FORSCHUNGSINITIATIVE Zukunft BAU

F 2970

Annette Bucher, Franziska Kohlrausch
Jens M. Kuckelkorn, Raphael Troll

Berechenbare Unterstützung der Klimatisierung von energetisch hocheffizienten Gebäuden durch dezentrale, funktionale Innenraumbegrünung

Bundesinstitut
für Bau-, Stadt- und
Raumforschung
im Bundesamt für Bauwesen
und Raumordnung

Fraunhofer IRB Verlag

F 2970

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2016

ISBN 978-3-8167-9638-1

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00
Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/bauforschung

ZAE BAYERN
Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung

HOCHSCHULE WEIHENSTEPHAN-TRIESDORF
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

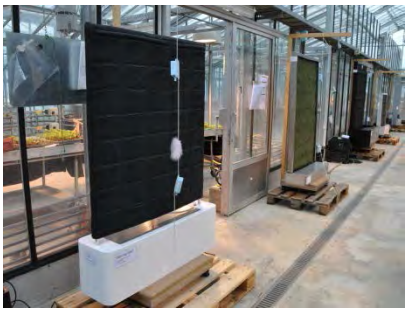
Berechenbare Unterstützung der Klimatisierung von energetisch hocheffizienten Gebäuden durch dezentrale, funktionale Innenraumbegrünung

Abschlussbericht - Juni 2015

Autoren: A. Bucher[1], F. Kohlrausch[1], J. M. Kuckelkorn[2], R. Troll[2]

Aktenzeichen: II 3-F20-11-1-120 / SWD-10.08.18.7-13.02

Projektlaufzeit: 01.04.2013 – 01.06.2015



Zuwendungsgeber:

Forschungsinitiative Zukunft Bau

Im Auftrag des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)

Zuwendungsempfänger:

Hochschule Weihenstephan-Triesdorf (HSWT) [1]

Projektpartner:

Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V. (ZAE Bayern) [2]

Fa. Häring Radtke Partner (HRP) [3]

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Projektpartner

Hochschule Weihenstephan-Triesdorf (HSWT) [1]
Zentrum für Forschung und Weiterbildung
Am Hofgarten 4
85354 Freising
Wissenschaftliche Leitung: Prof. Dr. Hermann Heiler

Projektbearbeitung:
Dr. Annette Bucher (Projektleitung, annette.bucher@hswt.de)
Dipl.-Ing. (FH) Franziska Kohlrausch
Dipl.-Ing. (FH) Dietmar Prucker

Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V. (ZAE Bayern) [2]
Bereich Energiespeicherung
Walther-Meißner-Straße 6, 85748 Garching
Wissenschaftlicher Leiter: Dr.-Ing. H. Spliethoff
Bereichsleiter: Dr. Andreas Hauer

Projektbearbeitung:
Dr. Jens M. Kuckelkorn
M. Sc. Raphael Troll (Projektleitung, raphael.troll@zae-bayern.de)
B. Sc. Dominik Niederlechner
Dipl.-Ing. Andreas Robrecht
M. Sc. Lisa Meyering

Fa. Häring Radtke Partner (HRP) [3]
Ingenieurbüro für biologische Gebäudeklimatisierung
Egerlandstraße 16
97209 Veitshöchheim

Projektbearbeitung:
Dipl.-Ing (FH) Bernhard Häring
Dipl.-Ing. Barbara Ludwig-Häring
Dipl. Biol. Manfred Radtke

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung 6

1.1 Raumkomfort in Nichtwohngebäuden 6

1.2 Pflanzenphysiologie - Transpiration 7

1.3 Begrünungssysteme 7

1.4 Beschreibung der Vorgehensweise 9

2 Versuche in der Klimakammer und im Gewächshaus 11

2.1 Material und Methoden - Detaillierte Versuchsbeschreibung 11

2.1.1 Begrünungssysteme 16

2.1.1.1 Auswahl der Begrünungssysteme für den Gewächshausversuch 16

2.1.1.2 Auswahl der Pflanzenart 23

2.1.1.3 Variation der Bewässerung 24

2.1.2 Messdatenerfassung im Gewächshaus 25

2.1.2.1 Pflanzenbauliche Messungen 25

2.1.2.2 pH-Wert / Leitfähigkeit 25

2.1.2.3 Erfassung der Wasserabgabe der Begrünungssysteme 25

2.1.2.4 Messung der Klimaparameter im Gewächshaus 26

2.2 Ergebnisse und Diskussion von Versuch 1: Ermittlung der Wasserabgabe der Substrate 26

2.3 Ergebnisse und Diskussion von Versuch 2: Ermittlung der Verdunstungsleistung der Begrünungssysteme (ohne Pflanzen) unter kontrollierten Bedingungen 27

2.4 Ergebnisse und Diskussion von Versuch 3: Ermittlung der Anpassungsfähigkeit der Begrünungssysteme an sich verändernde Klimabedingungen 32

2.5 Ergebnisse und Diskussion von Versuch 4: Ermittlung der Leistungsfähigkeit der Begrünungssysteme bzw. deren Veränderung durch Begrünung der Substrate 37

