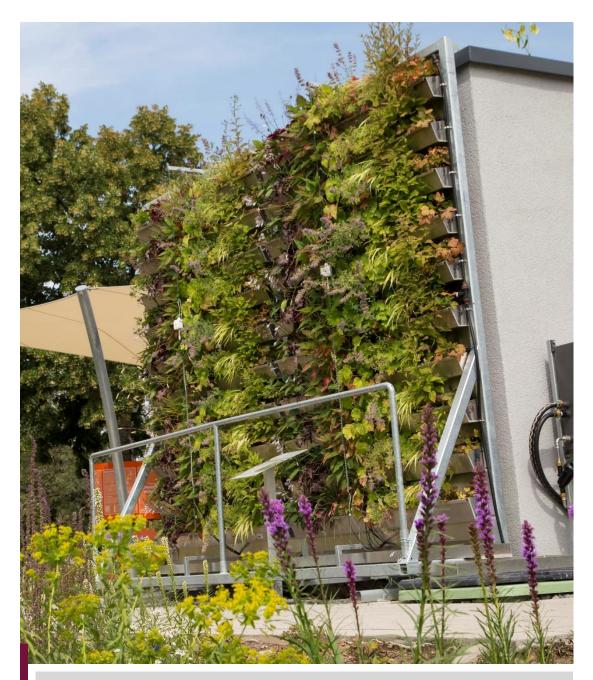


# Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau





Endbericht zum Forschungsvorhaben KL/17/04

# "Klima-Forschungs-Station"

Entwicklung und Optimierung begrünbarer Klimafassaden

Projektlaufzeit: 01.04.2017 bis 30.09.2020

Endbericht zum Forschungsvorhaben KL/17/04

# "Klima-Forschungs-Station"

Entwicklung und Optimierung begrünbarer Klimafassaden

Projektlaufzeit: 01.04.2017 bis 30.09.2020

Projektleiter: LLD Jürgen Eppel

Projektbearbeiter: VA Johanne Bohl

Veitshöchheim, September 2020

#### Zuwendungsempfänger:

Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau Institut für Stadtgrün und Landschaftsbau An der Steige 15, 97209 Veitshöchheim www.lwg.bayern.de, poststelle@lwg.bayern.de

# **INHALT**

1.	ZUSAMMENFASSUNG	7
2.	EINLEITUNG	7
3.	VERSUCHE	9
3.1.	Vorversuch Moos	9
3	.1.1. Zielsetzung	9
3	.1.2. Material und Methode	9
3	.1.3. Ergebnisse	11
3	.1.4. Diskussion und Fazit	14
3.2.	Vorversuch Lamelle	17
3	.2.1. Zielsetzung	17
3	.2.2. Material und Methode	17
3	.2.3. Ergebnisse und Diskussion	19
3.3.	Hauptversuch Klima-Forschungs-Station	23
3	.3.1. Zielsetzung	23
3	.3.2. Material und Methode	23
3	.3.3. Ergebnisse und Diskussion	27
3	.3.4. Schlussfolgerungen und Fazit	54
3.4.	Teilversuch Erdwärme	56
3	.4.1. Zielsetzung	56
	.4.2. Material und Methode	56
	.4.3. Ergebnisse	57
3	.4.4. Diskussion und Fazit	60
3.5.	Teilversuch Innenraum	61
3	.5.1. Zielsetzung	61
	.5.2. Material und Methode	62
	.5.3. Ergebnisse	63
3	.5.4. Diskussion und Fazit	64
3.6.	Teilversuch Strahlungsschutz	65
3	.6.1. Zielsetzung	65
	.6.2. Material und Methode	66
	.6.3. Ergebnisse	67
3	.6.4. Diskussion und Fazit	67
4.	ÖFFENTLICHKEITSARBEIT	69
5.	AUSBLICK: OFFENE FRAGESTELLUNGEN	69
6.	LITERATUR	71
7.	VORTRÄGE UND VERÖFFENTLICHUNGEN	72

7.1.	Vorträge	72
7.2.	Fachpublikationen	72
7.3.	Presse, Rundfunk, Fernsehen	72
ANH	IANG A – POSTERPRÄSENTATION FLL	74
ANH	IANG B – INFOFLYER "PFLANZE TRIFFT BAUWERK"	75
ANH	IANG C – ERGÄNZENDES MATERIAL LAMELLENVERSUCH	76
TABI	ELLENVERZEICHNIS	77
ABB	ILDUNGSVERZEICHNIS	77

# 1. Zusammenfassung

Vor dem Hintergrund überhitzter Städte wurden im Projekt "Klima-Forschungs-Station" die Potentiale begrünter Fassaden hinsichtlich Klimawirksamkeit und Energieeffizienz untersucht. Zwei getestete Begrünungssysteme mit standortgerechter Versuchsartenbepflanzung beeinflussten das Mikroklima im Fassadenumfeld signifikant. Auch die Größe des Abstands zwischen Begrünung und Gebäude stellte einen relevanten Einflussfaktor dar. Als besonders dauerhaft und vital erwies sich vor allem die Versuchsart *Geranium macrorrhizum* 'Czakor', während sich *Chrysogonum virginianum* leider nicht etablieren konnte. Beide Fassadenbegrünungssysteme waren zudem effizient mit passiver Erdwärmenutzung mit Hilfe von Heatpipes (ZAE Bayern) kombinierbar, wobei kein erwärmender Einfluss auf die Bepflanzung zu verzeichnen war. Die verwendete Temperatur-Sensorik wurde durch selbstentworfene Strahlungsschutzhülsen verbessert. Zusätzlich wurden im Projekt Bewässerungstests an Moosen durchgeführt sowie ein neuartiges drehbares Lamellensystem erprobt, um die bisherige Auswahl an grünen Fassadenlösungen zu verbessern und durch neue vielversprechende Ansätze zu erweitern. Dafür wurden auch im Innenraumbegrünungsbereich erste Messungen hinsichtlich Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Lichtverfügbarkeit durchgeführt.

## 2. Einleitung

Vor allem dort, wo in unseren Städten dicht gebaut und stark versiegelt wird, sind die negativen Folgewirkungen der fortschreitenden Klimaerwärmung geprägt durch Temperaturextreme, Wassermangel oder Starkregen einhergehend mit einem Verlust an Lebensräumen heute schon überproportional spürbar. Die Optimierung des Wasser- und Lufthaushaltes urbaner Räume genießt neben der Energieeffizienz in der Architektur und Stadtplanung schon jetzt oberste Priorität. Erfreulich, dass man sich in diesem Zusammenhang auch immer mehr auf Wohlfahrtswirkungen, die von Pflanzen ausgehen, rückbesinnt. Funktionales Grün in Kombination mit innovativen Fassadenmaterialien gilt auch im Hinblick auf die Förderung biologischer Vielfalt und nachhaltige Nutzung ihrer Bestandteile zu den hoffnungsvollen "grünen" Technologien. Für eine angestrebte qualitativ hochwertige Umsetzung bedarf es ganzheitlicher Konzepte, die disziplinübergreifendes Fachwissen bündeln und in Form praxisgerechter Anwendungsbeispiele Fassadenlösungen zur Optimierung energetischer, klimatischer und gestalterischer Potenziale aufzeigen.

Im Forschungsprojekt wurde anhand von Fassadenprüfständen die Leistungsfähigkeit und Wirkung von verschiedenen "grünen Klimafassaden" vergleichend untersucht. Dazu wurden zunächst unter Abstimmung bauphysikalischer und vegetationstechnischer Parameter nachhaltige grüne Klimakonzepte für eine Gebäudehülle entwickelt, die anschließend in den Prüfständen baulich realisiert wurden. Über Messungen sowohl im Bereich der Begrünung und im Hinterlüftungsspalt als auch im Gebäudeinneren in Form von konstant temperierten Messboxen konnten die Auswirkungen der Fassadenvarianten unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen von Gebäude, Bauwerksbegrünung und Gebäudeumfeld quantifiziert werden.

Durch Ausnutzung von Synergie-Effekten zwischen unbelebter (Fassadenwerkstoff) und belebter Materie (Pflanze) bieten sich Chancen für eine innovative Produktentwicklung im Sinne der Nachhaltigkeit. Das Projekt diente damit auch der Verbesserung vorhandener Begrünungslösungen, indem in einem interdisziplinären Ansatz bauphysikalische, vegetationstechnische und architektonischen Ansätze kombiniert wurden, um bei den relevanten Zielgruppen die Akzeptanz für "grüne" Klimafassaden zu steigern. Um dies zu gewährleisten, sollen die Versuchsergebnisse als "best-practice"-Beispiele Eingang in Industrie, Planung und Ausführungspraxis finden. Durch die öffentlichkeitswirksame Präsentation auf der LGS in Würzburg und den daraus erwachsenden Multiplikatoreneffekt wurde zum Abbau von Vorbehalten kritischer Verbraucher und Bauherren gegenüber "grünen" Klimafassaden und zur mittelfristigen Generierung einer Nachfragesituation beigetragen.

Verschiedene Versuchsansätze wurden für eine möglichst umfassende Bewertung kombiniert. Die Versuchsarten wurden passend zum Fassadenstandort, aber auch hinsichtlich ihres Verdunstungspotentials ausgewählt. Unterschiedliche Bewässerungsansätze wurden sowohl im Hauptversuch an den Fassadenprüfständen als auch in Nebenversuchen (Moos, Lamelle) schrittweise optimiert. Mikroklimatische Ansätze und Versuchsartenauswahl wurden mit modernen Gebäudetechnologien wie beispielsweise passiver Erdwärmenutzung kombiniert. Besonderer Dank gilt hierbei den Mitarbeitern des Bayerischen Zentrums für Angewandte Energieforschung (ZAE Bayern), welche als kompetenter Forschungspartner im Bereich Energieeffizienz fungierten. Sie stellten das Versuchsgelände zur Verfügung, ließen die Klimahäuser errichten, untersuchten neben passiver Erdwärme auch eine schaltbare Wärmedämmung, verwalteten die Sensorik inklusive Datenerhebung und trugen durch diesen vielfältigen Einsatz zum Gelingen des Forschungsvorhabens bei.

#### 3. Versuche

#### 3.1. Vorversuch Moos

#### 3.1.1. Zielsetzung

Moose sind Pflanzen ohne Stütz- und Leitgewebe, welche dazu in der Lage sind auch vertikale Flächen auf natürliche Weise zu begrünen, wenn die Umgebungsbedingungen ausreichend feucht und schattig sind. Im Bereich der Feinstaubadsorption (= Anlagerung) und vor allem auch der - absorption (= Aufnahme und Verstoffwechslung) wird Moosen ein enormes Potential beschieden (Frahm 2008). Der konkrete Nachweis dieser Feinstaubabsorption in situ (= vor Ort, nicht nur unter Laborbedingungen) steht noch aus. Es stellt sich zudem nach wie vor die Frage, ob man für Moose auch dauerhafte künstliche vertikale Standorte in Städten aufbauen kann, damit sie im Idealfall die Feinstaubbelastung vor Ort reduzieren.

Bei der künstlichen Anlage eines Moosstandorts muss für ausreichend feuchte Umgebungsbedingungen meist eine Bewässerung mit eingeplant werden. Diese darf nur bei Temperaturen unter 25°C aktiv sein, um die Pflanzenzellen nicht zu schädigen. Zudem sollte aufgefangenes Regenwasser verwendet werden, weil Leitungswasser oftmals zu viel Kalk enthält. Das Leitungswasser am Versuchsstandort Veitshöchheim ist beispielsweise durch die vorherrschenden Muschelkalk-Gesteinsschichten sehr kalkhaltig. Um die Begrünbarkeit des Lamellensystem "CityLam" (Hersteller: Fa. EuroLam) mit Moosen zu testen, wurde zunächst die Verträglichkeit zweier Laubmoos-Arten gegenüber Wasser verschiedenen Ursprungs mit unterschiedlich hohem Kalkgehalt über mehrere Monate getestet.

Hintergrund ist der potentielle Einsatz des Lamellensystems im urbanen Raum, wo meist lediglich Zugriff auf das örtliche Trinkwassernetz besteht. Der Bewässerungsversuch sollte idealerweise bei Auswahl passender Moosarten mögliche Komplikationen bei der Verwendung von lokalem Leitungswasser ausschließen. Durch die Untersuchung von Einflüssen des Bewässerungswassers unterschiedlicher Herkunft (und somit unterschiedlichen Kalkgehalts, pH-Wertes oder auch Leitfähigkeit) sollte festgestellt werden, ob sich Moose bis zu einem gewissen Grad auch gegenüber kalkhaltigerem Wasser tolerant zeigen können oder ob eine Versorgung mit Regenwasser unverzichtbar ist.

#### 3.1.2. Material und Methode

Durch den Versuchsstandort im Gewächshaus des Instituts für Stadtgrün und Landschaftsbau waren die Faktoren Lichtverfügbarkeit und Temperatur für alle Moosproben einheitlich. Zusätzlich wurde somit ein Anflug von Sämlingen vermieden. Als verschiedene Bewässerungsvarianten wurden Leitungswasser, Regenwasser und sogenanntes Mainwasser definiert (Tabelle 1). Das Mainwasser stammt aus einem Hochbehälter und setzt sich je nach Wasserverfügbarkeit aus Mainwasser und Leitungswasser zusammen. Aufgrund von Umbauarbeiten stand dieses Wasser ab dem 06.02.2018 nicht mehr zur Verfügung, sodass das später hinzugekommene Moos nur hinsichtlich Leitungs- und Regenwasser ausgewertet wurde.

Tabelle 1: Analyseergebnisse der Probenahme am 07.06.2017, nn = nicht nachweisbar, zum Gießen wurde bei der Regenwasservariante eine Mischung aus den vier beprobten Auffanggefäßen verwendet

Probe Einheit	Gesamthärte °dH	K mg/l	PO4 mg/l	NH4 mg/l	NO3 mg/l	pH-Wert 	Leitfähigkeit μS/cm
Leitungswasser VHH	23	1.00	nn	nn	23.66	8.0	849
Hochbehälterwasser (Main)	33	0.41	nn	nn	40.31	7.9	925
Regenwasser 1	15	1.19	nn	0.03	0.44	8.0	489
Regenwasser 2	12	0.81	nn	0.06	0.26	8.2	345
Regenwasser 3	17	1.35	nn	0.06	0.28	8.0	530
Regenwasser 4	12	1.78	nn	0.02	0.28	8.0	420



Abbildung 1: Versuchsbeginn mit *Racomitrium* canescens, Bewässerungsvarianten von links nach rechts: Leitung, Regen, Main (09.06.17)

Abbildung 2: Ergänzung durch *Tortella inclinata*, Versuch mit *R. canescens* läuft zu dem Zeitpunkt seit 122 Tagen (12.10.17)

Der Versuch wurde am 09.06.2017 mit der Laubmoos-Art *Racomitrium canescens* (Moosmatte, Bezugsquelle: Vertiko GmbH) begonnen (Abbildung 1). Unter die Moosmatten wurden beidseitig kaschierte Krallmatten zur Drainage verlegt. Die Bewässerung wurde einmal wöchentlich durchgeführt, möglichst früh morgens oder abends, um Zellschädigung durch zu große Hitze zu vermeiden.

Ab dem 09.10.2017 wurde neben *R. canescens* die zweite Laubmoos-Art in den Versuch einbezogen. *Tortella inclinata* (Einzelnes Moos, Bezugsquelle: Prof. W. Kircher, HS Anhalt, Bernburg) wächst auf kalkhaltigem Gestein und könnte deshalb toleranter gegenüber kalkhaltiger Bewässerung sein. Je Moosart wurden 3 Versuchsparzellen angelegt, welche jeweils gleiche Mengen unterschiedlichen Wassers (Leitungs-, Regen- und Mainwasser) erhielten (Abbildung 2).

*T. inclinata* wurde in drei Styroporboxen neben den bestehenden Versuchsparzellen aufgestellt. Kalkhaltiger Rollsplitt diente *T. inclinata* als Anwuchsuntergrund. Zudem wurde versucht, *T. inclinata* auf dem gleichen Rollsplitt-Untergrund gezielt zu vermehren. Beide Arten wurden regelmäßig

hinsichtlich Vitalität, Pflanzendichte, Bestandsstruktur (nur *R. canescens*), Weißfärbung und Braunfärbung (nur *T. inclinata*) bonitiert. Die Bestandsstruktur wurde nur für die flächige mit *R. canescens* bewachsene Moosmatte erfasst, um neben der Pflanzendichte die optische Homogenität zu erfassen und eventuelle strukturelle Veränderungen wie Lücken oder starke Verdichtungen zu dokumentieren. Die Braunfärbung trat hingegen nur bei *T. inclinata* auf.

Am 06.02.2018 wurden die Moosmatten mit *R. canescens* nach einer Abschlussbonitur aus dem Versuch genommen und vorübergehend mit Staunässe ohne Differenzierung der Wasserherkunft bewässert. Bei *T. inclinata* wurde die Bewässerung mit Mainwasser eingestellt. Die Pflanzen wurden anschließend mit Regenwasser weiterbewässert, sodass bei dieser Moosart die differenzierte Auswertung lediglich zwischen Regen- und Leitungswasser erfolgte.

# 3.1.3. Ergebnisse

#### 3.1.3.1. Racomitrium canescens

Schon nach zwei Wochen waren bei *R. canescens* erste Verfärbungen erkennbar. Zum einen änderte sich der zu Beginn frische Grünton in Richtung dunkelgrün/braun, zum anderen waren erste weißliche Verfärbungen auf Teilflächen erkennbar (Abbildung 3). Nach vier Wochen verstärkte sich die Weißfärbung zusehends, vor allem in den Varianten Leitungswasser und – etwas schwächer – Mainwasser (Abbildung 4). Die weißen Verfärbungen führten gleichzeitig zu einer Verhärtung des Pflanzenmaterials (Abbildung 5)



Abbildung 3: v.l.n.r. Leitung, Regen, Main; Weißfärbung von Teilflächen nach zwei Wochen (27.06.17)



Abbildung 4: v.l.n.r. Leitung, Regen, Main; Weißfärbung von Teilflächen nach vier Wochen (14.07.17)



Abbildung 5: Nahaufnahme der Mainwasservariante nach sechs Wochen (28.07.17)

Vier Monate nach Versuchsbeginn zeigten sich meist klare Unterschiede in Vitalität und Weißfärbung, die vor allem vor der Bewässerung in kurzen Trockenphasen sichtbar wurden (Abbildung 6). Im Vergleich zum neu integrierten Moos *T. inclinata* fiel deutlich auf, dass *R. canescens* seine vitale Grünfärbung komplett verloren hatte (Abbildung 7).





Abbildung 6: v.l.n.r. Leitung, Regen, Main; vier Monate nach Versuchsbeginn (26.10.17)

Abbildung 7: v.l.n.r. Leitung, Regen, Main; unten *R. canescens*, oben *T. inclinata* (02.11.17)

Hinsichtlich der Vitalität erzielte die Variante Regenwasser die besten Bewertungen, dicht gefolgt von der Variante Mainwasser. Die Variante Leitungswasser war hingegen etwas abgeschlagen. Pflanzendichte und Bestandsstruktur zeigten damit einhergehend ein ähnliches Ergebnis. Die Weißfärbung trat am stärksten beim Leitungswasser auf, etwas weniger stark beim Mainwasser und am wenigsten beim Regenwasser. Auffällig war, dass sich die Weißfärbung nach einem halben Versuchsjahr in den Wintermonaten wieder deutlich verringert hatte (Abbildung 8).

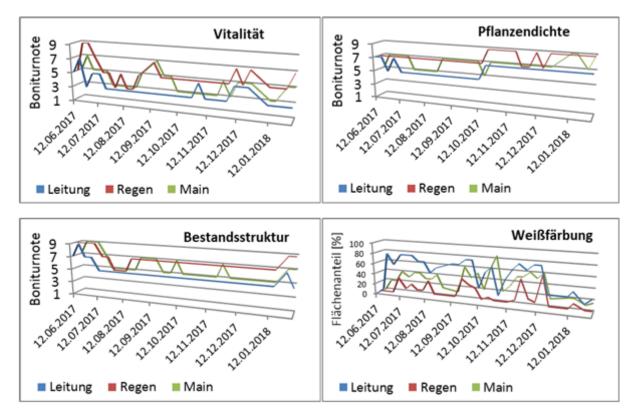


Abbildung 8: Vitalität, Bestandsstruktur, Pflanzendichte und Weißfärbung von *R. canescens* bei der Bewässerung mit Leitungs-, Regen- und Mainwasser, Boniturnoten von 9 = sehr gut bis 1 = ungenügend

#### 3.1.3.2. Tortella inclinata

Zu Versuchsbeginn wirkte *T. inclinata* frisch und vital mit kräftigem Grünton. Um die Vermehrung auf Rollsplit zu testen, wurde es in kleinere Einheiten aufgeteilt (Abbildung 9). Nach knapp zwei Wochen waren bei *T. inclinata* noch keine Verfärbungen zu erkennen (Abbildung 10). Nach und nach trat bei allen drei Varianten eine Braunfärbung auf. Das Grün wurde weniger intensiv. Auch Weißfärbung trat auf. Allerdings mit weniger starker Verkrustung als bei *R. canescens*, sondern eher als eine Art feiner Film (Abbildung 11).



Abbildung 9: Aufteilung von T. inclinata in kleinere Einheiten zum Wachstums- und Vermehrungstest (12.10.17)



Abbildung 10: Leitungswasser-Variante, *T. inclinata* behielt insgesamt länger eine frische, vitale Färbung bei als *R. canescens* (19.10.17)



Abbildung 11: Mainwasser-Variante nach drei Monaten, dunkleres Grün, feine Weißfärbung und leichte Braunfärbung an Rändern (09.01.18)

Verhärtungserscheinungen wurden erst deutlich später, im Sommer, festgestellt. Es entstanden feste, blasenartige, hellbraune Verkrustungen an den Rändern. Zudem war die Moosfarbe im Sommer den Temperaturen entsprechend eher bräunlich (Abbildung 12). Die Vermehrung von *T. inclinata* auf Rollsplit funktionierte, wenn auch langsam. In den folgenden Abbildungen kann man erkennen, wie die Lücken zwischen den ursprünglich einzelnen Mooseinheiten teilweise schon komplett zugewachsen sind. Farblich macht das Moos im Spätsommer wieder einen deutlich besseren Eindruck als noch Ende Juli (Abbildung 13).



Abbildung 12: Vermehrung neun Monate nach Versuchsbeginn, braune Verkrustungen an den Rändern (26.07.18)



Abbildung 13: Vermehrung elf Monate nach Versuchsbeginn, Färbung wird wieder frischgrün (20.09.18)

Bei *T. inclinata* wurden in der Auswertung nur die Varianten Leitungs- und Regenwasser gegenübergestellt, ohne die "Zwischenvariante" Mainwasser. Die Vitalität war in beiden Varianten nahezu gleich, teilweise etwas schlechter beim Regenwasser. Die Pflanzendichte blieb über den Versuchszeitraum gleich und lag bei der Leitungsvariante von Beginn an etwas höher, was dem Versuchsaufbau geschuldet war. Die Braun- und Weißfärbungen sind insgesamt nur sehr wenig aufgetreten, dabei aber häufiger beim Regen- als beim Leitungswasser (Abbildung 14).

