rahmenbedingungen und entsprechender Sensorik (exemplarisch durch farbige Kreise dargestellt)

Sofern nicht anders spezifiziert, fanden alle Messungen im Messraum des Projekthauses unter folgenden Rahmenbedingungen statt:

- Automatische Heizungsregelung mit Zielwert 22 °C (schaltet an bei 21.8 °C und ab bei 22.0 °C),
- Lüfter jeweils 10 h pro Tag an, stets von 8 Uhr bis 18 Uhr,
- Lampe jeweils 8 h pro Tag an, stets von 9 Uhr bis 17 Uhr,
- Bewässerung Wallflore: manuell im Durchschnitt ca. alle 10-14 Tage,
- Bewässerung Vertiko: automatisch 3x täglich (0 Uhr, 8 Uhr, 16 Uhr).



Abbildung 24: Der Messraum der Zwillingräume mit der Living Wall Indoor.

- Die unbegrüntten Begrünungssysteme wurden in den Zwillingssäumen gemessen. Beispiele für Messungen im tageszeitlichen Verlauf sind in Abbildung 25 dargestellt. Durch die Perforation des Bändchengewebes nimmt die Verdunstungsrate erwartungsgemäß zu, wodurch die relative Luftfeuchtigkeit steigt. Im Bereich der pink gefärbten Zeitachse ist die Raumlüftung aktiv.

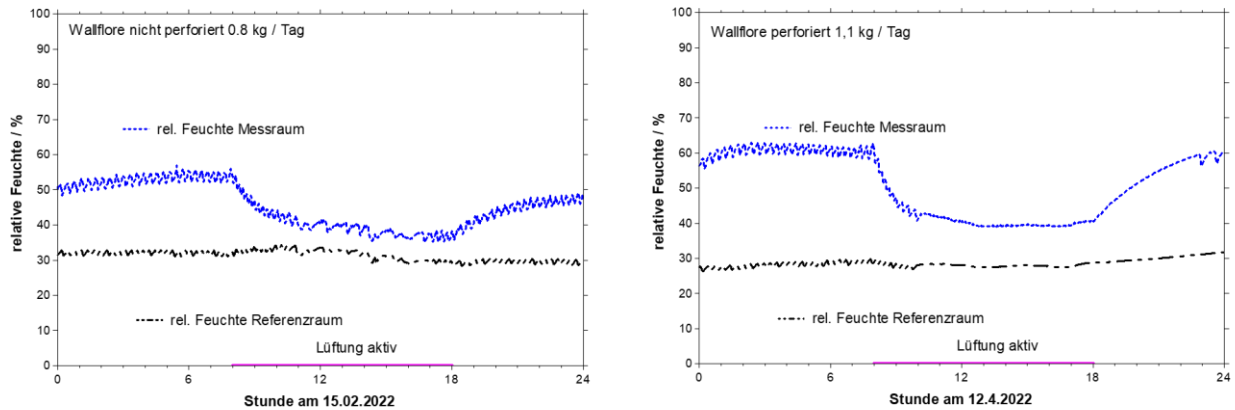


Abbildung 25: Tagesverlauf der relativen Feuchte für das den Raum mit Wallflore-System (Messraum) sowie den Raum ohne Begrünungssystem (Referenzraum), unbegrünt und nicht perforiert links, unbegrünt und perforiert rechts.

Mit Bepflanzung stellen sich Messkurven wie in Abbildung 26 gezeigt dar. Zusätzlich wird die Masse der Begrünungssysteme gemessen. Aus den zeitlichen Masseverläufen kann die Verdunstungsrate der Systeme bestimmt werden.

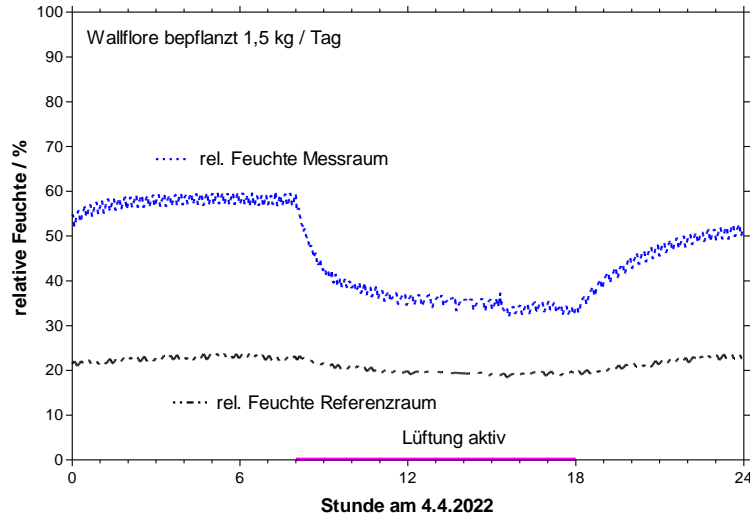


Abbildung 26: Tagesverlauf der relativen Feuchte für das begrünte Wallflore-System.

- Die Wasserabgabe wurde für die drei Ausführungen des Wallflore-Systems im Zeitraum von Februar 2020 bis April 2020 bei täglicher automatischer Bewässerung wie folgt bestimmt:
 - Unperforiert – 0,8 kg pro Tag,
 - perforiert – 1,1 kg pro Tag,
 - perforiert und bepflanzte – 1,5 kg pro Tag.
- Bei der Begrünung des Vertiko-Systems sind Probleme mit Wurzelfäule aufgetreten, so dass Pflanzen entnommen wurden und Pflanzen/Wurzeln und System mit 3%iger Wasserstoffperoxid-Lösung desinfiziert wurden und die Pflanzen sich über einen längeren Zeitraum regenerieren mussten. Da einige Pflanzen durch die Wurzelfäule

abgestorben waren, wurden neue Stecklinge sowohl bei der HSWT als auch beim ZAE zur Bewurzelung gebracht, um wieder gesunde Pflanzen einsetzen zu können.



Abbildung 27: Geöffnetes Vertikosystem zur Behandlung der Pflanzen gegen Wurzelfäule

Das Vertikosystem hat trotz zusätzlichen Nachpflanzungen mehrere Monate gebraucht um sich von der Wurzelfäule zu erholen und eine gleichmäßige und volle Pflanzenbedeckung zu bekommen. Aus diesem Grund konnten die Messungen mit dem Vertikosystem erst in den Wintermonaten durchgeführt werden, was zu einer deutlich niedrigeren Verdunstungsleistung der Pflanzen führt.

Aufgrund dieser Probleme wurde auch die Bewässerung des Wallflore-Systems reduziert. Weitere Messungen wurden mit manueller Bewässerung je nach Bedarf – typischerweise alle 10 bis 14 Tage – durchgeführt.

Verdunstungsrate und Kühlleistung

(a) Modell der ebenen Wasseroberfläche

Zunächst soll ein Berechnungsmodell zur Abschätzung der Verdunstung aus den Messparametern Temperatur und Luftfeuchte vorgestellt werden. Das Modell ist der Diplomarbeit von Matthias Schäfer¹ entnommen, wird im Folgenden als Referenz herangezogen und kann in Zukunft bei Kenntnis der Eingangsparameter zur Abschätzung der Verdunstung genutzt werden. Die Messung der Verdunstung selbst anhand von z.B. dem Pflanzengewicht ist aufgrund der Kosten und dem Kalibrierungsaufwand z.B. nach Gewichtssprüngen durch händisches Gießen oder Pflanzenschnitt häufig impraktikabel. Der Effekt der eingestrahelten Leistung auf die Transpiration der Pflanze wird im Modell nicht berücksichtigt.

Gemäß DIN 4108-3² berechnet sich der Sättigungsdampfdruck p_s von Wasser in Luft für Wassertemperaturen $\theta_{\text{Wasser}} \geq 0 \text{ °C}$ gemäß

$$p_s = 610,5 \cdot \exp\left(\frac{17,269 \cdot \theta_{\text{Wasser}}}{237,3 + \theta_{\text{Wasser}}}\right) \quad (1)$$

Da ein Sensor zur Messung der Wassertemperatur θ_{Wasser} erst im zweiten Halbjahr 2022 nachgerüstet wurde, wird für frühere Messungen die Näherung $\theta_{\text{Wasser}} \approx \theta_{\text{Luft}}$ genutzt.

Mit der relativen Luftfeuchte ϕ_{rel} gilt für den Wasserdampfpartialdruck p_w

$$p_w = \phi_{\text{rel}} \cdot 610,5 \cdot \exp\left(\frac{17,269 \cdot \theta_{\text{Luft}}}{237,3 + \theta_{\text{Luft}}}\right) \quad (2)$$

Ausgehend vom Wasserdampfpartialdruck kann die absolute Luftfeuchte ϕ_{abs} ermittelt werden:

$$\phi_{\text{abs}} = \frac{p_w}{R_{\text{Wasser}} \cdot T_{\text{Luft}}} \quad (3)$$

mit der Gaskonstante des Wassers $R_{\text{Wasser}} = 461,52 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ und der absoluten Temperatur $T_{\text{Luft}} = \theta_{\text{Luft}} + 273,15 \text{ K}$.

Aus der Differenz zwischen p_s und p_w kann die Verdunstungsrate \dot{m} berechnet werden:

$$\dot{m} = 7,9 \cdot 10^{-9} \text{ kg K Pa}^{-1} \text{ W}^{-1} \text{ s}^{-1} \cdot \alpha_{\text{conv}} \cdot (p_s - p_w) \quad (4)$$

Das Produkt $\beta = 7,9 \cdot 10^{-9} \text{ kg K Pa}^{-1} \text{ W}^{-1} \text{ s}^{-1} \cdot \alpha_{\text{conv}} = 2,5 \cdot 10^{-10} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ heißt Wasserdampfübergangskoeffizient. Die Zahlenwerte für den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten von α_{conv} und sind DIN 4108-3³ entnommen und gelten für Innenräume.

¹ Matthias Schäfer: *Passive Kälteerzeugung durch Strahlung, Konvektion und Verdunstung*. ZAE Report E21-1002-1, Diplomarbeit, Univ. Würzburg, 2002.

² DIN 4108-3, Abschnitt C.4, Gleichung (C.15), Version Okt. 2018

³ DIN 4108-3, Abschnitt D.4, Tabelle D.3, Version Okt. 2018

Ausgehend von der Verdunstungsrate kann die Kühlleistung berechnet werden:

$$\dot{q} = \dot{m} \cdot (Q_{\text{evap}} + c_{\text{Dampf}} \cdot \theta_{\text{Wasser}} - c_{\text{Wasser}} \cdot \theta_{\text{Wasser}}) \quad (5)$$

mit der spezifischen Verdampfungswärme von Wasser $Q_{\text{evap}} = 2,438 \cdot 10^6 \text{ J kg}^{-1}$ bei $\theta_{\text{Wasser}} = 0 \text{ °C}$ (erster Term in Klammer), der spez. Wärmekapazität von Dampf $c_{\text{Dampf}} = 2,2 \cdot 10^3 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (zweiter Term) und der spez. Wärmekapazität von Wasser $c_{\text{Wasser}} = 4,20 \cdot 10^3 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (dritter Term).

(b) Prüfung der Eignung der Mittelwerte der Lufttemperatur zur Berechnung der Dampfdrücke

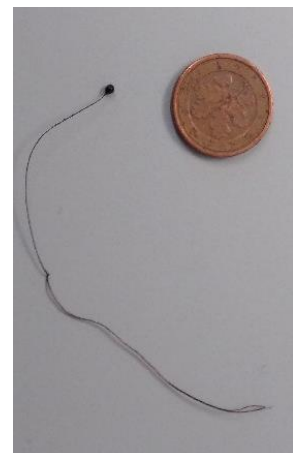
Damit das in (a) vorgestellte Modell als Abschätzung für die Verdunstungsrate der Pflanzenwände herangezogen werden kann, ist sicherzustellen, dass die gemessenen und anhand einer Steuerung vorgegebenen Lufttemperaturwerte auch tatsächlich im Mikroklima des Pflanzenblattes vorliegen. Hierzu wurden zwei $10 \text{ k}\Omega$ NTC-Temperatursensoren an der Blattunterseite des Wallflore-Systems installiert, siehe *Abbildung 28*. Eine Messung auf der Blattoberseite ist aufgrund der radiativen Strahlungseinträge durch die Pflanzenbeleuchtung nicht sinnvoll.



(a) Nach Durchstechen der Blattfläche mittels Nadel konnte der Temperatursensor von oben eingefädelt werden.



(b) Der Sensor wurde auf der Unterseite mit einem Streifen Gewebeklebeband gegen Verrutschen gesichert.



(c) Größenvergleich des NTC-Temperatursensors mit einer 1-Centmünze.

Abbildung 28: Befestigung eines Temperatursensors zur Messung der Temperatur direkt am Blatt.

Da neben der Pflanze auch das Substrat einen signifikanten Anteil an der Gesamtverdunstungsrate hat, wurden ins Substrat zwei PT100 Temperaturfühler eingebracht. Diese sind mit wasserdichten Tauchhülsen versehen, um auch in feuchter Umgebung verlässliche Temperaturwerte liefern zu können. Die so aufgenommenen Messwerte sind in Abb. 2.1 (b) über einen Zeitraum von 10 Tagen aufgetragen. Zum Vergleich sind die Werte der Lufttemperatur in (a) dargestellt. Aus den Daten wurden tagesweise Mittelwerte gebildet, siehe (c) und (d). Um die durch die Schaltzyklen des Radiators hervorgerufene Temperaturmodulation aus dem Messsignal zu entfernen, wurde zu jedem Datenpunkt ein gleitender Mittelwert berechnet, wobei die Gewichtung der Messdaten-Zeitreihe einer über dem zu berechnenden Mittelwert des ursprünglichen Datenpunkts zentrierten Gauß-Kurve entspricht. Effektiv handelt es

sich hierbei um einen Tiefpass-Filter, der schnelle Änderungen im Messsignal glättet, während langsame Änderungen nahezu unverändert erhalten bleiben.

Wie in [Abbildung 29](#) zu erkennen ist, sinkt die Lufttemperatur mit Einschalten der Raumbelüftung um 8 Uhr ab, da die Außentemperatur im November unterhalb der Zieltemperatur von 22 °C lag. Mit Einschalten der Pflanzenbeleuchtung um 9 Uhr steigt die Lufttemperatur an. Die Blatttemperatur folgt im Wesentlichen der Lufttemperatur, wobei bei eingeschalteter Pflanzenbeleuchtung der zeitliche Mittelwert etwa 0,5 K oberhalb der Lufttemperatur liegt. Die Abweichung kann durch den radiativen Energieeintrag der Beleuchtung erklärt werden, der von den Blättern absorbiert und anschließend radiativ und konvektiv an die Umgebung abgegeben wird. Das Substrat hingegen zeigt über den gesamten Einschaltzeitraum der Raumbelüftung hinweg eine sinkende Temperaturkurve mit einer tagesweisen Schwankung von 1,0 - 1,5 K. Erst nach Ausschalten des Lüfters um 18 Uhr steigt die Substrattemperatur wieder auf den Ursprungswert an, ohne jedoch die Lufttemperatur von im Mittel 22 °C vor dem erneuten Einschalten des Lüfters zu erreichen.

Um pflanzenphysiologische Effekte als Ursache des Abfalls der Substrattemperatur auszuschließen, wurde über einen Zeitraum von drei Nächten der Ein- und Ausschaltzeitpunkt der Raumbelüftung auf 0 Uhr bzw. 2 Uhr verlegt. Die Ergebnisse sind in [Abbildung 29](#) dargestellt. Tatsächlich sinkt die Substrattemperatur nun in ebendiesem Zeitrahmen, sodass die erhöhte Luftwechselrate und die damit gesteigerte Transpirationsrate des Substrats als Ursache der Abkühlung verifiziert werden konnte.

Insgesamt liegt die Differenz zwischen Lufttemperatur und Blatt- sowie Substrattemperatur im Bereich von unter 2 K. Die Steigung in der Kurve des Sättigungsdampfdrucks bei einer Wassertemperatur von $\theta_{\text{Wasser}} = 22 \text{ °C}$ beträgt

$$\left. \frac{dp_s}{d\theta_{\text{Wasser}}} \right|_{\theta_{\text{Wasser}}=22 \text{ °C}} \approx 1,61 \text{ mbar K}^{-1} .$$

Somit liegt die Differenz des Sättigungsdampfdrucks zwischen Messraum und dem Mikroklima der Pflanze im Bereich von max. 3,5 mbar, häufig jedoch deutlich darunter. Es ist folglich davon auszugehen, dass das vorgestellte Modell der ebenen Wasseroberfläche im Rahmen der angenommenen Werte von konvektiven Wärmeübergangskoeffizient und Wasserdampfübergangskoeffizient eine sinnvolle Vergleichsbasis darstellt.

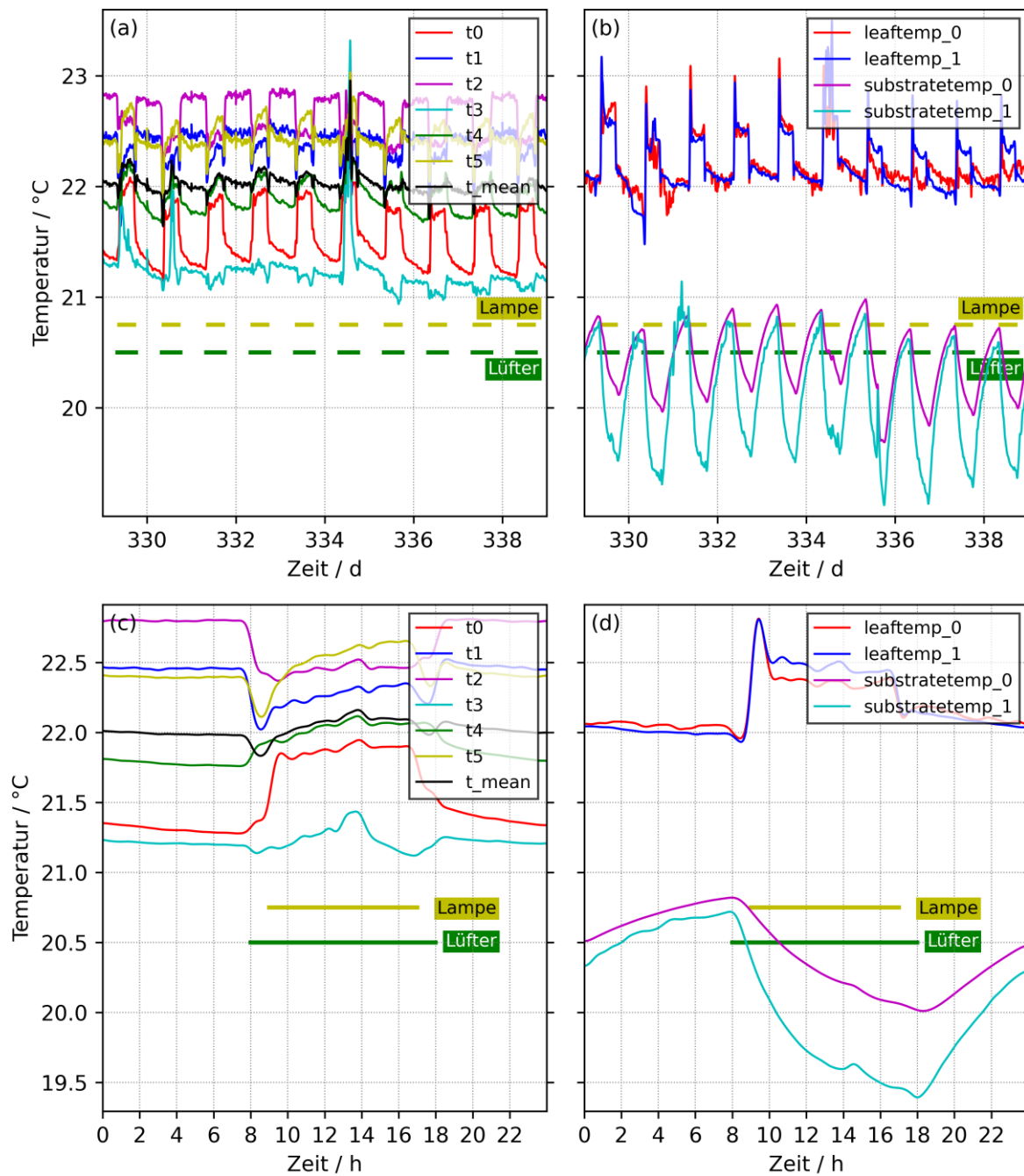


Abbildung 29: Lufttemperatur (a, c) und Blatt-/Substrattemperatur (b, d) jeweils über den gesamten Auswertzeitraum (a, b) sowie als Mittelwert im Tagesverlauf (c, d). Die Einschaltzeiten des Lüfters sind mittels grüner horizontaler Striche markiert. Daten von Freitag, den 25.11.2022 bis Sonntag, den 04.12.2022. Alle Werte wurden mittels Gauß-Filter ($\sigma = 10$ min) geglättet.