2.5.1 Systeme mit Begrünung – Bewässerung am Tag 37

2.5.2 Systeme mit Begrünung – Bewässerung auf 24 h verteilt 39

2.5.3 Erscheinungsbild der Begrünungssysteme zum Versuchsende 43

2.5.4 Erfahrungen und Probleme im praktischen Einsatz 46

2.6 Fazit Teil 1 - Entscheidung für ein vertikales Begrünungssystem für das Mustergebäude 47

3 Voruntersuchung zu verschiedenen Mustergebäuden 48

3.1 Definition von Anforderungen an die Mustergebäude 48

3.2 Bestandsaufnahme und Bewertung möglicher Mustergebäude 48

3.3 Beschreibung der Mustergebäude 49

3.3.1 Finanzamt in Freising 49

3.3.2 ZAE Bayern in Garching 51

4 Referenzmessungen in den ausgewählten Mustergebäuden 54
4.1 Messdatenerfassung in den Mustergebäuden 54
4.1.1 Konzept der Messdatenerfassung 54
4.1.2 Definition von Anforderungen an die Messtechnik 54
4.1.3 Auswahl und Beschreibung der Messtechnik 54
4.2 Messkampagne in Mustergebäuden ohne Begrünungssysteme 55
4.2.1 Installation Messtechnik 55
4.2.2 Messaufbau am Finanzamt in Freising 56
4.2.3 Messaufbau am ZAE Bayern in Garching 57
4.2.4 Einrichten von Datenübermittlung und Datenbank 58
4.2.5 Visualisierung der Messdaten 59
4.3 Ergebnisse der Messkampagne ohne Begrünungssysteme 59
4.3.1 Außenklima in Garching und Freising 59
4.3.2 Raumklimatische Charakteristika der untersuchten Büroräume 61
4.3.3 Bewertung der Untersuchungsräume in Bezug auf kritische Luftfeuchten 63
4.3.4 Untersuchungszeiträume 66
4.3.5 Charakteristika von Raumluftbedingungen mit niedriger relativer Luftfeuchte 67
4.4 Messkampagne im Mustergebäude mit Begrünungssystemen 71
4.4.1 Gebäudecharakterisierung und Raumauswahl 71
4.4.2 Aufbau und Messdatenerfassung mit Begrünungssystemen 72
4.4.2.1 Einbau der Begrünungssysteme 72
4.4.2.2 Ergänzung der Messdatenerfassung 75
4.5 Ergebnisse und Diskussion der Messkampagne mit Begrünungssystemen im Mustergebäude 78
4.5.1 Wohlfühlaspekt 78
4.5.2 Pflanzenbauliche Auswertung 78
4.5.3 Wasserabgaben der Begrünungssysteme in den Büroräumen 82
4.5.4 Raumklimatische Charakteristika der untersuchten Büroräume 89
4.5.5 Bewertung der Untersuchungszeiträume in Bezug auf kritische Luftfeuchten 91
4.5.6 Veränderung des Raumkomforts durch Begrünung im Vergleich zum unbegrünten Referenzraum im gleichen Versuchsjahr 97
4.5.7 Veränderung des Raumkomforts durch Begrünungssysteme im Vergleich zur Messung ohne Begrünungssysteme im Vorjahr 111
4.5.8 Berechnungsgrundlagen und Auslegung der Wandgröße 112
4.5.9 Energieverbrauch durch Begrünung 115
5 Interpretation und Diskussion 117
5.1 Bewertung der Wasserabgabe durch das Begrünungssystem 117
5.2 Bewertung des Einflusses der Begrünungssysteme auf den Raumkomfort 118

5.3 Grundlagen für einen Anforderungskatalog an Begrünungssysteme mit dem Ziel der Erhöhung der Luftfeuchte sowie Planungsgrundlagen und Handlungsempfehlungen 119
6 Zusammenfassung, Ausblick und weiterer Untersuchungsbedarf 124
6.1 Zusammenfassung 124
6.2 Ausblick 126
6.3 Weiterer Untersuchungsbedarf 127
Abbildungsverzeichnis 128
Tabellenverzeichnis 136
Literaturverzeichnis 138
Anhang 141

1 Einführung

Moderne, energetisch hocheffiziente Gebäude haben eine dichte, hochwärmegedämmte Gebäudehülle, um den Heiz- und Primärenergiebedarf möglichst niedrig zu halten. Häufig sorgt eine zentrale Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung für die Versorgung mit Frischluft. Dabei können vor allem in der kalten Jahreszeit, in Abhängigkeit vom Nutzerverhalten und der relativen Luftfeuchte der Zuluft, Probleme mit einer zu niedrigen relativen Luftfeuchte im Raum auftreten, die sich negativ auf das Wohlbefinden der Nutzer auswirken. Eine technische Lösung zur Erhöhung der relativen Luftfeuchte birgt die Gefahr einer Verkeimung (z. B. mit Legionellen). Aus vorangegangenen Untersuchungen an der Forschungsanstalt für Gartenbau Weihenstephan ist bekannt, dass durch Topfpflanzen in einem Raum die relative Luftfeuchte bestenfalls um 5 % angehoben werden kann [1]. Dies ist bei weitem nicht ausreichend, um relative Luftfeuchten von unter 20 %, wie sie in solchen Gebäuden auftreten können, auf ein behagliches Maß von 40 % bis 60 % anzuheben [2].

Daher soll im Rahmen des Projektes geprüft werden, ob der Einsatz einer sogenannten funktionalen Begrünung zur Lösung der Luftfeuchteproblematik geeignet ist. Eine funktionale Begrünung ist zum Beispiel ein vertikal in den Raum gestelltes Substrat-Trägersystem, das eine hohe Verdunstungsrate und chemisch-physikalisch stabile Eigenschaften aufweist. Die Wirkungsweise entspricht einem begrünten Oberflächenverdunster, bei dem die Verdunstung passiv erfolgt und daher als hygienisch unbedenklich anzusehen ist (Abb. 2).

1.1 Raumkomfort in Nichtwohngebäuden

Der Raumkomfort beeinflusst das Wohlbefinden und auch die Leistungsfähigkeit von Menschen. Die Temperatur der Raumluft hat einen wichtigen Einfluss auf den Raumkomfort der Nutzer. Daher sollte sie in der Heizperiode 20 °C bis 24 °C und im Kühlbetrieb 23 °C bis 26 °C betragen [3]. Da auf die menschliche Empfindung außer der Raumlufttemperatur auch noch die relative Luftfeuchtigkeit und die Strahlungstemperaturen der Raumumschließungsflächen wirken, sind dies nur Anhaltspunkte.

Ein besonders wichtiger Faktor für das Komfortgefühl des Menschen ist die relative Luftfeuchtigkeit (rF) φ. Eine zu hohe relative Luftfeuchtigkeit φ der Raumluft tritt überwiegend an heißen Sommertagen auf und wird als Schwülegefühl empfunden, was zu einer verminderten Leistungsfähigkeit der Nutzer führt. Im Winter dagegen tritt zu trockene Raumluft in den Räumen auf, die eine Austrocknung der Nasen- und Rachenschleimhäute verursacht. Dies hat eine verstärkte Infektanfälligkeit und einen Anstieg der krankheitsbedingten Ausfallzeiten zur Folge.

Die relative Luftfeuchtigkeit (rF) φ sollte als grober Richtwert zwischen 35 % rF und 65 % rF liegen. Die Werte zwischen 45 % rF und 55 % rF sind bestenfalls anzustreben [4]. Bei genauerer Betrachtung ist festzustellen, dass die als behaglich empfundene relative Luftfeuchtigkeit stark von der aktuellen Raumlufttemperatur abhängig ist. Stellt man die beiden Parameter in einem Diagramm gegenüber (siehe Abb. 1), ergeben sich Bereiche, in denen der Nutzer die Raumluft als behaglich, noch behaglich, unbehaglich trocken bzw. unbehaglich feucht empfindet [4]. Diese Grenzbereiche unterscheiden sich in verschiedenen Literaturquellen, da die Behaglichkeit auch stark vom subjektiven Empfinden abhängt.