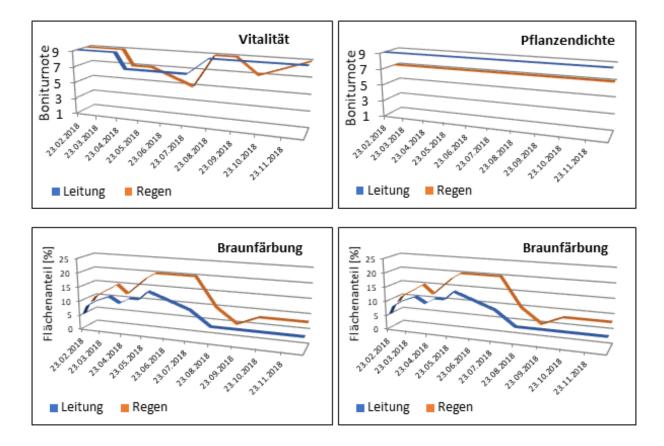


Abbildung 14: Vitalität, Braunfärbung, Pflanzendichte und Weißfärbung von *T. inclinata* bei der Bewässerung mit Leitungs- und Regenwasser, Boniturnoten von 9 = sehr gut bis 1 = ungenügend

#### 3.1.4. Diskussion und Fazit

#### 3.1.4.1. Racomitrium canescens

R. canescens hat schon nach zwei Wochen seine frische grüne Färbung verloren, welche im Laufe des Versuchs nie wieder erreicht wurde. Die weißen Verfärbungen sind höchstwahrscheinlich auf Kalkabscheidungen zurückzuführen. Dafür spricht die Verhärtung der weißen Stellen, vermutlich durch ausgefällten Kalk. Zudem traten die Weißfärbungen tendenziell stärker auf, je höher der Kalkgehalt in der genutzten Bewässerungsvariante war. Dass manchmal nur Teilflächen betroffen waren, lässt sich vermutlich auf nicht ganz gleichmäßige Bewässerungsbewegungen zurückführen.

Dabei wird dann in einem Abschnitt zwischenzeitlich wieder mehr Kalk gelöst als in einem anderen. Betrachtet man die Vitalität, Pflanzendichte und Bestandsstruktur, erzielte die Variante Regenwasser die besten Ergebnisse, gefolgt vom Mainwasser. Diese Ergebnisse bestätigen die These, dass Regenwasser sich am besten zur Moosbewässerung eignet. Nichtsdestotrotz traten die Weißfärbung und Verhärtungen auch in der Regenwasservariante auf. *R. canescens* erschien während des Versuchs nicht vital genug, um feine Staubteilchen verstoffwechseln zu können. Für den Einsatz im Freien erscheint eine Verschattung notwendig. In der Vertikalen könnte eine Bewässerungsverteilung durch feine Sprühdüsen realisiert werden, die durch Aufsätze vor Verwirbelungen geschützt werden können, damit die Feuchtigkeit auch direkt beim Moos ankommt. Solche Aufsätze wurden zum Beispiel in einem Versuchsaufbau am Neckartor in Stuttgart verwendet, um den Luftverwirbelungen infolge des Straßenverkehrs entgegenzuwirken.

#### 3.1.4.2. Tortella inclinata

T. inclinata hat sein frisches Grün erst später im Versuchsverlauf, vor allem während der Sommermonate, verloren. Im Herbst ist allerdings wieder eine vitale Färbung eingetreten. Insgesamt schien die Moosart mit den Bedingungen am Versuchsstandort besser zurechtzukommen als R. canescens. Es wurde allerdings auch zu einer anderen Jahreszeit mit dem Teilversuch begonnen (Oktober statt Juni). Die Vermehrung auf Rollsplit hat – wenn auch sehr langsam – funktioniert. Erste punktuelle Verfärbungen traten später auf, zuerst in Form von kleinen braunen Abschnitten, die vertrocknet aussahen. Die Weißfärbung trat schleierartig auf. Bei den im Sommer auftretenden braunen, blasenartigen Ablagerungen handelt es sich vermutlich ebenfalls um Kalkablagerungen. Sie hatten eine verhärtete Struktur und traten v.a. an Randbereichen auf. Die weißen Flecken sind nur sehr klein geblieben. Über einen längeren Zeitraum verglichen, schnitt überraschenderweise die Leitungswasservariante etwas besser ab als die Regenwasservariante. Das Moos war etwas vitaler und sowohl Braun- als auch Weißfärbungen traten seltener auf. Dies lässt vermuten, dass T. inclinata nicht unbedingt auf eine Bewässerung mit kalkarmem Regenwasser angewiesen ist. Da es natürlicherweise auf kalkhaltigem Untergrund wächst, hat es eventuell Mechanismen entwickelt, besser mit hohen Kalkgehalten zurechtzukommen als andere Arten wie z.B. R. canescens. Die Pflanzendichte blieb über einen längeren Zeitraum gleich. Der Unterschied zwischen den Varianten ist nur auf den Versuchsaufbau zu Beginn zurückzuführen.

#### 3.1.4.3. Schlussfolgerungen und weiterer Forschungsbedarf

Die künstliche Bewässerung wirkt dem natürlichen Vorgang der Dormanz entgegen, wobei sich die Moose unter widrigen Umständen in eine Art Schlafmodus zurückziehen. Zu dieser Zeit können die Moose optisch wie abgestorben wirken. Sie sind aber in der Lage sich zu regenerieren, wenn die äußeren Umstände wieder günstiger für sie werden, vor allem hinsichtlich der Wasserversorgung. Indem man künstlich bewässert, werden die Moose also in Zeiten der Dormanz in einem aktiven Modus gehalten. Deshalb sollte man die Moose bei starker Einstrahlung z.B. durch Verschattungsnetze schützen.

Die Kalkablagerungen kamen bei allen Bewässerungsvarianten vor. Für den Einsatz in künstlichen Begrünungssystemen in der Vertikalen ist es entscheidend, dass die Moose nicht nur überleben, sondern auch wirklich vital sind und ein attraktives Erscheinungsbild zeigen. Gestresste Pflanzen können die Moosen zugeschriebene Verstoffwechslung von Feinstäuben sicher nicht so effektiv ausüben wie gesunde Pflanzen. Zum Beispiel in der Vertikalbegrünung könnte sich ein Ansatz mit Ansiedelungshilfe eher bewähren als eine Mattenlösung, da sich die Pflanzen von Beginn an auf die Bedingungen am Standort einstellen können, wohingegen unter Idealbedingungen vorgezogene Matten stressigen Bedingungen oft nicht standhalten können. In diese Richtung bewegt sich beispielsweise das "BryoSYSTEM" des Anbieters Artificial Ecosystems GmbH. In jedem Fall ist beim Einsatz von Moosen in künstlich angelegten Begrünungen ausreichende Beschattung und Feuchtigkeit essentiell wichtig. Moose haben zudem ein großes Wasserrückhaltevermögen, was sie für Planungen im urbanen Raum zusätzlich interessant macht (Ingold 2018).

#### 3.2. Vorversuch Lamelle

#### 3.2.1. Zielsetzung

Das drehbare Lamellensystem "CityLam" des Herstellers EuroLam GmbH sollte begrünt werden, um als Bauwerksbegrünungvariante in der Stadt die bekannten Wohlfahrtswirkungen zu entfalten (Kühlung durch Verdunstung, Reduzierung von Luftschadstoffen etc.). Durch die Komponente der drehbaren Lamellen kann das System auch vor Fensterflächen als begrünbarer Sonnenschutz angebracht werden. Die stufenlose Verstellbarkeit der Lamellen von waagrecht (0°) bis senkrecht (90°) stellt eine Herausforderung bei Pflanzenverwendung und Bewässerung dar. Aufgrund der Ergebnisse aus dem Vorversuch zum Thema Moose (siehe Kapitel 3.1.) wurde von einer Verwendung von Moosmatten zunächst abgesehen, da sowohl eine genügende Verschattung als auch eine gleichmäßige Bewässerung noch nicht gewährleistet werden konnte. Die Praxistauglichkeit des Lamellensystems sollte dennoch untersucht werden, indem an der LWG in dieser ersten Projektphase möglichst einfache und trotzdem optisch ansprechende Lamellenaufbauten mit Substratersatzstoffen in Form von Festkörperspeichermaterialien getestet wurden. Parallel dazu wurden in einem Ringversuch an der LVG Erfurt und an der HS Anhalt alternative Aufbauten untersucht.

#### 3.2.2. Material und Methode

Zwei CityLam-Elemente mit jeweils sechs Lamellen (190cm x 30cm, Höhe 6cm) wurde im Gewächshaus des Instituts für Stadtgrün und Landschaftsbau (ISL) aufgebaut. Durch einen Vorversuch zum Wasserverbrauch wurde die Wasserverteilung innerhalb und zwischen den Lamellen möglichst gleichmäßig eingestellt. Die Lamellen wurden mit Krallmatten zur Drainage bestückt und anschließend mit den drei Substratersatzstoffen Steinwolle, Polyurethanschaum (PU-Schaum) und Schafwoll-Kokos-Gemisch ausgelegt (Abbildung 15). Von den insgesamt zwölf Lamellen wurden daraufhin sechs mit Sedumvegetationsmatten (Tabelle 2) bestückt, während in den übrigen Lamellen niedrige Ansaaten (Tabelle 3) mit Sedumsprossen (Tabelle 4) in zwei verschiedenen Mischungsverhältnissen getestet wurden. Darüber wurde ein Gitter mit der Maschenweite von 5,5 cm installiert, um die Stabilität der Substratersatzstoffe und Matten bei der Drehung zu gewährleisten (Abbildung 17).



Abbildung 15: Einbau der Speichermedien Steinwolle (beige), PU-Schaum (rosa) und Schafwoll-Kokos-Matte



Abbildung 16: Beleuchtung mit Natriumdampflampen

(braun) (17.11.17)

(17.01.18)

Tabelle 2: Die sechs Sedumsvegetationsmatten wurden zu unterschiedlichen Jahreszeiten geliefert und wiesen dadurch eine ungleiche Artzusammensetzung auf; Bezugsquelle Rollrasen Müller GmbH; die jeweils drei artenarmen (A) und artenreichen (B) Matten wurden entsprechend in verschiedenen Lamellen mit allen drei Substratersatzstoffen kombiniert

Art	Artenarme Mattenvariante A	Artenreiche Mattenvariante B
Sedum album in Sorten	Х	Х
Sedum kamtschaticum	X	Х
Sedum reflexum	X	X
Sedum spurium	X	Х
Sedum hispanicum	X	Х
Sedum acre	Х	Х

Tabelle 3: In der Ansaat/Sedum-Variante verwendete Ansaatarten mit spezifischem Tausendkorngewicht (TKG) und Anteil am Gesamtgewicht; Bezugsquelle Rieger-Hofmann GmbH; dieses Saatgut wurde in Kombination mit Sedumsprossen verwendet; Variante 1: 0,5g/m² Keimlinge, 90g/m² Sprossen; Variante 2: 1g/m² Keimlinge, 45g/m² Sprossen

Art	TKG [g]	Anteil [%]
Bellis perennis	0,1	15
Calendula arvensis	9	35
Campanula rotundifolia	0,06	5
Euphorbia cyparissias	2,2	5
Petrorhagia saxifraga	0,16	12
Prunella grandiflora	0,75	13
Thymus pulegioides	0,15	15

Tabelle 4: In der Ansaat/Sedum-Variante verwendete Sedumarten, Bezugsquelle Hofstetter Mühle GmbH, Arten des Rot-Rosa-Mix (RR) sind definitiv enthalten, während Arten im Bunt-Mix (B) jahreszeitlich variieren

Art	Mix
Sedum spurium in Sorten	RR & B
Sedum cyaneum	RR
Sedum album murale	RR
Sedum ewersii	RR & B
Sedum sexangulare	В
Sedum kamtschatikum	В
Sedum album in Sorten	В
Sedum floriferum	В
Sedum hispanicum	В
Sedum hypridum	В
Sedum reflexum	В

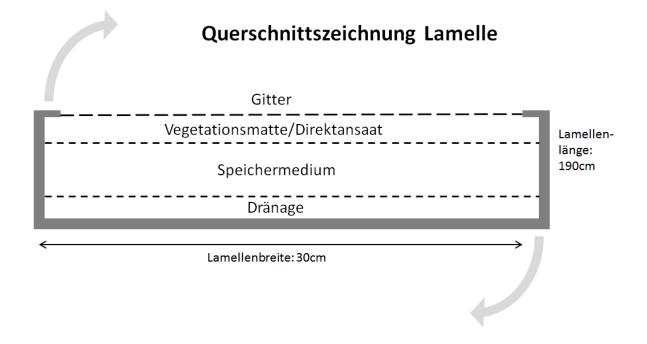


Abbildung 17: Querschnittszeichnung eines Lamellenbepflanzungsaufbaus

Nach anfänglich manueller Bewässerung zur Etablierung der Ansaatvarianten (mit einer dauerhaften Horizontalstellung der Lamellen) wurde nach 20 Tagen auf die automatische Bewässerung des Lamellensystems umgestellt und ein- bis zweimal täglich für eine Minute bewässert, was einem Wert von ca. 2 l/m² entsprach. Ab diesem Tag wurden die Systeme auch täglich in die Vertikale gedreht. Da die Versuchszeit größtenteils in die Wintermonate fiel, wurde mit Hilfe von Natriumdampflampen künstlich beleuchtet und somit ein Tag von zwölf Stunden simuliert (Abbildung 16).

Die Entwicklung der Pflanzen wurde wöchentlich in Form einer Bonitur dokumentiert. Bei den Ansaaten wurden hierbei die maximale Anzahl an Keimlingen pro Gitterzelle sowie der Deckungsgrad von Keimlingen und Sedumsprossen in je vier Parzellen pro Lamelle bestimmt. Die Matten wurden bezüglich ihrer Deckung und ihres Wachstums bewertet. Zudem wurden Auffälligkeiten an einzelnen Lamellen dokumentiert und die Eindrücke fotografisch festgehalten.

### 3.2.3. Ergebnisse und Diskussion

Bei den Ansaatvarianten hat sich gezeigt, dass ein Mischverhältnis mit erhöhter Samenzahl der Keimlinge gegenüber den beigemischten Sedumsprossen (Abbildung 21) zu einem besseren Gesamtergebnis führen kann als das umgekehrte Verhältnis (Abbildung 20). Steinwolle eignete sich hierbei am besten als Substratersatzstoff, da sie in der Lage ist ein großes Wasservolumen zu halten und bei Bedarf entsprechend an die Pflanze abzugeben. Dabei funktioniert die Wasserverteilung auch bei unterschiedlichen Lamellenstellungen sehr gut, sodass zwar am vorderen Rand der Lamelle Staunässe auftritt, die Steinwolle jedoch auch im hinteren Bereich gut durchfeuchtet ist (Abbildung

18; erste Lamelle von oben, Abbildung 19 dritte Lamelle von oben). Dies konnte bei den beiden Festkörpermaterialien PU-Schaum und Schafwoll-Kokos-Gemisch in Verbindung mit Ansaatmischungen nicht festgestellt werden. Während der PU-Schaum in der Vertikalen zu stark dränierte, wurde beim Schafwoll-Kokos-Gemisch das Keimlingswachstum gehemmt und eine leichte Schimmelbildung im unbelüfteten Bereich festgestellt.

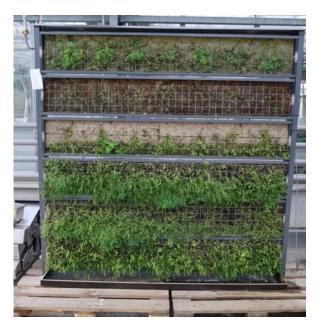


Abbildung 18: linkes System v.o.n.u.: Stein + Ansaat, Schaf-Kokos + Ansaat, PU + Ansaat, Stein + Matte, Schaf-Kokos + Matte, PU + Matte (18.01.18)



Abbildung 19: rechtes System v.o.n.u.: Schaf-Kokos + Matte, PU + Ansaat, Stein + Ansaat, Schaf-Kokos + Ansaat, PU + Matte, Stein + Matte (18.01.18)

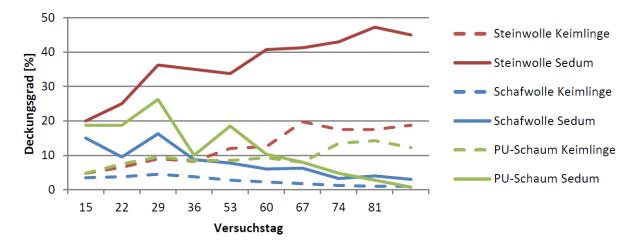


Abbildung 20: Deckungsgrad in den Lamellen mit der Ansaat/Sedum-Bepflanzungsvariante unter Verwendung von 0,5 g/m² Ansaat und 90 g/m² Sedumsprossen; die Flächenanteile wurden nach Saatgut-Keimlingen und Sedumsprossen differenziert in Kombination mit den drei verschiedenen Speichermaterialien Steinwolle, Schafwolle-Kokos und PU-Schaum erfasst

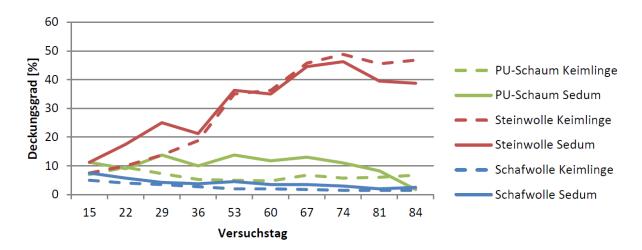


Abbildung 21: Deckungsgrad in den Lamellen mit der Ansaat/Sedum-Bepflanzungsvariante unter Verwendung von 1 g/m² Ansaat und 45 g/m² Sedumsprossen; die Flächenanteile wurden nach Saatgut-Keimlingen und Sedumsprossen differenziert in Kombination mit den drei verschiedenen Speichermaterialien Steinwolle, Schafwolle-Kokos und PU-Schaum erfasst

Bei den Matten stellten sich eine hohe Sedumartenvielfalt (Abbildung 23) und eine gute Lichtversorgung (also eine höhere Lage im System) als vorteilhaft heraus. Eine zu starke Bewässerung muss unbedingt vermieden werden, damit die Wurzeln der trockenheitsangepassten Sedumarten nicht zu faulen beginnen. Im Gewächshaus sind zudem Spinnmilben aufgetreten. Eine vergleichbare Untersuchung im Außenbereich wäre deshalb interessant. Steinwolle und PU-Schaum eignen sich als Unterlage für die Vegetationsmatten. Der dränierende Effekt des PU-Schaums fällt hier nicht negativ ins Gewicht, da die Matte selbst eine gewisse Menge Wasser speichern kann. Beim Schafwoll-Kokos-Gemisch kam es wegen mangelnder Belüftung zu stärkerer Schimmelbildung.

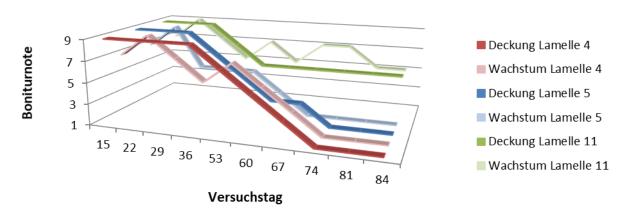


Abbildung 22: Deckungsgrad und Wachstum der artenärmeren Sedum-Vegetationsmatten (Variante A, vgl. Tabelle 2) in Kombination mit den drei Speichermaterialien Steinwolle (rot, Lamelle 4), Schafwoll-Kokos (blau, Lamelle 5) und PU-Schaum (grün, Lamelle 11); Boniturnoten von 9 = sehr gut bis 1 = ungenügend

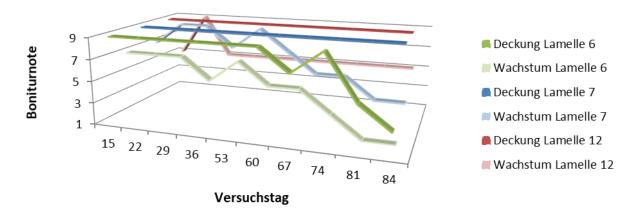


Abbildung 23: Deckungsgrad und Wachstum der artenreicheren Sedum-Vegetationsmatten (Variante B, vgl. Tabelle 2) in Kombination mit den drei Speichermaterialien Steinwolle (rot, Lamelle 12), Schafwoll-Kokos (blau, Lamelle 7) und PU-Schaum (grün, Lamelle 6); Boniturnoten von 9 = sehr gut bis 1 = ungenügend

Letztendlich hat der Versuch am neuartigen Lamellensystem CityLam ergeben, dass bei den Ansaat/Sedumvarianten Steinwolle aufgrund ihrer guten Wasserverteilung die beste Variante darstellte. Als Unterlage für Sedumvegetationsmatten waren Steinwolle und PU-Schaum vergleichbar geeignet. Abhängig vom Aufbau der Bewässerung und Bedarf der unterliegenden Pflanzen kann jedoch PU-Schaum tendenziell die bessere Lösung darstellen. Die enorme Speicherfähigkeit von Steinwolle ist bei Mattenlösungen mit eigener zusätzlicher Speicherkapazität nicht unbedingt nötig und kann eher dazu führen, dass unterliegende Lamellen bei einem Kaskadensystem keine ausreichende Wassermenge erhalten. Aus den Blickwinkeln der Ökologie und Nachhaltigkeit sind diese Ergebnisse nicht ideal, weshalb auf hochwertige Produkte mit Wiederverwertungsoption und ohne Gesundheitsgefahren gesetzt oder weitere Alternativstoffe zu Steinwolle und PU-Schaum gefunden werden sollten.

Zusätzliche Hintergrundinformationen zum Lamellen-Versuch hinsichtlich der Bewässerungsverteilung, des Wasserspeichervermögens der Substratersatzstoffe und der Lichtverfügbarkeit in den einzelnen Lamellen werden in Anhang C bereitgestellt.

#### 3.3. Hauptversuch Klima-Forschungs-Station

#### 3.3.1. Zielsetzung

Im urbanen Raum werden durch die starke Verdichtung und Versiegelung von Oberflächen vor allem im Sommer deutlich höhere Temperaturen gemessen als im Umland. Hitzewellen werden zukünftig durch den Klimawandel noch häufiger auftreten. Durch die Entsiegelung von Flächen und die Rückführung zu einem möglichst ursprünglichen, naturnahen Wasserhaushalt mit Wasserspeicherund Verdunstungsoptionen in Kombination mit Pflanzen können derartige städtische Hitzeinseln abgemildert werden.

Im Bereich von Fassadenbegrünungen spielen im Sommer vor allem Verschattungs- und Verdunstungsprozesse eine Rolle, indem sie Gebäude und ihre unmittelbare Umgebung kühlen. Auch im Winter hat Gebäudebegrünung durch erhöhte Dämmwirkung und Schutz vor Witterungseinflüssen einen positiven Einfluss auf Bauwerke (Pfoser et al. 2014, FLL 2018).

Um klimatische, energetische und gestalterische Potentiale von wandgebundenen Fassadenbegrünungen aufzuzeigen, wurden vergleichende Untersuchungen an eigens errichteten Klimahäusern durchgeführt. Dafür wurden zunächst unter Abstimmung bauphysikalischer und vegetationstechnischer Parameter nachhaltige grüne Klimakonzepte für eine Gebäudehülle entwickelt, die anschließend in Fassadenprüfständen baulich realisiert wurden. Über Messungen im Fassadenumfeld wurden die Fassadenvarianten unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen von Gebäude, Bauwerksbegrünung und Gebäudeumfeld analysiert und schrittweise optimiert.