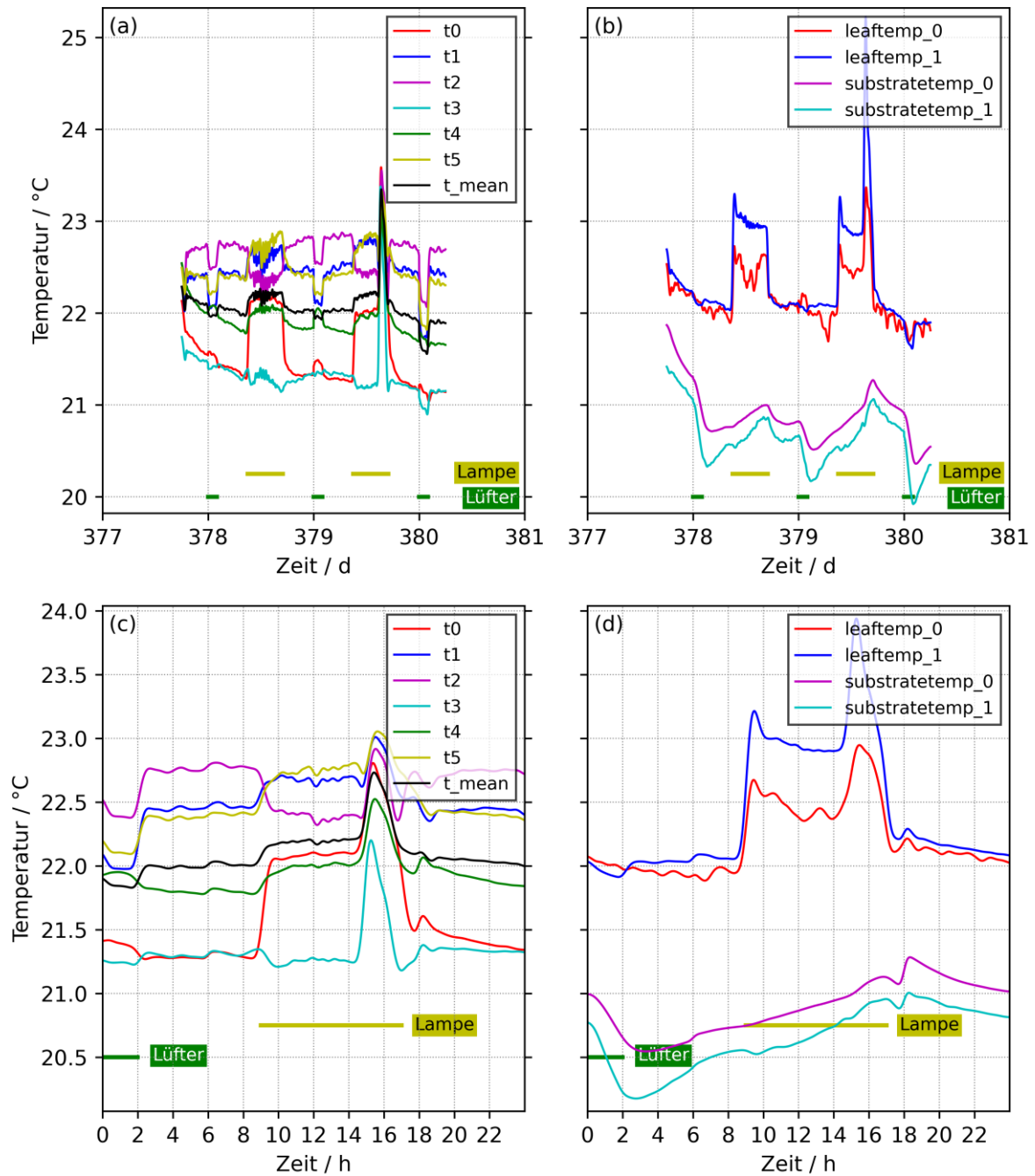


Abbildung 30: Daten von Donnerstag, den 12.01.2023 bis Sonntag, den 15.01.2023. Lüfter an von 0 Uhr bis 2 Uhr. Der Abfall in der Substrattemperatur ist nun im Zeitraum von 0 Uhr bis 2 Uhr zu finden. Alle Werte wurden mittels Gauß-Filter ($\sigma = 10 \text{ min}$) geglättet.

(c) Abschätzung des Wasserdampfübergangskoeffizienten und der effektiven Fläche

Die aus DIN 4108-3 entnommenen Werte des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten und des darauf basierenden Wasserdampfübergangskoeffizienten können lediglich als Näherung für die im Messraum tatsächlich vorliegenden Bedingungen angesehen werden (die Werte in der Literatur schwanken teilweise um eine Größenordnung).

Das Lehrbuch der Bauphysik⁴ führt Wasserdampfübergangskoeffizienten z. B. in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz zwischen umströmtem Körper und Umgebungsluft auf. Um eine Übersicht zu den Wasserdampfübergangskoeffizienten aus unterschiedlichen Quellen zu erhalten, wurden mit der Beziehung⁵

$$\beta = 7,9 \cdot 10^{-9} \text{ kg K Pa}^{-1} \text{ W}^{-1} \text{ s}^{-1} 10^{-9} \alpha_{conv} \quad (6)$$

entsprechende konvektive Wärmeübergangskoeffizienten berechnet und die Wasserdampfübergangskoeffizienten in Abbildung 31 doppeltlogarithmisch dargestellt.

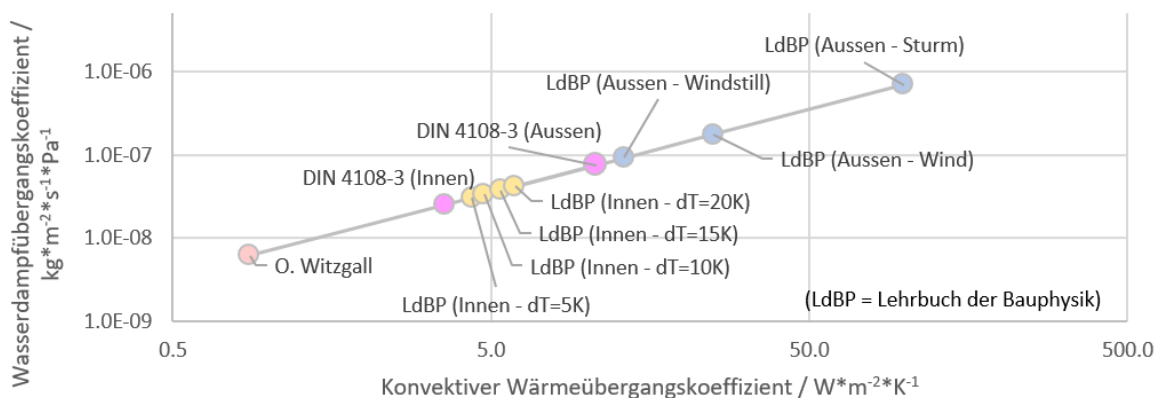


Abbildung 31: Vergleich der Literaturwerte für den Wasserdampfübergangskoeffizienten β aufgetragen über die zugehörigen konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten α_{conv} .

Zu erkennen ist die stimmige Größenkorrelation zwischen den Werten von Innen nach Außen – es treten keine Überschneidungen auf. Aufgrund von individuellen thermischen Gegebenheiten können Wasserdampfübergangskoeffizienten von Innenräumen im Allgemeinen je nach Raumgröße, Nutzung und Bebauung von den DIN und Literaturwerten abweichen (aufgrund der individuell gegebenen Strömungs- und Temperatur-Verhältnisse).

Eine weitere Unsicherheit besteht in der Ermittlung der tatsächlich für die Verdunstung zur Verfügung stehenden Fläche der Pflanzensysteme. Einzelmessungen an Blättern sowie das Modell der ebenen Wasser liefert eine flächenbezogene Verdunstungsrate, deren Absolutwerte erst nach Ermittlung der Gesamtfläche als Referenz herangezogen werden können. Hierbei muss zwischen Substrat- und Pflanzenfläche unterschieden werden.

⁴ Wolfgang M. Willems (Hrsg.): *Lehrbuch der Bauphysik*, 7. Auflage, Springer Vieweg, 2013.

⁵ Künzel M. Hartwig: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten, Universität Stuttgart, Dissertation, 1994.

Zur Berechnung der Substratfläche kann das Produkt aus Breite und Höhe des jeweiligen Begrünungssystems genutzt werden:

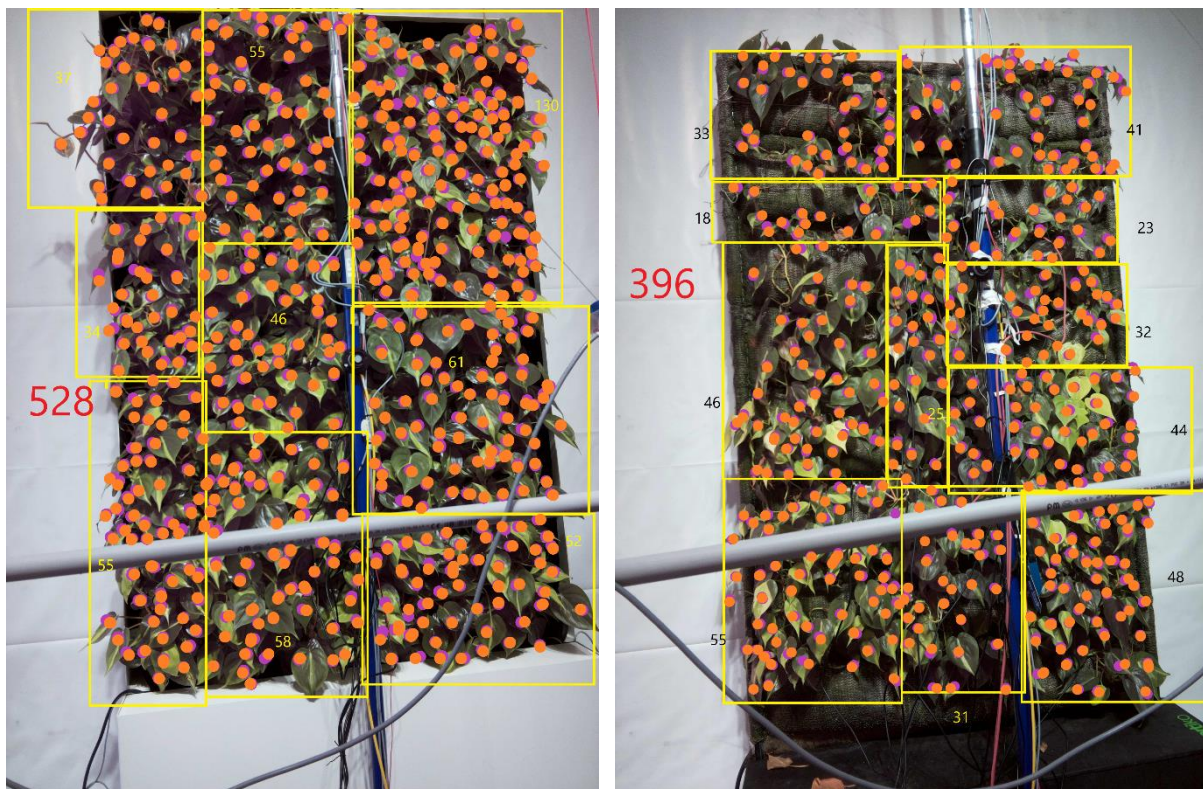
- Wallflore: $134 \text{ cm} \cdot 88 \text{ cm} = 1,179 \text{ m}^2$,
- Vertiko: $165 \text{ cm} \cdot 100 \text{ cm} = 1,650 \text{ m}^2$.

Durch die Oberflächenrauheit des Substrats ist jedoch davon auszugehen, dass die tatsächlich für die Transpiration zur Verfügung stehende Fläche größer als der so ermittelte Wert ist. Gleichzeitig ist das Substrat zumindest partiell von den Blättern der Pflanzen verdeckt oder zumindest abgeschirmt, wodurch der konvektive Wärmeübergangskoeffizient und damit auch der Wasserdampfübergangskoeffizient lokal erniedrigt wird. Eine Quantifizierung der gegenläufigen Effekte ist schwierig. Anhand der durchgeführten Messungen kann lediglich eine Abschätzung des kombinierten Gesamteffekts angestrebt werden.

Zur Abschätzung der Blattfläche der Vertikalbegrünungen wurde eine Blatzzählung durchgeführt, siehe Abbildung 32. Unter Verwendung der gemessenen mittleren Blattgröße der Philo. hederaceum Brasil von $36,42 \text{ cm}^2$ kann die Blattfläche berechnet werden:

- Wallflore: $528 \cdot 36,42 \text{ cm}^2 = 1,92 \text{ m}^2$,
- Vertiko: $396 \cdot 36,42 \text{ cm}^2 = 1,44 \text{ m}^2$.

Bei der Berechnung wurde angenommen, dass für die Transpiration lediglich eine der beiden Blattseiten (Vorderseite/Rückseite) zur Verfügung steht. Da die Blatzzählung rückwirkend anhand der Bildaufnahmen durchgeführt wurde, kann nicht ausgeschlossen werden, dass einzelne Blätter von anderen verdeckt wurden und damit nicht gezählt werden konnten. Die Rechnung liefert somit eine untere Grenze der Blattfläche.



(a) Wallflore-System am 14.05.2022 mit insg. 528 Blättern.

(b) Vertiko-System am 16.02.2023 mit insg. 396 Blättern.

Abbildung 32: Blatanzahl der Systeme Wallflore und Vertiko. Die gezählten einzelnen Blätter sind mit farbigen Punkten versehen. Zur besseren Nachvollziehbarkeit und Übersichtlichkeit wurde ein Raster aus gelb markierten Rechtecken über die Fotoaufnahmen gelegt und die sich in den Rechtecken befindlichen Blätter gezählt. Durch Addition der Blatanzahl aller Rechtecke ergibt sich die Gesamtanzahl des jeweiligen Begrünungssystems.

(d) Auswertung Wallflore

Zur Auswertung der Verdunstungsleistung des Wallflore-Systems wurde ein Messzeitraum im Mai 2022 ausgewählt. In Abbildung 33 (a) sind die Messwerte der Bodenfeuchte-Sensoren des Typs SM100 aufgetragen. Mittels Laufzeitmessung eines hochfrequenten Signals kann auf die Dielektrizitätszahl des Bodens und damit auf den Wassergehalt geschlossen werden. Im betrachteten Zeitraum sind zwei Sprünge der Bodenfeuchte zu erkennen. An den Tagen 130 und 139 steigt die Bodenfeuchte plötzlich an und sinkt in den nachfolgenden Tagen langsam ab. Die Sprünge markieren den Zeitpunkt des Bewässerns durch manuelles Einschalten der Bewässerungspumpe. Je nach Position der fünf verwendeten Bodenfeuchte-Sensoren fallen die Absolutwerte sowie die durch das Bewässern verursachten relativen Änderungen unterschiedlich hoch aus. Während z.B. der Sensor „sm100_0“ insbesondere auch die dem Bewässern nachfolgende Abtrocknungsphase idealtypisch abbildet, zeigen andere Sensoren lediglich kleine Veränderungen im Messsignal. Die starke Abhängigkeit der Messwerte der Bodenfeuchte wird später im Abschnitt zur Regelstrategie erneut thematisiert werden. Für die weitere Diskussion wird im Folgenden zunächst der arithmetische Mittelwert „sm100_mean“ verwendet.

In Abbildung 33 (b) ist der mittels Präzisionswaage ermittelte Gewichtsverlust durch Verdunstung aufgetragen. Zusätzlich zum Messwert (rot) wurde der aus dem Modell der ebenen Wasseroberfläche berechnete flächenbezogene Gewichtsverlust (magenta) angegeben, wobei die Achsenskalierung so gewählt wurde, dass sich beide Kurven zu Beginn und Ende des Auswertzeitraums schneiden. Da der Wassertank des Systems im Aufbau integriert ist und mitgewogen wird, hat die Bewässerung keinen direkten Einfluss auf das Gewicht des Systems. Ergänzend wurde für beide Kurven die Änderungsrate als zeitliche Ableitung des Gewichtsverlusts berechnet und aufgetragen. Die tatsächliche und die aus dem Modell berechnete Evaporationsrate stimmen qualitativ gut überein. So ist im Einschaltbereich der Raumbelüftung (jeweils 08 Uhr morgens bis 18 Uhr abends) und der Pflanzenbeleuchtung (jeweils 09 Uhr morgens bis 17 Uhr abends) eine deutlich erhöhte Gewichtsverlustrate feststellbar, wobei die Ausschläge um eine gedachte Mittellinie in den gemessenen Daten höher liegt als im Modell. Als visuelle Hilfestellung wurden jeweils die Einschaltzeiten von Lüfter und Pflanzenbeleuchtung als horizontale Linien am unteren Rand der Grafik markiert.

Das 1.179 m² große Wallflore-System verdunstet auf den gesamten Auswertzeitraum bezogen nach dem verwendeten Modell ebenso viel wie eine etwa 0.43 m² große ebene Wasseroberfläche. Dies entspricht einem Flächenquotienten von 2.74. Bezogen auf die Blattfläche von 1.92 m² ergibt sich ein Quotient von 4.47.