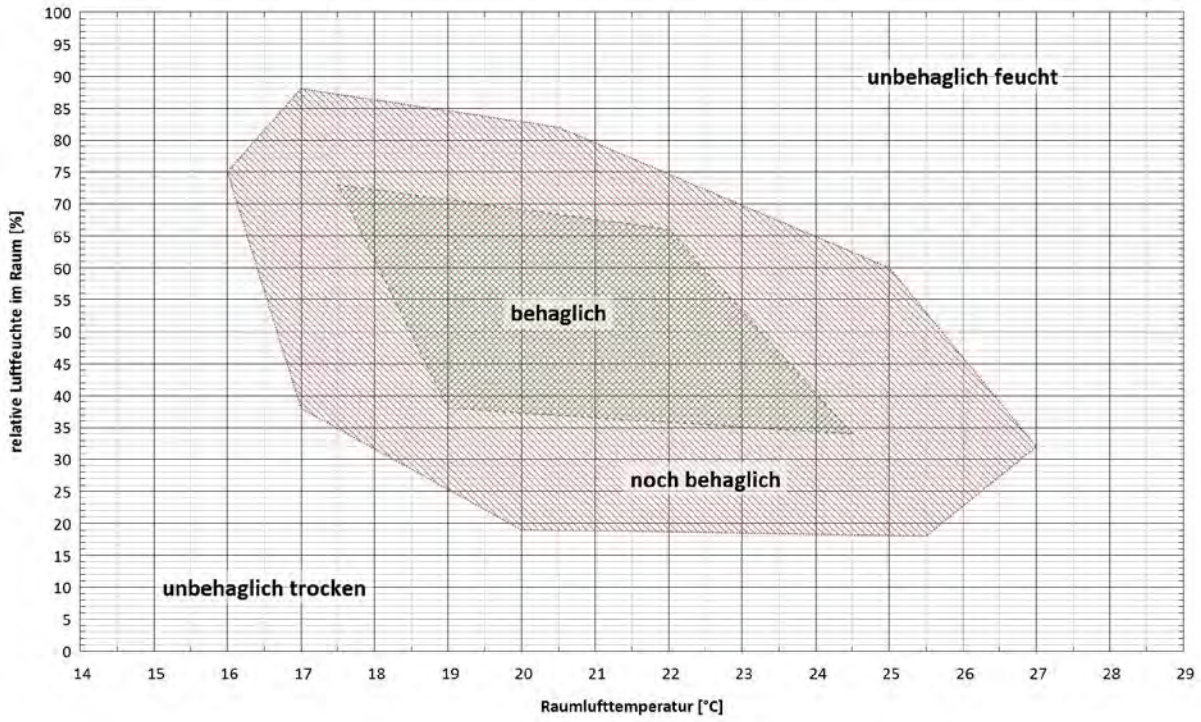


Abb. 1: Behaglichkeitszonen in Abhängigkeit von der Raumlufttemperatur und der relativen Luftfeuchte (eigene Darstellung in Anlehnung an Pistohl [4])

Für Gebäude lassen sich eine Vielzahl von theoretischen Wasserquellen und -senken benennen, die die Höhe der relativen Luftfeuchte beeinflussen. Für Nichtwohngebäude sind in erster Linie als Quellen die Zuluft, der Mensch (Atmen, Schwitzen), die Raumreinigung und Zimmerpflanzen zu nennen. Bei Wohngebäuden kommen noch als weitere Wassereinträge Kochen, Duschen, Baden, Wäschewaschen und -trocknen usw. hinzu. Wasser aufnehmende Baustoffe und Einrichtungsgegenstände (z. B. Kalkputze, Holz, Teppich, Stoffe, etc.) sowie die Lüftung wirken sich als Wassersenken aus.

1.2 Pflanzenphysiologie - Transpiration

Bei Pflanzen erfolgt nur etwa 5 % der Wasserabgabe ungeregelt über die Kutikula. Das meiste Wasser wird hingegen über die Spaltöffnungen (Stomata) abgegeben. Hierbei ist eine Regelung durch Öffnen und Schließen des Spaltöffnungsapparates in Abhängigkeit von der Wasserversorgung der Pflanze vorgesehen. Die Pflanze schützt sich bei unzureichender Wasserversorgung und niedriger Luftfeuchte selbst vor starker Transpiration, in dem sie die Stomata schließt [5].

Aus diesem Grund ist, vor allem bei niedrigen Luftfeuchten im Raum, kein nennenswerter Beitrag der Pflanze zur Erhöhung der Luftfeuchte im Raum zu erwarten. Eine Erhöhung der Luftfeuchte könnte aber durch die Wasserabgabe der Substrate, auf denen die Pflanzen wachsen, bewirkt werden.

1.3 Begrünungssysteme

Aus dem Bereich der funktionalen Begrünungen wurde für das Projekt die vertikale Begrünung gewählt, da sie potentiell eine hohe Verdunstungsrate und somit einen Einfluss auf die Luftfeuchte im Raum aufweist.

Ein vertikales Begrünungssystem besteht in der Hauptsache aus einem, mit Hilfe eines Gestells, senkrecht in den Raum gestellten Substrat, auf dem die Pflanzen wachsen können (Abb. 2). Mit einer Pumpe wird Wasser bzw. Nährlösung aus einem Vorratsgefäß über Tropfschläuche, Rinnen o.a. nach oben gebracht. Durch die Schwerkraft sickert die Flüssigkeit nach unten durch das Substrat und versorgt dabei die Pflanzen. Der Überschuss wird im Vorratsgefäß aufgefangen.

Die Wasserabgabe an die Raumluft erfolgt rein passiv, ohne zusätzliche Ventilatoren, durch Verdunstung über das Substrat. Zu einem geringen Teil gibt auch die Pflanze mit ihrer Transpiration Wasser ab. Da keine Aerosolbildung auftritt, ist die Wasserabgabe als hygienisch unbedenklich anzusehen.

Das Substrat soll im Idealfall chemisch-physikalisch stabile Eigenschaften aufweisen und nicht mikrobiell zersetzbar sein.

Die Begrünung des Oberflächenverdunsters bietet neben der Erhöhung der relativen Luftfeuchte im Raum weitere positive Wirkungen, wie den Abbau von Schadstoffen in der Raumluft (z. B. Formaldehyd) [6], die Reduktion der Feinstaubbelastung [7], die Schallminderung [8] und allem voran die Wohlfahrtswirkung von Pflanzen für den Menschen [9], [10], [11], [12].

Derzeit wird auf dem europäischen Markt eine Vielzahl an vertikalen Begrünungssystemen für den Innenraum angeboten. Nach der Auswertung bestehender Daten zu den Begrünungssystemen wurden für die Untersuchungen sechs Systeme ausgewählt, die aufgrund ihrer Konstruktion einen Einfluss auf die relative Luftfeuchte im Raum erwarten ließen (siehe 2.1.1, Auswahl der Begrünungssysteme).

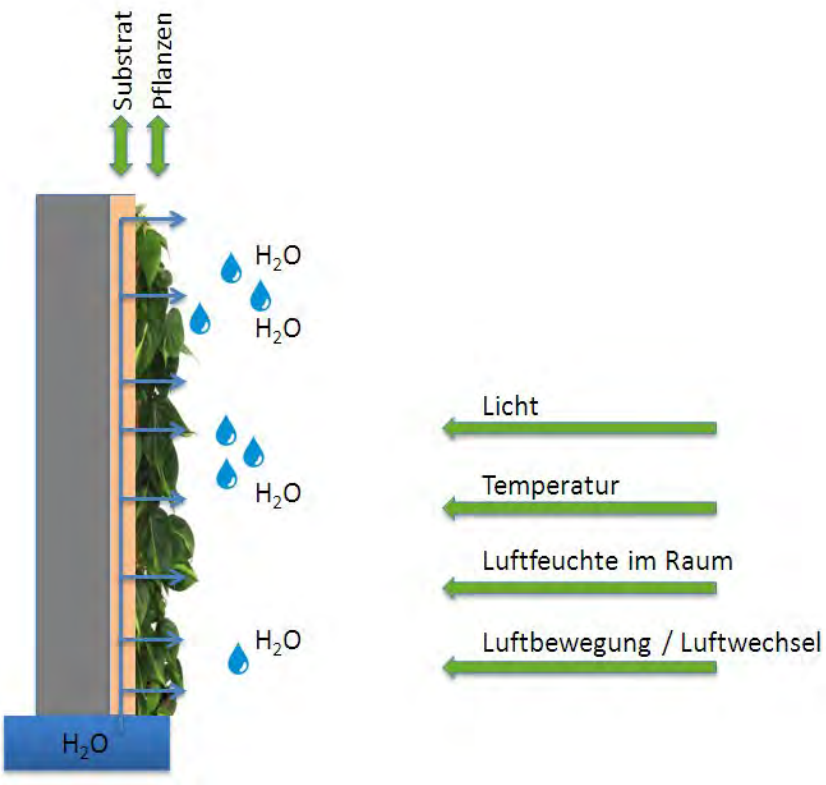


Abb. 2: Schematische Darstellung der Wirkungsweise einer funktionalen, vertikalen Begrünung