#### 3.3.2. Material und Methode

Es wurden zwei Messhäuser (= "Klimahäuser", Abbildung 24) errichtet, wovon jeweils eine Fassade zweigeteilt als Fassadenprüfstandstand dient. Eines der Klimahäuser ist mit bodenwärmefördernden Heatpipes ausgestattet, sowohl im Innenraum als auch an der linken Seite der untersuchten Fassade. Diese Fassade ist westexponiert. Der Fassadenprüfstand am zweiten Messhaus liegt an der südexponierten Fassade. Hier ist auf der rechten Seite der untersuchten Fassade eine schaltbare Wärmedämmung in das Versuchsdesign integriert. Alle vier Fassadenprüfstände werden durch eine automatische Tropfbewässerung inklusive Rücklauf und Frischwassernachspeisung sowie Düngerzugabe versorgt. Der jeweilige Verbrauch wird für jeden Versuchsstand einzeln erfasst.





Abbildung 24: Beide Klimahäuser auf einer schematischen Skizze (links) und auf einem Luftbild vom August 2018 (rechts, Bildquelle ZAE Bayern); die Klimahäuser werden nach der Ausrichtung ihrer zugehörigen Fassadenprüfstände als Klimahaus Süd und Klimahaus West bezeichnet

An den Fassadenprüfständen werden folgende Faktoren im Verhältnis zueinander untersucht: Begrünungssystem, energetisches Bauteil, Abstand zwischen Fassade und Begrünung, Pflanzenarten und Exposition (Süd/West):

#### 3.3.2.1. Faktor A: Begrünungssystem:

Regalförmiges Rinnensystem (Grünwand Klimafassade, Wien, Ansprechpartner Sascha Haas), insgesamt 40 Rinnen ("1-40")

Flächiges Vliessystem (Vertiko GmbH, Kirchzarten, Ansprechpartner Stefan Brandhorst), insgesamt 24 Paneele ("41-64")

Die Begrünungssysteme (Tabelle 5) werden in eine eigens konzipierte Unterkonstruktion eingehängt und sind somit auswechselbar. Beide Begrünungssysteme wurden mit denselben Arten standortgerecht begrünt (s. Faktor D) und je nach aktueller Versuchsfrage in die Fassadenprüfstände eingehängt (Abbildung 25).

#### 3.3.2.2. Faktor B: Energetisches Bauteil

Klimahaus West: gesamter Versuchsstand mit konventioneller Dämmung (16cm), auf linker Seite zwei Heatpipes im Spalt zwischen Gebäude und Begrünung

Klimahaus Süd: linke Fassadenhälfte konventionell gedämmt (16cm), rechte Fassadenhälfte mit einem zentral in der Wandhälfte eingebauten Vakuumisolationspaneel zur schaltbaren Wärmedämmung

Tabelle 5: Eigenschaften der im Versuch verwendeten Begrünungssysteme

Hersteller	Vertiko GmbH	Tech Metall Erzeugungs- und Handel und Montage GesmbH	
Produkt	Living Wall Outdoor	grünwand klimafassade	
System	Textil-Substrat	Rinne-Substrat	
Konstruktionsprinzip	Flächig, für Versuchsaufbau modular	Modular/trogförmig	
Bauteilkomponenten	Aluminium-Verbundplatte als Trägerplatte mit gefalteten Vliestaschen und Abdeckvlies	Aluminiumtrog mit Vliesauskleidung	
Substrat	Spezialmischung	Extensivsubstrat	
Maße Einzelmodul (B x H x T) [cm]	55 x 135 x 8	165 x 26 x 16	
Anzahl Einzelmodule pro Fassadenhälfte (4,5m²)	6	10	
Pflanzdichte [St/m²]	21,6	24	
Gewicht wassergesättigt [kg/m²]	max. 30	max. 100	
Bewässerungszeiten	3-4x täglich, 5-7 Minuten	1x täglich 2-6 Minuten	







Abbildung 25: Unbepflanzte Einzelmodule des Rinnen- (links) und Vliessystems (rechts) sowie beide Systeme in bepflanztem Zustand im zweiten Versuchsjahr im Fassadenprüfstand von Klimahaus Süd (Juni 2019)

## 3.3.2.3. Faktor C: Abstand zwischen Fassaden und Begrünung (variabel einstellbar)

Klimahaus West: 20cm, 25cm, 30cm (Abstände in Bezug auf die nach innen gesetzte Gebäudefassade, Aussparung wegen eingebauter Heatpipes nötig)

Klimahaus Süd: 5cm, 10cm, 15cm (kleinere Abstände, keine zusätzliche Aussparung)

#### 3.3.2.4. Faktor D: Versuchspflanzenarten

Beide Begrünungssysteme wurden mit denselben Arten standortgerecht begrünt. Die Auswahl erfolgte hinsichtlich bisheriger Erfahrungen bezüglich Hitzetoleranz, Strahlungstoleranz und Trockenheitsverträglichkeit. Im Gegensatz zur häufig üblichen Verwendung von Arten mit möglichst niedrigem Wasserbedarf (Manso & Castro-Gomes 2015) wurde bewusst besonderes Augenmerk auf genügend große Blattflächen für einen damit einhergehenden Wasserumsatz gelegt, um Verdunstungseffekte eindeutig quantifizieren zu können (Tabelle 6). Ab August 2018 wurden die Versuchspflanzen monatlich hinsichtlich ihrer Vitalität bonitiert (Tabelle 7). Zeitgleich wurde die Pflanzendichte in den Einzelmodulen der Begrünungssysteme monatlich als prozentualer Anteil der Gesamtfläche abgeschätzt.

Tabelle 6: Versuchspflanzenarten

Gattung, Art und Sorte
Aster divaricatus 'Tradescant'
Bistorta amplexicaulis 'Blackfield'
Campanula poscharskyana 'Blauranke'
Chrysogonum virginianum
Geranium macrorrhizum 'Czakor'
Hakonechloa macra 'Aureola'
Heuchera Hybride 'Chantilly'
Heuchera Hybride 'Amethyst Myst'
Hosta lancifolia
Nepeta x faassenii 'Walker's Low'
Sesleria heufleriana
Waldsteinia geoides

Tabelle 7: Zur Vitalitätsbewertung verwendete Boniturskala

Boniturnote	Bedeutung
1	Pflanze kümmert, starke Mängel
3	geringes Wachstum und Mangelerscheinungen
5	normales Wachstum, leichte Mängel
7	normales Wachstum, keine Mängel
9	optimales Wachstum, keine Mängel

Die Temperatur und relative Luftfeuchte im Fassadenumfeld wurden ab Juni 2018 kontinuierlich erfasst (Messwert alle 15 Minuten). Dazu wurde jeder Fassadenprüfstand mit 15 Temperatursensoren (NTC) und 4 Feuchtesensoren ausgestattet (insgesamt 60 Temperatur und 16 Feuchtemesspunkte). Zudem wurde die Oberflächentemperatur an den Fassadenprüfständen in Einzelerhebungen mit einer Wärmebildkamera (testo 868) erfasst und der Wasserverbrauch der einzelnen Wasserkreisläufe ermittelt.

#### 3.3.3. Ergebnisse und Diskussion

#### 3.3.3.1. Begrünungssysteme und Versuchsarten

Durch die monatliche Bonitur der Pflanzenvitalität verbunden mit der Abschätzung der Pflanzendichte über längere Zeiträume konnten verschiedene Trends beobachtet werden. Die Pflanzendichte wurde hierbei als Deckung angegeben, also als Anteil der Wandfläche, welcher zum Zeitpunkt der Erfassung von Pflanzenteilen bedeckt wird. Beide Begrünungssysteme erreichten im zweiten Versuchsjahr eine höhere Bedeckung, wobei das Vliessystem (Vertiko) meist etwas bessere Werte erzielte als das Rinnensystem (grünwand). Oftmals sind diese Unterschiede allerdings auf einzelne Arten zurückzuführen, die im Vliessystem besonders groß wurden (Geranium, Nepeta, Heuchera 'Chantilly'), während andere Arten abgestorben waren oder nur sehr klein blieben. Im Vergleich dazu wiesen die Versuchsarten in den Rinnen weniger deutliche Größenunterschiede auf. Nach dem Staudenrückschnitt (April 2019 und März 2020) nahm die Deckung wieder rasch zu, im Frühling 2020 sogar etwas schneller im Rinnensystem (Abbildung 26). Bezüglich der Exposition war die Deckung meist im Westen etwas stärker ausgeprägt. Nur im Frühling 2020 lagen die Werte für die Südseite durchschnittlich höher (Abbildung 27). Der Bedeckungsgrad sollte nicht nur aus optischen Gründen möglichst hoch liegen, sondern auch aus energetischen Gründen. Freiliegendes Substrat oder Trägermaterial kann bei unvollständiger pflanzlicher Bedeckung austrocknen, die Oberflächenund Umgebungstemperatur erhöhen und die Wärmekapazität gegenüber dichter Vegetation absenken, sodass die durch Fassadenbegrünung verursachten Kühleffekte in ihrer Wirksamkeit abgeschwächt werden (Brune et al. 2017).

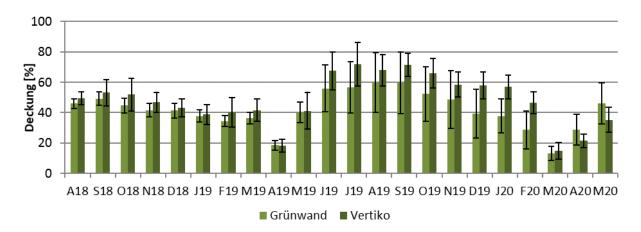


Abbildung 26: Von Pflanzen bedeckte Fassadenfläche je System und Monat jeweils über die Einzelmodule (Vlieselemente Vertiko, Rinnen Grünwand) gemittelt, die Balken zeigen die Standardabweichung an.

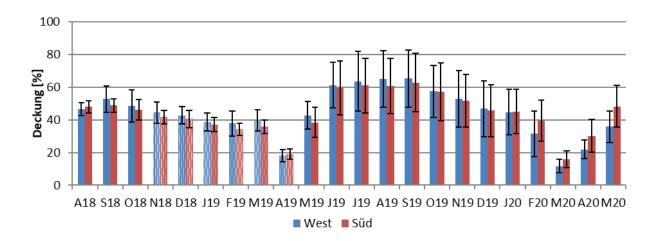


Abbildung 27: Von Pflanzen bedeckte Fassadenfläche je Exposition und Monat jeweils über die Einzelmodule (Vlieselemente Vertiko, Rinnen Grünwand) gemittelt, die Balken zeigen die Standardabweichung an. Der Zeitraum November 2018 (N18) bis April 19 (A19) ist nicht repräsentativ, da Südmodule für Versuche an der Westfassade verwendet wurden

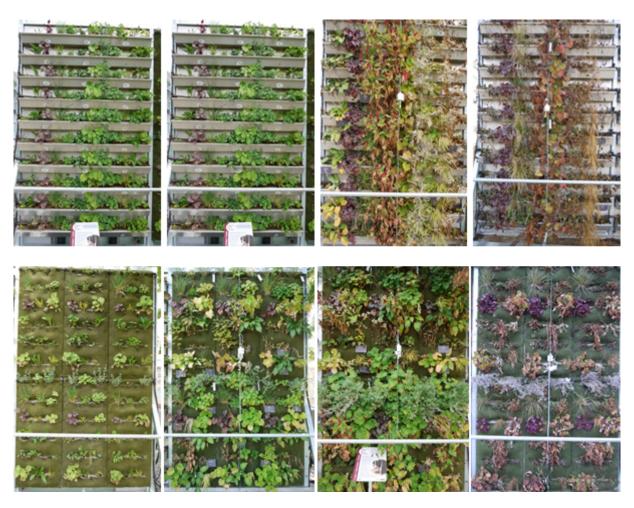


Abbildung 28: Frontalansichten der Fassadenhälften am Klimahaus West im ersten Versuchsjahr; obere Reihe: Rinnensystem Grünwand; untere Reihe: Vliessystem Vertiko (April 2018, Juli 2018, Oktober 2018, Januar 2019 unten bzw. 2020 oben)

Bezüglich der Vitalität zeichneten sich ebenfalls Unterschiede zwischen den Begrünungssystemen ab. In den Wintermonaten wurden nur die aktiven Versuchsarten bewertet. Stauden, die ihre lebenden Teile einziehen und bis zum Neuaustrieb überwintern, wurden nicht mit einbezogen. In Sommer und Herbst waren die Pflanzen in beiden Systemen etwa gleich vital. Vor allem im Frühling wurden aber im Rinnensystem (Grünwand) deutlich bessere Ergebnisse erzielt, was größtenteils auf einen früheren Austrieb und eine schnellere Pflanzenentwicklung in den Rinnen zurückzuführen ist (Abbildung 29).

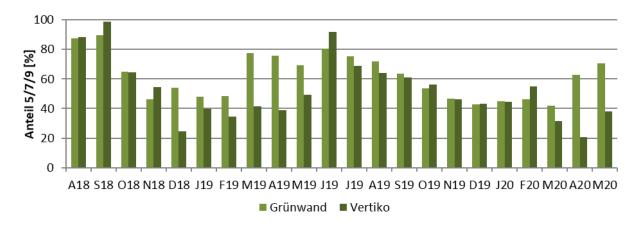


Abbildung 29: Anteil der ausreichend vitalen Pflanzen (Boniturnote 5, 7 oder 9) je System und Monat



Abbildung 30: Aster divaricatus 'Tradescant' im Sommer (August 2018)



Abbildung 31: Weißfärbung der Blütenstände im Herbst (Oktober 2019)

Die Versuchsart Aster divaricatus war in der Rinne deutlich vitaler als im Vlies, was sich auch in den Ausfallraten widerspiegelte, welche im Vlies deutlich höher ausfielen. In den Rinnen war beim Neuaustrieb im Frühjahr deutlich eine starke Neigung zur seitlichen Ausbreitung erkennbar. Dadurch bedrängte A. divaricatus die benachbarten Arten und sollte dementsprechend nur neben konkurrenzstarke Pflanzen gesetzt werden. Im Vlies ist diese seitliche Ausbreitung durch die voneinander isolierten Substrattaschen nicht sichtbar geworden. Das geringere Substratvolumen mit einer damit einhergehenden niedrigeren Wasserspeicherkapazität hat vermutlich zu den verstärkten Ausfällen im Vliessystem geführt. Im Herbst verfärbte sich die komplette Pflanze braun mit weißen,

auffällig flaumigen Blütenrückständen. Im Winter (Nov – Mrz) ist *A. divaricatus* eingezogen. Im März treiben die ersten Pflanzen wieder stark aus. Ein eventuell nötiges Nachpflanzen sollte spätestens im Frühsommer stattfinden, da die Pflanzen sonst nicht mehr ausreichend anwurzeln und in zu starker Sonneneinstrahlung vertrocknen. Bei vertrockneten Exemplaren kann es nochmal zu einem verspäteten Neuaustrieb kommen. Im August blüht *A. divaricatus* 'Tradescant' weiß und meist üppig. Wenn sie gedüngt wird, führt dies zu einem erkennbar stärkeren Wachstum.

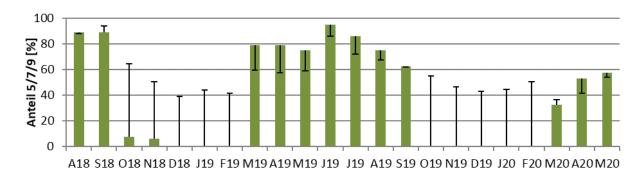


Abbildung 32: Entwicklung der Vitalität von *Aster divaricatus* 'Tradescant' im Zeitraum August 2018 bis Mai 2020 als Anteil der ausreichend vitalen Pflanzen (Boniturnote 5, 7 oder 9) je Monat im Verhältnis zur Gesamtvitalität (schwarze Balken)



Abbildung 33: Neuaustrieb (März 2020)



Abbildung 34: Irreversible Vertrocknung im Herbst (September 2019)



Abbildung 35: Noch in voller Blüte zum gleichen Zeitpunkt im Herbst (September 2019)

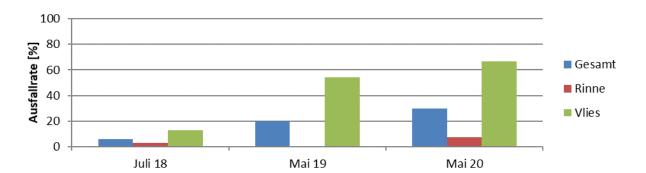


Abbildung 36: Gesamte und nach Begrünungssystem differenzierte Ausfallraten von *Aster divaricatus* 'Tradescant' zur Abnahme im Juli 2018 und jeweils nach Austrieb aller Versuchsarten im Mai 2019/2020

#### Bistorta amplexicaulis 'Blackfield' (Kerzen-Wiesenknöterich)



Abbildung 37: Bistorta amplexicaulis 'Blackfield' während der Blüte (Juli 2019)



Abbildung 38: Rotfärbung der Blattränder schon im Frühsommer (Juli 2018)



Abbildung 39: Trockenschäden traten leider häufiger auf (Juli 2019)

Bistorta amplexicaulis ist im ersten Versuchsjahr sehr stark gewachsen und hat dadurch in beiden Systemen für eine gewisses Tiefenprofil im Gesamteindruck der Fassade gesorgt. Eine Kombination aus Sonnenbrand und Herbstfärbung ist an der Wand im Vergleich zu Bodenstandorten verhältnismäßig früh eingetreten. Nach dem Winter (eingezogen Dez – Apr) hat *B. amplexicaulis* leider nur sehr schwach ausgetrieben. Im Rinnensystem kam es zu häufigerem Neuaustrieb als im Vliessystem. Bistorta amplexicaulis 'Blackfield' hat ab Juli/August eine kräftig dunkelrote Blüte. Die auffällig langen Triebe bis zu einem Meter im ersten Versuchsjahr wurden in den Folgejahren seltener erreicht. Teilweise konnte man den Einfluss von zu starker Sonneneinstrahlung deutlich sehen: sonnenexponierte Blätter waren komplett verbrannt, während die im Schatten gelegenen Bereiche derselben Versuchspflanze noch üppig grün waren. Auch hier sollte eine Nachpflanzung vor den heißen Sommertemperaturen stattfinden, um ein Anwachsen und somit eine ausreichende Wasserversorgung zu gewährleisten. Möglicherweise reicht *B. amplexicaulis* der beengte Wurzelraum in Rinne und Vliespflanztasche nicht aus. Verglichen mit einem Bodenstandort blieb sie an der Wand weit unter ihren Möglichkeiten. Zur mehrjährigen Verwendung kann sie deshalb nicht empfohlen werden.

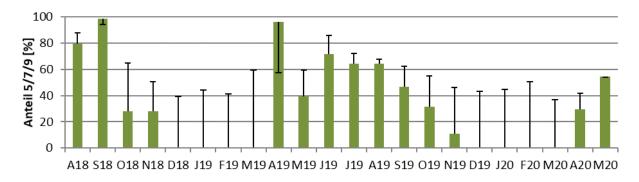


Abbildung 40: Entwicklung der Vitalität von *Bistorta amplexicaulis* 'Blackfield' im Zeitraum August 2018 bis Mai 2020 als Anteil der ausreichend vitalen Pflanzen (Boniturnote 5, 7 oder 9) je Monat im Verhältnis zur Gesamtvitalität (schwarze Balken)



Abbildung 41: Im Winter sind die Stauden eingezogen (Dezember 2019)



Abbildung 42: Neuaustrieb an altem Wurzelstock aus dem Vorjahr (April 2019)

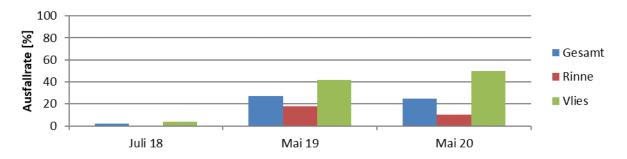


Abbildung 43: Gesamte und nach Begrünungssystem differenzierte Ausfallraten von *Bistorta amplexicaulis* 'Blackfield' zur Abnahme im Juli 2018 und jeweils nach Austrieb aller Versuchsarten im Mai 2019/2020

#### Campanula poscharskyana 'Blauranke' (Hängepolster-Glockenblume)



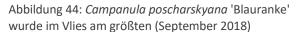




Abbildung 45: In der Rinne blieben die Stauden etwas kleiner, wuchsen aber in schattiger Lage bei ausreichender Wasserversorgung ebenfalls ausreichend gut (August 2019)

Campanula poscharskyana wuchs in beiden Systemen, reagierte aber empfindlich auf kurzzeitige Wasser-Unterversorgung und direkte Sonneneinstrahlung. Im Winter sah die Versuchsart oftmals sehr schön aus, weil sie auch in den kalten Monaten ein sattes Grün aufwies. Es gestaltete sich allerdings als schwierig bei Frost eine ausreichende Wasserversorgung zu gewährleisten. In der Rinne funktionierte dies aufgrund des höheren Substratspeichervolumens tendenziell besser als im Vlies. Bei Wasserknappheit ließ C. poscharskyana deutlich ihre Blätter hängen und färbte sich nach kurzer Zeit bei Erreichen des permanenten Welkepunkts irreversibler schwarz. Ideal wuchs die Versuchsart im Vliessystem, wo C. poscharskyana von darüber liegenden Pflanzen beschattet wurde. Zu starker Schatten führte allerdings zu kümmerlichem Wuchs, während starke Einstrahlung die Pflanzen absterben ließ. Die Einflüsse der Einstrahlung waren durch die gleichmäßigere Wasserversorgung in den Rinnen nicht so deutlich erkennbar. In der Rinne war zudem eine, wenn auch langsame, seitliche Ausbreitungstendenz erkennbar. Die blau-violette Blüte von Campanula poscharskyana 'Blauranke' ist ab Mai sichtbar und wird gerne von Bienen beflogen.

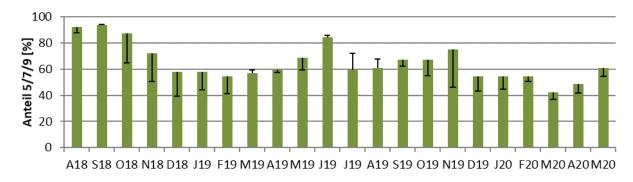


Abbildung 46: Entwicklung der Vitalität von *Campanula poscharskyana* 'Blauranke' im Zeitraum August 2018 bis Mai 2020 als Anteil der ausreichend vitalen Pflanzen (Boniturnote 5, 7 oder 9) je Monat im Verhältnis zur Gesamtvitalität (schwarze Balken)



Abbildung 47: Wasserunterversorgung im Winter (Januar 2019)



Abbildung 48: Irreversibel abgestorben (November 2018)



Abbildung 49: Überlebende Pflanzen sorgen für einen frischgrünen Eindruck im Winteraspekt (Dezember 2018)

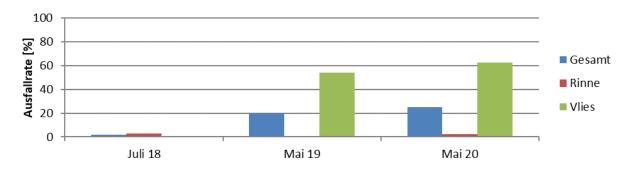


Abbildung 50: Gesamte und nach Begrünungssystem differenzierte Ausfallraten von *Campanula poscharskyana* 'Blauranke' zur Abnahme im Juli 2018 und jeweils nach Austrieb aller Versuchsarten im Mai 2019/2020

#### Chrysogonum virginianum (Goldkörbchen)



Abbildung 51: *Chrysogonum virginianum* in voller Blüte (Mai 2019)



Abbildung 52: Grundsätzlich ist die Staude immergrün, war allerdings häufig schwarzgrau verfärbt oder abgestorben (Februar 2020)

Chrysogonum virginianum scheint sich hingegen allgemein kaum für die Vertikale zu eignen. Über 90% der Versuchspflanzen waren im Frühling des zweiten Versuchsjahres ausgefallen. Nur im

Rinnensystem hatten einzelne Pflanzen überlebt. Durch eine weitere Nachpflanzung sollte eine mangelhafte Ausgangsware als Ursache ausgeschlossen werden. Die nachgepflanzten Exemplare wuchsen besser an, waren aber ebenfalls nicht dauerhaft in den Wänden. Allerdings waren die Ausfallraten im Rinnensystem im Frühling des dritten Versuchsjahres deutlich geringer als noch im Vorjahr, was die Theorie der mangelhaften Ausgangsware zumindest teilweise bestätigte. Insgesamt kam es bei *C. virginianum* schnell zu rötlichen Verfärbungen der Blätter, welche in einer Grau/Schwarzfärbung mündete, welche die Pflanzen als irreversibel abgestorben kennzeichnete. Die wenigen überlebenden Exemplare von *C. virginianum* wiesen einen schönen Blühaspekt auf, wurden jedoch nicht wirklich groß und schienen insgesamt zu empfindlich für den Fassadenstandort.