Bei den im zeitlichen Mittel im Messraum herrschenden Bedingungen von tagsüber etwa 45 % relativer Luftfeuchte und einer Lichtintensität von 90 μmol m⁻² s⁻¹ kann für das Wallflore-System aus [Abbildung 22](#) eine berechnete Transpirationsrate von 69 g h⁻¹ abgelesen werden. Die tatsächlich gemessene Evapotranspiration des Begrünungssystems liegt im Auswertzeitraum tagsüber im Bereich von 80 g h⁻¹ bis 120 g h⁻¹. Der Anteil des Substrats an der Gesamtverdunstung liegt folglich bei < 50 %.

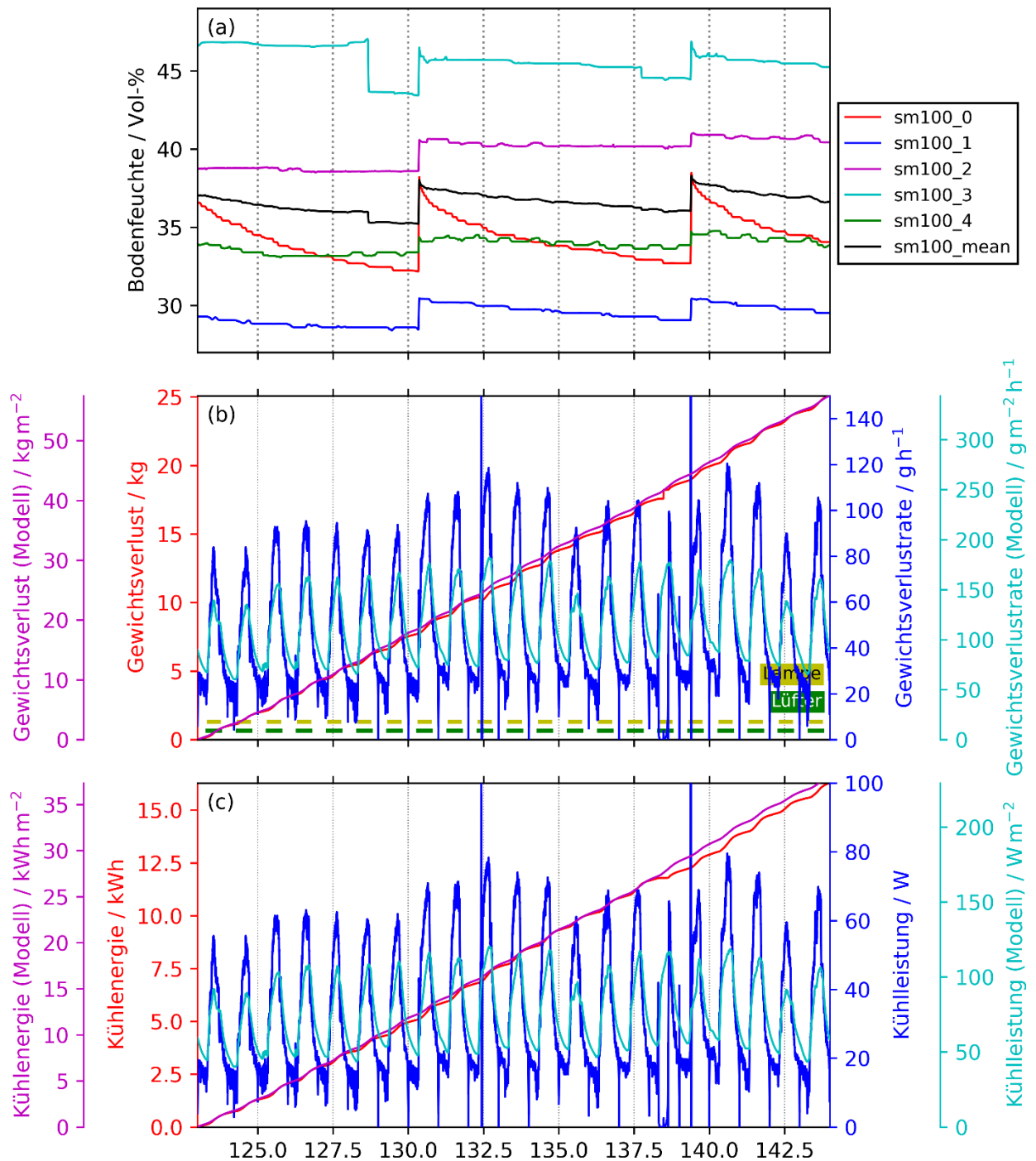


Abbildung 33: Auswertung Wallflöre. In (a) ist die Bodenfeuchte der fünf installierten Sensoren über den Auswertzeitraum (Kalendertag 123 (Dienstag, 03. Mai) bis 143 (Montag, 21. Mai) des Jahres 2022) sowie der hieraus berechnete Mittelwert aufgetragen. In (b) ist der anhand des mittels Waage gemessenen Gewichts des Wallflöre-Systems berechnete Gewichtsverlust sowie dessen Zeitableitung aufgetragen. Zum Vergleich sind die anhand des Modells berechneten Werte pro Fläche jeweils auf zusätzlichen y-Achsen gezeigt. Am unteren Rand sind die Einschaltzeiten der Pflanzenbeleuchtung (gelb, jeweils 09 Uhr bis 17 Uhr) sowie der Raumbelüftung (grün, jeweils 08 Uhr bis 18 Uhr) markiert. In (c) sind Kühlenergie und -leistung dargestellt. Alle Werte wurden mittels Gauß-Filter ($\sigma = 10 \text{ min}$) geglättet.

Ausgehend von den Evapotranspirationsraten wurde die Kühlleistung sowie die zur Verdunstung nötige Energiemenge berechnet und in *Abbildung 33 (c)* aufgetragen. Die Kurven entsprechen im Wesentlichen den bereits diskutierten Verläufen. In dem 19 volle Tage umfassenden Auswertezeitraum konnte durch das Wallflore-System der Raumluft eine Gesamtkühlwärme von etwa 16 kWh entzogen werden. Dies entspricht im zeitlichen Mittel einer Kühlleistung von rund 35 W, wobei tagsüber kurzzeitig auch Werte bis zu knapp 80 W erzielt wurden.

(e) Auswertung Vertiko

Das Vertiko-System wurde analog zum Wallflore-System vermessen. Als Auswertezeitraum wurden 19 Tage im Februar und März 2023 ausgewählt, wobei die in *Abbildung 34* genutzte Zeitachse in Tagen seit dem 01.01.2022 angegeben wird, sodass die Darstellung identisch zu *Abbildung 33* ist. Im Gegensatz zum Wallflore-System wurde das Vertiko-System automatisiert in regelmäßigen Abständen von 8 h bewässert. Zur Messung der Bodenfeuchte wurden Sensoren des Typs EC-5 genutzt, wobei diese ähnlich starke Abhängigkeiten der Messwerte von der Positionierung des Sensors innerhalb des Substrats aufweisen. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Sensoren betreffen sowohl den Absolutwert als auch die Amplitude relativer Änderungen.

Das 1.650 m² große Wallflore-System verdunstet auf den gesamten Auswertezeitraum bezogen nach dem verwendeten Modell ebenso viel wie eine etwa 0.71 m² große ebene Wasseroberfläche. Dies entspricht einem Flächenquotienten von 2.32. Bezogen auf die Blattfläche von 1.44 m² ergibt sich ein Quotient von 2.03.

Bei den im Messraum herrschenden Bedingungen kann aus *Abbildung 22* eine Transpirationsrate von 52 g h⁻¹ abgelesen werden. Die tatsächlich gemessene Evapotranspiration des Begrünungssystems liegt im Auswertezeitraum tagsüber im Bereich von 90 g h⁻¹ bis 150 g h⁻¹. Der Anteil des Substrats an der Gesamtverdunstung liegt folglich meist bei > 50 % und damit höher als beim Wallflore-System.

Die Kühlleistung des Vertiko-Systems lag im Auswertezeitraum trotz geringerer Pflanzenfläche leicht oberhalb der des Wallflore-Systems. Eine Ursache hierfür kann die Evaporation über das Substrat darstellen, das im Vertiko-System aufgrund der häufigen und regelmäßigen Bewässerung nahezu durchgehend feucht gehalten wurde. Mit einer Gesamtkühlenergie von etwa 22 kWh liegt das Vertiko-System rund 50 % über dem Wert des Wallflore-Systems. Es ist jedoch zu beachten, dass aufgrund der deutlich verschiedenen Umweltbedingungen zwischen beiden Auswerteziträumen (Mai bzw. Februar) eine direkte Vergleichbarkeit nicht gegeben ist.

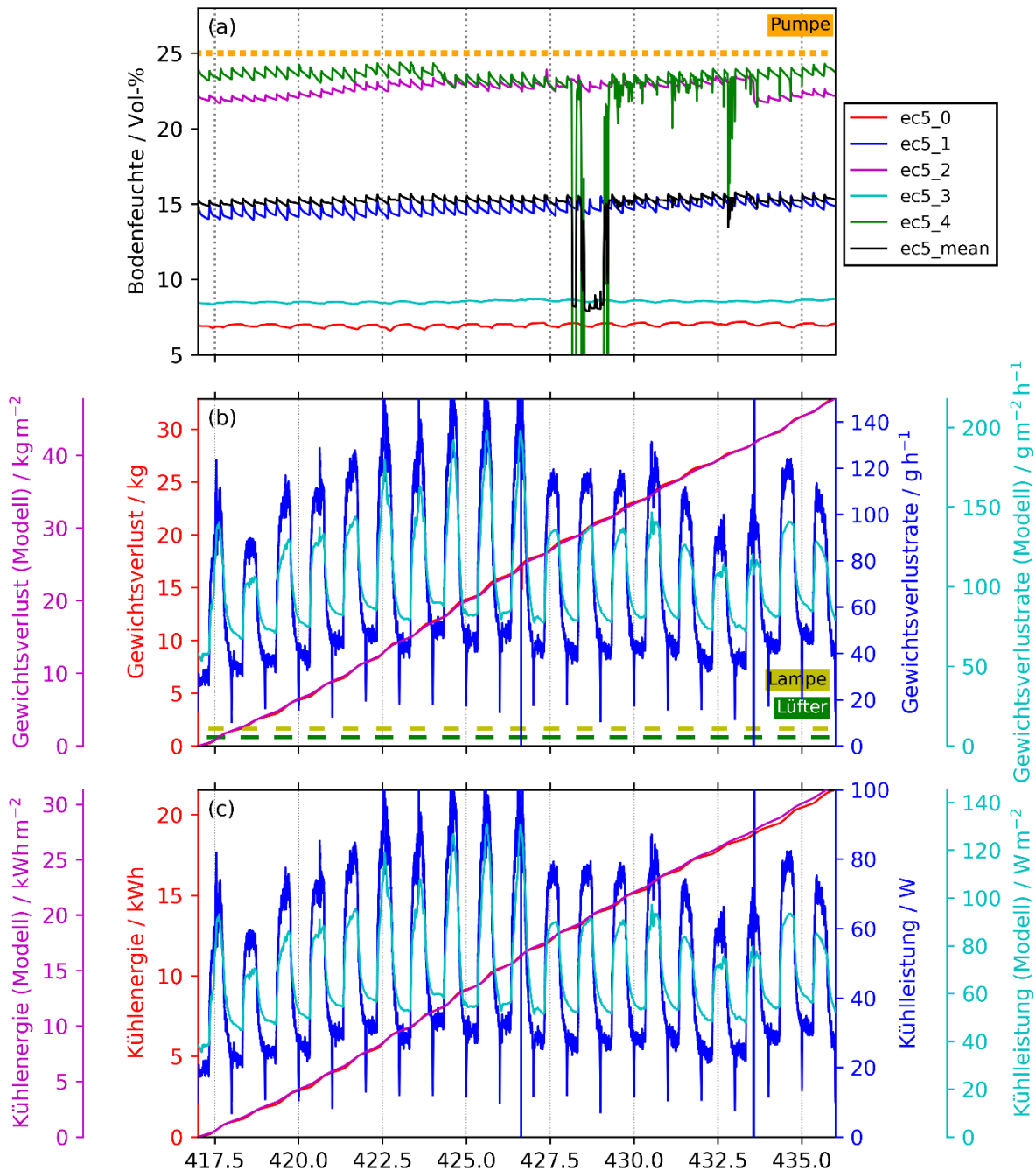


Abbildung 34: Auswertung Vertiko. Daten von Mittwoch, den 22.02.2023 bis einschl. Sonntag, den 12.03.2023. Bewässerung drei Mal täglich. Zwei der fünf Bodenfeuchte-Sensoren haben unzureichenden Kontakt mit dem Substrat und zeigen daher keine durch periodisches Gießen (drei Mal täglich im Abstand von 8 h) ausgelöste Feuchtemodulation. Alle Werte wurden mittels Gauß-Filter ($\sigma = 10 \text{ min}$) geglättet.

(f) Auswertung Verdunstungsfläche

Um zusätzlich zur Innenraumbegrünung eine Möglichkeit zur Raumlufffeuchteconditionierung zu schaffen, wurde im Rahmen des Projektes eine technische Verdunstungsfläche aufgebaut. Die Verdunstungsfläche besteht im Wesentlichen aus einem Gestell mit Rahmen (siehe Abbildung 35). Im Rahmen eingespannt ist eine hydrophil beschichtete Scheibe über welche im Befeuchtungsfall Wasser verdunstet wird. Das Wasser wird hierbei über eine Pumpe aus einem Vorratsbehältnis über ein horizontales Verteilerrohr auf die Scheibe geleitet. Hierzu weist das Verteilerrohr selbst, einen entsprechenden Längsspalt auf. Über diesen Längsspalt wird das Wasser durch Schwammtücher auf die hydrophile Beschichtung der Glasscheibe geführt um einen möglichst homogenen Wasserfluss zu erzeugen, welcher durch die hydrophile Beschichtung vollflächig auf der Scheibe verteilt werden soll. Leider hat sich in der Praxis gezeigt, dass die Leistungsfähigkeit der hydrophilen Beschichtung deutlich unter den Herstellerangaben liegt (siehe Abbildung 35 rechts). Um ein eventuelles Algenwachstum zu hemmen, ist im Wasserkreislauf zusätzlich ein UV-Wasserkklärer und ein Feinfilter integriert. Ein weiteres Sammelrohr an der unteren Scheibenkante führt das Wasser wieder in das Vorratsbehältnis zurück. In das Vorratsbehältnis ist ein kapazitiver Füllstandssensor zur Fernüberwachung integriert. Veralgung konnte im Projektzeitraum nicht festgestellt werden. Die Schwammtücher haben sich im Projektverlauf allerdings kontinuierlich zugesetzt, wodurch sich der Durchfluss im Laufe der Zeit reduziert hat.

Analog zu den beiden Vertikalbegrünungen wurde die Evaporationsleistung der Verdunstungsfläche ausgewertet, siehe Abbildung 36. Im gewählten Auswertzeitraum war die Verdunstungsfläche trotz dynamischer Regelung von ca. 9 Uhr bis 18 Uhr nahezu durchgehend aktiv, siehe orange horizontale Markierungen in (b). In (a) ist die relative Luftfeuchte der sechs genutzten Sensoren aufgetragen sowie deren Mittelwert „rh_mean“ und die aus Mittelwert und Lufttemperatur berechnete absolute Luftfeuchte ϕ_{abs} . Gut zu erkennen ist das Absinken der relativen und absoluten Luftfeuchte nach Einschalten des Lüfters um 08 Uhr morgens sowie der langsame Anstieg nach Ausschalten des Lüfters ab 18 Uhr. Mit einer durchschnittlichen Kühlleistung von etwa 30 W im aktiven Zustand liegt die Verdunstungsfläche deutlich unter den beiden untersuchten Vertikalbegrünungen. Im Gegensatz zu diesen lässt sich die Evaporation jedoch durch Ansteuerung der Zirkulationspumpe regeln. Eine angepasste Steuerung zur Regulierung der relativen Luftfeuchte wird in einem späteren Abschnitt dieses Berichts vorgestellt und evaluiert.



(a) Messaufbau Verdunstungsfläche mit Pumpe und Vorratsbehältnis. (b) Detailansicht der Benetzung.

Abbildung 35: (a): Blick auf die Verdunstungsfläche mit der im Rahmen eingespannten hydrophil beschichteten Scheibe: Über eine Pumpe wird das Wasser aus dem Vorratsbehältnis (weiß) über das obere horizontal angebrachte Verteilerrohr und die Schwammtücher (grün) auf die Scheibe geführt und dem Sammelrohr (horizontal an der unteren Kante der Scheibe angebracht) wieder dem Wasserkreislauf zugeführt. (b): Blick auf das Verteilerrohr mit den Schwammtüchern: Aufgrund der schlechten Benetzung, trotz hydrophiler Beschichtung bilden sich Rinnsale.