1.4 Beschreibung der Vorgehensweise

Das Projekt gliederte sich in die folgenden, aufeinander aufbauenden, Versuchsschritte (Zeitplan siehe Tab. 1):

1. Ermittlung der Wasserabgabe von Substraten, die in vertikalen Begrünungssystemen eingesetzt werden (Versuch 1; Klimakammer).
2. Auswahl von potentiell zur Erhöhung der Luftfeuchte geeigneten, vertikalen Begrünungssystemen für nachfolgende Versuche.
3. Erfassung der Verdunstungsleistung der Begrünungssysteme unter kontrollierten Bedingungen im Gewächshaus. Dabei wurden über den Gewichtsverlust im Tagesverlauf maßgebliche Rückschlüsse auf die Verdunstungsleistung der Systeme gezogen. Die im Raum herrschenden Klimaverhältnisse (Temperatur, relative Luftfeuchte, Licht, Luftbewegung) wurden parallel dazu mittels Fühlern und Datenloggern erfasst und zu den verdunsteten Wassermengen in Beziehung gesetzt (Versuch 2).
4. Überprüfung der Anpassungsfähigkeit der Verdunstungsleistung durch die Begrünungssysteme an sich verändernde Rahmenbedingungen wie Temperatur, Luftbewegung und relative Luftfeuchte im Raum (Versuch 3; Gewächshaus).
5. Feststellung der Veränderung der Verdunstungsleistung mit Begrünung der Systeme (Gewächshaus). Dazu wurden die Begrünungssysteme mit *Philodendron hederaceum* bepflanzt (Versuch 4).
6. Parallel zu den Untersuchungen im Gewächshaus erfolgte die periodische Erfassung der klimatechnisch relevanten Parameter ohne Begrünung in Büroräumen von zwei in Frage kommenden Mustergebäuden (ZAE Bayern und Finanzamt Freising). Nach Auswertung der Messdaten fiel die Wahl auf Räume des ZAE Bayerns.
7. Auswahl des Systems, das in den Gewächshausversuchen die höchste und im Idealfall eine sich selbstregulierende Verdunstungsleistung zeigte und eine verlässliche Technik aufwies, für die weitere Prüfung unter Praxisbedingungen.
8. Aufstellung der Begrünungssysteme in jeweils drei Büroräumen des Mustergebäudes. Zwei unbegrünte Räume dienten als Kontrolle. Ermittlung der Einflüsse auf das Raumklima und Prüfung der Wirksamkeit der Begrünung.

Tab. 1: Vorgehensweise und Zeitplan (Stand April 2015)

<table>
<tr><th>Jahr</th><th>Monat</th><th>Tätigkeit</th><th></th><th></th><th></th></tr>
<tr><td rowspan="12">2013</td><td>April</td><td rowspan="3">Auswertung bestehender Daten zu Begrünungssystemen und Berechnungsgrundlagen</td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>Mai</td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>Juni</td><td rowspan="2">Untersuchung der Wasserabgabe von Substraten aus vertikalen Begrünungssystemen (Versuch 1)</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>Juli</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>Aug.</td><td rowspan="6">Wahl von 6 funktionalen, vertikalen Begrünungssystemen, Prüfung und Weiterentwicklung unter kontrollierten Bedingungen im Gewächshaus (Versuch 2-4)</td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>Sept.</td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>Okt.</td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>Nov.</td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>Dez.</td><td></td><td></td><td>Meilenstein 1</td></tr>
<tr><td rowspan="12">2014</td><td>Jan.</td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>Feb.</td><td rowspan="5">Auswertung der Versuche 1-4 und der Gebäudemessdaten, Wahl eines Begrünungssystems für Mustergebäude, Auslegung der Begrünung</td><td rowspan="2">Erfassung klimatechnisch relevanter Parameter ohne Begrünung in 2 Mustergebäuden</td><td></td></tr>
<tr><td>März</td><td></td></tr>
<tr><td>Apr.</td><td></td><td></td><td>Meilenstein 2</td></tr>
<tr><td>Mai</td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>Juni</td><td rowspan="7">Einbau eines Begrünungssystems in Mustergebäude
3 vergleichbare Räume = 3 Wdh.
+ 2 Räume ohne Begrünung (Kontrolle)
Messung der klimatechnisch relevanten Parameter
Prüfung der Wirksamkeit der Begrünung in energetisch hocheffizientem Gebäude</td><td></td><td></td><td>Meilenstein 3</td></tr>
<tr><td>Juli</td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>Aug.</td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>Sept.</td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>Okt.</td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>Nov.</td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>Dez.</td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="4">2015</td><td>Jan.</td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>Feb.</td><td rowspan="3">Verfassen des Abschlussberichts
Erstellen der Berechnungsgrundlagen, Richtlinien und Handlungsempfehlungen</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>März</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>April</td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td></td><td>Mai</td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">Meilenstein 1:</td><td colspan="4">Für mindestens ein Begrünungssystem ist ein Einfluss auf die Luftfeuchte messbar, Pflanzenwachstum gegeben und das System beherrschbar</td></tr>
<tr><td colspan="2">Meilenstein 2:</td><td colspan="4">energetisch hocheffizientes Gebäude für Versuchszwecke ermittelt</td></tr>
<tr><td colspan="2">Meilenstein 3:</td><td colspan="4">Auswahl eines geeigneten Begrünungssystems für den Praxiseinsatz möglich</td></tr>
</table>

2 Versuche in der Klimakammer und im Gewächshaus

2.1 Material und Methoden - Detaillierte Versuchsbeschreibung

Im ersten Versuch wurde die Wasserabgabe von unterschiedlichen Substraten, die in vertikalen Begrünungssystemen Verwendung finden, unter konstanten Bedingungen in der Klimakammer ermittelt (Tab. 2).