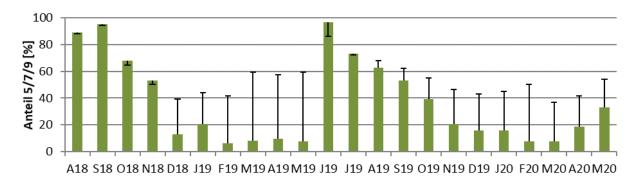


Abbildung 53: Entwicklung der Vitalität von *Chrysogonum virginianum* im Zeitraum August 2018 bis Mai 2020 als Anteil der ausreichend vitalen Pflanzen (Boniturnote 5, 7 oder 9) je Monat im Verhältnis zur Gesamtvitalität (schwarze Balken)



Abbildung 54. Winteraspekt mit rötlichen Blättern und immer noch attraktiver Blüte (Dezember 2018)



Abbildung 55: Leider der häufigste Zustand von *C. virginianum* (September 2019)



Abbildung 56: Nachgepflanzte Staude im Sommer des zweiten Versuchsjahres (August 2019)



Abbildung 57: Gesamte und nach Begrünungssystem differenzierte Ausfallraten von *Chrysogonum virginianum* zur Abnahme im Juli 2018 und jeweils nach Austrieb aller Versuchsarten im Mai 2019/2020

#### Geranium macrorrhizum 'Czakor' (Balkan-Storchschnabel)



Abbildung 58: *Geranium* macrorrhizum 'Czakor' wuchs besonders gut im Vliessystem (Mai 2019)



Abbildung 59: Im Winter bleiben Teile der Staude grün (Februar 2020)



Abbildung 60: Geäderte, gelbliche Blätter deuten auf einen Nährstoffmangel hin (September 2019)

Geranium macrorrhizum hat sich im Versuch neben den Heuchera-Sorten als am widerstandsfähigsten erwiesen. Es wuchs in beiden Systemvarianten, gedieh aber im Vlies noch besser, während es in der Rinne verstärkt zu Sonnenbrand neigte. Keine einzige Versuchspflanze der Gattung Geranium ist im ersten Versuchsjahr ausgefallen. Auch in den folgenden Versuchsjahren mussten nur sehr wenige Pflanzen ersetzt werden. Im Herbst verfärbten sich große Teile der Blattmasse braun, ein kleinerer Teil der Blätter blieb aber über den ganzen Winter grün. Im Mai zeigt Geranium macrorrhizum 'Czakor' eine pinke Blüte, die stark von Insekten beflogen wird, allerdings auch nur verhältnismäßig kurz andauert. Im zweiten Versuchsjahr wuchsen die Pflanzen in den Vliessystemen besonders

stark. Auch ein leichter Einfluss von Düngerzugabe ist bei der Größe der einzelnen Exemplare von *G. macrorrhizum* erkennbar. Gegenüber Bewässerungsknappheit ist die Staude als einzige der getesteten Versuchsarten absolut unempfindlich.

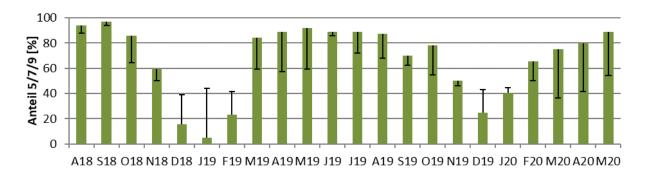


Abbildung 61: : Entwicklung der Vitalität von *Geranium macrorrhizum* 'Czakor' im Zeitraum August 2018 bis Mai 2020 als Anteil der ausreichend vitalen Pflanzen (Boniturnote 5, 7 oder 9) je Monat im Verhältnis zur Gesamtvitalität (schwarze Balken)



Abbildung 62: Bei starker Einstrahlung kann es auch zu Sonnenbrand kommen (Mai 2019)



Abbildung 63: Zum gleichen Zeitpunkt ist die Staude in schattiger Lage in deutlich besserem Zustand (Mai 2019)

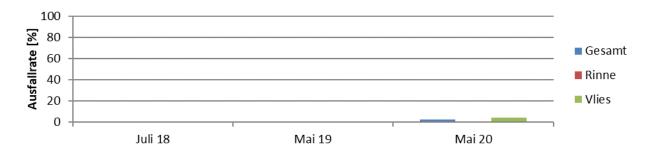


Abbildung 64: Gesamte und nach Begrünungssystem differenzierte Ausfallraten von *Geranium macrorrhizum* 'Czakor' zur Abnahme im Juli 2018 und jeweils nach Austrieb aller Versuchsarten im Mai 2019/2020

### Hakonechloa macra 'Aureola' (Japangras)







Abbildung 66: Teilweise gelbbraune Färbung Im Herbst (Dezember 2019)



Abbildung 67: Teilweise blassrotviolette Färbung im Herbst (November 2018)

Das Gras *Hakonechloa macra* blieb hinsichtlich seiner Wüchsigkeit leider hinter den Erwartungen zurück. In der Rinne wuchs es zwar an, bildete aber nur teilweise eine annähernd ausreichende Deckung aus. Im Vliessystem sind über den ersten Winter gut 70%, über den zweiten Winter sogar über 80% von *H. macra* ausgefallen. Eine Düngerzugabe verbesserte das Wachstum in den Rinnen deutlich. Im Vlies waren mögliche Unterschiede nicht erkennbar, weil dort viele Exemplare schnell durch zu starke Einstrahlung an den permanenten Welkepunkt gelangten und somit irreversibel abgestorben waren. Wenn *H. macra* bis in den Herbst überlebte, bildete es meist eine schöne Gelbfärbung, seltener eine blassrot-violette Färbung aus, im Winter ist es dann eingezogen (Dez – Mrz). Die Neuaustriebe begannen zuerst im Rinnensystem. Über die gesamte Vegetationsperiode lag die Vitalität von *H. macra* unter der durchschnittlichen Gesamtvitalität der Versuchswände.

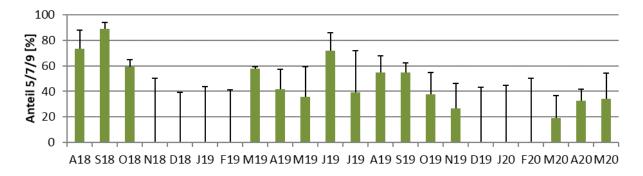


Abbildung 68: Entwicklung der Vitalität von *Hakonechloa macra* 'Aureola' im Zeitraum August 2018 bis Mai 2020 als Anteil der ausreichend vitalen Pflanzen (Boniturnote 5, 7 oder 9) je Monat im Verhältnis zur Gesamtvitalität (schwarze Balken)



Abbildung 69: Vor allem durch Wassermangel ist *H. macra* häufig abgestorben (August 2019)



Abbildung 70: Neuaustrieb im Frühling (März 2020)

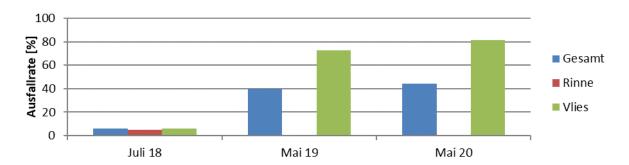


Abbildung 71: Gesamte und nach Begrünungssystem differenzierte Ausfallraten von *Hakonechloa macra* 'Aureola' zur Abnahme im Juli 2018 und jeweils nach Austrieb aller Versuchsarten im Mai 2019/2020

# Heuchera Hybride 'Amethyst Myst' (Purpurglöckchen)



Abbildung 72: *Heuchera* Hybride 'Amethyst Myst' im Herbst (Oktober 2018)



Abbildung 73: Auch im Winter bleibt die Laubfarbe erhalten, bei diesem Exemplar trotz Trockenschäden (Januar 2019)



Abbildung 74: Der Neuaustrieb findet bei der Sorte 'Amethyst Myst' relativ früh statt (März 2020)

Mit den beiden Heuchera-Sorten 'Amethyst Myst' und 'Chantilly' wurden Pflanzen getestet, die auch mit geringerem Substratvolumen gut zurechtkommen könnten. Die Heuchera-Sorten erwiesen sich als vital und widerstandsfähig mit sehr geringen Ausfallquoten. Vom gefürchteten Dickmaulrüssler-Befall ist die Versuchsanlage bisher verschont geblieben. Die Sorte 'Amethyst Myst' blieb eher kleiner und kompakt. Vor allem in den kalten Monaten stach sie aber deutlich durch ihre kräftige Rotfärbung hervor und sorgte somit für eine gewisse Frische im sonst eher tristen winterlichen Aspekt der begrünten Fassaden. Ab März trieb sie wieder neu aus. Im Frühling und Sommer wuchs die Heuchera-Sorte 'Amethyst Myst' dann etwas besser im Rinnensystem. Manchmal war sie allerdings auch von Sonnenbrand betroffen, jedoch seltener als die zweite getestete, deutlich hellere Sorte 'Chantilly'. Auf Bewässerungsengpässe reagierte sie relativ unempfindlich.

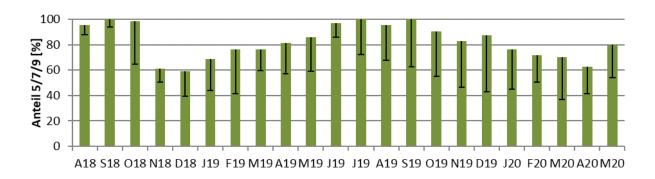


Abbildung 75: Entwicklung der Vitalität von *Heuchera* Hybride 'Amethyst Myst' im Zeitraum August 2018 bis Mai 2020 als Anteil der ausreichend vitalen Pflanzen (Boniturnote 5, 7 oder 9) je Monat im Verhältnis zur Gesamtvitalität (schwarze Balken)



Abbildung 76: Manche Versuchspflanzen haben sortenbedingt eine helle Blattfarbe (Mai 2019)



Abbildung 77: Punktuelle bräunliche Verfärbung im Frühsommer (Juni 2019)

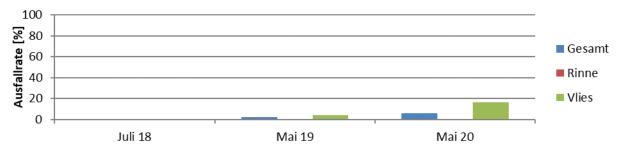


Abbildung 78: Gesamte und nach Begrünungssystem differenzierte Ausfallraten von Heuchera Hybride 'Amethyst Myst' zur Abnahme im Juli 2018 und jeweils nach Austrieb aller Versuchsarten im Mai 2019/2020

### Heuchera Hybride 'Chantilly' (Purpurglöckchen)



Abbildung 79: Heuchera Hybride 'Chantilly' im Sommer (Juli 2019)

Abbildung 80: Bei starker zu Verbrennungen kommen (August 2019)

Abbildung 81: Bei der Sorte 'Chantilly' erfolgt Einstrahlung kann es im Sommer der Neuaustrieb erst etwas später im Frühling (April 2019)

Auch die Heuchera-Sorte 'Chantilly' erwies sich als äußerst vital und widerstandsfähig mit geringen Ausfallquoten, die allerdings im dritten Versuchsjahr im Vliessystem etwas höher lagen. Im Vliessystem hat ihre Wüchsigkeit 2019 und 2020 im Vergleich zu 2018 noch einmal deutlich zugenommen. Vom gefürchteten Dickmaulrüssler-Befall ist die Versuchsanlage bisher verschont geblieben. Insgesamt wächst 'Chantilly' deutlich stärker als 'Amethyst Myst', die ohnehin schon sehr hellen Blätter sind aber auch anfälliger für Verfärbungen jeglicher Art (rot durch Sonnenbrand, braun durch Trockenheit, blass durch Nährstoffmangel). Diese Verfärbungen können allerdings im Herbst eine eher interessant-ansprechende Optik ausbilden, obwohl sie ursprünglich auf Schädigungen zurückzuführen sind. Eine Düngergabe wirkte sich bei der Heuchera-Sorte 'Chantilly' sehr deutlich auf die Pflanzengröße aus. Der Neuaustrieb erfolgt etwas später als bei 'Amethyst Myst'. Auf Bewässerungsengpässe reagierte 'Chantilly' allerdings ebenfalls relativ unempfindlich.

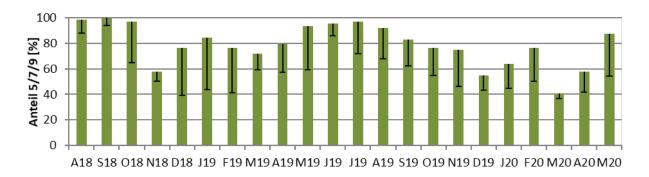


Abbildung 82: Entwicklung der Vitalität von *Heuchera* Hybride 'Chantilly' im Zeitraum August 2018 bis Mai 2020 als Anteil der ausreichend vitalen Pflanzen (Boniturnote 5, 7 oder 9) je Monat im Verhältnis zur Gesamtvitalität (schwarze Balken)



Abbildung 83: Die hell gefärbten Blätter neigen zu sehr starkem Wachstum (August 2019)



Abbildung 84: Im Herbst/Winter verfärben sich die Blätter meist rötlich/bräunlich (Februar 2020)

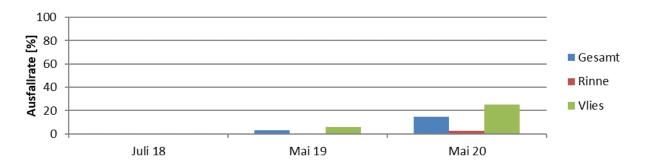


Abbildung 85: Gesamte und nach Begrünungssystem differenzierte Ausfallraten von *Heuchera* Hybride 'Chantilly' zur Abnahme im Juli 2018 und jeweils nach Austrieb aller Versuchsarten im Mai 2019/2020

### Hosta lancifolia (Lanzenblatt-Funkie)



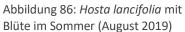




Abbildung 87: Die gelbe Herbstfärbung setzt meist relativ früh ein (Oktober 2018)



Abbildung 88: Über den Winter ist die Staude eingezogen (Februar 2020)

Auch die für den Versuch ausgewählten Funkien kamen an den Wänden gut zurecht und wuchsen in beiden Systemen zufriedenstellend. Teilweise verfärbten sich die Blätter etwas gelblich, aber zu direktem Sonnenbrand kam es bei *Hosta lancifolia* kaum. Die Ausfallquoten waren äußerst gering. Im Winter sind die Pflanzen eingezogen (Nov – Apr). Im April war in den Rinnen ein früherer und stärkerer Austrieb zu beobachten, vor allem in sonnenexponierten Bereichen. Die blassviolett gefärbte Blüte beginnt im Juni/Juli und erreicht ihren Höhepunkt meist im August. Auf Bewässerungsengpässe, vor allem in der Umstellung von Winterpause auf beginnende Frühlingsbewässerung, reagierte sie vermutlich durch ihren späten Austrieb relativ unempfindlich. Während ihrer aktiven Phase von April bis September/Oktober lag die Vitalität von *H. lancifolia* meist deutlich über der durchschnittlichen Gesamtvitalität.

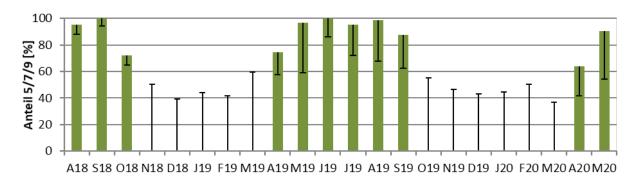


Abbildung 89: Entwicklung der Vitalität von *Hosta lancifolia* im Zeitraum August 2018 bis Mai 2020 als Anteil der ausreichend vitalen Pflanzen (Boniturnote 5, 7 oder 9) je Monat im Verhältnis zur Gesamtvitalität (schwarze Balken)



Abbildung 90: Während der Vegetationsperiode bleiben die Blätter meist frischgrün, lediglich die Spitzen sind manchmal durch Sonnenbrand oder Trockenheit verfärbt (Juli 2019)



Abbildung 91: Neuaustrieb im Frühling (April 2019)

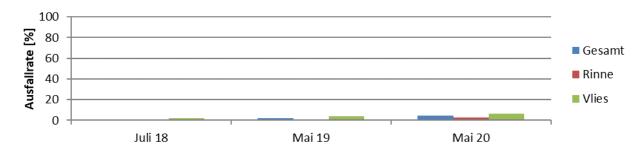


Abbildung 92: Gesamte und nach Begrünungssystem differenzierte Ausfallraten von *Hosta lancifolia* zur Abnahme im Juli 2018 und jeweils nach Austrieb aller Versuchsarten im Mai 2019/2020

# Nepeta x faasenii 'Walker's Low' (Katzenminze)



Abbildung 93: *Nepeta x faasenii* 'Walker's Low' mit üppiger Blüte im Vliessystem (Juli 2019)



Abbildung 94: In der Rinne bleiben die Stauden kleiner als im Vlies (Mai 2019)



Abbildung 95: Im Winter ist die Staude eingezogen, die Rückstände sind oft weißgrau gefärbt (Januar 2020)

Oftmals sind Pflanzen in wandgebundenen Systemen stark der Sonneneinstrahlung ausgesetzt, vor allem in südlicher Exposition. Deshalb wurde *Nepeta* als hitze- und strahlungs- sowie trockenheitsverträgliche Gattung getestet. Die Sorte 'Walker's Low' wächst besonders üppig. Als beliebte und rege besuchte Nahrungsquelle für verschiedene Bestäuber-Insekten trägt sie dazu bei die Biodiversität an Fassaden zu erhöhen. Jedoch führt eine mehrtägige Trockenheit schneller zu irreversiblem Absterben als bei anderen Versuchsarten. Wie dauerhaft *Nepeta* in der Wand ist, lässt sich noch nicht eindeutig abschätzen. Tendenziell gedieh die Versuchsart im Vliessystem deutlich besser als in der Rinne, verzeichnete dort aber auch höhere Ausfallraten. Zum Herbst hin werden die Pflanzen komplett grau, im Winter (Dez – Mrz) sind sie eingezogen. Die blauviolette Blüte begann Anfang Mai. Im zweiten Versuchsjahr kam es bei einzelnen Versuchspflanzen zu einem Blattlausbefall. Auf Bewässerungsengpässe reagierte *Nepeta* leider relativ empfindlich.

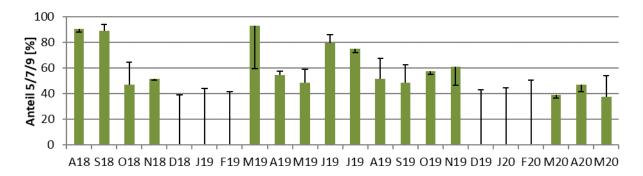


Abbildung 96: : Entwicklung der Vitalität von *Nepeta x faasenii* 'Walker's Low' im Zeitraum August 2018 bis Mai 2020 als Anteil der ausreichend vitalen Pflanzen (Boniturnote 5, 7 oder 9) je Monat im Verhältnis zur Gesamtvitalität (schwarze Balken)



Abbildung 97: Katzenminze lockt viele Bestäuberinsekten an und erhöht somit die Biodiversität an der Fassade (Juli 2019)



Abbildung 98: Beim Neuaustrieb geht die Staude neue Wege... (März 2020)

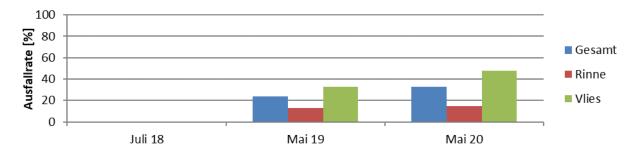


Abbildung 99: Gesamte und nach Begrünungssystem differenzierte Ausfallraten von Nepeta x faasenii 'Walker's Low' zur Abnahme im Juli 2018 und jeweils nach Austrieb aller Versuchsarten im Mai 2019/2020

### Sesleria heufleriana (Grünes Kopfgras)



Abbildung 100: Sesleria heufleriana Abbildung 101: Blüte im Frühling Abbildung 102: Wassermangel kann zu im Spätsommer (September 2018)



(März 2020)



irreversiblem Absterben führen (März 2019)

Auch Gräser können in einer wandgebundenen Begrünung reizvoll aussehen. Leider blieb allerdings auch Sesleria heufleriana bezüglich Wüchsigkeit und Dauerhaftigkeit hinter den Erwartungen zurück. Es hatte in der Rinne zwar nur sehr geringe Ausfallraten, blieb aber oftmals eher schmal und bildete somit oft keine ausreichende Deckung aus. Im Vliessystem funktionierten die Gräser weniger gut: über den ersten Winter sind dort knapp 60%, über den zweiten Winter etwa 50% von S. heufleriana ausgefallen. Die Versuchsart bildete eine schöne Herbstfärbung aus, einzelne Halme blieben über den gesamten Winter grün. S. heufleriana blüht violett und schon früh im Jahresverlauf (Ende Februar/Anfang März) und reagierte relativ empfindlich auf Bewässerungsengpässe. Im Sommer lag die Vitalität dieser Versuchsart deutlich unter der durchschnittlichen Gesamtvitalität.

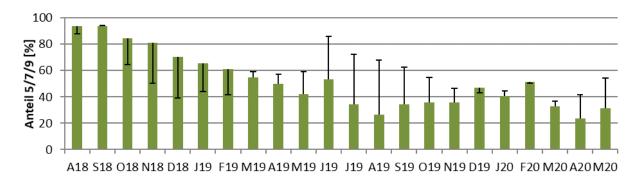


Abbildung 103: : Entwicklung der Vitalität von *Sesleria heufleriana* im Zeitraum August 2018 bis Mai 2020 als Anteil der ausreichend vitalen Pflanzen (Boniturnote 5, 7 oder 9) je Monat im Verhältnis zur Gesamtvitalität (schwarze Balken)



Abbildung 104: Im Herbst verfärben sich die einzelnen Halme unterschiedlich schnell (November 2019)



Abbildung 105: Die ersten Blütenhalme treten schon im Spätwinter auf (Februar 2020)

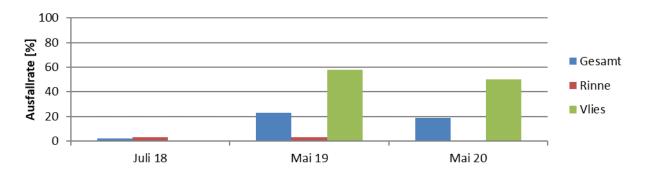


Abbildung 106: Gesamte und nach Begrünungssystem differenzierte Ausfallraten von *Sesleria heufleriana* zur Abnahme im Juli 2018 und jeweils nach Austrieb aller Versuchsarten im Mai 2019/2020

### Waldsteinia geoides (Ungarwurz)



Abbildung 107: Waldsteinia geoides im Frühling (April 2019)



Abbildung 108: Verschiedene Blattgenerationen der Staude mit Blütenansatz (März 2020)

Um die kühlenden Effekte durch Verdunstung für das Mikroklima am Gebäude nutzen zu können, sollte der Wasserumsatz der Bepflanzung insgesamt nicht zu niedrig sein. Deshalb wurden auch Arten getestet, die sonst eher in schattigen Bereichen verwendet werden. Vor allem Waldsteinia geoides neigte bei direkter Sonnenexposition zu Sonnenbrand und verlor bei Trockenheit vorzeitig ihre Blätter. Sie trieb aber bei entsprechender Wasserversorgung wieder nach. Die gelbe, oftmals üppige Blüte findet wie bei Sesleria schon früh im Jahr statt. Es kam aber im Versuch nur ein Teil Exemplare zur Blüte. Insgesamt ist W. geoides im Rinnensystem etwas besser gewachsen. Meistens sahen die Pflanzen aber leider eher nach Überlebenskampf aus, sodass eine ansprechende Optik in der Wand, wenn überhaupt, nur an schattigen Standorten erreicht werden konnte. Ein komplettes Absterben fand allerdings selten statt. Die Ausfallraten beziehen sich wie bei allen Arten auf punktuelle Erfassungen. Es ist gut möglich, dass als abgestorben bewertete Versuchspflanzen zu einem späteren Zeitpunkt wieder schwach ausgetrieben hätten. Ein Neuaustrieb kann sogar im Januar stattfinden und auch ein Bewässerungsengpass führt nicht so schnell zur permanenten Welke wie bei anderen Versuchsarten.