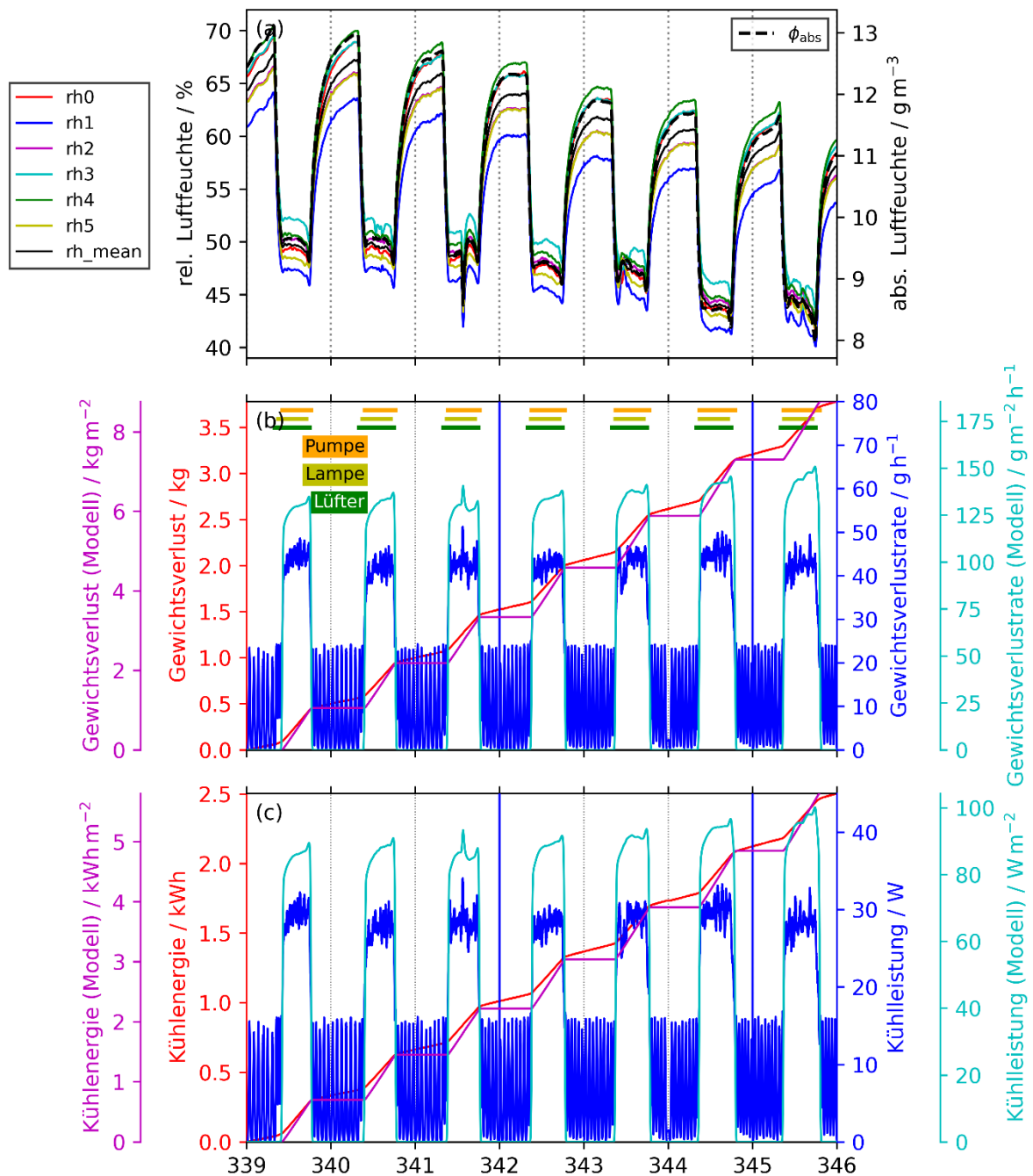


Abbildung 36: Auswertung Verdunstungsfläche. Daten von Montag, 05.12.2022 bis einschließlich Sonntag, 11.12.2022. Alle Werte wurden mittels Gauß-Filter ($\sigma = 10 \text{ min}$) geglättet. Das starke Rauschen in der Gewichtsverlustrate und Kühlleistung bei ausgeschalteter Pumpe der Verdunstungsfläche ist auf die endliche Auflösung der genutzten Waage zurückzuführen.

(g) Gesamtvergleich

Da die Verdunstungsperformance der einzelnen Systeme bisher isoliert in einzelnen Zeiträumen bei teilweise unterschiedlichen Umweltparametern betrachtet wurde, ist ein Vergleich der Ergebnisse schwierig. Unter der Annahme des Modells der ebenen Wasseroberfläche, dass die Evaporation direkt proportional zur Partialdruckdifferenz zwischen Sättigungsdampfdruck und Wasserdampfpartialdruck ist, können jedoch Rückschlüsse auf das Verhalten bei vergleichbaren Bedingungen (vergleichbaren Partialdruckdifferenzen) gezogen werden. Eine Auftragung des beschriebenen Zusammenhangs ist in Abbildung 37 gegeben, wobei beim Wallflore-System zusätzlich zwischen (a) Substrat ohne Pflanzen mit ungelochtem Bändchengewebe, (b) Substrat ohne Pflanzen nach Perforierung des Bändchengewebes mittels Fleischzartmacher sowie (c) bepflanzt System unterschieden wurde. Für die Auswertung wurden jeweils lediglich die Zeiträume mit eingeschalteter Pflanzenbeleuchtung zwischen 9 Uhr und 17 Uhr betrachtet und halbstündliche Mittelwerte berechnet. Bei der Verdunstungsfläche wurden lediglich solche halbstündlichen Zeiträume ausgewertet, in denen die Zirkulationspumpe durchgehend aktiv war. Die Steigung der zur Punktwolke zugehörigen Ausgleichsgerade ist dann ein Maß für die Verdunstungsperformance. Neben einer durch den Nullpunkt führenden Ausgleichsgeraden (y -Achsenabschnitt $t = 0$, durchgezogene Linie) wurde ein „best fit“ (freier y -Achsenabschnitt, gestrichelte Linie) berechnet. Lediglich die durch den Nullpunkt verlaufende Gerade ist nach dem Modell der ebenen Wasseroberfläche physikalisch sinnvoll. Geringe Abweichungen zwischen beiden Gerade deuten im Umkehrschluss darauf hin, dass das Modell die Realität gut beschreibt.

Gut erkennbar ist die durch Perforation der Gewebefolie gesteigerte Verdunstung des Wallflore-Systems bei gleicher Partialdruckdifferenz in Abbildung 37 (a) und (b) mit einer Verdopplung bis Verdreifachung der Steigung der Ausgleichsgeraden. Nach Bepflanzung der Vertikalbegrünung ergibt sich eine geringere Steigung. Es ist vorstellbar, dass ein wesentlicher Anteil der verdunsteten Wassermenge über das Substrat an die Umgebungsluft abgegeben wird und dieses durch die darüber liegende Blattschicht von der Luftzirkulation abgeschirmt wird. Durch diesen Effekt fiel die Partialdruckdifferenz im Mikroklima des Substrats deutlich geringer aus als im Restvolumen des Raums. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass auch vom Blatt selbst transpirierten Wassermengen die Einbuße durch Abschirmung des Substrats nicht vollständig kompensieren können.

Im direkten Vergleich zwischen bepflanzt System Wallflore- und Vertiko-System zeigt letzteres eine etwa um den Faktor 1.5 gesteigerte Verdunstungsperformance. Der Unterschied scheint in Anbetracht der unterschiedlichen Gesamt-Oberflächen sowie der unterschiedlichen Bewässerungs-Strategien plausibel. Das mehrmals täglich bewässerte Vertiko-System weist zu nahezu allen Zeiten ein feuchtes Substrat auf, während das Substrat des ca. alle 10 Tage bewässerte Wallflore-System zumindest phasenweise abtrocknen kann.

Die Verdunstungsfläche weist grundsätzlich eine deutlich geringere Verdunstung als die Vertikalbegrünungen auf. Eine Hauptursache hierfür ist die deutlich geringere effektiv benetzten Fläche, siehe Abbildung 35 (b).

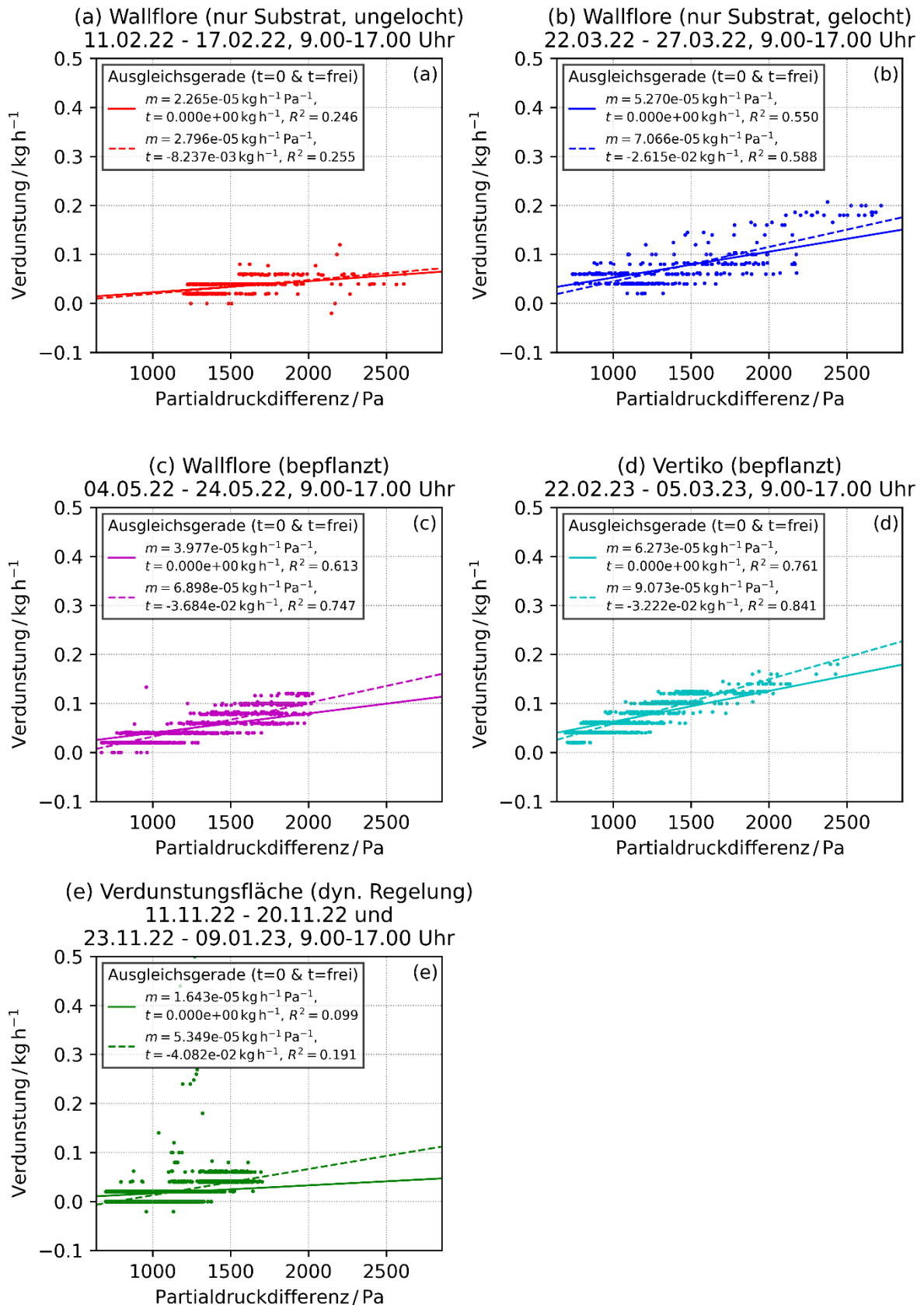


Abbildung 37: Verdunstungsperformance der untersuchten Systeme aufgetragen über die Partialdruckdifferenz. Jeder Datenpunkt entspricht dem Mittelwert aus 30 Minuten. Zur Bestimmung der Steigung wurden Ausgleichsgeraden mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate berechnet. Die durchgezogene Gerade geht durch den Koordinatenursprung; die gestrichelte Gerade stellt den besten Fit mit freiem y-Achsenabschnitt dar. In der den Ausgleichsgeraden zugehörigen Legende ist jeweils ein Wert des statistischen Bestimmtheitsmaßes R^2 angegeben.

Pflegestrategie für vertikale Begrünungen

Während die beschriebene Regelstrategie vorrangig den Parameter Luftfeuchte im Raum betrifft, geht es in der Pflegestrategie um die Faktoren, die das Wachstum der Pflanzen und den Erhalt ihrer Qualität bedingen.

Unabhängig von den Zielen des Projektes, nämlich einer angepassten Verdunstungsrate und Kühlleistung ohne Überfrachtung der Luft in Innenräumen, zielt die Pflegestrategie darauf, eine bedarfsgerechte Versorgung der Pflanzen mit Überwachung der Nährlösungsqualität zu schaffen. Prinzipiell kommt dabei das komplette Zusammenspiel der Wachstumsparameter zum Tragen. Aber die vertikale Begrünung erfordert an einigen Stellen einer besonderen Sorgfalt.

Die Systemauswahl erfolgt entsprechend der Zielrichtung. Steht die Klimatisierung im Vordergrund empfehlen sich Systeme mit großer (mineralischer) Verdunstungsfläche, deren Bewässerung sich durch An- und Abschalten automatisieren lässt. Steht dagegen der dekorative Aspekt im Vordergrund, sind Systeme zu bevorzugen, die ein dauerhaftes Pflanzenwachstum bei möglichst geringem Pflegeaufwand begünstigen, indem sie z.B. ein möglichst großes Wasserspeichervermögen des Substrates und eine gute Austauschbarkeit der Pflanzen bieten.

Die vorliegende Pflegestrategie ist ausgelegt für Büroräume.

1. Standort

Eine relative Luftfeuchte von 40 – 60 % und eine Raumtemperatur zwischen 18 – 25 °C ist für Büroräume anzustreben und für die typischen Innenraumbegrünungspflanzen passend. Weit wichtiger ist eine ausreichend vorhandene, photosynthetisch aktive Strahlung (PAR). Die Systeme werden entweder entlang einer freien Wandfläche gestellt oder als Raumteiler positioniert und profitieren daher nur wenig vom natürlichen Licht. Auf die Statik des Gebäudes und die Tragfähigkeit des Fußbodens ist zu achten. Für die in der Regel erforderliche Zusatzbelichtung und technische Ausstattung wie z.B. Pumpen, Sensoren sollte ein Stromanschluss in der Nähe sein.

2. Belichtung

Da die vertikalen Begrünungssysteme in der Regel mit der begrünten Fläche der Raummitte zugewandt sind, ist eine Zusatzbelichtung erforderlich. Als Anhaltspunkt für Erhaltungswachstum kann eine photosynthetisch aktive Strahlung (PAR) von mindestens $20 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ für etwa 12 bis 16 Stunden angesetzt werden. Die jeweilige Belichtungsintensität und Dauer hängt von der Pflanzenart ab. Zur Erhöhung der Photosynthese- und somit auch die Verdunstungsrate werden etwa 50 bis $90 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ angestrebt, wobei zwischen dem Nutzen einer erhöhten Transpiration durch erhöhte PAR-Strahlung und dem dafür notwendigen Energieverbrauch abgewogen werden muss. Die begrünte Fläche sollte gleichmäßig ausgeleuchtet sein. Für die Berechnung der Lampenauslegung ist das Hinzuziehen einer Fachperson aus der Objektbegrünung oder Lichtplanung sinnvoll. Es empfiehlt sich der Einsatz von geeigneten (LED-)Lampen. Um für die Nutzer:innen der Büroräume eine Blendung oder Störung zu vermeiden, wird Zusatzlicht bevorzugt in den Abendstunden gegeben. Ca. 6 Stunden Dunkelheit sind allerdings für eine gesunde Pflanzenentwicklung einzuhalten.

Im einfachsten Fall erfolgt die Steuerung der Belichtung über eine Zeitschaltuhr. Mit Hilfe einer kontinuierlichen PAR-Messung lassen sich auch Konzepte verwirklichen, bei denen beispielsweise bei Unterschreitung eines Schwellenwertes aus natürlichem Licht (z.B. $< 50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) die Lampen eingeschaltet werden. Das Konzept der Tagessumme (Daily Light Integral, DLI) verfolgt die Strategie, dass solange belichtet wird, bis eine festgelegte Tagessumme (aus natürlichem und künstlichem Licht)

erreicht ist. Diese Tagessumme ist von der Pflanzenart abhängig und beträgt beispielsweise für Schwachlichtpflanzen wie viele *Araceae* $3 - 6 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ in der Produktion (Torres und Lopez, 2012). Für das Erhaltungswachstum in der Innenraumbegrünung kann von dem niedrigeren Wert ausgegangen werden. $3 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ entsprechen einer erforderlichen PAR-Strahlung aus natürlichem und künstlichem Licht von umgerechnet $70 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ bei einer Belichtungsdauer von 12 Stunden am Tag, bzw. $53 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ bei einer Belichtungsdauer von 16 Stunden am Tag.

Die Belichtungsintensität wird sinnvollerweise im PAR-Wellenlängenbereich von 400 – 700 nm als Photosynthetische Photonenflussdichte (PPFD) in $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ mit einem sogenannten Quantum-Meter bestimmt. Die Überprüfung der photosynthetisch aktiven Strahlung sollte regelmäßig verteilt über mehrere Messpunkte an der begrüneten Fläche erfolgen, um auch die Gleichmäßigkeit der Belichtung sicher stellen zu können. Wenn PAR als Regelgröße für das Ein- bzw. Ausschalten der Lampen verwendet wird, muss die Messung kontinuierlich erfolgen. Die Messwerte werden dann zum Daily Light Integral (DLI) zusammengefasst.

3. Bewässerung, Düngung (Nährlösung)

Bewässerungsintervall

Allgemein gilt, dass das Bewässerungsintervall individuell an das Begrünungssystem, das verwendete Kultursubstrat, die Pflanzenarten, die Jahreszeit und den Standort angepasst werden muss. Als Orientierungswert dienen dafür die Angaben der System-Anbieter, auf deren Grundlage eine angepasste Bewässerung entwickelt werden muss. Systeme mit Steinwolle als Kultursubstrat benötigen deutlich seltenere Wassergaben als Systeme, die auf einem Filz-Vlies-Aufbau oder auf Phenolharzschaum basieren, da die Wasserspeicherung bei Steinwolle deutlich höher ist. Wenn die Bewässerungsintensität mit dem Ziel der Luftfeuchterhöhung angehoben wird, muss verstärkt auf das Auftreten von *Botrytis* geachtet werden, da in dem entstehenden feuchten Mikroklima sich dieser Pilz bevorzugt ausbreitet.

Zum Einsatz in gärtnerischen Substraten werden u.a. FDR-Sensoren, die den volumetrischen Wassergehalt kapazitiv messen, von diversen Herstellern angeboten. Die Sensorsignale können mit den dazu passenden Handlesegeräten oder über den Anschluss an einen Computer mitgeloggt und ausgewertet werden.

Allgemein gilt: Für jede Art von Bewässerungssensor muss eine Kalibrierkurve erstellt werden, um den Bewässerungs-Schaltzeitpunkt individuell bestimmen zu können.

Grundsätzlich ist eine Regelung basierend auf den Werten der Bodenfeuchte-Sensoren denkbar, allerdings lieferten die verwendeten Sensoren noch keine zuverlässigen Werte. Eine unkomplizierte und auf Dauer verlässliche Steuerung basierend auf Bodenfeuchtedaten erfordert daher weiteren Untersuchungs- und Anpassungsbedarf.

Wasserqualität

Die Carbonathärte des verwendeten Wassers sollte möglichst zwischen $5 - 10^\circ \text{dKH}$ (= $1,79 - 3,58 \text{ mmol l}^{-1}$ Säurekapazität) liegen, um einen stabilen pH-Wert der Nährlösung zu begünstigen. Die Wahl der Wasserherkunft, z.B. Leitungs-, Regen-, vollentsalztes (VE) –Wasser beeinflusst die Carbonathärte. Leitungswasser mit hoher Carbonathärte lässt sich mit Regenwasser oder VE-Wasser verschneiden, um die Carbonathärte abzusenken.

Es empfiehlt sich, die Wasserqualität am Standort zu prüfen. Die Carbonathärte kann mit einem einfachen, handelsüblichen Küvettenschnelltest gemessen werden. Die Bestimmung der Carbonathärte ist vor Verwendung jeder neuen Wasserherkunft sinnvoll, um die Düngung darauf abzustimmen. Bei Verwendung von Leitungswasser

können die aktuellen Ergebnisse der Wasseranalyse bei den zuständigen Wasserversorgern abgerufen werden (Internet), dabei sind vor allem die Carbonathärte, die Leitfähigkeit sowie Nähr- und Schadstoffgehalte interessant. Der pH-Wert des Wassers ist von untergeordneter Bedeutung, da er ungepuffert ist und sich daher leicht verändert.