Tab. 2: Versuch 1 – Ermittlung der Wasserabgabe der Substrate

Versuch	**1**
Ziel	**Ermittlung der Wasserabgabe der Substrate**
Beschreibung	• Wasserabgabe der Substrate unter konstanten Bedingungen über einen bestimmten Zeitraum ermitteln (ohne Pflanzen, ohne dazugehörige Bewässerungstechnik)
Ort	• Klimakammer
Termin	• Mai 2013
Dauer	• 4 Tage pro Substrat
Anzahl Substrate	• 5 Substrate • Größe: ca. 50 x 50 cm = 0,25 m² bzw. kleinstes verfügbares Modul
Versuchsaufbau	• Substrat / Trägermaterial liegend in einer Schale auf einer Waage mit kontinuierlicher Messwerterfassung (bepflanzbare Fläche nach oben)
Versuchsdurchführung	• Substrat im Trockenschrank bis Gewichtskonstanz trocknen (30 °C) • Wassersättigung des Substrates (anbrausen, überstauen für 24 h) • 1 h senkrecht abtropfen lassen • Wasserverlust (Masse) über 4 Tage ermitteln
Rahmenbedingungen	• Raumtemperatur 22 °C • Relative Luftfeuchte ca. 25 %
Variierter Faktor	• Substrat
Messparameter	• Wasserabgabe über Masseverlust (kontinuierlich alle 20 Min.) • Rel. Luftfeuchte mit Handpsychrometer (stichprobenartig) • Raumtemperatur (kontinuierlich) • Temperatur direkt auf Substratoberfläche (stichprobenartig)

Im Anschluss daran wurden die kompletten Systeme in unbegrüntem Zustand im Gewächshaus hinsichtlich ihrer Wasserabgabe untersucht (Tab. 3, Abb. 3). Dabei wurden über den Gewichtsverlust im Tagesverlauf maßgebliche Rückschlüsse auf die Verdunstungsleistung der Systeme gezogen. Die im Raum herrschenden Klimaverhältnisse (Temperatur, relative Luftfeuchte, Licht, Luftbewegung) wurden parallel dazu mittels Fühlern und Datenloggern erfasst und zu den verdunsteten Wassermengen in Beziehung gesetzt.

Tab. 3: Versuch 2 – Ermittlung der Verdunstungsleistung des Begrünungssystems unter kontrollierten Bedingungen

Versuch	**2**
Ziel	**Ermittlung der Verdunstungsleistung des Begrünungssystems unter kontrollierten Bedingungen**
Beschreibung	• handelsüblicher Systemaufbau inkl. Bewässerung, ohne Pflanzen
Ort	• Gewächshaus
Termin	• Ab Mitte Oktober 2013
Dauer	• 1 Monat
Anzahl Systeme	• 6 Begrünungssysteme, ohne Wiederholungen
Versuchsaufbau	• Systemaufbau inkl. Bewässerung positioniert auf einer Plattformwaage mit kontinuierlicher Messwerterfassung, Ausrichtung der bepflanzbaren Fläche nach Osten
Versuchsdurchführung	• Kontinuierliche Bewässerung der Trägersysteme mit dem Bewässerungssystem
Rahmenbedingungen	• Temperatur → Heizung 21/19 °C, Lüftung 25 °C • Relative Luftfeuchte (minimal 40 % einstellbar), • Reduziertes Tageslicht mittels Lamellenschattierung
Variierte Faktoren	• Begrünungssysteme • Bewässerung: 1. nach Anbieterempfehlung 2. nass, erhöhte Bewässerung 3. optimiert für die Pflanze nach eigenen Erfahrungen
Messparameter	• Wasserverbrauch – Masseverlust (Plattformwaage, Messwerterfassung alle 10 Minuten) • Wasserverbrauch – Volumen der Nachfüllmenge (Liste) • Relative Luftfeuchte – Zuluft (Fühler, kontinuierlich) • Relative Luftfeuchte direkt vor Wand - Verlauf, Höchstwerte (Fühler, kontinuierlich) • Relative Luftfeuchte im Raum (Fühler, kontinuierlich) • Raumtemperatur (Fühler, kontinuierlich) • Temperatur direkt vor den Systemen (Fühler, kontinuierlich) • CO_2 (Fühler, kontinuierlich) • Einstrahlung – PAR (Fühler, kontinuierlich) • Stromverbrauch Pumpe (stichprobenartig) • Luftbewegung (Hitzedrahtanemometer, stichprobenartig)

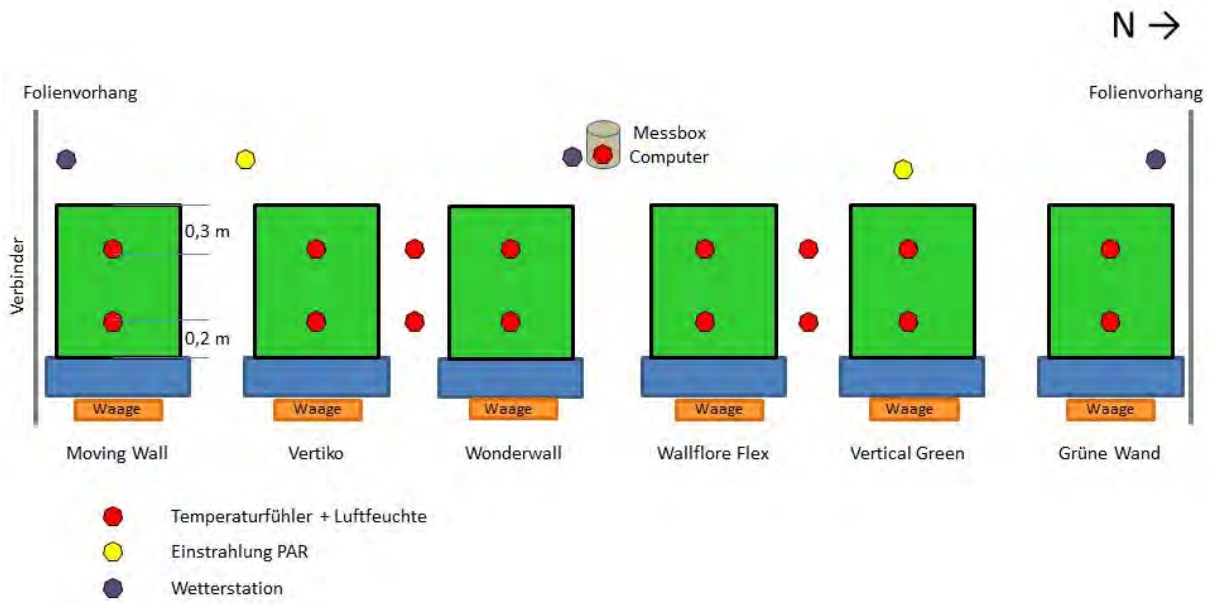


Abb. 3: Versuchsaufbau für Versuch 2 bis 4

Im dritten Schritt wurde die Anpassungsfähigkeit der Begrünungssysteme an sich verändernde Klimabedingungen (Temperatur, Luftbewegung, Luftfeuchte) geprüft (Tab. 4).