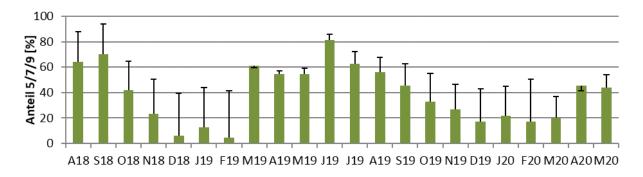


Abbildung 109: : Entwicklung der Vitalität von *Waldsteinia geoides* im Zeitraum August 2018 bis Mai 2020 als Anteil der ausreichend vitalen Pflanzen (Boniturnote 5, 7 oder 9) je Monat im Verhältnis zur Gesamtvitalität (schwarze Balken)



Abbildung 110: Nährstoffmangel kann zu Gelbfärbung mit deutlicher Äderung führen (Mai 2019)



Abbildung 111: Winteraspekt von W. geoides (Februar 2019)



Abbildung 112: Neuaustrieb mit Blütenansatz (März 2020)

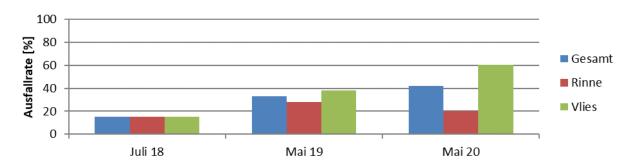


Abbildung 113: : Gesamte und nach Begrünungssystem differenzierte Ausfallraten von *Waldsteinia geoides* zur Abnahme im Juli 2018 und jeweils nach Austrieb aller Versuchsarten im Mai 2019/2020

### 3.3.3.2. Temperatur und Luftfeuchte

Um den Einfluss verschiedener Faktoren auf das Mikroklima im Fassadenumfeld zu quantifizieren, sind regelmäßige Messungen über längere Zeiträume nötig, in denen Messwerte für die unterschiedliche Kombination der untersuchten Faktoren gesammelt werden. Die an den Fassaden der Klima-Forschungs-Station gemessenen Tagesmittelwerte des Sommers 2018 (Juni bis September) wurden hierfür einer mehrfaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA) mit dem Statistikprogramm R unterzogen. Diese Art der statistischen Auswertung gibt einen Überblick bezüglich längerfristiger Trends. In den folgenden Abbildungen sind die Auswertungen an der Westfassade dargestellt. Die relative Luftfeuchtigkeit war durchschnittlich um 12% höher als die Außenluftreferenz. Die Art des Begrünungssystems hatte hierauf nur einen äußerst geringen Einfluss. Direkt in der Begrünung wurde die durchschnittlich höchste Feuchtigkeit gemessen, welche auch 15cm vor der Begrünung noch Auswirkungen zeigte. Im Zwischenspalt war es hingegen weniger feucht, was darauf schließen lässt, dass keine Überfeuchtung der Bausubstanz durch wandgebundene Begrünungssysteme zu befürchten ist. Je höher zudem der Abstand zwischen Begrünungssystem und Fassade gewählt wurde, desto weniger feucht war es im gesamten Fassadenumfeld (Abbildung 114). Hinsichtlich der Temperaturentwicklung spielte die Art des Begrünungssystems ebenso keine Rolle. Die wärmsten Temperaturen wurden vor der Begrünung erzielt, am kühlsten war es in der Begrünung. Eine Vergrößerung des Zwischenspalts führte tendenziell zu niedrigeren Temperaturen (Abbildung 115). An der Südfassade wurden die gleichen Tendenzen beobachtet. Lediglich der Systemunterschied war in südlicher Exposition stärker ausgeprägt, was vermutlich auf eine häufiger nötige Bewässerung des Vliessystems in Südexposition zurückzuführen ist. Durchschnittlich wurde eine um 0,8 K erhöhte Temperatur gemessen, was auf die unterschätzte Beschattung des Referenzsensors zurückzuführen ist. Auch im Feuchtebereich sind die absoluten Werte deshalb mit Vorsicht zu genießen. Die relativen Verhältnisse lassen sich aber durch diese Methodik gut abschätzen.

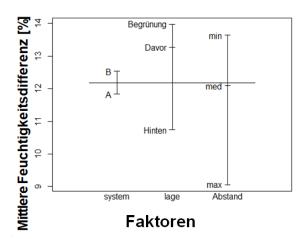


Abbildung 114: Mittlere Feuchtigkeitsdifferenz der Tagesmittelwerte zur Außenluftfeuchtigkeit an der Westfassade im Sommer 2018, A = Rinne, B = Vlies, Lage = Standort des Messfühlers, Abstand = Distanz zwischen Begrünungssystem und Gebäudefassade (20/25/30 cm)

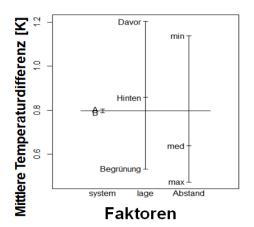


Abbildung 115: Mittlere Temperaturdifferenz der Tagesmittelwerte zur Außenlufttemperatur an der Westfassade im Sommer 2018, A = Rinne, B = Vlies, Lage = Standort des Messfühlers, Abstand = Distanz zwischen Begrünungssystem und Gebäudefassade (20/25/30 cm)

Neben den Tagesmittelwerten kann auch die Temperatur- und Feuchteentwicklung innerhalb eines Tages von Bedeutung sein. Da der Zwischenspalt im Winter für Erdwärmeuntersuchungen abgedichtet wurde (vgl. Kapitel 3.4.), kam die Frage auf, wie sich eine solche Abdichtung im Sommer auswirken würde. Da die Messungen mit und ohne Spaltabdichtung nicht gleichzeitig durchgeführt werden konnten, wurde eine Vorauswahl an Tagen getroffen, an denen eine vergleichbar hohe solare Einstrahlung vorherrschte, um eine möglichst hohe Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Ohne Abdichtung verlief die Temperatur im Luftspalt über den Tag parallel zur Begrünungsebene. Mit Abdichtung kam es zu einem zeitlichen Versatz. Dies ist vermutlich auf die Entkopplung der Luftpakete zurückzuführen, welche die Erwärmung und Abkühlung im Luftspalt relativ zum Außenbereich verlangsamt. Die relative Luftfeuchtigkeit erreichte ohne Abdichtung niedrigere Werte als in der Begrünungsebene. Mit Abdichtung war die relative Luftfeuchtigkeit leicht erhöht, was möglicherweise auf eine weniger gute Durchlüftung und einen damit einhergehenden schwächer ausgeprägten Austausch von wassergesättigten Luftpaketen zurückzuführen ist.

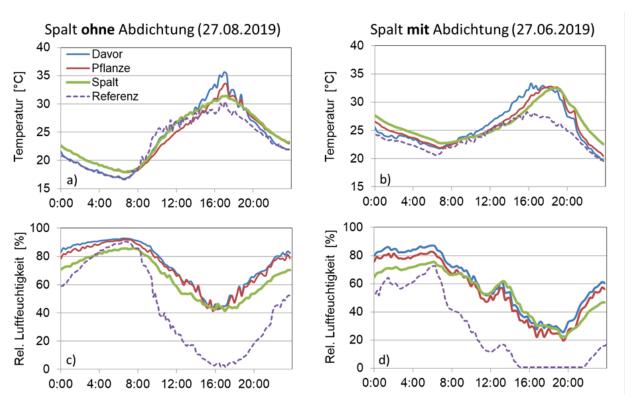


Abbildung 116: Tagesverläufe von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit mit (rechts, 27.06.2019) und ohne Abdichtung (links, 27.08.2019) sowohl vor und in der Begrünung als auch im Zwischenspalt und an einem von der Fassade nicht beeinflussten Referenzpunkt

Die Oberflächentemperaturen an den Fassadenprüfständen wurden zudem optisch durch eine Wärmebildkamera erfasst. Damit lassen sich Kühleffekte abschätzen und die Erwärmung verschiedener Fassadenbauteile kann zueinander ins Verhältnis gesetzt werden. Absolute Werte können nur verglichen werden, wenn die Randbedingungen komplett übereinstimmen. Dies ist durch den (relativ gesehen) unterschiedlichen Sonnenstand für den west- und südexponierten

Fassadenprüfstand nicht möglich. Deshalb muss zur Interpretation der Wärmebilder immer die aktuelle Skala am rechten Bildrand herangezogen werden. Diese lässt sich auch für mehrere Aufnahmen hintereinander fest definieren, sodass eine untereinander vergleichbare Zeitreihe entsteht. Beide Begrünungssysteme erwärmten sich im März 2020 relativ gleichmäßig. Auffällig war hierbei die im Rinnensystem deutlich stärkere Erwärmung der Substratoberfläche im Vergleich mit den umgebenden metallischen Bauteilen (Abbildung 119). Auch im Vliessystem wurden im Mai 2020 Oberflächentemperaturunterschiede sichtbar. Die Pflanzen waren deutlich kühler als freiliegende Vliesbereiche (Abbildung 120). Im Folgenden sind vier Wärmebildaufnahmen mit den jeweils zugehörigen Echtbildaufnahmen abgebildet.

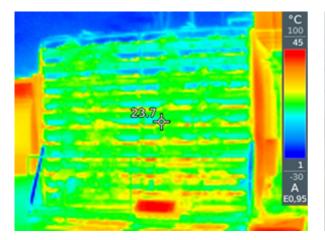




Abbildung 117: Wärmebildaufnahme des Fassadenprüfstands am Klimahaus Süd mit Rinnensystem (20.03.2020)

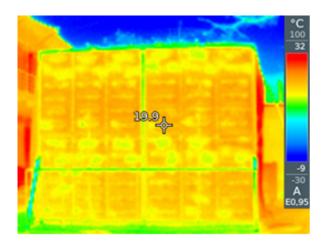




Abbildung 118: Wärmebildaufnahme des Fassadenprüfstands am Klimahaus West mit Vliessystem (20.03.2020)

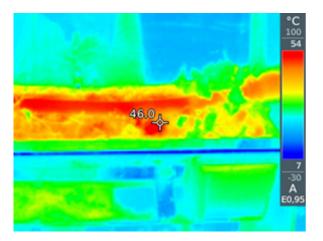




Abbildung 119: Wärmebildaufnahme einer Versuchsrinne mit im Vergleich zum umgebenden Metall erwärmter Substratoberfläche neben ebenfalls erwärmtem Bewässerungsschlauch (20.03.2020)

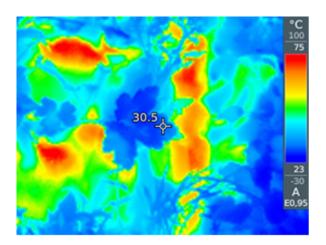




Abbildung 120: Wärmebildaufnahme einer Vliesoberfläche mit deutlich erwärmten Kahlstellen gegenüber der Blattmasse (27.05.2020)

### 3.3.3.3. Automatische Bewässerung

Zur automatischen Bewässerung der Fassadenprüfstände wurde das Steuergerät PRO-HC der Firma Hunter verwendet, welches mit Hilfe der webbasierten Software Hydrawise gesteuert wird. Für die beiden Bewässerungssysteme wurde jeweils ein Bewässerungskreislauf definiert, welcher sich je nach aktueller Bestückung des Fassadenprüfstands zuverlässig anwählen ließ. Dauer und Zeitpunkte der Bewässerungsgänge ließen sich über die Hydrawise-Browseroberfläche benutzerfreundlich programmieren. Es kam zu keinerlei Ausfällen der Bewässerung. Auch kurzfristige Ausfälle des durch einen lokalen Router bereitgestellten WLAN-Signals stellten kein Problem dar. Je nach Programmierung bewässert die Anlage weiter und war während des Verbindungsausfalls lediglich nicht für Anpassungen der Bewässerungsintervalle erreichbar. Bezüglich einer verlässlichen, benutzerfreundlich einstellbaren automatisierten Bewässerung kann das gewählte System aufgrund seiner geringen Fehleranfälligkeit weiterempfohlen werden.

Weniger zufriedenstellen konnte leider die zugehörige Durchflusserkennung und Verbrauchsdatenerhebung der Hydrawise-Software. Es waren mehrere Nachrüstungen an Wasserzählern nötig, da die Durchflussmengen oftmals zu gering waren, sodass sie nicht kontinuierlich erfasst wurden. Zudem waren die Daten aus nicht nachvollziehbaren Gründen nicht regelmäßig vollständig abrufbar, was eine systematische Auswertung über längere Zeiträume leider unmöglich machte. Zur kontinuierlichen Datenerfassung für Forschungszwecke kann das System demzufolge leider nicht empfohlen werden.

Beide Begrünungssysteme wurden nach den Empfehlungen der Hersteller bewässert, wobei die Bewässerung im Sommer jeweils intensiviert wurde. Das Rinnensystem wurde nur einmal am Tag mittags bewässert und somit das Reservoir wieder aufgefüllt, während beim Vliessystem auf mehrere Bewässerungsgänge pro Tag zur regelmäßigen Durchfeuchtung gesetzt wurde. Beim Rinnensystem variierten die mittäglichen Bewässerungszeiten je nach Jahreszeit und Exposition zwischen 2 und 6 Minuten. Das Vliessystem wurde im Frühling und Herbst dreimal täglich 5 bis 7 Minuten bewässert. Im trockenen, heißen Hochsommer wurde teilweise täglich ein zusätzlicher vierter Bewässerungsgang eingeplant, vor allem am südlich exponierten Klimahaus. Im Juli 2018 führten diese Bewässerungseinstellungen beispielsweise zu einem höheren Wasserverbrauch des Vliessystems (4,1 Liter pro m² und Tag) gegenüber dem Rinnensystem (3,1 Liter pro m² und Tag). Bei nur drei Bewässerungsgängen pro Tag verbraucht das Vliessystem insgesamt weniger Wasser als das Rinnensystem.

Die gesamte Klima-Forschungs-Station war nur von Frühling bis Herbst an die Wasserversorgung angeschlossen. Im Winter wurde somit auf eine automatisierte Bewässerung verzichtet, was grundsätzlich für die meisten Versuchsarten kein Versorgungsproblem darstellte. Lediglich sehr kalte und dennoch strahlungsintensive Wintertage sowie der Übergang vom Winter in den Frühling sorgten für zwischenzeitliche Wasserunterversorgung der Versuchsarten. In einem Folgeprojekt soll deshalb ein Winterbewässerungssystem eingesetzt werden, welches in Kombination mit den vorhandenen Erdwärmerohren neue gestalterische und energetische Potentiale der wandgebundenen Begrünung aufzeigen soll.

### 3.3.4. Schlussfolgerungen und Fazit

Die beiden getesteten Begrünungssysteme beeinflussten das Mikroklima im Fassadenumfeld signifikant. Die meisten Versuchsarten wuchsen besser im Rinnensystem, manche wurden aber im Vliessystem deutlich größer (*Geranium, Heuchera* 'Chantilly', *Nepeta*). Die Ausfallraten waren im Vliessystem höher, was auf eine engere Abhängigkeit vom Bewässerungssystem zurückzuführen ist. Vor allem der Übergang vom Winter ohne Bewässerung zum Bewässerungsstart im Frühjahr gestaltete sich im Hinblick auf Frostgefahr gleichzeitig mit schon starker Sonneneinstrahlung als schwierig. Das Maximalgewicht des Vliessystems liegt deutlich unter dem des Rinnensystems, was beim Aufbau einer grünen Wand prinzipiell von Vorteil ist, weil geringere Lasten bewegt werden und stabil im Fassadenaufbau verankert werden müssen.

Beide getesteten energetischen Bauteile scheinen mit wandgebundener Begrünung kombinierbar. Die schaltbare Wärmedämmung an Klimahaus Süd wurde in den ersten Versuchsjahren Voruntersuchungen unterzogen, woran die Messaufbauten angepasst wurden. Im Sommer 2020 wird die schaltbare Wärmedämmung einer Langzeitmessung unterzogen, um zu quantifizieren, wieviel der Verdunstungskälte der Pflanzen effizient in ein Gebäude transportiert werden kann. Die passiven Erdwärmerohre wurden in den Wintern 2018/2019 und 2019/2020 mit beiden Begrünungssystemen jeweils erfolgreich kombiniert (siehe Kapitel 3.4.). In einem nächsten Schritt soll versucht werden, die Erdwärme nicht nur in den Zwischenspalt, sondern direkt ans Begrünungssystem zu transportieren. Die potenziellen Auswirkungen auf die Pflanzen soll untersucht werden. Zudem wird eine Winterbewässerung integriert und gegebenenfalls daran angepasst die Bepflanzung variiert.

Der Abstand zwischen Fassade und Begrünung wirkte sich ebenfalls signifikant auf das gebäudenahe Mikroklima aus. Je größer es gewählt wurde, desto weniger feucht und desto kühler wurde es im fassadennahen Umfeld. Daraus lässt sich ableiten, dass der ideale Abstand sowohl vom verwendeten System abhängt als auch an dem hauptsächlich erwünschten Effekt der Fassadenbegrünung angepasst werden kann. Auch bei den Erdwärmeversuchen beeinflusste die Breite des Zwischenspalts die Ergebnisse (siehe Kapitel 3.4.).

Die verwendeten Versuchspflanzenarten haben sich als geeignet erwiesen, um den Einfluss von wandgebundenen Systemen auf das umgebende Mikroklima nachzuweisen. Beinahe uneingeschränkt können die Versuchsarten Geranium, Heuchera 'Chantilly' und 'Amethyst Myst' sowie Hosta empfohlen werden, da sie in beiden Systemen gut wuchsen und sich gegenüber kurzzeitiger Wasserknappheit und starker Sonneneinstrahlung als relativ unempfindlich erwiesen. Campanula, Aster und Sesleria dürfen keiner zu starken Einstrahlung ausgesetzt sein und verkraften einen Bewässerungsausfall weniger gut. Abgesehen von diesen Einschränkungen sind auch diese Versuchsarten gut für wandgebundene Systeme verwendbar. Waldsteinia braucht ausreichend Schatten, da ihre Blätter sonst zu sehr durch Einstrahlung geschädigt werden. Nepeta verträgt keine zu langen Bewässerungslücken, mag es sonst aber sehr sonnig und nicht zu beengt. Hakonechloa ist ebenfalls sehr auf eine funktionierende Bewässerung mit ausreichendem Substratspeicher angewiesen. Bistorta kann nicht empfohlen werden, vermutlich weil der Standort Fassade für diese Staude zu eng ist, sodass sie sich selbst nicht mit ausreichend Wasser versorgen kann. Chrysogonum ist empfindlich gegenüber Wasserknappheit und Einstrahlung und hatte im Versuch so geringe Überlebensraten, dass es nicht für eine Verwendung in der Wandbegrünung empfohlen werden kann. Für eine ganzjährig ansprechende Optik empfiehlt sich ein Anteil von mindestens 60% immergrünen Arten an der Gesamtpflanzenanzahl.

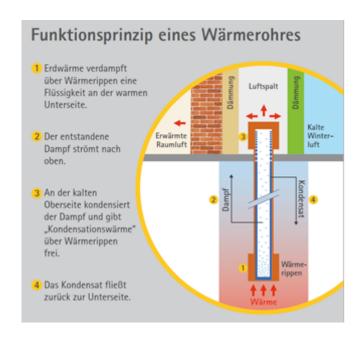
#### 3.4. Teilversuch Erdwärme

### 3.4.1. Zielsetzung

An der Klima-Forschungs-Station wurden begrünbare Klimafassaden entwickelt und optimiert (siehe Hauptversuch Kapitel 3.3). Während der Vegetationsperiode wirkt wandgebundene Begrünung als natürliche Klimaanlage. Da die Klimafassade ganzjährig einsetzbar sein soll, wurde untersucht, ob passive Erdwärmenutzung im Winter den Gesamtaufbau unterstützen kann. Ziel war es herauszufinden, inwiefern die passiv gewonnene Erdwärme die Pflanzen in den Begrünungssystemen beeinflusst. Außerdem sollte untersucht werden, ob die leichte Erwärmung der Gebäudeaußenwand Transmissionswärmeverluste signifikant verringert, ob also die Erdwärmegewinnung insgesamt zu einer gesteigerten Energieeffizienz am Gebäude führt.

#### 3.4.2. Material und Methode

Die Erdwärmerohre sind am Klimahaus West verbaut. Für den Versuch wurden die Fassadenprüfstände nachgerüstet. U-Schienen wurden am Rahmengestell befestigt, sodass der Zwischenspalt zwischen Gebäude und Begrünung mit Styrodur-Dämmmaterial abgedichtet werden konnte. Dabei wurden auch die beiden Fassadenhälften abgetrennt, sodass auf der linken Seite ein geschlossener Luftraum mit passiver Erdwärmenutzung und auf der rechten Seite ein entsprechender Luftraum ohne Erdwärmenutzung entstand. Als Begrünungssystem wurde im Winter 2018/19 das flächige Vlies-System in zwei Abständen untersucht. Zu Versuchsbeginn befanden sich alle Pflanzen in einem vergleichbaren Entwicklungsstand. Im Winter 2019/20 wurde das regalförmige Rinnen-System in drei Abständen eingesetzt und anschließend noch der zuvor vernachlässigte minimale Abstand beim Vliessystem. Das Funktionsprinzip der verwendeten Wärmerohre ("Heatpipes") ist in Abbildung 121 vereinfacht dargestellt.



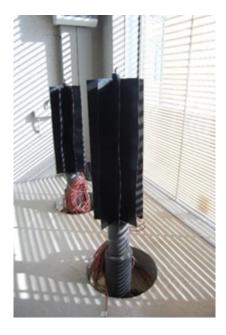


Abbildung 121: Vereinfachte Darstellung des passiven Erdwärmetransports durch Verdampfung und Kondensation innerhalb eines Wärmerohrs im Fassadenaufbau (links) und oberes Ende (etwa 1m von insgesamt 5m) einer im Innenraum des Klimahaus West eingebauten Heatpipe (rechts, Bildquelle: ZAE Bayern)

### 3.4.3. Ergebnisse

Um die Wirkungsweise der Wärmerohre zu testen, sind niedrige Außentemperaturen nötig, weil erst ein genügend großes Temperaturgefälle zwischen Erdreich und Oberflächenluft den passiven Wärmetransportmechanismus in Gang setzt. Für die Winter 2018/19 (Vliessystem) und 2019/20 (Rinnensystem) wurden deshalb geeignete Frostperioden zur Auswertung herangezogen.