Vor allem in größeren Bürogebäuden sollte bei der Nutzung von Leitungswasser vorab beim Gebäudebetreiber geklärt werden, ob eine Wasseraufbereitung im Gebäude installiert ist. Sollte dort ein Kationenaustauscher verwendet werden, der mit NaCl regeneriert wird (meist gut erkennbar an großen Säcken mit Salz-Plätzchen neben der Anlage), dann ist das daraus gewonnene Wasser für die Bewässerung von Pflanzen vollkommen ungeeignet, da es zu hohe Natriumgehalte aufweist. In diesem Fall sollte das Wasser vor der Aufbereitungsanlage entnommen werden.

Wasser aus Umkehrosmoseanlagen (VE-Wasser) ist zur Bewässerung von Pflanzen geeignet und kann zum Verschneiden von Leitungswasser mit zu hoher Carbonathärte verwendet werden.

Nährlösung

Die Nährstoffversorgung von vertikalen Begrünungssystemen erfolgt üblicherweise als kontinuierliche Bewässerungsdüngung mit einer schwachkonzentrierten Nährlösung. Bei der Zusammenstellung der Nährlösung sind eine ausreichende Nährstoffversorgung der Pflanzen für ein Erhaltungswachstum und die Erreichung eines stabilen pH-Wert und EC-Wert in der Nährlösung besonders wichtig.

pH-Wert der Nährlösung

Optimaler Weise sollte der pH-Wert der Nährlösung zwischen 5 und 6,6 liegen, als maximale Spannweite kann 4,5 – 7,5 angenommen werden. Eine Absenkung des pH-Wertes in der Nährlösung ist durch die Wahl von Wasser mit niedriger Carbonathärte und/oder durch physiologisch sauer wirkende Stickstoffdüngung in Form von Ammonium möglich. Eine Anhebung des pH-Wertes in der Nährlösung erfolgt dagegen durch Wasser mit höherer Carbonathärte und/oder Stickstoffdüngung in Form von physiologisch alkalisch wirkendem Nitrat.

Der pH-Wert der Nährlösung sollte mindestens 1 x wöchentlich überprüft werden. Dazu können pH-Elektroden in Verbindung mit einem pH-Meter (elektronisches Messgerät) verwendet werden. Aber auch mit kostengünstigen pH-Indikatorstäbchen lässt sich der pH-Wert bestimmen.

EC-Wert der Nährlösung

Beim EC-Wert der Nährlösung sind Werte zwischen 0,5 und 2,0 ms cm⁻¹ (= EC) anzustreben, um eine zu hohe Salzbelastung der Pflanzen zu vermeiden und eine ausreichend hohe Nährstoffgabe sicherzustellen. Zu beachten ist, dass der EC-Wert nur ein Summenparameter für die osmotische Belastung der Nährlösung ist und keine Aussage über die Art der vorhandenen Salze zulässt. Ein hoher EC-Wert kann daher sowohl durch hohe Nährstoff- als auch durch hohe Ballast Salzgehalte begründet sein. Auch das Wasser selbst weist einen EC-Wert auf, der bekannt sein sollte, um später den EC-Wert der Nährlösung beurteilen zu können. Bei zu niedrigen EC-Werten ist eine zusätzliche Nährstoffgabe erforderlich. Zu hohe Werte können durch Verdünnung mit Wasser abgesenkt werden. Allerdings sollte immer versucht werden, die Ursachen für zu hohe EC-Werte aufzudecken und zu vermeiden.

Zur Messung des EC-Wertes werden Leitfähigkeitsmessgeräte mit entsprechender Leitfähigkeitssonde eingesetzt. Auch diese Messung sollte mindestens 1 x wöchentlich erfolgen.

Nährstoffgehalt

Im Versuch mit *Philodendron hederaceum* 'Brasil' wurden gute Erfahrung mit folgenden Nährstoffgehalten pro Liter Nährlösung gemacht: 42 mg N, 12 mg P, 63 mg K, 59 mg Ca, 6 mg Mg und Spurenelemente.

Die erforderlichen Nährstoffe können in Form eines salzförmigen oder flüssigen Volldüngers, der sowohl Makro- als auch Mikronährstoffe enthält, appliziert werden. Diese werden mit unterschiedlichen Zusammensetzungen angeboten und entsprechend der Empfehlung der Hersteller für die vorhandene Wasserhärte ausgewählt. Eine Alternative stellen stickstofffreie Basisdünger in Kombination mit einem separaten Stickstoffdünger dar. Letzterer wird so ausgewählt, dass der pH-Wert im günstigen Bereich gehalten wird. Bei stark ansteigendem pH-Wert wird schwefelsaures Ammoniak verwendet, bei leicht steigendem pH-Wert Ammoniumnitrat und bei sinkendem pH-Wert kommt Kalksalpeter zum Einsatz. Häufig bietet es sich an, zusätzliche Gaben von Eisen in Form von Fe-EDDHA zu verabreichen, um Eisenmangelchlorosen vorzubeugen.

Da der EC-Wert als Summenparameter nur Auskunft über den Gesamtsalzgehalt der Nährlösung gibt, ist es sinnvoll den Stickstoffgehalt zusätzlich zu messen, um Aufschluss darüber zu erhalten, wie sich der N-Gehalt in der Lösung entwickelt. Diese Messung erfolgt am kostengünstigsten durch die Verwendung von Nitrat-Teststäbchen, deren Färbung verglichen mit einer Farbskala auf der Verpackung den Messwert ergibt. Durch Verwendung eines Reflektometers (Messgerät, das die Bewertung der Färbung des Teststäbchens übernimmt) wird die Messgenauigkeit der Teststäbchen deutlich erhöht und die Ablesung erleichtert. Darüber hinaus haben die Nitrat-Teststäbchen ein Testfeld für den Nitritgehalt der Lösung. Da Nitrit toxisch für Pflanzen ist, sollte hier die Anzeige nicht anschlagen. Wenn Nitrit in der Nährlösung vorhanden ist, muss diese ausgetauscht werden. Der Nitritentstehung kann durch Belüften der Nährlösung und durch Verwendung von ammoniumfreiem Dünger vorgebeugt werden.

4. Pflegemaßnahmen

Begrünungssysteme

Die folgenden Empfehlungen spiegeln den Idealzustand einer optimalen Funktionskontrolle, die aber häufig im Pflegerhythmus nicht einzuhalten ist. Was aber in jedem Fall zu gewährleisten ist, ist eine eingewiesene Person, die aufmerksam den Pflanzenzustand und die Systemfunktionen im Auge hat und gegebenenfalls das Pflegepersonal informiert. Vertikale Begrünungen sind ein attraktives Gestaltungselement, erfordern aber ein hohes Maß an Betreuung.

Der wichtigste Funktionsparameter des Begrünungssystems ist die Pumpentätigkeit, die daher täglich, bzw. zu den eingestellten Bewässerungszeiten überprüft werden muss. Dies ist besonders bei Systemen, deren Kultursubstrate nur wenig Wasser speichern können, wie z.B. Filz-Vlies-Aufbauten oder Phenolharzschaum, essentiell. Steinwolle dagegen speichert relativ viel und lange Wasser, sodass eine tägliche Bewässerung in vielen Fällen nicht notwendig ist.

In Abhängigkeit vom Verbrauch muss in regelmäßigen Abständen der Wasserfüllstand des Vorratstanks überprüft und gegebenenfalls mit Nährlösung aufgefüllt werden, sodass immer ausreichende Mengen zur Bewässerung zur Verfügung stehen und Tauchpumpen mit Wasser bedeckt sind.

Regelmäßig beim Pflegedurchgang empfiehlt sich eine technische Funktionskontrolle des ganzen Systems: Pumpentätigkeit, Funktion und Gleichmäßigkeit der Belichtung, verstopfte Leitungen, Gleichmäßigkeit der Bewässerung über die ganze Fläche, Kontrolle der Nährlösungsparameter (s.o.). Zusätzlich sollte geprüft werden, ob feuchte Stellen auf dem Fußboden zu bemerken sind, da diese häufig eine Folge von

Nährlösung, die über die Blätter abläuft, sind. In diesem Fall sollte der Wasseraustritt aus den Düsen korrigiert und/oder störende Blätter entfernt werden.

Pflanzen

Bei rankenden und kletternden Pflanzenarten ist je nach Wachstumsintensität alle 2–3 Monate ein Rückschnitt und/oder Anheften der Pflanzen erforderlich, sodass eine gleichmäßig begrünte Fläche mit gut verzweigten Pflanzen erreicht wird.

Zur Aufrechterhaltung eines optisch ansprechenden Eindrucks und einer hohen Photosynthese- und Transpirationsleistung der Pflanzen müssen Staubablagerungen auf den Blättern regelmäßig entfernt werden. Dies kann durch Abstauben oder Abbrausen mit Wasser (wenn das System an einen dafür geeigneten Ort gebracht werden kann) erfolgen.

Pflanzenschutz

Es empfiehlt sich, einmal wöchentlich die Pflanzen auf tierische Schädlinge und andere Phytopathogene zu kontrollieren, um eine unkontrollierte Ausbreitung zu vermeiden. Laus-Arten, die im Innenraum am häufigsten auftreten, sind indirekt durch klebrige Stellen auf den Blättern bemerkbar. Je früher Schädlinge entdeckt werden, desto eher lässt sich der Befall manuell durch Ausputzen und Rückschnitt reduzieren. Wenn darüber hinaus erforderlich, müssen vorrangig biologische Pflanzenschutzmaßnahmen (Nützlingseinsatz) ergriffen werden. Falls chemischer Pflanzenschutz notwendig ist muss das Pflanzenschutzmittel die Zulassung für Haus- und Kleingartenbereich aufweisen.

MS 2: Es wurden geeignete Sensoren identifiziert und eine Regelstrategie für die Verdunstungsrate der vertikalen Begrünungen sowie eine Pflegestrategie entwickelt.

Regelbarkeit der Verdunstungsrate

(a) Allgemeine Bemerkungen

Wie im vorherigen Abschnitt gezeigt, regelt sich die Verdunstungsrate anhand der relativen Luftfeuchte ϕ_{rel} selbst, da mit steigender Partialdruckdifferenz zwischen Wasserdampfpartialdruck $p_W \propto \phi_{\text{rel}}$ und Sättigungsdampfdruck die Evaporation ansteigt. Bei physiologisch ungünstigen besonders niedrigen relativen Luftfeuchten z.B. an kalten und trockenen Wintertagen steigt hierdurch die Evaporation auf natürliche Weise. Eine hierüber hinausgehende Regelung der Verdunstungsrate der Pflanzensysteme könnte z.B. durch eine besondere Bewässerungsstrategie realisiert werden, die auf Kosten der Pflanzengesundheit bewusst zu häufig oder zu selten gießt und damit sowohl die Transpiration der Pflanzen als auch des Substrats reguliert. Ebenso ist vorstellbar, durch besonders hohe oder niedrige künstliche Beleuchtung die Transpiration zu regulieren. Da im Projektverlauf bereits zu Anfang Probleme mit Wurzelfäule auftraten, wurden diese für die Pflanzengesundheit potentiell schädlichen Strategien nicht weiterverfolgt, sondern auf alternative Regelkonzepte zurückgegriffen: Zunächst soll hier eine Feinregelung mittels zusätzlich zu den Begrünungssystemen zuschaltbarer Verdunstungsfläche untersucht werden. Anschließend wird aufbauend auf die gewonnenen Erkenntnisse eine praktikable Regelstrategie vorgestellt, die im folgenden Kapitel weiter betrachtet und verfeinert werden soll.

(b) Feinregelung der relativen Luftfeuchte mittels Verdunstungsfläche

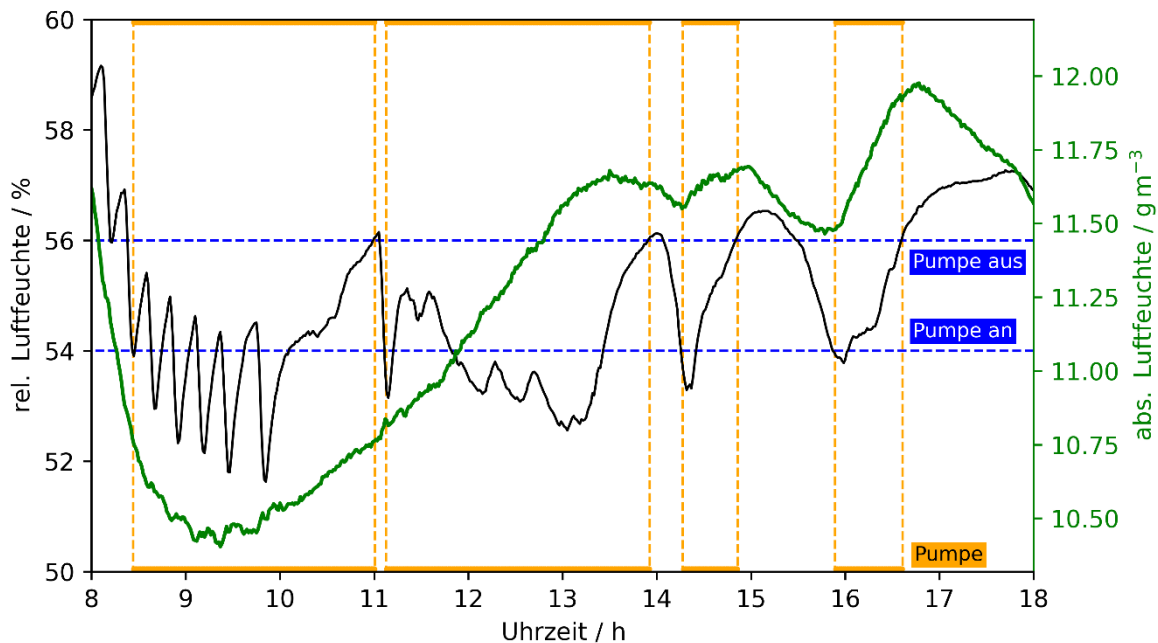


Abbildung 38: Feinregelung der Luftfeuchte mittels Verdunstungsfläche. Daten von Sonntag, den 23.10.2022. Zusätzlich zur relativen Luftfeuchte (schwarz) ist die absolute Luftfeuchte (grün) aufgetragen.

Der in Abbildung 38 abgebildete Tagesverlauf der relativen und absoluten Luftfeuchte demonstriert die Funktionsweise der Verdunstungsfläche als Ergänzung zur Vertikalbegrünung. Zum Zeitpunkt der Messung war der Zielwert der relativen Luftfeuchte auf 55 % gesetzt, die Toleranz nach oben und unten auf je 1 %. Bei Unterschreiten von 54 % rel. Luftfeuchte schaltet die Zirkulationspumpe der Verdunstungsfläche automatisiert ein, bei Überschreiten von 56 % aus. Die Schwellen sind zur Verdeutlichung als horizontale blau gestrichelte Linien in Abb. 39 eingetragen. Die Anschaltzeiten der Pumpe sind durch orange gestrichelte Rechtecke markiert. Nachdem ab 8 Uhr morgens zunächst die relative Luftfeuchte stark abnimmt, wird erstmals um ca. 11 Uhr der Schwellenwert von 56 % rel. Luftfeuchte kurzzeitig überschritten, worauf die Pumpe ausschaltet, die Luftfeuchte stark absinkt und die Pumpe hierdurch wieder einschaltet. In den Mittagsstunden bis ca. 13:30 Uhr befindet sich die rel. Luftfeuchte dauerhaft unterhalb des Zielwerts, während die absolute Luftfeuchte kontinuierlich ansteigt. Dies lässt sich mit einer erhöhten Lufttemperatur z.B. durch starke mittägliche Sonneneinstrahlung erklären, was auch das Verschwinden der periodisch durch den elektrischen Radiator hervorgerufenen Senken/Spitzen in der rel. Luftfeuchte erklärt. Ab ca. 13:30 Uhr befindet sich der Feuchteverlust durch die Raumbelüftung nahezu im Gleichgewicht mit der Transpiration des Begrünungssystems, sodass die Verdunstungsfläche nur noch ab und an aktiv geschaltet werden muss. In den beiden Zeiträumen mit aktiver Pumpe von 14:17 Uhr bis 14:52 Uhr sowie von 15:53 Uhr bis 16:37 Uhr kann der Idealfall der Feinregelung der rel. Luftfeuchte mittels Verdunstungsfläche schließlich beispielhaft nachvollzogen werden.

(c) Entwicklung einer Regelstrategie

Aufbauend auf den Erkenntnissen der vorherigen Abschnitte und unter Berücksichtigung der Licht- und Wasserbedürfnisse der Pflanzen wurde eine für das Raumklima optimale Regelstrategie entwickelt. Unter der Annahme, dass der untersuchte Raum als Büroraum genutzt werden soll, muss in den Bürozeiten für einen ausreichenden Luftaustausch gesorgt werden. Hierzu wurde der Lüfter im Zeitraum von 8 Uhr morgens bis 18 Uhr abends eingeschaltet. Bedingt durch den Lichtbedarf der Pflanze und der verbauten Pflanzenbeleuchtung ergibt sich für die Beleuchtung eine Einschaltzeit von 8 h. Die Pflanzenbeleuchtung wurde entsprechend von 9 Uhr bis 17 Uhr eingeschaltet. Zur Erreichung des Zielwerts der relativen Luftfeuchte von 50 % können nun je nach Ausstattung des Raums zwei Maßnahmen ergriffen werden:

- Falls eine Verdunstungsfläche im Raum vorhanden ist, ist diese bei Unterschreiten von 49 % rel. Feuchte einzuschalten, bei Überschreiten von 51 % rel. Feuchte auszuschalten. Der Toleranzwert von je 1 % bzgl. des Zielwerts von 50 % dient zur Vermeidung eines zu häufigen An- und Abschaltens.
- Ist die Verdunstungsfläche nicht verfügbar, kann versucht werden, die Raumluftfeuchte durch Variation der Bewässerungshäufigkeit zu regeln. Hierbei ist jedoch die Pflanzengesundheit und die Vermeidung von z.B. Wurzelfäule ein limitierender Faktor. Grundsätzlich ist eine Regelung basierend auf den Werten der Bodenfeuchte-Sensoren denkbar, allerdings hat sich im Verlauf des Versuchszeitraums gezeigt, dass die verwendeten Sensoren je nach Kontakt mit dem Substrat und Positionierung stark unterschiedliche Werte liefern. Eine unkomplizierte und auf Dauer verlässliche Steuerung war hierdurch nicht realisierbar.

Vergleich von relativer und absoluter Luftfeuchte in Mess- und Referenzraum

Die Vertikalbegrünungen sowie die Verdunstungsfläche wurden jeweils in dem als Messraum bezeichneten Raum eines Zwillingsraum-Setups vermessen. Durch Vergleich der raumklimatischen Parameter mit dem baugleichen Referenzraum kann der Einfluss der Begrünungssysteme z.B. auf die Luftfeuchte direkt ermittelt werden.