Tab. 4: Versuch 3 - Ermittlung der Anpassungsfähigkeit des Begrünungssystems an sich verändernde Klimabedingungen

Versuch	**3**
Ziel	**Ermittlung der Anpassungsfähigkeit des Begrünungssystems an sich verändernde Klimabedingungen**
Beschreibung	• handelsüblicher Systemaufbau inkl. Bewässerung, ohne Pflanzen
Ort	• Gewächshaus
Termin	• Anfang November 2013
Dauer	• 1 Monat
Anzahl Systeme	• 6 Systeme, ohne Wiederholung
Versuchsaufbau	• Systemaufbau inkl. Bewässerung positioniert auf Plattformwaage mit kontinuierlicher Messwerterfassung, Ausrichtung der bepflanzbaren Fläche nach Osten
Versuchsdurchführung	• Kontinuierliche Bewässerung der Trägersysteme mit dem Bewässerungssystem • Veränderung der Klimabedingungen (siehe variierte Faktoren)
Rahmenbedingungen	• Reduziertes Tageslicht
Variierte Faktoren	• Begrünungssysteme • Temperatur • Luftbewegung → Ventilator • Relative Luftfeuchte der Zuluft über Heizen/Lüften
Messparameter	• Wasserverbrauch – Masseverlust (Plattformwaage, Messwerterfassung alle 10 Minuten) → Mehr- bzw. Minderverbrauch an Wasser (Anpassungsfähigkeit des Systems) • Wasserverbrauch – Volumen der Nachfüllmenge (Liste) • Relative Luftfeuchte – Zuluft (Fühler, kontinuierlich) • Relative Luftfeuchte direkt vor Wand - Verlauf, Höchstwerte (Fühler, kontinuierlich) • Relative Luftfeuchte im Raum (Fühler, kontinuierlich) • Raumtemperatur (Fühler, kontinuierlich) • Temperatur direkt vor den Systemen (Fühler, kontinuierlich) • CO_2 (Fühler, kontinuierlich) • Einstrahlung – PAR (Fühler, kontinuierlich) • Luftbewegung (Hitzedrahtanemometer, stichprobenartig)

Erst im vierten Schritt wurden die Begrünungssysteme mit *Philodendron hederaceum* bepflanzt, um den Einfluss von Pflanzen auf die vorher ermittelten Verdunstungsleistungen zu erfassen (Tab. 5).

Tab. 5: Versuch 4 – Ermittlung der Leistungsfähigkeit des Begrünungssystems mit Pflanzen

Versuch	**4**
Ziel	**Ermittlung der Leistungsfähigkeit des Begrünungssystems mit Pflanzen**
Beschreibung	• handelsüblicher Systemaufbau mit Pflanzen
Ort	• Gewächshaus
Termin	• Ab Dezember 2013
Dauer	• 4 Monate
Anzahl Systeme	• 6 Systeme, ohne Wiederholung
Versuchsaufbau	• Systemaufbau inkl. Bewässerung positioniert auf einer Plattformwaage mit kontinuierlicher Messwerterfassung, Ausrichtung der bepflanzten Fläche nach Osten • Bepflanzung mit *Philodendron hederaceum* (vermehrt in Oasis)
Versuchsdurchführung	• Kontinuierliche Bewässerung der Begrünungssysteme mit dem jeweiligen internen Bewässerungssystem • Wasserverbrauch nach Bedarf (Welken der Pflanzen vermeiden) ausgleichen
Rahmenbedingungen	• Bepflanzung (*Philodendron hederaceum*), Anzahl pro m² siehe Systembeschreibungen
Variierte Faktoren	• Begrünungssysteme • Bewässerungszeiten • Luftbewegung • Temperatur
Messparameter	• Wasserverbrauch – Masseverlust (Plattformwaage, Messwerterfassung alle 10 Minuten) → Mehr- bzw. Minderverbrauch an Wasser (Anpassungsfähigkeit des Systems) • Wasserverbrauch – Volumen der Nachfüllmenge (Liste) • Relative Luftfeuchte – Zuluft (Fühler, kontinuierlich) • Relative Luftfeuchte direkt vor Wand - Verlauf, Höchstwerte (Fühler, kontinuierlich) • Relative Luftfeuchte im Raum (Fühler, kontinuierlich) • Raumtemperatur (Fühler, kontinuierlich) • Temperatur direkt vor den Systemen (Fühler, kontinuierlich) • CO_2 (Fühler, kontinuierlich) • Einstrahlung – PAR (Fühler, kontinuierlich) • Luftbewegung (Hitzedrahtanemometer, stichprobenartig) • Wasserqualität und Nährstoffbedarf der Pflanzen • pH-Wert-Veränderungen während der Kultur (wöchentlich) • Nährlösungsanalyse (bei Bedarf) • Transpiration (LCA 4 von ADC, stichprobenartig)

Das System, das in den Gewächshausversuchen die höchste und im Idealfall eine sich selbstregulierende Verdunstungsleistung zeigte und eine verlässliche Technik aufwies, wurde in einem weiteren Versuchsabschnitt unter Praxisbedingungen geprüft. Dabei wurden in einem energetisch hocheffizienten Bürogebäude mit vier hinsichtlich Größe, Exposition und Nutzung vergleichbaren Büroräumen zunächst Klimamessungen ohne Begrünung vorgenommen. Drei der Räume wurden in der Folge mit der ausgewählten Begrünung ausgestattet, ein unbegrünter Raum diente jeweils als Kontrolle.

2.1.1 Begrünungssysteme

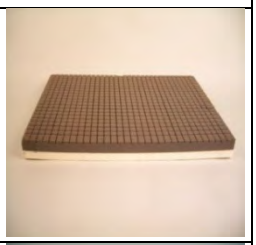
2.1.1.1 Auswahl der Begrünungssysteme für den Gewächshausversuch

Derzeit gibt es auf dem Markt ein stetig wachsendes und sich veränderndes Angebot an vertikalen Begrünungssystemen. Ein Hauptunterscheidungsmerkmal ist, ob die Substrate flächig ausgeführt sind oder sich in einer Art Topf oder Kasten befinden. Bei der Versuchskonzeption wurde davon ausgegangen, dass die überwiegende Verdunstungsleistung der vertikalen Systeme über ein flächiges Substrat erfolgt und die Pflanze hinsichtlich der Verdunstung eine eher untergeordnete Rolle spielt. Folgende Kriterien waren Grundlage für die Auswahl der Systeme:

- Flächiges Trägermaterial / Substrat
  → größere potentielle Verdunstungsfläche als bei Einzelpflanzen in Gefäßen
- Mineralisches Trägermaterial / Substrat
  → dauerhaft strukturstabil, weniger hygienische Probleme als bei organischem Anteil
- Passive Verdunstung / Befeuchtung
  → kein aktives Verteilen von Keimen aus dem Substrat in die Raumluft
- Positiver Einfluss auf die relative Luftfeuchte laut Hersteller gegeben
- Mobiles System
  → Vereinfachung der Versuchstechnik

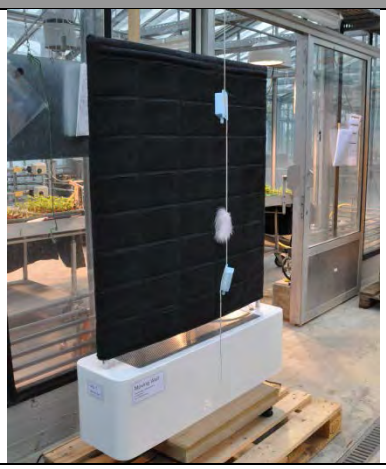
Entsprechend dieser Kriterien wurden für den ersten Test in der Klimakammer (Versuch 1) die in Tab. 6 aufgeführten Substrate, die Bestandteil von in Frage kommenden Begrünungssystemen sind, gewählt.