### 3.4.3.1. Vliessystem

Abbildung 122 bezieht sich auf ein Frostereignis vom 12.12.18 bis zum 17.12.18 bei einem Rahmengestellabstand von 25cm. Im Spalt mit Wärmerohren werden deutlich höhere Temperaturen gemessen (bis zu 2K). Im Substrat, sozusagen auf der anderen Seite des Begrünungssystems, ist diese Erwärmung allerdings nicht mehr eindeutig messbar. Das Höhenprofil im Spalt ohne Erdwärme ist relativ gleichmäßig verteilt. Oben ist es am wärmsten, auf mittlerer Höhe etwa kühler und unten am kühlsten, mit einem Unterschied von jeweils ungefähr 0,5K. Anders sieht es im Spalt mit Erdwärme aus. Hier liegen die Temperaturen im oberen und mittleren Bereich gleichauf, während es unten etwa 1,5K kühler ist. Aber auch in diesem unteren Bereich ist die Erwärmung im Vergleich zum Spalt ohne Erdwärme deutlich erkennbar, wenn man die grünen Kurven in Bezug zur Außentemperatur (türkise Kurve) setzt. Bei einem größeren (30cm) und kleineren (20cm) Abstand wurden vergleichbare Ergebnisse erzielt.

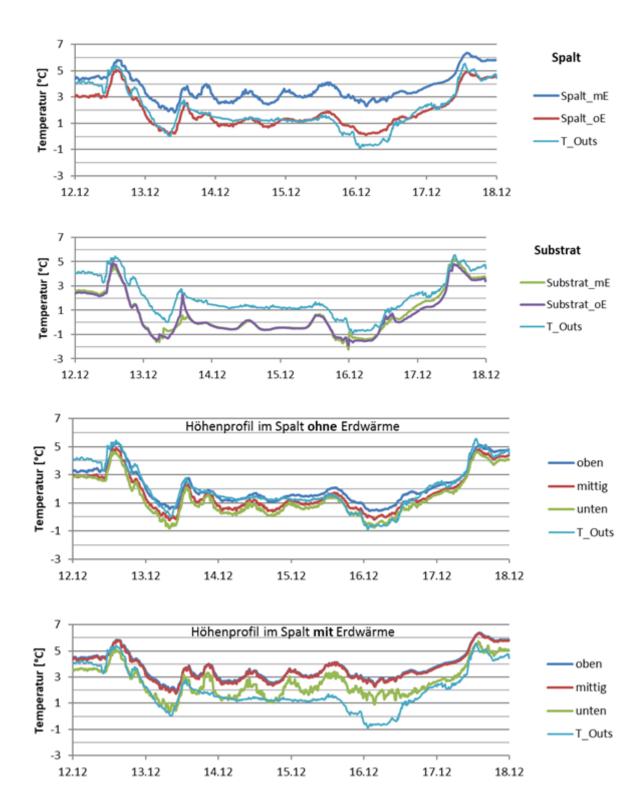


Abbildung 122: Temperaturverläufe während des Frostereignisses vom 12.bis zum 17.12.2018 (Abstand: 25cm) in Zwischenspalt und Substrat, jeweils mit und ohne Erdwärme, sowie als Höhenprofil im Spalt ohne und mit Erdwärme unter Verwendung des Vliessystems, T\_Outs beschreibt die Außentemperatur als Referenz

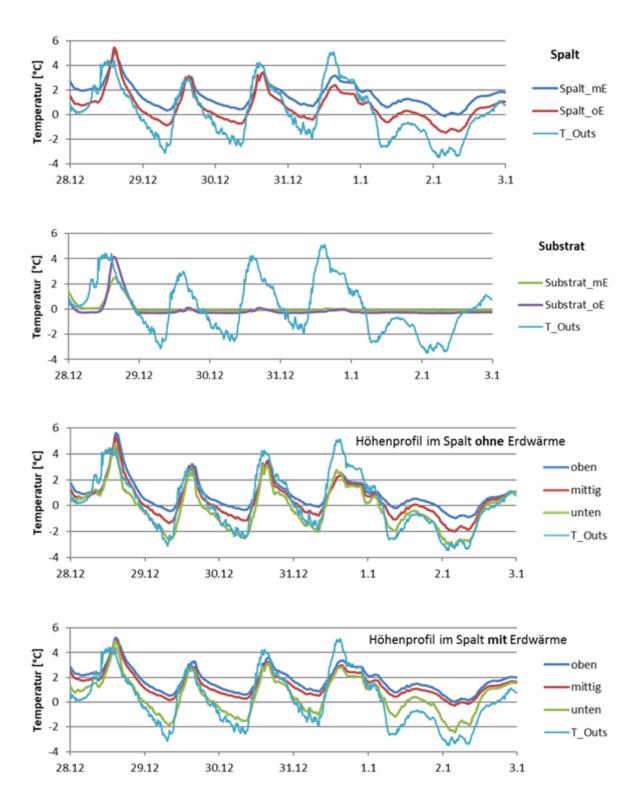


Abbildung 123: Temperaturverläufe während des Frostereignisses vom 28.12.2019 bis zum 02.01.2020 (Abstand: 30cm) in Zwischenspalt und Substrat, jeweils mit und ohne Erdwärme, sowie als Höhenprofil im Spalt ohne und mit Erdwärme unter Verwendung des Rinnensystems, T\_Outs beschreibt die Außentemperatur als Referenz

#### 3.4.3.2. Rinnensystem

Abbildung 123 bezieht sich auf ein Frostereignis vom 28.12.19 bis zum 02.01.20 bei einem Rahmengestellabstand von 30cm. Im Spalt mit Wärmerohren werden deutlich höhere Temperaturen gemessen (bis zu 1,5K). Im Substrat, sozusagen auf der anderen Seite des Begrünungssystems, ist diese Erwärmung auch beim Rinnensystem nicht eindeutig messbar. Sobald die Außentemperatur unter 0°C fällt, fallen die Temperaturen im Substrat mit und ohne Erdwärme auf knapp unter den Gefrierpunkt und bleiben dabei, auch während wärmerer Tagestemperaturen, über längere Zeiträume auffällig konstant. Dies wurde auch in den Abständen 20 und 25cm beobachtet. Das Höhenprofil im Spalt ohne Erdwärme ist relativ gleichmäßig verteilt. Oben ist es am wärmsten, auf mittlerer Höhe etwa kühler und unten am kühlsten, mit einem nächtlichen Unterschied von jeweils ungefähr 1K, welcher tagsüber stark zusammenschmilzt. Etwas anders sieht es im Spalt mit Erdwärme aus. Hier liegen die Temperaturen im oberen und mittleren Bereich näher beieinander, während es unten bis zu 2K kühler ist. Aber auch in diesem unteren Bereich ist die Erwärmung im Vergleich zum Spalt ohne Erdwärme deutlich erkennbar, wenn man jeweils die grünen Kurven in Bezug zur türkisen Kurve setzt, welche die Außentemperatur anzeigt.

### 3.4.4. Diskussion und Fazit

Die Erdwärmerohre in der linken Fassadenhälfte des Klimahauses West haben im Zwischenspalt einen eindeutigen erwärmenden Effekt gezeigt. Im Substrat der Begrünungssysteme waren allerdings keine eindeutigen Unterschiede messbar, was darauf hindeutet, dass die bisherige Erwärmung nicht ausreicht, um Pflanzen in wandgebundenen Fassadenbegrünungen signifikant zu beeinflussen. Das Ziel wäre hierbei zuerst einmal die Frostfreihaltung des Substrats, um auch im Winter eine Wasseraufnahme für immergrüne Pflanzen zu ermöglichen.

Der gewählte Spaltabstand hatte nur einen geringen Einfluss auf die beobachteten Temperaturerhöhungen. Es waren bei den beiden getesteten Systemen jeweils die gleichen Muster erkennbar, unabhängig vom gewählten Spaltabstand.

Unter Verwendung des Vliessystems wurden deutliche Temperaturerhöhungen im Spalt mit Erdwärmerohren gemessen, während die Substrattemperatur sowohl mit als auch ohne Erdwärmerohre annähernd gleiche Werte erzielte. Auffällig war hierbei, dass die Substrattemperaturen oftmals deutlich unter den gemessenen Außenlufttemperaturen lagen. Das Vliessystem scheint also Frost im Substrat zu begünstigen. Eine Ursache könnte hierbei die mehrfache Vliesschicht um die Substratkörper darstellen, die eine Erwärmung durch Sonneneinstrahlung verhindert und somit eher niedrigere Temperaturen konserviert.

Beim Rinnensystem wurden im Spalt mit Erdwärmerohren ebenfalls erhöhte Temperaturen gemessen. Die Differenz war hierbei im Mittel etwas kleiner als beim Vliessystem, aber durchaus auch sehr deutlich messbar. Besonders auffällig waren die Substrattemperaturen im Rinnensystem. Sobald die Außentemperatur unter 0°C fiel, pendelten sich die Temperaturen im Substrat (mit und ohne Erdwärme) auf einen annähernd konstanten Wert knapp unter 0°C ein. Dieser Zustand blieb oft über mehrere Tage bestehen, auch wenn die Außentemperaturen zwischenzeitlich wieder deutlich

über den Gefrierpunkt stiegen. Erst andauernde Plustemperaturen führten zu erneuten Schwankungen in der Substrattemperatur. Eine mögliche Erklärung für diese Temperaturverläufe besteht im großen, offenliegenden Substratverbund und der damit verbundenen stärker ausgeprägten Erwärmbarkeit durch Einstrahlung. Ein größeres zusammenhängendes Substratvolumen gleicht Temperaturschwankungen gleichmäßiger aus als kleinere isolierte Substratvolumina. Zudem kann das Substrat in den Rinnen direkt an der Oberfläche und auch an den Seiten durch die gute Leitfähigkeit des Rinnenmaterials durch Einstrahlung erwärmt werden, sodass tiefere Temperaturen gar nicht erreicht werden. Die Wärmerohre schienen keinen entscheidenden Einfluss auf die Substrattemperaturen zu haben, da dieses Messwertverhalten sowohl auf der Seite mit als auch auf der Seite ohne Wärmerohre im Substrat beobachtet wurde.

Betrachtet man die Temperaturhöhenprofile im Luftspalt, liegen die im mittleren und oberen Bereich gemessenen Werte meist nah beieinander, während die Werte im unteren Bereich etwas niedriger liegen. Dies ist auf das Aufsteigen wärmerer Luftpakete zurückzuführen, sodass sich wärmere Luft eher in höheren Bereichen eines Luftpakets ansammelt. Die kühleren Temperaturen im unteren Spaltbereich hängen zusätzlich mit dem Luftaustausch mit dem Außenbereich zusammen, weil der Zwischenspalt unten nicht luftdicht abgetrennt wurde.

In einem nächsten Schritt soll statt einer Luftpolstererwärmung versucht werden die gewonnene Erdwärme beispielsweise durch eine Flanschlösung direkt an das Begrünungssystem zu übermitteln, um im Zusammenspiel mit einer Winterbewässerung Auswirkungen auf die Bepflanzung untersuchen zu können.

# 3.5. Teilversuch Innenraum

### 3.5.1. Zielsetzung

Pflanzen im Innenraum können das Raumklima positiv beeinflussen. Vor allem bei regelmäßiger Bewässerung wird die relative Luftfeuchtigkeit erhöht und die Raumluft gekühlt. Außerdem wird die Luftqualität durch die Umwandlung von Kohlenstoffdioxid zu Sauerstoff verbessert.

Sogenannte Living Walls (wandgebundene Begrünungen) werden neben dem Außenbereich mittlerweile auch im Innenbereich eingesetzt. Eine besondere Herausforderung sind hierbei die Lichtverhältnisse. Oftmals muss durch eine künstliche Beleuchtung nachgeholfen werden, damit die Pflanzen ausreichend Licht zur Photosynthese erhalten.

Im Eingangsbereich des Fachzentrums Analytik der LWG wurde eine zweiteilige Innenraumbegrünung ("Living Walls") des Herstellers mobilane GmbH installiert. Es handelt sich um ein Foyer, welches zwei Geschosshöhen umfasst. Die Räumlichkeit wird gelegentlich für Veranstaltungen genutzt. Die beiden Living Walls bestehen jeweils aus 24 einzelnen Modulen (ca. 40cm x 40cm), die in eine Rinnenhalterung inklusive Wasserversorgung eingehängt werden. Die Living Walls sind insgesamt jeweils etwa 2m hoch und 2,50m breit.

Anhand von Temperatur- und Feuchtesensoren wurde das Raumklima um die Innenraumbegrünung erfasst. Zudem wurde die Verfügbarkeit von photosynthetisch aktiver Strahlung ermittelt (PAR-Sensoren).

#### 3.5.2. Material und Methode

Die Innenraumbegrünung wurde nachträglich im Eingangsbereich installiert. Die begrünte Wand ist Richtung Nordosten ausgerichtet. Im rechten Winkel daran angrenzend besteht die Wand um die Eingangstür herum aus einer großen Fensterfront, Richtung Südosten. Vorhandene Aussparungen im Bodenbereich konnten genutzt werden, um die automatische Bewässerung der Grünelemente unterzubringen. Die linke Teilwand wurde mit *Philodendron scandens* 'Pictus' bepflanzt, während auf der rechten Seite *Epipremnum pinnatum Pothos* 'Neon' verwendet wurde.

Da nur wenig natürliches Licht die Living Walls erreicht, werden die Pflanzen zusätzlich mit künstlichem Licht versorgt. Anhand von PAR-Sensoren wurde kontinuierlich in 5-Minuten-Intervallen überprüft, wie hoch der Lichtanteil ist, den die Pflanzen für Photosynthese nutzen können. Zusätzlich wurden kleine mobile Datenlogger angebracht, die in der Begrünung und in verschieden großen Abständen zu den grünen Wänden kontinuierlich in 15-Minuten-Intervallen Mikroklimadaten erfassten. Je Teilwand wurde ein Sensor direkt in der Bepflanzung, ein weiterer am Lampensteg (ca. 1m vor den grünen Wänden) und ein dritter am entfernteren Ende der Kunstinstallation etwas oberhalb installiert (ca. 3m, s.a. Abbildung 124). Als Vergleichspunkte dienten zwei weitere Sensoren an Geländer und Laborzugang im ersten Obergeschoss. Für eine erste Auswertung werden die Messdaten von März bis November 2019 herangezogen.



Abbildung 124: Komplettansicht der Innenwandbegrünung, links im Bild ist die beginnende Fensterfront zu sehen



Abbildung 125: PAR-Sensor (schwarz, rund) und Datenlogger für Temperatur und relative Luftfeuchte (weiß, eckig)

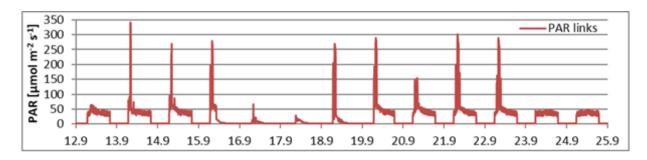
### 3.5.3. Ergebnisse

### 3.5.3.1. Lichtverfügbarkeit

Die PAR-Sensoren wurden jeweils mittig sowohl in der linken als auch in der rechten Wand platziert, um das für die Pflanzen verfügbare Licht zu quantifizieren. Nachts wurden hierbei kontinuierlich an beiden Sensoren 1,2  $\mu$ mol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> gemessen. Tagsüber schwankten die Messwerte über den gesamten Jahresverlauf auf der linken, fensternahen Seite zwischen 30 und 60  $\mu$ mol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, während an der rechten, weiter vom Fenster entfernten Seite Werte zwischen 30 und 40  $\mu$ mol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> gemessen wurden.

Phasenweise wurden zu Tagesbeginn (im Zeitfenster zwischen 6:45 Uhr und 9:00 Uhr) deutlich höhere Werte gemessen. Der höchste auf der linken Seite gemessene Wert lag bei 420  $\mu$ mol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> am 25.04.19 und am 18.08.19 jeweils gegen 7 Uhr, auf der rechten Seite waren die Maxima nur halb so groß (210  $\mu$ mol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> am 22.03.19 um 6:20 Uhr und 200  $\mu$ mol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> am 21.09.19. um 7 Uhr). In manchen Monaten tauchten die Extremwerte auf, während sie in anderen ausblieben. Bei genauerer Betrachtung zeichnete sich hierbei ein Muster im Jahresverlauf ab (Tabelle 8).

In Abbildung 126 wird ein exemplarischer Verlauf der Messwerte vom 12. Bis zum 24.09.2019 dargestellt. Hier sind die Extremwerte zu Tagesbeginn gut erkennbar. Die Messwerte auf der rechten (weiter von der Fensterfront entfernten) Seite liegen deutlich unter denen der linken Seite. Auffällig sind zudem die extrem niedrigen Messwerte am 16. Und 17.09.2020, die auf ausgeschaltete Beleuchtung zurückzuführen sein könnten.



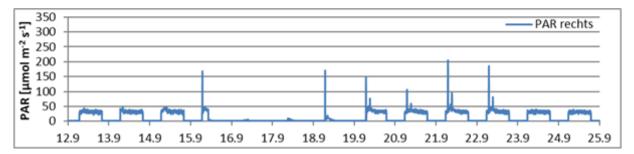


Abbildung 126: Photosynthetisch aktive Strahlung an den Sensoren in der linken Wand (oben) und der rechten Wand (unten) vom 12. bis zum 24.09.2019

Tabelle 8: Auftreten von PAR-Extremwerten an beiden Wänden im Jahresverlauf von März 2019 bis November 2019 (X = ja, O = nein)

Monat	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov
linke Wand	Х	Х	0	0	0	Х	Х	Х	0
rechte Wand	Х	О	О	О	О	0	Χ	О	0

### 3.5.3.2. Mikroklima (Temperatur, Luftfeuchte und Taupunkt)

Die verwendeten mobilen Klimadatenlogger wurden direkt in der Begrünung sowie in verschieden großen Abständen dazu positioniert. Die Raumtemperatur, die relative Luftfeuchte und der aktuelle Taupunkt wurden in Bezug auf die im restlichen Raum erhobenen Daten ausgewertet. Die Begrünung sorgte für niedrigere Temperaturen, eine höhere Luftfeuchtigkeit und einen höheren Taupunkt. Diese Effekte nahmen mit zunehmendem Abstand zur Begrünung kontinuierlich ab (Tabelle 9).

Tabelle 9: Mittelwert der Differenz zwischen Datenpunkt A (Begrünung, Lampensteg, oder Kunstwerk) und Datenpunkt B (Raumluft in genügend großem Abstand zur Begrünung)

Messung	Begrünung	Lampensteg	Kunstwerk
Temperatur [°C]	-0.82	-0.30	-0.20
Relative Luftfeuchtigkeit [%]	8.30	1.61	0.68
Taupunkt [°C]	1.99	0.32	0.09

### 3.5.4. Diskussion und Fazit

An beiden grünen Teilwänden wurden im Bereich der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) während des Versuchszeitraums tagsüber mindestens 30  $\mu$ mol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> gemessen, was auf die künstliche Beleuchtung zurückzuführen ist. Für eine pflanzenkompatible Innenraumbeleuchtung wird meist der doppelte Wert des durchschnittlichen Lichtkompensationspunkts von Sonnen- und Schattenpflanzen (12,5  $\mu$ mol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> \* 2 = 25  $\mu$ mol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) angenommen. Mit 30  $\mu$ mol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> war die Beleuchtung somit passend eingestellt, um auch Pflanzen ausreichend zu versorgen, die eine relativ hohe Lichtmenge für einen funktionierende Kohlenstofffixierung bei der Photosynthese benötigen.

Die im Frühling und Herbst morgendlich auftretenden Extremwerte der Strahlungsmessung sind auf den flachen Einfallswinkel der aufgehenden Sonne zurückzuführen, der die Strahlungsverfügbarkeit zu Tagesbeginn durch das Südost-Fenster deutlich erhöhte. Das Auftreten der Extremwerte hängt zudem von der Jahreszeit und dem damit einhergehenden Sonnenstand ab. Von Mai bis Juli (um die Sommersonnenwende) stand die Sonne hoch, sodass keine Auswirkungen auf die grünen Wände messbar waren, weil der Einfallswinkel zu steil war, um die innen gelegenen Wände zu erreichen. Im April bzw. August traten an der linken, fensternahen Seite Extrema auf, während dies auf der rechten Seite nur bis einschließlich März bzw. erst ab September wieder der Fall war.

Für Innenraumbegrünungen gilt es also auch die realistische Verfügbarkeit von Sonneneinstrahlung je nach Fensterausrichtung und Sonnenstand zu berücksichtigen. Jedoch ist selbst bei voll beschienenen Innenraumbegrünungen oftmals trotzdem eine künstliche Beleuchtung von Nöten, weil die immer dickeren Fensterverglasungen nur noch wenige für Pflanzen verfügbare Lichtanteile durchlassen. Die Messwerte vom 16./17.09.2019 (Abbildung 126) lassen erahnen, wieviel Licht allein durch die Einstrahlung durchs Fenster zur Verfügung stand, weil die Beleuchtung an diesen Tagen vermutlich ausgeschalten blieb.

Bezüglich des Mikroklimas war ein eindeutiger Einfluss der begrünten Wand auf Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Taupunkt messbar, welcher mit zunehmendem Abstand zu den grünen Wänden immer schwächer wurde. Interessant wäre hierbei ein Vergleich, wie weit sich diese Einflüsse in einem kleineren Raum auswirken. Zur weiteren Quantifizierung der Einflüsse von Innenraumbegrünungen auf das Raumklima wären zudem Vergleichsmessungen vor und nach Installation einer Innenraumbegrünung angeraten.

Die verwendete Sensorik (1x Micro Station H21-USB mit 2x PAR-Sensor, 8x MX Temp/RF Datenlogger MX1101, Gerätehersteller: HOBO) funktionierte zuverlässig und ließ sich über USB (PAR) bzw. Bluetooth (T/rH) auslesen. Diese Messgeräte können für vergleichbare Messungen im Innenraum weiterempfohlen werden.

Sowohl die Mitarbeiter des Fachzentrums Analytik als auch Passanten äußerten sich durchweg positiv über die neue Innenraumbegrünung. Dies ließe sich bei zukünftigen Projekten noch gezielter durch Fragebögen evaluieren, welche die Raumzufriedenheit der Benutzer vor und nach der Begrünungsinstallation abfragen. Seit Mai 2020 werden zusätzlich zu *Philodendron scandens* 'Pictus' und *Epipremnum pinnatum Pothos* 'Neon' folgende Arten in den grünen Wänden getestet: *Epipremnum pinnatum* 'Marble Queen', *Phlebodium aureum* 'Blue Star', *Pteris evergemiensis* und *Tradescantia* 'Nanouk'.

### 3.6. Teilversuch Strahlungsschutz

#### 3.6.1. Zielsetzung

Bei Temperaturmessungen bestehen die Fühler der einzelnen Sensoren oftmals aus Metall. Dies ist auch bei den an der Klima-Forschungs-Station verwendeten NTC-Sensoren der Fall. NTCs sind sogenannte Heißleiter. Die Messung der Temperatur erfolgt über den durch Erwärmung oder Abkühlung veränderten elektrischen Widerstand des Messfühlers. Dazu muss für jeden Fühler die eigene spezifische Kalibrierkurve ermittelt werden. NTCs sind sehr kostengünstige Sensoren, die allerdings vor der Messung demzufolge eine gewisse Vorbereitung benötigen.