(a) Wallflore

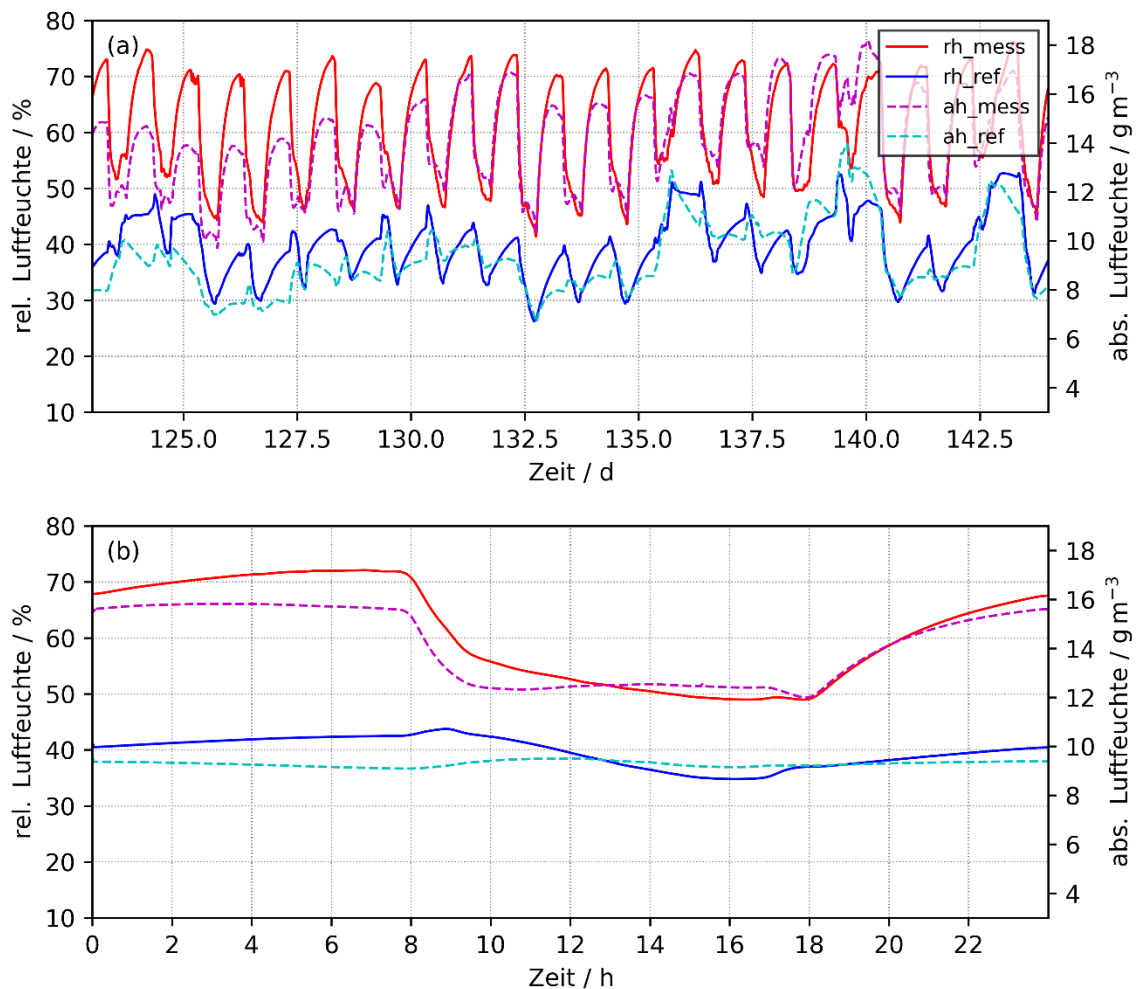


Abbildung 40: Vergleich der Luftfeuchten in Mess- und Referenzraum mit dem Wallflore System. Aufgetragen ist der Verlauf von relativer Luftfeuchte (linke Achse, rote u. blaue Kurve) und absoluter Luftfeuchte (rechte Achse, Magenta u. Cyan). In (a) ist der gesamte ausgewertete Messzeitraum (Kalendertag 123 (Dienstag, 03. Mai) bis 143 (Montag, 21. Mai) des Jahres 2022) dargestellt, in (b) der hiermit berechnete Mittelwert im Tagesverlauf. Alle Werte wurden mittels Gauß-Filter ($\sigma = 10 \text{ min}$) geglättet.

Die zeitlichen Verläufe der Mittelwerte der relativen Luftfeuchte (*relative humidity*, in der Legende als „rh“ abgekürzt) in Mess- und Referenzraum mit Wallflore-System sind in Abbildung 40 als durchgezogene Linien dargestellt. Zunächst lässt sich feststellen, dass während des gesamten 20 Tage umfassenden Auswertezitraums die relative Feuchte des Messraums etwa 10-30 % oberhalb der des Referenzraums lag, wobei im Tagesverlauf der Zeitraum tagsüber bei eingeschaltetem Lüfter eine deutlich geringere Differenz zwischen beiden Räumen aufweist als in der Nacht. Ursache ist der durch den Lüfter erzwungene Luftwechsel. Im betrachteten Zeitraum wurde mit Begrünungssystem tagsüber durchschnittlich eine um etwa 10 % erhöhte relative Luftfeuchte als ohne Begrünung erzielt. Der physiologisch erstrebenswerte Zielwert von 50 % relativer Feuchte konnte so über große Bereiche des Tages gehalten werden, während die relative Feuchte im Referenzraum gegen Nachmittag und Abend auf durchschnittlich bis zu 35 % absank.

Nach Abschalten des Lüfters zeigt der Raum mit Vertikalbegrünung jedoch einen deutlich stärkeren Anstieg in der relativen Luftfeuchte als der Referenzraum. Das zu diesem Zeitpunkt verdunstete Wasser wird nicht länger durch den Luftwechsel nach außen abtransportiert, sondern verbleibt im Raum und lässt die relative Luftfeuchte bis zum nächsten Morgen auf Werte von bis zu >70 % ansteigen, während im

Referenzraum der durchschnittliche Maximalwert um 8 Uhr morgens bei lediglich etwa 45 % liegt. Im Nutzungsfall eines Büroraums sind die Auswirkungen auf die Nutzer hier gering, da die sich die Situation nach einschalten der Lüftung innerhalb von etwa zwei Stunden normalisiert, jedoch besteht in der Nacht die Gefahr einer Taupunktüberschreitung, sofern die Raumtemperatur zur Energieeinsparung nach Ende der Arbeitszeit abgesenkt wird. Eine solche Absenkung wurde in den Zwillingsräumen nicht umgesetzt. Durch eine gezielte Steuerung von Heizung und Gebäudebelüftung kann einer zu hohen nächtlichen Raumlufffeuchte jedoch mit nur geringem zusätzlichen Aufwand entgegengesteuert werden.

Zusätzlich zur relativen Luftfeuchte wurde mit den ebenfalls aufgenommenen Temperaturkurven die absolute Luftfeuchte (*absolute humidity*, kurz „ah“) berechnet. Hier ergibt sich im Wesentlichen ein identisches Bild, wobei an dieser Stelle noch auf einen Effekt hingewiesen werden soll, der sich in den Kurven der relativen Feuchte nicht erkennen lässt: In Abbildung 40 (b) kann in der Kurve der abs. Feuchte des Messraums „ah_mess“ ab 17 Uhr ein Knick nach unten beobachtet werden. Ursache ist die nach Abschalten der Pflanzenbeleuchtung verringerte Evaporation der Begrünungssysteme, sodass der durch die bis 18 Uhr aktive Belüftung hervorgerufene Wasserverlust nicht länger kompensiert werden kann.

(b) Vertiko

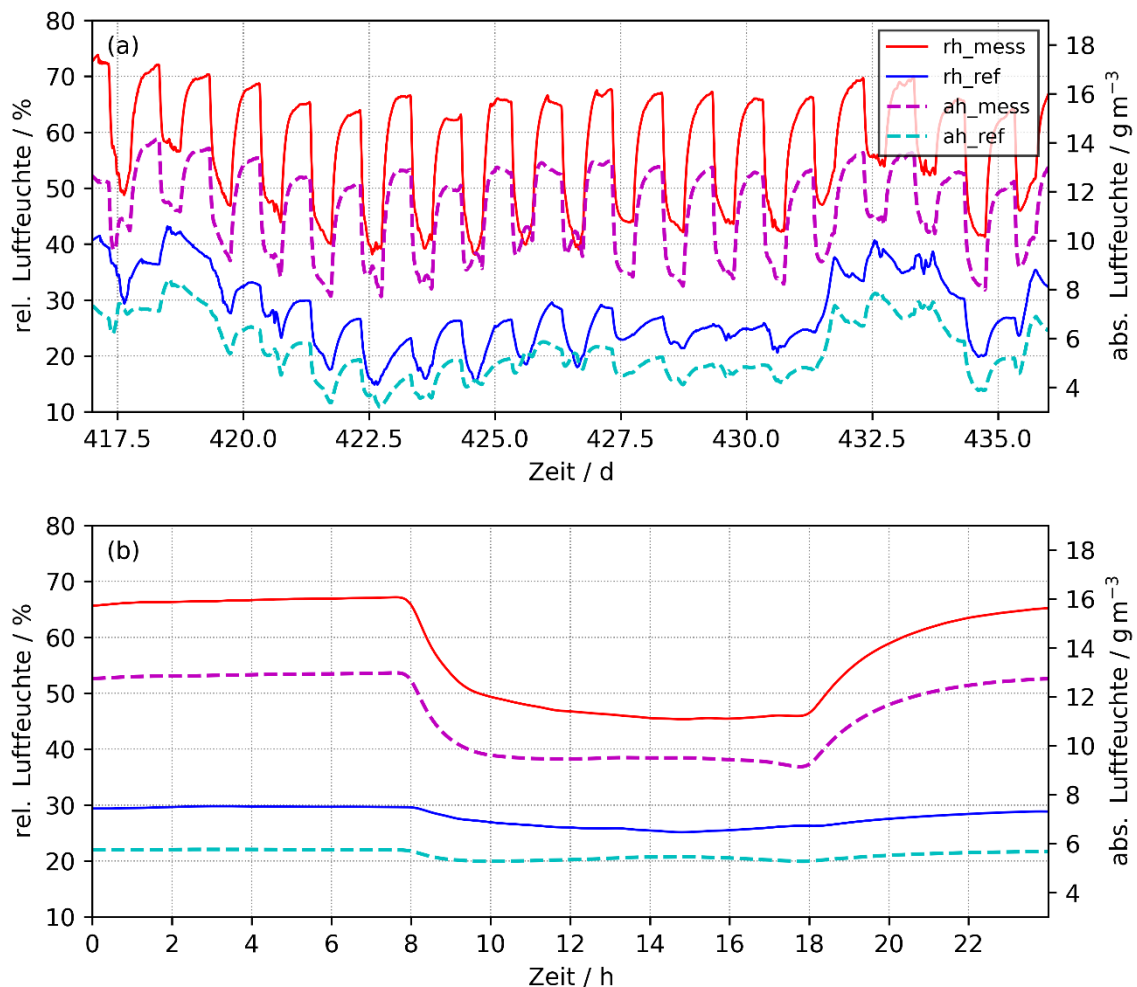


Abbildung 41: Vergleich der Luftfeuchten in Mess- und Referenzraum mit dem Vertiko System. Aufgetragen ist der Verlauf von relativer Luftfeuchte (linke Achse, rote u. blaue Kurve) und absoluter Luftfeuchte (rechte Achse, Magenta u. Cyan). In (a) ist der gesamte ausgewertete Messzeitraum (Kalendertag 417 (Mittwoch, 22. Feb.) bis 436 (Montag, 13. März) des Jahres 2023) dargestellt, in (b) der hiermit berechnete Mittelwert im Tagesverlauf. Alle Werte wurden mittels Gauß-Filter ($\sigma = 10 \text{ min}$) geglättet.

Die in Abbildung 41 dargestellte Kurven der Raumfeuchte mit dem Vertiko-System sind qualitativ mit denen des Wallflore-Systems identisch. Da der Auswertzeitraum im Februar und März liegt, wird durch die Raumbelüftung von außen jedoch kältere Luft mit geringerer absoluter Luftfeuchte in den Raum befördert. Hierdurch liegen die Werte der Luftfeuchte generell um einige Prozentpunkte bzw. einige g/m^3 niedriger als beim Auswertzeitraum des Wallflore-Systems im Mai. Während der Referenzraum tagsüber relative Feuchten von lediglich etwa 25 % aufweist, erreicht der Messraum Werte zwischen 45 % und 50 % und liegt damit im physiologisch optimalen Bereich. Wie bereits beim Wallflore-System ist somit klar erkennbar, dass das Vertiko-System das Raumklima messbar verbessert.

(c) Verdunstungsfläche

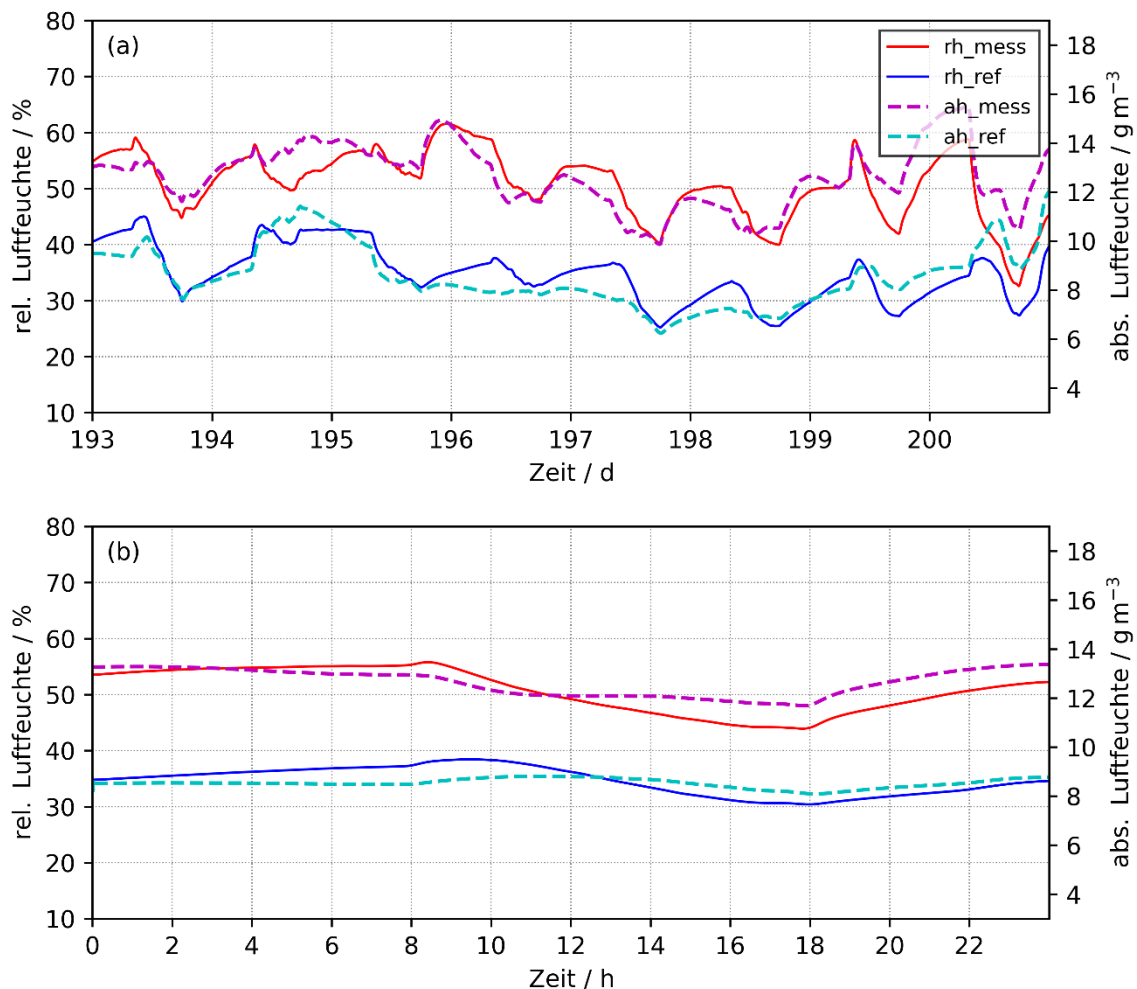


Abbildung 42 Vergleich der Luftfeuchten in Mess- und Referenzraum mit der Verdunstungsfläche. Aufgetragen ist der Verlauf von relativer Luftfeuchte (linke Achse, rote u. blaue Kurve) und absoluter Luftfeuchte (rechte Achse, Magenta u. Cyan). In (a) ist der gesamte ausgewertete Messzeitraum (Kalendertag 193 (Mittwoch, 13. Juli) bis 201 (Donnerstag, 21. Juli) des Jahres 2022) dargestellt, in (b) der hiermit berechnete Mittelwert im Tagesverlauf. Alle Werte wurden mittels Gauß-Filter ($\sigma = 10 \text{ min}$) geglättet.

Neben den beiden Vertikalbegrünungen wurde die Verdunstungsfläche in identischer Weise charakterisiert, wobei die Zirkulationspumpe im Auswertezentrum täglich dauerhaft jeweils von 8 Uhr bis 18 Uhr angeschaltet war. Wie in Abbildung 42 erkennbar ist, konnten hiermit ähnliche Effekte wie durch die Begrünungssysteme erzielt werden, ohne jedoch in der Nacht einen signifikanten Anstieg in der Luftfeuchte zu verursachen. Rein hinsichtlich der Raumparameter ist die Verdunstungsfläche aufgrund ihrer einfachen Regelbarkeit folglich die beste Lösung. Weitere positive Effekte hinsichtlich Luftqualität und dem psychologischen Empfinden bleiben an dieser Stelle jedoch unberücksichtigt.

Vergleich der thermischen Behaglichkeit in Mess- und Referenzraum

Die bereits zuvor angesprochene physiologische Behaglichkeit kann in der Gebäudetechnik mittels verschiedener Methoden charakterisiert werden. Weit verbreitet sind die in DIN EN ISO 7730 definierten Kennzahlen PMV (*predicted mean vote*, vorhergesagtes mittleres Behaglichkeits-Votum) sowie PPD (*predicted percentage of dissatisfied*, vorhergesagter Anteil der mit den raumklimatischen Bedingungen Unzufriedenen). Das mittlere Votum umfasst hierbei eine lineare Skala von +3 (heiß) bis -3 (kalt).

Bei Kenntnis der Bekleidung der Befragten (hier verwendeter Wert 1,0 clo, entspricht typischer Bürobekleidung), der Tätigkeit bzw. des Energieumsatzes (hier verwendeter Wert 1,2 met, entspricht sitzender Tätigkeit) und der Luftgeschwindigkeit (hier verwendeter Wert 0,1 m/s), können aus Luft- und Oberflächentemperatur der Umgebung sowie aus der relativen Luftfeuchte die Werte von PMV und PPD berechnet werden. Die sich ergebenden Werte sind in Abbildung 43 aufgetragen, wobei Luft- und Oberflächentemperatur als identisch angenommen wurden. Für Details und Grenzen der Berechnung wird auf DIN 7730 verwiesen.