Tab. 6: Auswahl der Substrate für Versuch 1

Produkt	Anbieter	Substrat	Maße des Substrat-moduls (cm)	Foto
Fasssaden-garten Compact-f	Optigrün International AG, Deutsch-land	Korbmodul mit Alumini-um-Lochblech-Front und Aussparungen für Töpfe, gefüllt mit vierlagigem, mineralischem Substrat (Lava, Bims, Blähton, Tuff…)	47 x 30 x 6	
Grüne Wand	H & W Be-wässerung GmbH, Deutschland	Phenolharzschaumplatten (Oasis) auf Styrodur	40 x 60 x 5	
Vertigreen	ZinCo GmbH, Deutschland	Steinwollmatte auf Bewässerungsvlies, ge-halten von Kunststoff-schale mit Pflanzlöchern	50 x 60 x 8	
Wallflore Flex	Wallflore Systems N.V., Nieder-lande	Steinwolle, umhüllt mit Bändchengewebe, Aussparungen für Pflan-zen	49 x 58 x 7	
Wonderwall	Copijn Utrecht, Nie-derlande	Mehrere Filz- bzw. Vliesschichten mit Ta-schen auf Brett	64 x 60 x 1	

Für die Versuche 2 bis 4 im Gewächshaus schied das Produkt Fassadengarten aus, da es mit 380 kg pro Modul im Versuch nicht handhabbar gewesen wäre. Auf die Verwendung des Produktes von Vertigreen wurde verzichtet, da aufgrund der Kunststoffabdeckung eine geringe Verdunstungsrate erreicht wurde und keine marktreife, mobile Lösung verfügbar war. Nach weiterer Produktrecherche wurden die in Tab. 7 bis Tab. 12 beschriebenen Systeme für die Versuche 2 bis 4 gewählt, da sie den formulierten Anforderungen entsprechen.

Tab. 7: Moving Wall

Produkt	**Moving Wall**
	
Anbieter	Sempergreen Vertical Systems, Niederlande
Substrat	Filz / Vlies-Taschen
Substrat-Maße und Fläche	102,5 cm x 114 cm x 4,5 cm (B x H x T) Fläche: 1,17 m²
Modulgröße	107,5 cm x 150 cm x 28,5 cm (B x H x T)
Gewicht (inkl. gefülltem Wassertank)	70 kg
Füllmenge Vorratstank	65 l
Anschaffungskosten	ca. 1960,- €
Anzahl Stecklinge	40 Taschen à 1 bzw. 2 Würfel → 60 Würfel à 3 Stecklinge = 180 Stecklinge (Anzahl Filztaschen : 40 pro Seite, insges. 80, nur einseitig bepflanzt)
Bewässerungssystem	Tauchpumpe, oben je Seite ein gelochter Bewässerungsschlauch
Bewässerungszeiten Empfehlung Anbieter	3 Min, 3 x pro Tag

Tab. 8: Vertiko

Produkt	Vertiko
Anbieter	Vertiko GmbH, Deutschland
Substrat	mehrere Lagen Vlies gefüllt mit Vertiko Substrat (Zeolith, Vermiculit, Perlit), Abdeckung mit PP-Kompositvlies
Substrat-Maße und Fläche	97 cm x 149 cm x 4 cm (B x H x T) Fläche: 1,45 m²
Modulgröße	100 cm x 166,5 cm x 31 cm (B x H x T)
Gewicht (inkl. gefülltem Wassertank)	80 kg
Füllmenge Vorratstank	35 l
Anschaffungskosten	ca. 1700,- €
Anzahl Stecklinge	31 Taschen à 2 Würfel à 3 Stecklinge = 186 Stecklinge (Schlitzanzahl variabel→ 31 Taschen geschnitten)
Bewässerungssystem	Tauchpumpe, oben gelochter Bewässerungsschlauch
Bewässerungszeiten Empfehlung Anbieter	Max 5 Min, 3 x pro Tag

Tab. 9: Wonderwall

Produkt	Wonderwall
Anbieter	Copijn Utrecht, Niederlande
Substrat	Mehrlagiger Filz
Substrat-Maße und Fläche	115,5 cm x 158 cm x 1 cm (B x H x T) Fläche: 1,82 m²
Modulgröße	130,5 cm x 189 cm x 50 cm (B x H x T)
Gewicht (inkl. gefülltem Wassertank)	144 kg
Füllmenge Vorratstank	60 l
Anschaffungskosten	ca. 3930,- €
Anzahl Stecklinge	42 Taschen à 2 Würfel à 3 Stecklinge = 252 Stecklinge
Bewässerungssystem	Tauchpumpe, oben und in der Mitte jeweils gelochter Bewässerungs-schlauch
Bewässerungszeiten Empfehlung Anbieter	1. Monat: 10 Min, 1 x pro Tag danach: 5 Min, 1 x pro Tag

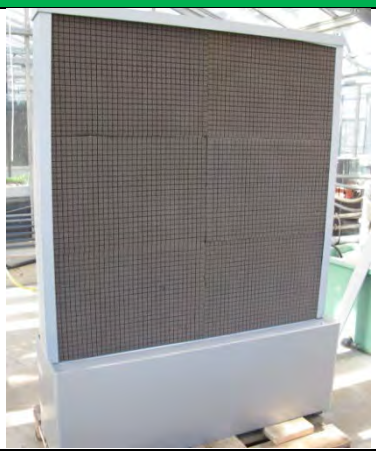
Tab. 10: Wallflore Flex

Produkt	**Wallflore Flex**
Anbieter	Wallflore Systems, Niederlande
Substrat	Steinwolle (Saint-Gobain/Cutilene), umhüllt von Bändchen-gewebe
Substrat-Maße und Fläche	118 cm x 97 cm x 7,5 cm (B x H x T) Fläche: 1,14 m²
Modulgröße	125 cm x 136 cm x 25 cm (B x H x T)
Gewicht (inkl. gefülltem Wassertank)	110 kg
Füllmenge Vorratstank	42 l
Anschaffungskosten	ca. 3035,- €
Anzahl Stecklinge	64 Löcher à 1 Würfel à 3 Stecklinge = 192 Stecklinge
Bewässerungssystem	Pumpe außerhalb der Nährlösung, oben gelochter Bewässerungsschlauch
Bewässerungszeiten Empfehlung Anbieter	5 Min, 1 x pro Tag

Tab. 11: Vertical Green

Produkt	Vertical Green
Anbieter	Ruof Grün Raum Konzepte, Deutschland
Substrat	Steinwolle
Substrat-Maße und Fläche	100 cm x 165 cm x 4 cm (B x H x T) Fläche: 1,65 m²
Modulgröße	137 cm x 200 cm x 48 cm (B x H x T)
Gewicht (inkl. gefülltem Wassertank)	172 kg
Füllmenge Vorratstank	34 l
Anschaffungskosten	Leihgabe eines Prototyps
Anzahl Stecklinge	3 Platten à 57 Stecklinge = 171 Stecklinge
Bewässerungssystem	Pumpe außerhalb der Nährlösung, über jeder Steinwollplatte Schlauch mit Tropfern, unter jeder Platte eine Wasserablaufrinne
Bewässerungszeiten Empfehlung Anbieter	8 Min, 1-2 x pro Tag