Wenn die NTC-Fühler direkter Sonneneinstrahlung ausgesetzt sind, führt dies zu einer Erwärmung des Materials und somit zu einer Veränderung des elektrischen Widerstands. Statt der eigentlichen Lufttemperatur gibt der Sensor dann einen höheren Messwert aus. Um dies zu vermeiden, werden Sensoren nach Möglichkeit vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt. In der Meteorologie werden Temperatursensoren deshalb oftmals mit ventilierten Schutzhäuschen ausgestattet. Im Versuch

sollte eine kostengünstige Alternative für die 60 Temperatursensoren in den grünen Klimafassaden der Klima-Forschungs-Station entwickelt werden. Bei Erfolg kann die entwickelte Methode auch für vergleichbare Versuchsaufbauten verwendet werden.

#### 3.6.2. Material und Methode

In einem ersten Schritt wurden vom Versuchsbetrieb ISL vier Strahlungsschutz-Prototypen in Hülsenform gebaut. Als Material wurden ein Bambusrohr, ein Kunststoffrohr, ein Kunststoffrohr mit spiegelnder Folie beklebt und ein Metallrohr aus Stahl aus dem Messebau verwendet (Abbildung 127). Abgesehen vom Hülsenmaterial sind die Strahlungsschutz-Prototypen gleich aufgebaut. Es wurden jeweils vier Löcher in die Hülse gebohrt, um die Temperaturfühler mithilfe von eingedrehtem isoliertem Draht in der Mitte der jeweiligen Hülse zu fixieren (Abbildung 128). Dies ist wichtig, damit keine Wärme vom Hülsenmaterial direkt auf den Fühler übertragen wird. Die Fühler sind jeweils 5cm lang und haben einen Durchmesser von 5mm. Die Hülsen sind entsprechend länger, um eine vollständige Beschattung der Fühler bei jedem Sonnenstand zu gewährleisten.



Abbildung 127: Strahlungsschutz-Prototypen



Abbildung 128: Seitenansicht, Befestigung mit Isolierdraht

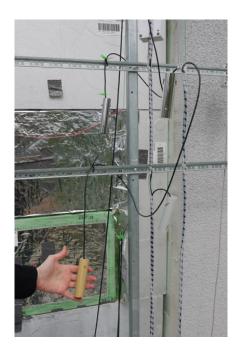


Abbildung 129: Probemessung am südlichen Fassadenprüfstand

Die Messungen wurden am südlichen Fassadenprüfstand der Klima-Forschungs-Station durchgeführt. Am 17.04.2019 wurden vier Sensoren in vergleichbarer Höhe und in vergleichbarem Abstand zu eventuell aufgeheizten und somit wärmestrahlenden Bauteilen mit je einem Prototyp ausgestattet (Abbildung 129).

# 3.6.3. Ergebnisse

Die vier Prototypen wurden eine Woche lang getestet und hinsichtlich ihrer Wirksamkeit bewertet. Während nachts kaum Temperaturunterschiede zwischen den Sensoren gemessen wurden, gab es tagsüber je nach getesteter Strahlungsschutzhülse ein unterschiedliches Ergebnis. Die höchsten Temperaturen wurden in der Bambusrohrhülse gemessen. Die Kunststoffhülse und die Metallhülse lagen etwas darunter und in etwa gleich auf. Die mit Spiegelfolie beklebte Kunststoffhülse führte als einzige zu Temperaturen, die niedriger lagen als diejenigen, die ohne jegliche Hülse gemessen wurden (Abbildung 130).

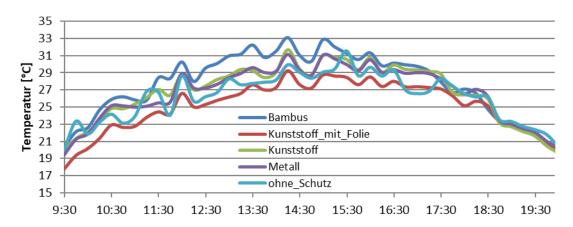


Abbildung 130: Temperatur-Tagesverlauf unter Verwendung der vier Strahlungsschutz-Prototypen am 21.04.2019 zwischen 09:30 und 20:00 Uhr

### 3.6.4. Diskussion und Fazit

Erstaunlicherweise hat die "natürliche" Bambushülse trotz porigem Material zu den höchsten Temperaturen geführt und kann somit nicht empfohlen werden. Ebenfalls überraschend war die Tatsache, dass es zwischen Kunststoff und Metall kaum einen Unterschied gab. Metall kann sich zwar leichter erwärmen, möglicherweise haben aber auch die spiegelnden Eigenschaften des Stahls einen Teil der Einstrahlung zurückgeworfen. Die ähnlichen Ergebnisse von Kunststoff und Metall sprechen zudem für die Grundkonstruktion, bei der Wert darauf gelegt wurde, dass der Sensor in jedem Fall vom Hülsenmaterial isoliert messen kann.



Abbildung 131: Strahlungsschutzhülse

Die niedrigsten Temperaturen wurden bei der Kombivariante von Kunststoffrohr und Spiegelfolie gemessen. Der Unterschied zum einfachen Kunststoffrohr resultiert somit nur aus den spiegelnden Eigenschaften der Folie, die einen Teil der Strahlung zurückwirft und somit eine Erwärmung verhindert.

Aus diesen Ergebnissen ließ sich ableiten, dass die Temperatur in den Kunststoffhülsen mit Spiegelfolie der tatsächlichen Temperatur am nächsten kommt. Messfehler, die durch direkte Einstrahlung verursacht werden und höhere Tagesamplituden ausgeben, als in der Realität vorliegen, können mit solchen Hülsen vermieden werden. Demzufolge wurden alle 60 Temperatursensoren der Klima-Forschungs-Station anschließend mit den neuen Strahlungsschutzhülsen aus Kunststoff mit Spiegelfolie ausgestattet.

## 4. Öffentlichkeitsarbeit

Um die Fassadenprüfstände an den Klimahäusern wurden Klimagärten angelegt, welche die grüne Infrastruktur moderner Stadtplanung in Form von Klimabäumen, pflegereduzierten und dennoch artenreichen Pflanzflächen sowie versickerungsaktivem Pflaster beispielhaft abbildeten. Durch die Einbindung in die Landesgartenschau Würzburg 2018 (LGS) wurde aktuelle Forschung für eine breite Öffentlichkeit erlebbar. Es haben Aktionstage stattgefunden (28./29.04.2018, 26./27.05.2018, 15./16.06.2018, 01./02.09.2018), an denen die Besucher direkt mit Begrünungs- und Bauexperten vor Ort in Kontakt treten konnten. Beim regelmäßigen Schulklassenprogramm wurden die Forschungsthemen auch einem jüngeren Publikum altersgerecht vermittelt (insgesamt über 700 Schüler). Für die LGS-Besucher wurde zudem ein Infoleitsystem in Form von Schautafeln erarbeitet. Zur vertieften Hintergrundinformation wurde der Flyer "Pflanze trifft Bauwerk" gemeinsam mit dem ZAE Bayern entwickelt und herausgegeben. Zudem war die Klima-Forschungs-Station in den LGS-Themenschwerpunkt "Klimawelten" eingebunden. Auch nach der LGS war die Klima-Forschungs-Station der Öffentlichkeit zugänglich und wurde gut besucht. Auf Anfrage wurden weiterhin Fachführungen angeboten. Die Ergebnisse wurden zudem kontinuierlich auf Konferenzen präsentiert und diskutiert sowie in Fachzeitschriften veröffentlicht.

# 5. Ausblick: Offene Fragestellungen

Im Projekt Klima-Forschungs-Station – Entwicklung und Optimierung begrünbarer Klimafassaden wurde der signifikante Einfluss von wandgebundener Begrünung auf das fassadennahe Mikroklima unter den gegebenen Rahmenbedingungen nachgewiesen. Hinsichtlich der Übertragbarkeit der Ergebnisse gilt es aber grundsätzlich standortspezifische Gegebenheiten wie umliegende Bebauung, Exposition oder klimatische Zonierung zu berücksichtigen. Die Aussagekraft nimmt meist mit der Größe des messtechnisch erfassten Gebietes zu, da auch Wechselbeziehungen einzelner Teilbereiche untereinander in einer Gesamtschau dokumentiert werden können. Die Vermessung einer ganzen begrünten Stadt wäre somit weit aussagekräftiger als reine Modellierungen aufgrund von Labormessungen oder Teilmessungen an einzelnen Fassadenflächen (Brune et al. 2017).

Im Bereich der Energieeffizienz wurden die Begrünungssysteme erstmals erfolgreich mit passiver Erdwärmenutzung kombiniert. In einem nächsten Schritt soll geklärt werden, inwiefern die Erdwärme noch effizienter an das Begrünungssystem herangeführt werden kann und welche Vorteile sich daraus für die Bepflanzung entwickeln können. Im Gegensatz zur erwärmenden Funktion soll die schaltbare Wärmedämmung an Klimahaus Süd Verdunstungskälte effizient ins Gebäudeinnere transportieren, wofür der Nachweis noch aussteht.

Zusätzlich zu klimatischem und energetischem Nutzen kann eine begrünte Fassade auch als Lebensraum für Flora und Fauna dienen. Mit Hilfe der Fassadenprüfstände können Begrünungssysteme somit hinsichtlich ihres Beitrags zu einer funktionalen Stadtökologie untersucht werden. Ein entsprechendes Folgeprojekt mit Schwerpunkt Wildbienenhabitat wurde beim Bayerischen Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten beantragt.

Die Feinstaubfilterwirkung von begrünten Fassaden lässt sich in situ (vor Ort unter Außenluftbedingungen) aufgrund von Luftbewegung und instationären Randbedingungen nicht eindeutig nachweisen. Einzelne Arten können hinsichtlich ihrer Blattoberflächenstruktur und des damit verbundenen Adsorptions- und Absorptionspotentials untersucht werden. Eine Gesamtbetrachtung begrünter Fassaden ließe sich eventuell in deutlich größerem Maßstab, beispielsweise in Form eines begrünten Straßenzugs im Vergleich zu einem unbegrünten Straßenzug realisieren. Ergebnisse aus dem Dachbegrünungsbereich lassen sich nur bedingt auf die Fassadenbegrünung übertragen (FBB 2012).

Ein entscheidender und oft vernachlässigter Aspekt der Wandbegrünungsforschung ist die Befestigung eines wandgebundenen Systems oder von Rankhilfen für bodengebundene Lösungen. Wenn kein Fundament verwendet wird, muss die Begrünung direkt in der Fassade verankert werden. Hierbei gilt es statisch sicher zu planen und eine möglichst wärmebrückenarme Befestigung zu entwickeln, welche sich mit modernen Dämmstrategien kombinieren lässt.

### 6. Literatur

- Brune M, Bender S, Groth M (2017): Gebäudebegrünung und Klimawandel Anpassung an die Folgen des Klimawandels durch klimawandeltaugliche Begrünung, Report 30, Climate Service Center Germany, Hamburg
- FBB (2012): Feinstaubbindungsvermögen der für Bauwerksbegrünung typischen Pflanzen, bearbeitet durch das Institut für Agrar- und Stadtökologische Projekte an der Humboldt-Universität zu Berlin (IASP), beauftragt durch die Fachvereinigung Bauwerksbegrünung e. V., Saarbrücken
- FLL (2018): Richtlinie für Planung, Bau und Instandhaltung von Fassadenbegrünungen, 3. Überarbeitete und ergänzte Ausgabe 2018, Hrsg.: Forschungsgesellschaft für Landschaftsentwicklung und Landschaftsbau e. V., Bonn
- Frahm JP (2008): Feinstaubreduktion an Straßenrändern durch Moosmatten, Vortrag.

  URL:https://www.bast.de/BASt\_2017/DE/Publikationen/ Veranstaltungen/VerkeVerkehrste/V3-Luftqualitaet-2008/luftqualit%C3%A4t-vortrag-frahm.html, Letzter Aufruf: 11.05.2020
- Ingold R (2018): Infoschrift zu Mooskulturen (Grundlagen, Erkenntnisse, Umsetzung, Pflege, Bedeutung für das Klima), Ingold Gartenbau und Begrünungen AG, Oberwil-Lieli, Schweiz
- Manso M, Castro-Gomes J (2015): Green wall systems: A review of their characteristics, Renewable and Sustainable Energy Reviews 41, 863–871.
- Pfoser N, Jenner N, Henrich J, Heusinger J, Weber S (2013): Gebäude Begrünung Energie Potenziale und Wechselwirkungen, 1. Ausgabe 2014; bearbeitet von der TU Darmstadt in Kooperation mit der TU Braunschweig, Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung

# 7. Vorträge und Veröffentlichungen

### 7.1. Vorträge

- Eppel, J.; Demling, F.; Bohl, J.; Grüne Klimafassaden Utopie und Wirklichkeit, 50. Veitshöchheimer Landespflegetage, Mainfrankensäle Veitshöchheim, 20.02.18
- Bohl, J.; Grüne Klimafassaden Auswirkungen wandgebundener Fassadenbegrünung auf das Mikroklima, Pilotveranstaltung Weiterbildung KlimAGaLa, HS Osnabrück, 15.05.19
- Bohl, J.; Römer, C.; Klima-Forschungs-Station Würzburg: Gemeinschafts-projekt von LWG und ZAE, BuGG-Tag Forschung und Lehre Gebäudegrün 2019, ZAE Bayern, 18.09.19
- Bohl, J.; Grüne Klimafassaden Auswirkungen wandgebundener Fassadenbegrünung auf das Mikroklima, BuGG AK Gehölze auf Dächern, LWG Veitshöchheim, 09.10.19
- Bohl, J.; Dr. Reim, M.; Klima-Forschungs-Station Würzburg. Ergebnisse zu den energetischen Wirkungen begrünter Fassaden, 11. BuGG-Fassadenbegrünungssymposium 2019, Düsseldorf, 21.11.19
- Bohl, J.; Biodiversität an grünen Wänden Chancen für den Endverkauf?, 63. Lindauer Tag, Gartenbau, ZP-Endverkauf, Lindau (Bodensee), 14.01.20
- Bohl, J.; Eppel, J.; Dr. Reim, M.; Pflanze trifft Bauwerk Ergebnisse eines Praxisversuchs, 52. Veitshöchheimer Landespflegetage, Mainfrankensäle Veitshöchheim, 21.01.20
- Bohl, J.; Dr. Reim, M.; Energetische Wirkungen begrünter Fassaden (Poster), 7. Forschungsforum Landschaft der FLL, Nürtingen, 05./06.03.20 (3. Platz im Posterwettbewerb, s. Anhang A)

# 7.2. Fachpublikationen

- Eppel, J.; Demling, F.; Bohl, J.; Grüne Klimafassaden Utopie und Wirklichkeit, Veitshöchheimer Berichte 183 (2018), S. 45-53 (Tagungsband 50. Landespflegetage)
- Bohl, J.; Grüne Klimafassaden für die Praxis, Landschaft Bauen und Gestalten, 05/18, S.10-14
- Bohl, J.; Die "Grünen Klimafassaden" der Zukunft Grau in Grau? Farbkleckse braucht die Betonlandschaft, Schule und Beratung, 07/18, S.42-44
- Bohl, J.; Substratlose Bepflanzungsvarianten für das begrünbare Lamellensystem "CityLam", Versuche im Garten- und Landschaftsbau 2018, Nr. 2, Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V., Bonn (Hrsg.)
- Bohl, J.; Grüne Klimafassaden für die Stadt der Zukunft, Neue Landschaft, 09/19, S. 31-36
- Eppel, J.; Bohl, J.; Dr. Reim, M.; Pflanze trifft Bauwerk Ergebnisse eines Praxisversuchs, Veitshöchheimer Berichte 187 (2020), S. 47-57 (Tagungsband 52. Landespflegetage)
- Bohl, J.; Pflanze trifft Bauwerk Ergebnisse eines Praxisversuchs, Neue Landschaft, 04/20, S. 42-47

### 7.3. Presse, Rundfunk, Fernsehen

- Eppel, J.; Bohl, J.; Pflanze trifft Hauswand Grüne Fassaden an der "Klima-Forschungs-Station" auf der Landesgartenschau, TV Mainfranken, 06.07.2018
- Bohl, J.; Verkabelte Klimabäume, Antenne Bayern, 06.08.2018
- Bohl, J.; Frankenschau aktuell: Würzburger Forscher arbeiten an spezieller Wandkonstruktion, Bayerischer Rundfunk, 07.08.2018

- Bohl, J. (mit ZAE); Grüne Hausfassaden gegen Stadthitze, TV Mainfranken, 08.08.2018
- Bohl, J. (mit ZAE); Mittags in Mainfranken live von der Würzburger Landesgartenschau: von Bienen und begrünten Hauswänden, Bayern 1, 18.09.2018
- Bohl, J.; Fachtagung in Würzburg: Wie grüne Fassaden dem Stadtklima nutzen, Bayerischer Rundfunk, 18.09.2019
- Bohl, J.; Tagung zur Gebäudebegrünung, Radio Bayern 2, 19.09.2019

## Anhang A – Posterpräsentation FLL

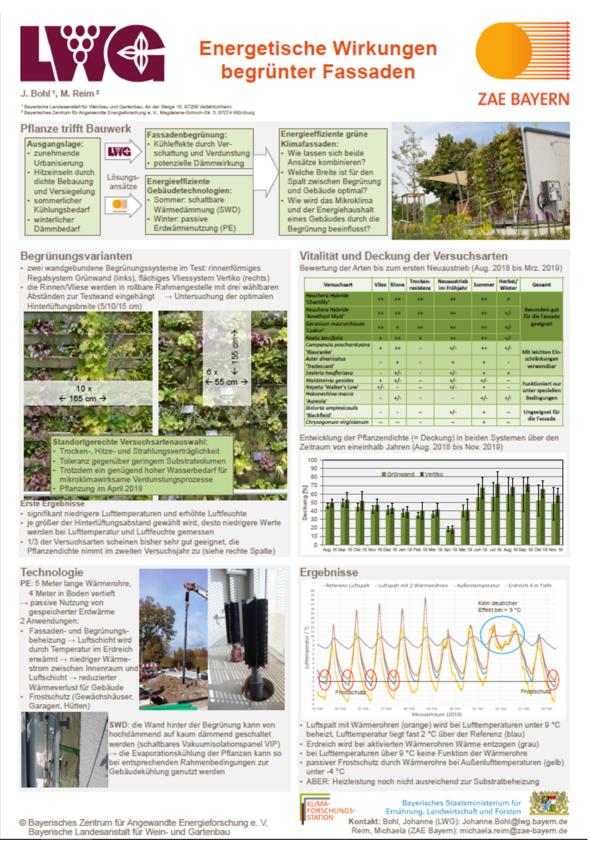


Abbildung 132: 3. Platz beim Posterwettbewerb des 7. Forschungsforum Landschaft der FLL mit dem Motto "Grün macht Klima" am 05./06.03.2020 in Nürtingen

# Anhang B – Infoflyer "Pflanze trifft Bauwerk"

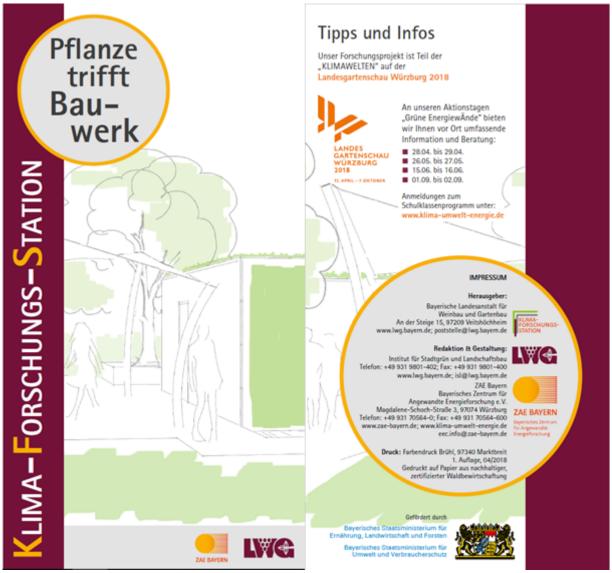


Abbildung 133: Vorder- und Rückseite des 12-seitigen Infoflyers "Pflanze trifft Bauwerk", Herausgeber: Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau (LWG), Gestaltung: Institut für Stadtgrün und Landschaftsbau (ISL) und Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung (ZAE Bayern)

## Anhang C – Ergänzendes Material Lamellenversuch

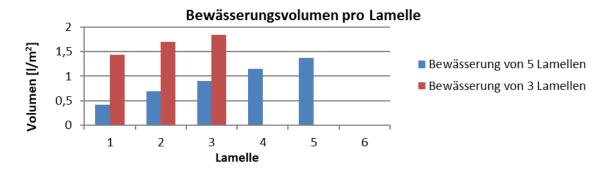


Abbildung 134: Das Bewässerungssystem von CityLam ist nicht druckkompensiert, was bei einer Öffnung von 5 Leitungsabzweigungen zu extremen Unterschieden im Bewässerungsvolumen führte. Das Verschließen der unteren Abzweigungen 4 & 5 erhöhte den Wasserdruck in den oben liegenden Lamellen 1 bis 3. Dieser Systembereich wurde somit ausreichend direkt versorgt, während die unteren Lamellen nur Abtropfwasser erhielten, was sich im Versuch als vorerst ausreichende Lösung herausgestellt hat.

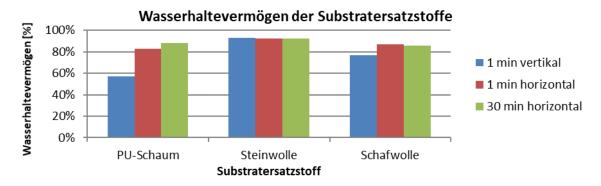


Abbildung 135: Die Substratersatzstoffe sollten trotz der unterschiedlichen Lamellenstellungen eine ausreichende Wasserspeicherung bei gleichmäßiger Verteilung gewährleisten. Vor allem beim PU-Schaum fiel in Wasserhalteversuchen über verschiedene Zeitintervalle auf, dass seine Speicherfähigkeit richtungsabhängig ist. Es gilt also abzuwägen, in welchem Winkel der PU-Schaum verlegt wird.

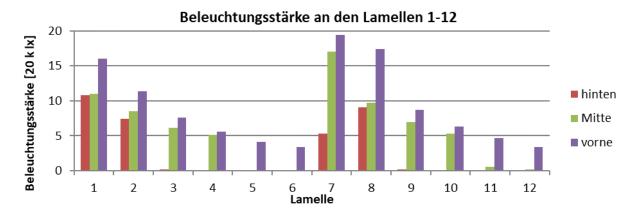


Abbildung 136: Lichtverfügbarkeit in den einzelnen Lamellen (1-6 = linkes System von oben nach unten, 7-12 = rechtes System von oben nach unten); es ist deutlich zu erkennen, dass nur in den obersten Lamellen auch die hinteren Bereiche mit ausreichend Licht versorgt werden (rote Balken); insgesamt nimmt die Lichtverfügbarkeit von oben nach unten deutlich ab, was es bei einer Pflanzplanung zu berücksichtigen gilt.