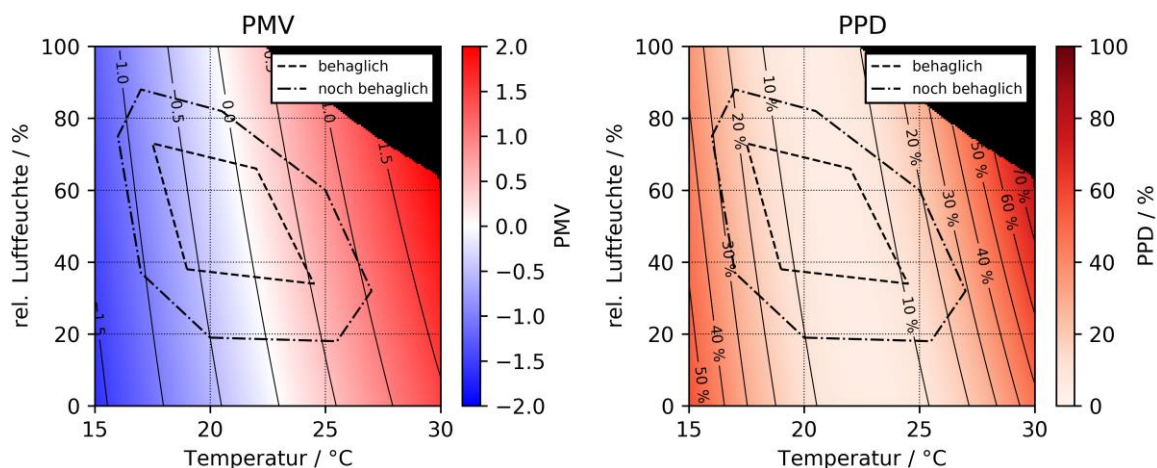


Abbildung 43 Vorausgesagtes mittleres Votum (*predicted mean vote*, PMV, linke Abbildung) sowie vorausgesagter Prozentsatz an Unzufriedenen (*predicted percentage of dissatisfied*, PPD, rechte Abbildung) berechnet nach DIN EN ISO 7730 Anhang D abhängig von Temperatur und relativer Luftfeuchte. Isolinien von PMV und PPD sind jeweils als durchgezogene Linien mit eingefügter Beschriftung dargestellt. Zum Vergleich wurde die aus dem Handbuch Bauphysik entnommenen Behaglichkeitsflächen ebenfalls als gestrichelte Linie bzw. als Punkt-Strich-Linie aufgetragen.

Neben PMV und PPD wurden zusätzlich Behaglichkeitsflächen für den Fall einer sitzenden Tätigkeit mit geringer Luftgeschwindigkeit aufgetragen, die aus dem Handbuch Bauphysik⁶ entnommen sind. Es ist leicht erkennbar, dass zwischen den Behaglichkeitsflächen und neutralen Vota des PMV bzw. geringer Unzufriedenheit im Wert des PPD eine große Überschneidung besteht. Im Gegensatz zu PMV und PPD berücksichtigen die Behaglichkeitsfläche jedoch nicht ausschließlich thermische Kriterien und deklarieren folglich auch physiologisch ungünstige zu hohe und zu niedrige Luftfeuchten als unbehaglich. Aufgrund der simplen Darstellung werden die Behaglichkeitsfläche im Folgenden weiterverwendet. Ein Abgleich mit PMV und PPD ist jedoch mittels Abbildung 43 stets möglich.

⁶ Wolfgang M. Willems, Kai Schild, Simone Dinter: *Handbuch Bauphysik Teil 1*, Vieweg, 2006

(a) Wallflore

Um die Auswirkungen der Vertikalbegrünung auf die Behaglichkeit zu ermitteln, wurden die Verläufe der Lufttemperatur-Luftfeuchte-Kurven für Messraum und Referenzraum getrennt geplottet, siehe Abbildung 44. Hierbei wurden die Zustandslinien tageweise anhand der Uhrzeit eingefärbt, um typische Entwicklungen im Tagesverlauf leicht sichtbar zu machen. Zur besseren Übersicht wurden die Zeiträume mit angeschalteter Pflanzenbeleuchtung von 9 Uhr bis 17 Uhr sowie die Nachtperiode von 19 Uhr bis 7 Uhr nochmals getrennt dargestellt. Die Daten weisen hinsichtlich der Lufttemperatur eine Streuung um bis zu 5 °C auf, was sich durch unterschiedliche starke solare Einträge je nach Witterungslage erklären lässt. Deutlich erkennbar ist die im Messraum durch das Begrünungssystem im Vergleich zum Referenzraum erhöhte relative Luftfeuchte. Aufgrund der Heizungssteuerung mit einer Solltemperatur von 22 °C und der bereits erwähnten zusätzlichen Erwärmung aufgrund von Sonneneinstrahlung liegen die Verläufe im Vergleich zur inneren Behaglichkeitsfläche bei zu hohen Temperaturen. Sehr gut erkennbar ist auch der nächtliche Anstieg der relativen Luftfeuchte im Messraum.

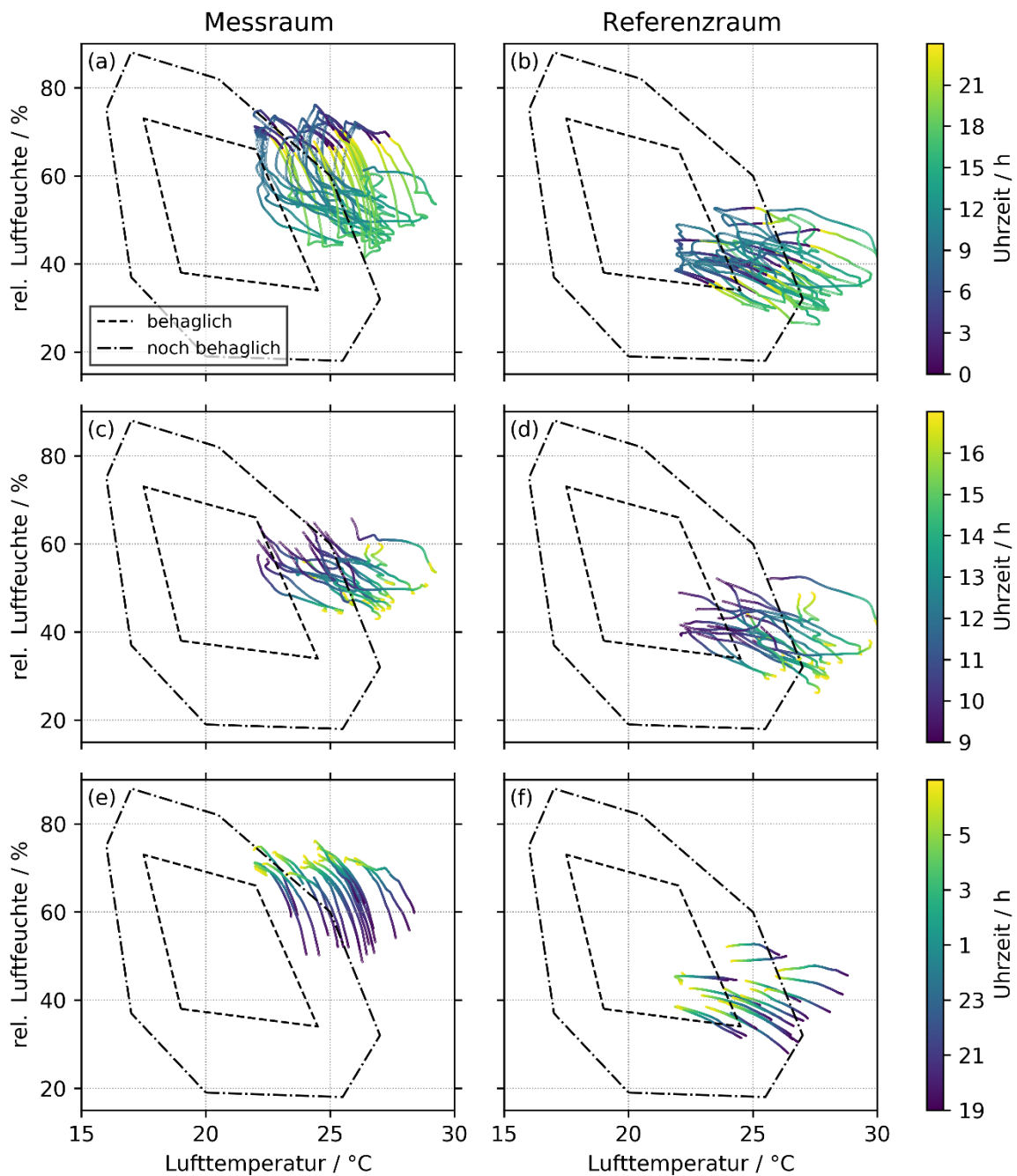


Abbildung 44: Behaglichkeit mit Vertikalbegrünung (Messraum, Grafiken (a), (c), (e)) und ohne Vertikalbegrünung (Referenzraum, Grafiken (b), (d), (f)) des Herstellers Wallflore. In (a) und (b) ist jeweils der gesamte Auswertzeitraum aufgetragen, in (c) und (d) nur der Zeitraum von 9 Uhr bis 17 Uhr, in (e) und (f) nur von 19 Uhr dargestellt bis 7 Uhr. Die dargestellte Temperatur ist der Mittelwert der Lufttemperatur-Sensoren. Der Auswertzeitraum erstreckt sich von Dienstag, den 03. Mai bis einschließlich Montag, den 21. Mai 2022. Alle Werte wurden mittels Gauß-Filter ($\sigma = 10 \text{ min}$) geglättet.

(b) Vertiko

Ein Vergleich der Behaglichkeit zwischen Messraum mit dem Vertiko-System und dem Referenzraum ist in Abbildung 45 gegeben. Aufgrund der im Auswertezeitraum geringeren Sonneneinstrahlung und niedrigeren Außentemperatur wurde der Temperatur-Sollwert von 22 °C an den meisten Tagen durchgängig gehalten. Während das Raumklima des Messraums tagsüber größtenteils im behaglichen Bereich liegt, erreicht der Referenzraum nur ein „noch behaglich“.

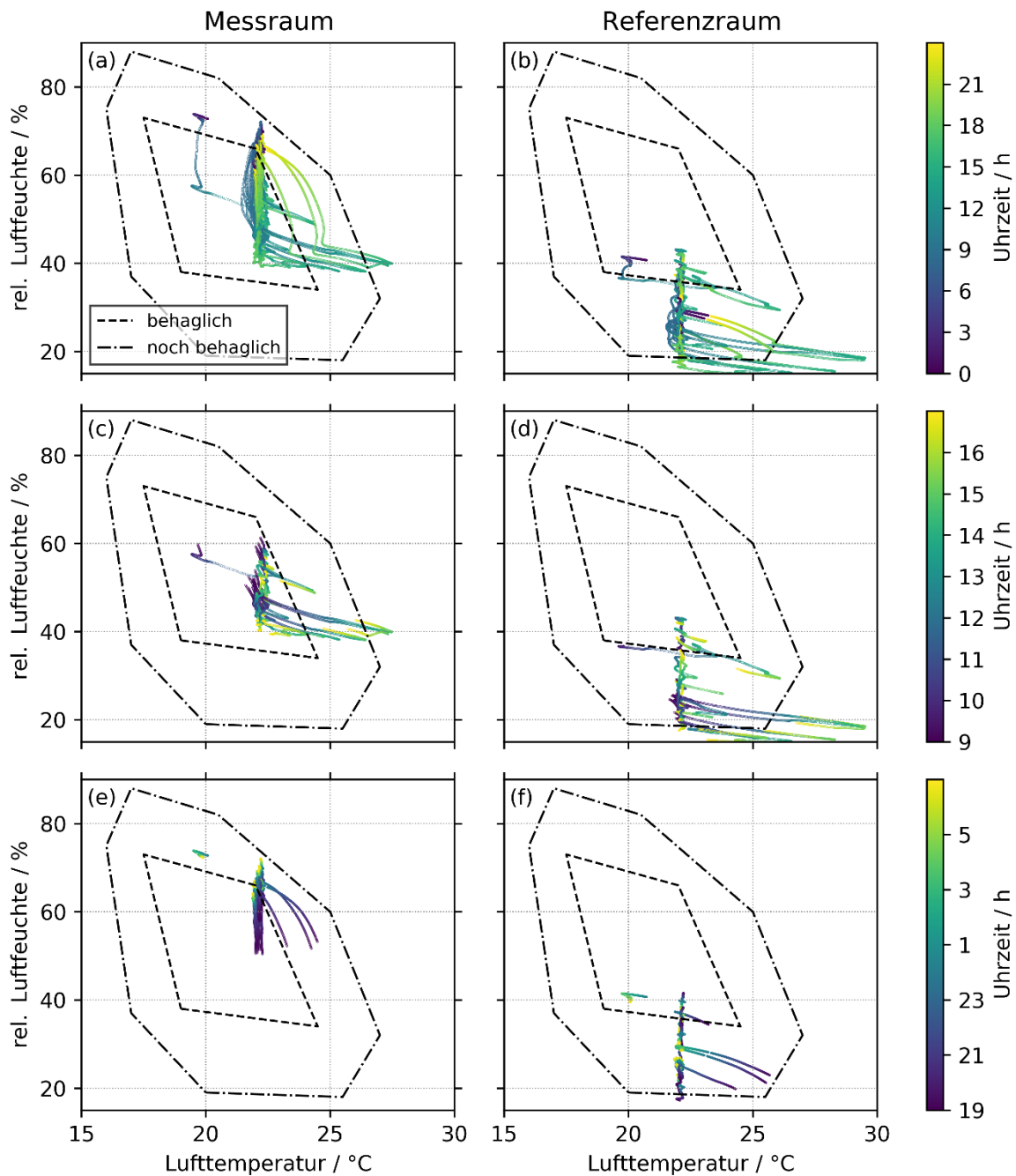


Abbildung 45: Behaglichkeit mit Vertikalbegrünung (Messraum, Grafiken (a), (c), (e)) und ohne Vertikalbegrünung (Referenzraum, Grafiken (b), (d), (f)) des Herstellers Vertiko. In (a) und (b) ist jeweils der gesamte Auswertezeitraum aufgetragen, in (c) und (d) nur der Zeitraum von 9 Uhr bis 17 Uhr, in (e) und (f) nur von 19 Uhr bis 7 Uhr. Der Auswertezeitraum erstreckt sich von Mittwoch, den 22.02.23 bis einschl. Sonntag, den 12.03.23. Alle Werte wurden mittels Gauß-Filter ($\sigma = 10 \text{ min}$) geglättet.

Bisher wurden Aussagen über die Behaglichkeit lediglich anhand der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte getroffen. Wie bereits zuvor erwähnt, fließt jedoch z.B. in die Berechnung von PMV und PPD gemäß DIN EN ISO 7730 ebenfalls die Oberflächentemperatur der Umgebung mit ein, da der im Raum befindliche Nutzer neben dem konvektiven Wärmeaustausch über die Umgebungsluft ebenso Wärme über langwellige Strahlung an die Umgebung abgibt oder von ihr aufnimmt. Der bisher angenommene Spezialfall identischer Luft- und Oberflächentemperatur ist im Allgemeinen nicht gültig. Zur Untersuchung des radiativen Wärmeaustauschs wurde je ein Globe-Thermometer in Mess- und Referenzraum installiert. Hierbei handelt es sich im Wesentlichen um einen Temperatursensor im Zentrum einer schwarz lackierten Kugel, die als idealisierte thermische Strahlungsquelle betrachtet werden kann. Die so ermittelte Globetemperatur beinhaltet dann eine konvektive und radiative Komponente.

Um die Abweichung zwischen Luft- und Globetemperatur zu ermitteln, wurden in Abbildung 46 beide Größen gegeneinander aufgetragen. Aus dem Schnittpunkt einer linearen Ausgleichsgeraden mit der Ordinatenachse kann dann die Abweichung abgelesen werden. Die Globetemperatur liegt um rund 1 °C höher als die Lufttemperatur. Es ist also davon auszugehen, dass Wände, Boden und Decke des Raumes im Mittel wärmer sind als die Raumluft. Als Abschätzung für die operative Temperatur dient im Folgenden der Mittelwert zwischen Luft- und Globetemperatur.

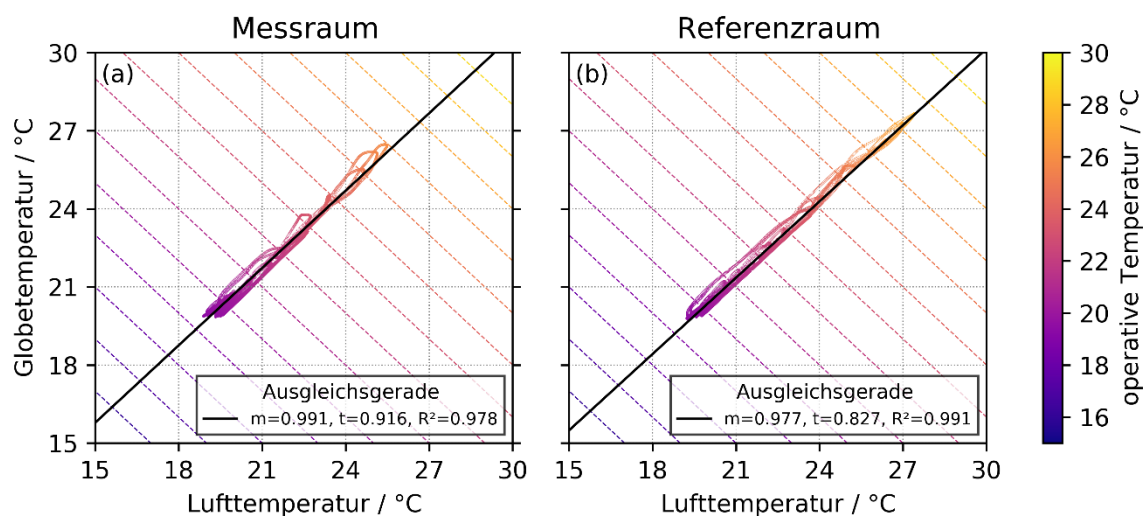


Abbildung 46: Luft- und Globe-Temperatur in Mess- und Referenzraum nach Anpassung der Heizungssteuerung. Isothermen der berechneten operativen Temperatur als arithmetisches von Luft- und Globe-Temperatur sind als gestrichelte Linien dargestellt. Der Auswertzeitraum erstreckt sich von Donnerstag, den 08.02.23 bis einschl. Dienstag, den 21.02.23. Alle Werte wurden mittels Gauß-Filter ($\sigma = 10 \text{ min}$) geglättet.

Um die auch an Tagen mit hoher Sonneneinstrahlung noch eine behagliche Temperatur im Bereich von 19 °C bis etwa 23 °C zu ermöglichen, wurde die Solltemperatur der Heizung in Mess- und Referenzraum von 22 °C Lufttemperatur auf 20 °C Globetemperatur herabgesetzt. Durch die thermische Trägheit der Räume herrscht so auch an sonnigen Tagen über weite Zeiträume eine angenehme Temperatur. Die Umstellung betrifft alle folgenden Auswertungen, vgl. Abbildung 47 und Abbildung 48.

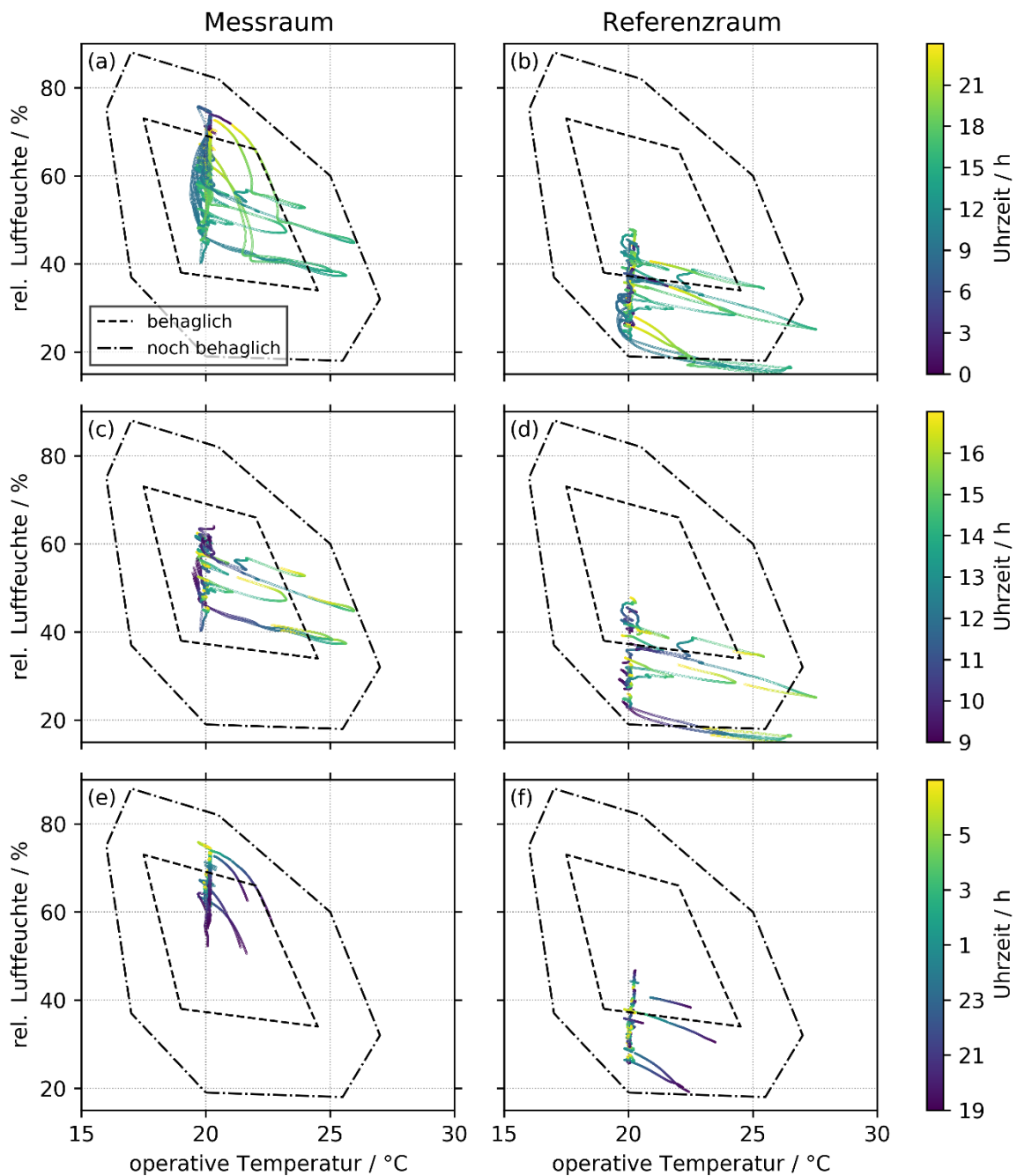


Abbildung 47: Behaglichkeit mit Vertikalbegrünung (Messraum, Grafiken (a), (c), (e)) und ohne Vertikalbegrünung (Referenzraum, Grafiken (b), (d), (f)) des Herstellers Vertiko nach Anpassung der Heizungssteuerung. In (a) und (b) ist jeweils der gesamte Auswertzeitraum aufgetragen, in (c) und (d) nur der Zeitraum von 9 Uhr bis 17 Uhr, in (e) und (f) nur von 19 Uhr bis 7 Uhr. Der Auswertzeitraum erstreckt sich von Donnerstag, den 08.02.23 bis einschl. Dienstag, den 21.02.23. Alle Werte wurden mittels Gauß-Filter ($\sigma = 10 \text{ min}$) geglättet. Die gezeigten Temperaturen sind nicht wie in Abb. 14 u. 15 Lufttemperaturen, sondern operative Temperaturen als arithmetischer Mittelwert zwischen Luft- und Globe-Temperatur.

Zur Analyse der Zustandsänderungen feuchter Gase wird in der Literatur häufig eine Darstellung in Form eines sog. Mollier-t-x-Diagramms gewählt. Hierbei wird die Lufttemperatur über der absoluten Feuchte aufgetragen. Werte der relativen Feuchte und der Enthalpie können dann als Isolinien dargestellt werden. Die bereits in Abbildung 47 (a) gezeigten Daten wurden in ein Mollier-Diagramm eingetragen, vgl. Abbildung 48.

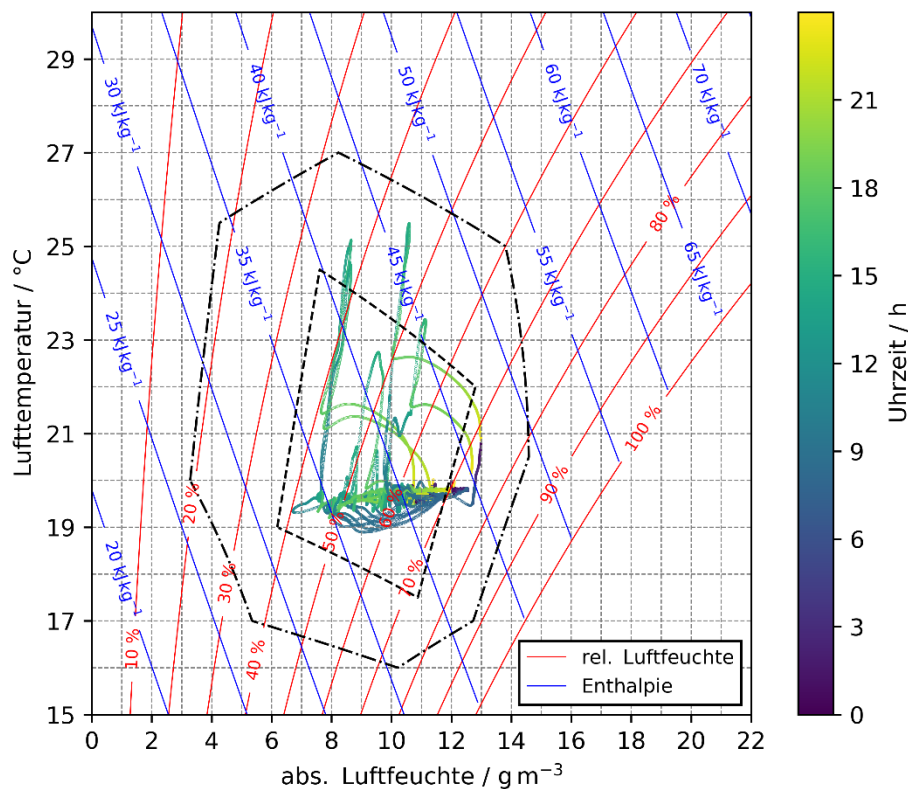


Abbildung 48: t-x-Plot des Vertiko-Systems im Messraums mit Behaglichkeitsfläche und identische gefilterten Messdaten wie in Abbildung 47. Isolinien von Enthalpie (blau) und relativer Luftfeuchte (rot) sind als durchgezogene Linien dargestellt.

Da der Raum tagsüber belüftet wird, lassen sich die Änderungen der absoluten Luftfeuchte nicht einzig der Evapotranspiration des Begrünungssystems zuordnen. Gut zu erkennen, sind jedoch die bereits in Abbildung 47 beobachteten abknickenden Kurvenverläufe nach Abschalten des Lüfters hin zu höheren Feuchten bei zunächst nahezu konstanter Temperatur. Die hierfür nötige Enthalpieerhöhung wird folglich nicht durch Abkühlung des Raums realisiert.

Zusammenfassung

Im Projekt wurden zwei Innenraumbegrünungssysteme auf ihre Verdunstungsleistung hin untersucht. Dazu wurden sowohl Messungen an den einzelnen Pflanzen im Labor als auch an begrünten Systemen in zwei Testräumen (einer mit begrünungssystem und ein baugleicher Referenzraum) durchgeführt. Beim Wallflore-System liegt die Evapotranspiration bei einer relativen Luftfeuchte von etwa 45 % und einer Lichtintensität von $90 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ tagsüber im Bereich von 80 g h^{-1} bis 120 g h^{-1} . Der Anteil des Substrats an der Gesamtverdunstung liegt bei $< 50 \%$. In dem 19 volle Tage umfassenden Auswertzeitraum konnte durch das Wallflore-System der Raumluft eine Gesamtkühlwärme von etwa 16 kWh entzogen werden. Dies entspricht im zeitlichen Mittel einer Kühlleistung von rund 35 W, wobei tagsüber kurzzeitig auch Werte bis zu knapp 80 W erzielt wurden.

Beim Vertiko-System liegt die Evapotranspiration bei einer relativen Luftfeuchte von etwa 45 % und einer Lichtintensität von $90 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ tagsüber im Bereich von 90 g h^{-1} bis 150 g h^{-1} . Der Anteil des Substrats an der Gesamtverdunstung liegt folglich meist bei $> 50 \%$ und damit trotz geringerer Pflanzenfläche höher als beim Wallflore-System. Eine Ursache hierfür kann die Evaporation über das Substrat darstellen, das im Vertiko-System aufgrund der häufigen und regelmäßigen Bewässerung nahezu durchgehend feucht gehalten wurde. Mit einer Gesamtkühlenergie von etwa 22 kWh im Auswertzeitraum liegt das Vertiko-System rund 50 % über dem Wert des Wallflore-Systems. Es ist jedoch zu beachten, dass aufgrund der deutlich verschiedenen Umweltbedingungen zwischen beiden Auswertzeiträumen (Mai bzw. Februar) eine direkte Vergleichbarkeit nur bedingt gegeben ist.

Mit einer durchschnittlichen Kühlleistung von etwa 30 W im aktiven Zustand liegt die Kühlleistung einer im Testraum zusätzlich installierten Verdunstungsfläche, bei der über einen offenen Wasserfilm zusätzlich verdunstet wird, deutlich unter den beiden untersuchten Vertikalbegrünungen. Im Gegensatz zu diesen lässt sich die Evaporation jedoch durch Ansteuerung der Zirkulationspumpe sehr einfach regeln.

Im direkten Vergleich zwischen bepflanztem Wallflore- und Vertiko-System zeigt letzteres eine etwa um den Faktor 1,5 gesteigerte Verdunstungsperformance. Der Unterschied scheint in Anbetracht der unterschiedlichen Gesamt-Oberflächen sowie der unterschiedlichen Bewässerungsstrategien plausibel. Das mehrmals täglich bewässerte Vertiko-System weist zu nahezu allen Zeiten ein feuchtes Substrat auf, während das Substrat des ca. alle 10 Tage bewässerten Wallflore-System zumindest phasenweise abtrocknen kann.

Die Verdunstungsfläche weist grundsätzlich eine deutlich geringere Verdunstung als die Vertikalbegrünungen auf, erhöht allerdings die Regelbarkeit der relativen Luftfeuchte im Raum.

Ohne Verdunstungsfläche ist eine Regelung der relativen Luftfeuchte im Raum auf etwa 50 % durch Variation der Bewässerungshäufigkeit möglich, wobei die Pflanzengesundheit hier ein limitierender Faktor ist.

Eine unkomplizierte und auf Dauer verlässliche Regelung der Luftfeuchte basierend auf den Werten von Bodenfeuchte-Sensoren hat sich jedoch aufgrund der hohen Unsicherheit der Messwerte, selbst bei Verwendung unterschiedlicher Sensoren als nicht realisierbar herausgestellt.

Beide Begrünungssysteme führen dazu das Raumklima tagsüber größtenteils im „behaglichen“ Temperatur-Feuchte-Bereich in Abbildung 47 zu halten, während der unbegrünte Referenzraum nur ein „noch behaglich“ erreicht.

Ausblick

Die Regelbarkeit der Raumklimatisierung konnte im Projekt belegt werden, aber die Abbildung in einer App oder die Anbindung an ein Smart-Home-System stehen noch aus und sollten in einem Folgeprojekt realisiert werden.

Zur Verbesserung Kalkulation der Begrünungseffekte auf die Gebäudeklimatisierung bietet sich die Entwicklung von Raumsimulationsmodellen auf Grundlage der vorhandenen Messwerte für die Befeuchtungs- und Kühlwirkung der Begrünungssysteme an, die in eine Gebäudesimulations-Software implementiert werden können. Somit könnten die Wirkungen von Begrünungssystemen in verschiedenen Gebäudeausführungen mit variablen Klimasituationen simuliert werden und somit weitere Erkenntnisse zum zielführenden Einsatz gewonnen werden.

Die vorliegenden Ergebnisse zeigten, dass die Messung der Substratfeuchte mit herkömmlichen Bodenfeuchtesensoren in den verwendeten Substraten problematisch ist. Eine Weiterentwicklung und Verbesserung der Bodenfeuchtesensoren zusammen mit einem Industriepartner ist zu prüfen.

Da die Transpirationsleistung der Pflanzen deutlich von der Lichtintensität abhängt, wäre eine Weiterentwicklung der Regelstrategie zur Optimierung der Transpirationsleistung basierend auf dem „Daily Light Integral“ ein vielversprechender Ansatz.

Das Pflegemanagement könnte durch eine innovative App vereinfacht werden, die auf die im vorliegenden Projekt gesammelten Informationen zurückgreift und die Feuchtesensoren sowie Nährlösungsparameter einbezieht. So werden Hilfestellungen für die Pflege gegeben und Störungen durch Alarmierungen frühzeitig erkannt

Der energetische und ökonomische Vorteil der Innenraumbegrünung wurde bislang nicht untersucht. Daher werden in einem weiterführenden Projekt die Quantifizierung der Energieeinsparung und eine Kosten-Nutzen-Analyse anvisiert. Zur ganzheitlichen Betrachtung wird eine Lebenszyklusanalyse (engl. Life Cycle Assessment, LCA) vorgesehen, die mittels kalkulierter oder gemessener Energieeinsparung u. a. die Senkung des Treibhauspotentials darstellt. Ziel dabei ist es, die Effizienz der Innenraumbegrünung über den gesamten Zeitraum, also „from cradle to grave“, zu bewerten und so die Akzeptanz sowie die Verwendung der Begrünung zu steigern.

Danksagung der HSWT

Fa. Ruof – Grün.Raum.Konzepte, Esslingen unterstützte uns mit der Bereitstellung des Wallflore-Systems und Fa. Günter Mohr GmbH – Mohr Hydrokultur, München mit den Pflanzen für die Photosynthesemessungen.

Wir danken Emily Lampertsdörfer für die Unterstützung bei den Versuchsarbeiten und Messungen und allen Gärtner:innen des Instituts für die Pflege der Pflanzen.

Sabine Wittmann führte uns in die Messtechnik des LCPro ein und Michael Beck stand uns bei Fragen zu Bodenfeuchtesensoren hilfreich zur Seite. Als Diskussionspartnerin war Franziska Kohlrausch gefordert.

Wir danken allen herzlich, die so zum Erfolg des Projektes beigetragen haben.

AP 4: Öffentlichkeitsarbeit

Das Projekt wird vorgestellt auf den Webseiten:

<https://forschung.hswt.de/forschungsprojekt/1695-green4indoor> und
<https://www.researchgate.net/project/Energieeffiziente-Raumklimatisierung-mit-Pflanzen-Ressourcenschonende-Konditionierung-der-Innenraumluf-durch-dezentrale-Vertikalbegruenungen-Green4indoor>

Das Projekt wurde am 10.05.2022 in Stuttgart beim BuGG Tag der Forschung und Lehre in einem Vortrag präsentiert.

Die bereitgestellten Vorträge zum BuGG-Tag der Forschung und Lehre Gebäudegrün 2022 konnten bis zum 31.07.2022 unter folgendem Link abgerufen werden:
www.gebaeudegruen.info/Vortraege-tagFuL2022

Es wurde ein gemeinsames Projektposter erstellt (auf Researchgate verfügbar: <https://www.researchgate.net/publication/356605315-green4indoor-Energieeffiziente-Raumklimatisierung-mit-Pflanzen-Ressourcenschonende-Konditionierung-der-Innenraumluf-durch-dezentrale-Vertikalbegruenungen>) und auf dem Bundeskongress Gebäudegrün 2021 des BuGG vorgestellt. Das Projekt wurde dort auch im Vortrag „Überblick zur Forschungslandschaft und Wissensstand“ von Frau Prof. Pfoser vorgestellt.

Eine Projektvorstellung ist in der Zeitschrift Gebäudegrün geplant für 2023

Die Projektergebnisse werden am 27. Juni 2023 auf dem BuGG-Weltkongress Gebäudegrün in Berlin im Rahmen eines Vortrages präsentiert werden.

BuGG Tag der Forschung und Lehre 2023, Frankfurt: geplante Vorstellung der Ergebnisse aus dem Projekt

Literatur


Chen, J.; McConnell, D.B.; Henny, R.J. ; Norman, D.J. (2005): The Foliage Plant Industry. In: Janick, J. (Ed.), Horticultural Reviews, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, S. 45 ff.

Lösch, R. (2001): Wasserhaushalt der Pflanzen. Quelle und Meyer, Wiebelsheim, S. 284 ff.

Torres, A. P. und Lopez, R. G. (2012): Measuring daily light integral in a greenhouse. (Stand: 06.06.2023) <https://www.extension.purdue.edu/extmedia/ho/ho-238-w.pdf>

Wu, J.; Fu, S.; Zheng, J.; Zhou, G. (2008): *Epipremnum aureum*: Growth and photosynthetic response to light emitting diodes. Journal of Zhejiang Forestry College, 25 /6), 739-742.

Aufgrund von Corona hatten viele fürs Projekt benötigte Materialien, Messsensoren und sogar Kleinteile erhebliche Lieferzeiten. Daher gab es bei einigen APs leichte Verzögerungen, die aber im weiteren Projektverlauf aufgeholt wurden.

Datum	Stempel und Unterschrift des Bewilligungsempfängers
06.06.2023	 A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Klaus - Peter EHA'.