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Analyseergebnisse der Probenahme am 07.06.2017, nn = nicht nachweisbar, zum Gießen wurde bei der Regenwasservariante eine Mischung aus den vier beprobten Auffanggefäßen verwendet	10
Tabelle 2: Die sechs Sedumsvegetationsmatten wurden zu unterschiedlichen Jahreszeiten geliefert und wiesen dadurch eine ungleiche Artzusammensetzung auf; Bezugsquelle Rollrasen Müller GmbH; die jeweils drei artenarmen (A) und artenreichen (B) Matten wurden entsprechend in verschiedenen Lamellen mit allen drei Substratersatzstoffen kombiniert	18
Tabelle 3: In der Ansaat/Sedum-Variante verwendete Ansaatarten mit spezifischem Tausendkorngewicht (TKG) und Anteil am Gesamtgewicht; Bezugsquelle Rieger-Hofmann GmbH; dieses Saatgut wurde in Kombination mit Sedumsprossen verwendet; Variante 1: 0,5g/m² Keimlinge, 90g/m² Sprossen; Variante 2: 1g/m² Keimlinge, 45g/m² Sprossen	18
Tabelle 4: In der Ansaat/Sedum-Variante verwendete Sedumarten, Bezugsquelle Hofstetter Mühle GmbH, Arten des Rot-Rosa-Mix (RR) sind definitiv enthalten, während Arten im Bunt-Mix (B) jahreszeitlich variieren	18
Tabelle 5: Eigenschaften der im Versuch verwendeten Begrünungssysteme	25
Tabelle 6: Versuchspflanzenarten	26
Tabelle 7: Zur Vitalitätsbewertung verwendete Boniturskala	26
Tabelle 8: Auftreten von PAR-Extremwerten an beiden Wänden im Jahresverlauf von März 2019 bis November 2019 (X = ja, O = nein)	64
Tabelle 9: Mittelwert der Differenz zwischen Datenpunkt A (Begrünung, Lampensteg, oder Kunstwerk) und Datenpunkt B (Raumluft in genügend großem Abstand zur Begrünung)	64
Abbildungsverzeichnis Abbildung 1: Versuchsbeginn mit <i>Racomitrium canescens</i> , Bewässerungsvarianten von links nach	
rechts: Leitung, Regen, Main (09.06.17)	10
Abbildung 2: Ergänzung durch <i>Tortella inclinata</i> , Versuch mit <i>R. canescens</i> läuft zu dem Zeitpunkt seit 122 Tagen (12.10.17)	10
Abbildung 3: v.l.n.r. Leitung, Regen, Main; Weißfärbung von Teilflächen nach zwei Wochen (27.06.17)	11
Abbildung 4: v.l.n.r. Leitung, Regen, Main; Weißfärbung von Teilflächen nach vier Wochen (14.07.17)	11
Abbildung 5: Nahaufnahme der Mainwasservariante nach sechs Wochen (28.07.17)	11
Abbildung 6: v.l.n.r. Leitung, Regen, Main; vier Monate nach Versuchsbeginn (26.10.17)	12
Abbildung 7: v.l.n.r. Leitung, Regen, Main; unten R. canescens, oben T. inclinata (02.11.17)	12
Abbildung 8: Vitalität, Bestandsstruktur, Pflanzendichte und Weißfärbung von <i>R. canescens</i> bei der Bewässerung mit Leitungs-, Regen- und Mainwasser, Boniturnoten von 9 = sehr gut bis 1 = ungenügend	12
Abbildung 9: Aufteilung von <i>T. inclinata</i> in kleinere Einheiten zum Wachstums- und Vermehrungstest (12.10.17)	
Abbildung 10: Leitungswasser-Variante, <i>T. inclinata</i> behielt insgesamt länger eine frische, vitale Färbung bei als <i>R. canescens</i> (19.10.17)	

Abbildung 11: Mainwasser-Variante nach drei Monaten, dunkleres Grün, feine Weiß-färbung und leichte Braun-färbung an Rändern (09.01.18)	13
Abbildung 12: Vermehrung neun Monate nach Versuchsbeginn, braune Verkrustungen an den Rändern (26.07.18)	13
Abbildung 13: Vermehrung elf Monate nach Versuchsbeginn, Färbung wird wieder frischgrün (20.09.18)	13
Abbildung 14: Vitalität, Braunfärbung, Pflanzendichte und Weißfärbung von <i>T. inclinata</i> bei der Bewässerung mit Leitungs- und Regenwasser, Boniturnoten von 9 = sehr gut bis 1 = ungenügend	14
Abbildung 15: Einbau der Speichermedien Steinwolle (beige), PU-Schaum (rosa) und Schafwoll- Kokos-Matte (braun) (17.11.17)	17
Abbildung 16: Beleuchtung mit Natriumdampflampen (17.01.18)	17
Abbildung 17: Querschnittszeichnung eines Lamellenbepflanzungsaufbaus	
Abbildung 18: linkes System v.o.n.u.: Stein + Ansaat, Schaf-Kokos + Ansaat, PU + Ansaat, Stein + Matte, Schaf-Kokos + Matte, PU + Matte (18.01.18)	20
Abbildung 19: rechtes System v.o.n.u.: Schaf-Kokos + Matte, PU + Ansaat, Stein + Ansaat, Schaf- Kokos + Ansaat, PU + Matte, Stein + Matte (18.01.18)	
Abbildung 20: Deckungsgrad in den Lamellen mit der Ansaat/Sedum-Bepflanzungsvariante unter Verwendung von 0,5 g/m² Ansaat und 90 g/m² Sedumsprossen; die Flächenanteile wurden nach Saatgut-Keimlingen und Sedumsprossen differenziert in Kombination mit den drei verschiedenen Speichermaterialien Steinwolle, Schafwolle-Kokos und PU-Schaum erfasst	
Abbildung 21: Deckungsgrad in den Lamellen mit der Ansaat/Sedum-Bepflanzungsvariante unter Verwendung von 1 g/m² Ansaat und 45 g/m² Sedumsprossen; die Flächenanteile wurden nach Saatgut-Keimlingen und Sedumsprossen differenziert in Kombination mit den drei verschiedenen Speichermaterialien Steinwolle, Schafwolle-Kokos und PU-Schaum erfasst	21
Abbildung 22: Deckungsgrad und Wachstum der artenärmeren Sedum-Vegetationsmatten (Variante A, vgl. Tabelle 2) in Kombination mit den drei Speichermaterialien Steinwolle (rot, Lamelle 4), Schafwoll-Kokos (blau, Lamelle 5) und PU-Schaum (grün, Lamelle 11); Boniturnoten von 9 = sehr gut bis 1 = ungenügend	21
Abbildung 23: Deckungsgrad und Wachstum der artenreicheren Sedum-Vegetationsmatten (Variante B, vgl. Tabelle 2) in Kombination mit den drei Speichermaterialien Steinwolle (rot, Lamelle 12), Schafwoll-Kokos (blau, Lamelle 7) und PU-Schaum (grün, Lamelle 6); Boniturnoten von 9 = sehr gut bis 1 = ungenügend	22
Abbildung 24: Beide Klimahäuser auf einer schematischen Skizze (links) und auf einem Luftbild vom August 2018 (rechts, Bildquelle ZAE Bayern); die Klimahäuser werden nach der Ausrichtung ihrer zugehörigen Fassadenprüfstände als Klimahaus Süd und Klimahaus West bezeichnet	24
Abbildung 25: Unbepflanzte Einzelmodule des Rinnen- (links) und Vliessystems (rechts) sowie beide Systeme in bepflanztem Zustand im zweiten Versuchsjahr im Fassadenprüfstand von Klimahaus Süd (Juni 2019)	25
Abbildung 26: Von Pflanzen bedeckte Fassadenfläche je System und Monat jeweils über die Einzelmodule (Vlieselemente Vertiko, Rinnen Grünwand) gemittelt, die Balken zeigen die Standardabweichung an	27
Abbildung 27: Von Pflanzen bedeckte Fassadenfläche je Exposition und Monat jeweils über die Einzelmodule (Vlieselemente Vertiko, Rinnen Grünwand) gemittelt, die Balken zeigen die Standardabweichung an. Der Zeitraum November 2018 (N18) bis April 19 (A19) ist nicht repräsentativ, da Südmodule für Versuche an der Westfassade verwendet wurden	

Abbildung 28: Frontalansichten der Fassadenhälften am Klimahaus West im ersten Versuchsjahr; obere Reihe: Rinnensystem Grünwand; untere Reihe: Vliessystem Vertiko (April 2018, Juli 2018, Oktober 2018, Januar 2019 unten bzw. 2020 oben)	
Abbildung 29: Anteil der ausreichend vitalen Pflanzen (Boniturnote 5, 7 oder 9) je System und Monat	29
Abbildung 30: Aster divaricatus 'Tradescant' im Sommer (August 2018)	
Abbildung 31: Weißfärbung der Blütenstände im Herbst (Oktober 2019)	
Abbildung 32: Entwicklung der Vitalität von <i>Aster divaricatus</i> 'Tradescant' im Zeitraum August 2018 bis Mai 2020 als Anteil der ausreichend vitalen Pflanzen (Boniturnote 5, 7 oder 9) je Monat im Verhältnis zur Gesamtvitalität (schwarze Balken)	
Abbildung 33: Neuaustrieb (März 2020)	30
Abbildung 34: Irreversible Vertrocknung im Herbst (September 2019)	
Abbildung 35: Noch in voller Blüte zum gleichen Zeitpunkt im Herbst (September 2019)	
Abbildung 36: Gesamte und nach Begrünungssystem differenzierte Ausfallraten von Aster divaricatus 'Tradescant' zur Abnahme im Juli 2018 und jeweils nach Austrieb aller Versuchsarten im Mai 2019/2020	
Abbildung 37: Bistorta amplexicaulis 'Blackfield' während der Blüte (Juli 2019)	
Abbildung 38: Rotfärbung der Blattränder schon im Frühsommer (Juli 2018)	
Abbildung 39: Trockenschäden traten leider häufiger auf (Juli 2019)	
Abbildung 40: Entwicklung der Vitalität von <i>Bistorta amplexicaulis</i> 'Blackfield' im Zeitraum August 2018 bis Mai 2020 als Anteil der ausreichend vitalen Pflanzen (Boniturnote 5, 7 oder 9) je Monat im Verhältnis zur Gesamtvitalität (schwarze Balken)	t
Abbildung 41: Im Winter sind die Stauden eingezogen (Dezember 2019)	
Abbildung 42: Neuaustrieb an altem Wurzelstock aus dem Vorjahr (April 2019)	
Abbildung 43: Gesamte und nach Begrünungssystem differenzierte Ausfallraten von <i>Bistorta</i> amplexicaulis 'Blackfield' zur Abnahme im Juli 2018 und jeweils nach Austrieb aller  Versuchsarten im Mai 2019/2020	
Abbildung 44: Campanula poscharskyana 'Blauranke' wurde im Vlies am größten (September 2018)	
Abbildung 45: In der Rinne blieben die Stauden etwas kleiner, wuchsen aber in schattiger Lage be ausreichender Wasserversorgung ebenfalls ausreichend gut (August 2019)	ei
Abbildung 46: Entwicklung der Vitalität von <i>Campanula poscharskyana</i> 'Blauranke' im Zeitraum August 2018 bis Mai 2020 als Anteil der ausreichend vitalen Pflanzen (Boniturnote 5, 7 oder 9 je Monat im Verhältnis zur Gesamtvitalität (schwarze Balken)	-
Abbildung 47: Wasserunterversorgung im Winter (Januar 2019)	34
Abbildung 48: Irreversibel abgestorben (November 2018)	
Abbildung 49: Überlebende Pflanzen sorgen für einen frischgrünen Eindruck im Winteraspekt (Dezember 2018)	
Abbildung 50: Gesamte und nach Begrünungssystem differenzierte Ausfallraten von <i>Campanula poscharskyana</i> 'Blauranke' zur Abnahme im Juli 2018 und jeweils nach Austrieb aller Versuchsarten im Mai 2019/2020	34
Abbildung 51: Chrysogonum virginianum in voller Blüte (Mai 2019)	
Abbildung 52: Grundsätzlich ist die Staude immergrün, war allerdings häufig schwarzgrau verfärb oder abgestorben (Februar 2020)	

Abbildung 78: Gesamte und nach Begrünungssystem differenzierte Ausfallraten von Heuchera Hybride 'Amethyst Myst' zur Abnahme im Juli 2018 und jeweils nach Austrieb aller Versuchsarten im Mai 2019/2020	. 41
Abbildung 79: Heuchera Hybride 'Chantilly' im Sommer (Juli 2019)	. 41
Abbildung 80: Bei starker Einstrahlung kann es im Sommer zu Verbrennungen kommen (August 2019)	. 41
Abbildung 81: Bei der Sorte 'Chantilly' erfolgt der Neuaustrieb erst etwas später im Frühling (April 2019)	. 41
Abbildung 82: Entwicklung der Vitalität von <i>Heuchera</i> Hybride 'Chantilly' im Zeitraum August 2018 bis Mai 2020 als Anteil der ausreichend vitalen Pflanzen (Boniturnote 5, 7 oder 9) je Monat im Verhältnis zur Gesamtvitalität (schwarze Balken)	
Abbildung 83: Die hell gefärbten Blätter neigen zu sehr starkem Wachstum (August 2019)	. 42
Abbildung 84: Im Herbst/Winter verfärben sich die Blätter meist rötlich/bräunlich (Februar 2020).	. 42
Abbildung 85: Gesamte und nach Begrünungssystem differenzierte Ausfallraten von <i>Heuchera</i> Hybride 'Chantilly' zur Abnahme im Juli 2018 und jeweils nach Austrieb aller Versuchsarten im Mai 2019/2020	. 42
Abbildung 86: Hosta lancifolia mit Blüte im Sommer (August 2019)	
Abbildung 87: Die gelbe Herbstfärbung setzt meist relativ früh ein (Oktober 2018)	
Abbildung 88: Über den Winter ist die Staude eingezogen (Februar 2020)	. 43
Abbildung 89: Entwicklung der Vitalität von <i>Hosta lancifolia</i> im Zeitraum August 2018 bis Mai 2020 als Anteil der ausreichend vitalen Pflanzen (Boniturnote 5, 7 oder 9) je Monat im Verhältnis zur Gesamtvitalität (schwarze Balken)	. 43
Abbildung 90: Während der Vegetationsperiode bleiben die Blätter meist frischgrün, lediglich die Spitzen sind manchmal durch Sonnenbrand oder Trockenheit verfärbt (Juli 2019)	
Abbildung 91: Neuaustrieb im Frühling (April 2019)	. 44
Abbildung 92: Gesamte und nach Begrünungssystem differenzierte Ausfallraten von <i>Hosta lancifolia</i> zur Abnahme im Juli 2018 und jeweils nach Austrieb aller Versuchsarten im Mai 2019/2020	. 44
Abbildung 93: Nepeta x faasenii 'Walker's Low' mit üppiger Blüte im Vliessystem (Juli 2019)	. 44
Abbildung 94: In der Rinne bleiben die Stauden kleiner als im Vlies (Mai 2019)	. 44
Abbildung 95: Im Winter ist die Staude eingezogen, die Rückstände sind oft weiß-grau gefärbt (Januar 2020)	. 44
Abbildung 96: : Entwicklung der Vitalität von <i>Nepeta x faasenii</i> 'Walker's Low' im Zeitraum August 2018 bis Mai 2020 als Anteil der ausreichend vitalen Pflanzen (Boniturnote 5, 7 oder 9) je Monat im Verhältnis zur Gesamtvitalität (schwarze Balken)	
Abbildung 97: Katzenminze lockt viele Bestäuberinsekten an und erhöht somit die Biodiversität an der Fassade (Juli 2019)	
Abbildung 98: Beim Neuaustrieb geht die Staude neue Wege (März 2020)	. 45
Abbildung 99: Gesamte und nach Begrünungssystem differenzierte Ausfallraten von <i>Nepeta x faasenii</i> 'Walker's Low' zur Abnahme im Juli 2018 und jeweils nach Austrieb aller	
Versuchsarten im Mai 2019/2020	
Abbildung 100: Sesleria heufleriana im Spätsommer (September 2018)	
Abbildung 101: Blüte im Frühling (März 2020)	
Abbildung 102: Wassermangel kann zu irreversiblem Absterben führen (März 2019)	. 46

Abbildung 103: : Entwicklung der Vitalität von <i>Sesleria heufleriana</i> im Zeitraum August 2018 bis Mai 2020 als Anteil der ausreichend vitalen Pflanzen (Boniturnote 5, 7 oder 9) je Monat im Verhältnis zur Gesamtvitalität (schwarze Balken)	47
Abbildung 104: Im Herbst verfärben sich die einzelnen Halme unterschiedlich schnell (November 2019)	47
Abbildung 105: Die ersten Blütenhalme treten schon im Spätwinter auf (Februar 2020)	47
Abbildung 106: Gesamte und nach Begrünungssystem differenzierte Ausfallraten von Sesleria heufleriana zur Abnahme im Juli 2018 und jeweils nach Austrieb aller Versuchsarten im Mai 2019/2020	47
Abbildung 107: Waldsteinia geoides im Frühling (April 2019)	48
Abbildung 108: Verschiedene Blattgenerationen der Staude mit Blütenansatz (März 2020)	48
Abbildung 109: : Entwicklung der Vitalität von <i>Waldsteinia geoides</i> im Zeitraum August 2018 bis Mai 2020 als Anteil der ausreichend vitalen Pflanzen (Boniturnote 5, 7 oder 9) je Monat im Verhältnis zur Gesamtvitalität (schwarze Balken)	48
Abbildung 110: Nährstoffmangel kann zu Gelbfärbung mit deutlicher Äderung führen (Mai 2019)	
Abbildung 111: Winteraspekt von W. geoides (Februar 2019)	49
Abbildung 112: Neuaustrieb mit Blütenansatz (März 2020)	49
Abbildung 113: : Gesamte und nach Begrünungssystem differenzierte Ausfallraten von Waldsteinia geoides zur Abnahme im Juli 2018 und jeweils nach Austrieb aller Versuchsarten im Mai 2019/2020	
Abbildung 114: Mittlere Feuchtigkeitsdifferenz der Tagesmittelwerte zur Außenluftfeuchtigkeit an der Westfassade im Sommer 2018, A = Rinne, B = Vlies, Lage = Standort des Messfühlers, Abstand = Distanz zwischen Begrünungssystem und Gebäudefassade (20/25/30 cm)	50
Abbildung 115: Mittlere Temperaturdifferenz der Tagesmittelwerte zur Außenlufttemperatur an der Westfassade im Sommer 2018, A = Rinne, B = Vlies, Lage = Standort des Messfühlers, Abstand = Distanz zwischen Begrünungssystem und Gebäudefassade (20/25/30 cm)	50
Abbildung 116: Tagesverläufe von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit mit (rechts, 27.06.2019) und ohne Abdichtung (links, 27.08.2019) sowohl vor und in der Begrünung als auch im Zwischenspalt und an einem von der Fassade nicht beeinflussten Referenzpunkt	51
Abbildung 117: Wärmebildaufnahme des Fassadenprüfstands am Klimahaus Süd mit Rinnensystem (20.03.2020)	52
Abbildung 118: Wärmebildaufnahme des Fassadenprüfstands am Klimahaus West mit Vliessystem (20.03.2020)	
Abbildung 119: Wärmebildaufnahme einer Versuchsrinne mit im Vergleich zum umgebenden Metall erwärmter Substratoberfläche neben ebenfalls erwärmtem Bewässerungsschlauch (20.03.2020)	53
Abbildung 120: Wärmebildaufnahme einer Vliesoberfläche mit deutlich erwärmten Kahlstellen gegenüber der Blattmasse (27.05.2020)	53
Abbildung 121: Vereinfachte Darstellung des passiven Erdwärmetransports durch Verdampfung und Kondensation innerhalb eines Wärmerohrs im Fassadenaufbau (links) und oberes Ende (etwa 1m von insgesamt 5m) einer im Innenraum des Klimahaus West eingebauten Heatpipe (rechts, Bildquelle: ZAE Bayern)	57
Abbildung 122: Temperaturverläufe während des Frostereignisses vom 12.bis zum 17.12.2018 (Abstand: 25cm) in Zwischenspalt und Substrat, jeweils mit und ohne Erdwärme, sowie als Höhenprofil im Spalt ohne und mit Erdwärme unter Verwendung des Vliessystems, T_Outs beschreibt die Außentemperatur als Referenz	52

Abbildung 123: Temperaturverläufe während des Frostereignisses vom 28.12.2019 bis zum 02.01.2020 (Abstand: 30cm) in Zwischenspalt und Substrat, jeweils mit und ohne Erdwärme, sowie als Höhenprofil im Spalt ohne und mit Erdwärme unter Verwendung des Rinnensystems, T_Outs beschreibt die Außentemperatur als Referenz	59
Abbildung 124: Komplettansicht der Innenwandbegrünung, links im Bild ist die beginnende Fensterfront zu sehen	
Abbildung 125: PAR-Sensor (schwarz, rund) und Datenlogger für Temperatur und relative Luftfeuchte (weiß, eckig)	62
Abbildung 126: Photosynthetisch aktive Strahlung an den Sensoren in der linken Wand (oben) und der rechten Wand (unten) vom 12. bis zum 24.09.2019	
Abbildung 127: Strahlungsschutz-Prototypen	66
Abbildung 128: Seitenansicht, Befestigung mit Isolierdraht	66
Abbildung 129: Probemessung am südlichen Fassadenprüfstand	66
Abbildung 130: Temperatur-Tagesverlauf unter Verwendung der vier Strahlungsschutz-Prototypen am 21.04.2019 zwischen 09:30 und 20:00 Uhr	
Abbildung 131: Strahlungsschutzhülse	68
Abbildung 132: 3. Platz beim Posterwettbewerb des 7. Forschungsforum Landschaft der FLL mit dem Motto "Grün macht Klima" am 05./06.03.2020 in Nürtingen	74
Abbildung 133: Vorder- und Rückseite des 12-seitigen Infoflyers "Pflanze trifft Bauwerk", Herausgeber: Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau (LWG), Gestaltung: Institut für Stadtgrün und Landschaftsbau (ISL) und Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung (ZAE Bayern)	75
Abbildung 134: Das Bewässerungssystem von CityLam ist nicht druckkompensiert, was bei einer Öffnung von 5 Leitungsabzweigungen zu extremen Unterschieden im Bewässerungsvolumen führte. Das Verschließen der unteren Abzweigungen 4 & 5 erhöhte den Wasserdruck in den oben liegenden Lamellen 1 bis 3. Dieser Systembereich wurde somit ausreichend direkt versorgt, während die unteren Lamellen nur Abtropfwasser erhielten, was sich im Versuch als vorerst ausreichende Lösung herausgestellt hat.	76
Abbildung 135: Die Substratersatzstoffe sollten trotz der unterschiedlichen Lamellenstellungen eine ausreichende Wasserspeicherung bei gleichmäßiger Verteilung gewährleisten. Vor allem beim PU-Schaum fiel in Wasserhalteversuchen über verschiedene Zeitintervalle auf, dass seine Speicherfähigkeit richtungsabhängig ist. Es gilt also abzuwägen, in welchem Winkel der PU-Schaum verlegt wird	76
Abbildung 136: Lichtverfügbarkeit in den einzelnen Lamellen (1-6 = linkes System von oben nach unten, 7-12 = rechtes System von oben nach unten); es ist deutlich zu erkennen, dass nur in den obersten Lamellen auch die hinteren Bereiche mit ausreichend Licht versorgt werden (rote Balken); insgesamt nimmt die Lichtverfügbarkeit von oben nach unten deutlich ab, was es bei	76
einer Pflanzplanung zu berücksichtigen gilt	70

## Impressum

## Herausgeber:

Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau An der Steige 15, 97209 Veitshöchheim www.lwg.bayern.de, poststelle@lwg.bayern.de

#### **Redaktion & Gestaltung:**

Institut für Stadtgrün und Landschaftsbau

Telefon: 0931 9801-402, Fax: 0931 9801-400, isl@lwg.bayern.de

Bildnachweis: LWG

Datum: September 2020

© LWG