Tab. 12: Grüne Wand

Produkt	Grüne Wand
	
Anbieter	H & W Bewässerung GmbH, Deutschland
Substrat	Phenolharzschaumplatten (Oasis) auf Styrodur
Substrat-Maße und Fläche	120 cm x 119 cm x 5 cm (B x H x T) Fläche: 1,428 m²
Modulgröße	125 cm x 162,5 cm x 37 cm (B x H x T)
Gewicht (inkl. gefülltem Wassertank)	175 kg
Füllmenge Vorratstank	122 l
Anschaffungskosten	ca. 2830,- €
Anzahl Stecklinge	6 Platten à 48 Stecklinge = 288 Stecklinge
Bewässerungssystem	Tauchpumpe, oben Bewässerungsrinne mit Vlies als kapillarer Übergang zu den Oasisplatten
Bewässerungszeiten Empfehlung Anbieter	15 Min, 45 Min Pause, 24 h

2.1.1.2 Auswahl der Pflanzenart

Philodendron hederaceum (im Handel unter dem Synonym *Philodendron scandens*) gehört zu der Pflanzenfamilie der Aronstabgewächse (*Araceae*). Ursprünglich wächst diese immergrüne Kletterpflanze im Urwald Mittel- und Südamerikas. Aufgrund ihrer geringen Lichtansprüche (Minimum 500 Lux [2]), unproblematischen Pflege und niedrigen Anfälligkeit hinsichtlich Krankheiten und Schädlingen hat sie sich einen festen Platz in der Innenraumbegrünung erobert. Mit den glänzenden, mittelgrünen, herzförmigen, dickledrigen Blättern lässt sich hervorragend eine flächige Begrünung gestalten. Ein Rückschnitt der Triebspitzen ist problemlos möglich und verbessert den Pflanzenaufbau. Die Temperaturansprüche von

Philodendron hederaceum liegen bei 20°C mit einem Minimum von 15 °C im Winter [2]. 40 bis 60 % relative Luftfeuchte sind für die Pflanzen optimal [2].

Die Stecklingsvermehrung erfolgte für alle Systeme einheitlich in Phenolharzschaum (Oasis). Dabei wurden für Moving Wall, Vertico, Wonderwall und Wallflore Würfel (5 x 5 x 5 cm) mit je 3 Stecklingen besteckt. Für Vertical Green fanden kleine Oasis-Plugs Verwendung, die in passende Löcher in den Steinwollplatten gesteckt wurden. Für die Grüne Wand wurde direkt in die Oasis-Platten gesteckt.

2.1.1.3 Variation der Bewässerung

Um ein Gespür für die optimale Bewässerung der jeweiligen Systeme zu bekommen, wurden die Häufigkeit, die Dauer und der Zeitpunkt der Bewässerung variiert. Als Ausgangspunkt diente die Anbieterempfehlung, die aber in vielen Fällen keine zufriedenstellenden Ergebnisse brachte. Das Hauptaugenmerk lag darin, eine Kombination zu finden, die die Versorgung der Pflanzen sicherstellt. Tab. 13 zeigt die in den Versuchen 2 bis 4 getesteten Kombinationen.

Tab. 13: Bewässerungsdauer und -häufigkeit in den Versuchen ohne und mit Bepflanzung

VG	Name	ohne Bepflanzung				mit Bepflanzung			
		Anbieter-empfehlung		optimiert		tagsüber		auf 24 h verteilt	
		Dauer	Häufig-keit	Dauer	Häufig-keit	Dauer	Häufig-keit	Dauer	Häufig-keit
1	Moving Wall	3 Min	3 x pro Tag	10 Min	10 x pro Tag	10 Min	8 x pro Tag	10 Min	8 x pro Tag
2	Vertico	max. 5 Min	3 x pro Tag	5 Min	10 x pro Tag	5 Min	10 x pro Tag	5 Min	10 x pro Tag
3	Wonder-wall	10 Min	1 x pro Tag	10 Min	10 x pro Tag	10 Min	8 x pro Tag	10 Min	8 x pro Tag
4	Wallflore	5 Min	1 x pro Tag	5 Min	1 x pro Tag	10 Min	3 x pro Tag	10 Min	3 x pro Tag
5	Vertical Green	8 Min	2 x pro Tag	8 Min	6 x pro Tag	8 Min	1 x pro Tag	8 Min	1 x pro Tag
6	Grüne Wand	15 Min	45 Min Pause	15 Min	45 Min Pause	10 Min	50 Min Pause	10 Min	50 Min Pause

Auf die Ermittlung der Bewässerungsmenge pro Bewässerungsvorgang musste verzichtet werden, da dies nicht für alle Systeme möglich war. Bei dem System Grüne Wand erfolgt die Entnahme von Wasser aus der Rinne durch ein Dochtsystem in Abhängigkeit von der Feuchtigkeit auf dem Substrat. Daher ist hier die entnommene Wassermenge pro Bewässerungsvorgang variabel und nicht messbar. Alle anderen Systeme bieten das Wasser nach Zeit gesteuert und im Überschuss an.

Wasserqualität und Nährstoffversorgung

In der Regel wurden die Vorratsgefäße mit einer 1:1 Mischung aus Freisinger Leitungswasser (19,3 °dH) und vollentsalztem Wasser befüllt, um ein Ansteigen des pH-Wertes in der Nährlösung zu reduzieren und trotzdem die Ca- und Mg-Versorgung der Pflanzen sicherzustellen. Stark kalkhaltiges Leitungswasser würde zudem zu einer schnellen Verkalkung der Bewässerungseinrichtung führen. Im Falle eines zu starken pH-Anstieges wurde der Anteil

an vollentsalztem Wasser und im Falle eines starken pH-Absinkens der Anteil an Leitungswasser erhöht.

Um die Pflanzen mit Nährstoffen zu versorgen, wurde dem Mischwasser bei jeder Gabe Dünger zugegeben, sodass eine Nährlösung mit 0,25 ‰ entstand. Es wurde dazu der Dünger Ferty 9 Hydro (10 % NO_3-N, 5 % NH_4-N, 7 % P_2O_5, 22 % K_2O, 6 % MgO, 0,03 % B, 0,002 % Cu, 0,12 % Fe, 0,05 % Mn, 0,005 % Mo, 0,01 % Zn) verwendet. Um den Eisenbedarf der Pflanzen zu sichern, wurde zusätzlich 0,25 ‰ eines Eisenchelatdüngers (Fe-EDDHA) gegeben.

2.1.2 Messdatenerfassung im Gewächshaus

2.1.2.1 Pflanzenbauliche Messungen

Nach der Begrünung der Wände wurde ein großes Augenmerk auf das weitere Wachstum der Pflanzen gelegt. Aufgrund der Verschiedenartigkeit der Systeme war es nicht möglich, exakte Messungen, z.B. Trieblänge, durchzuführen. Ersatzweise wurde das Wachstum optisch beurteilt (z.B. Blattfarbe, Bedeckungsgrad, Austrieb). Anhand der Turgeszenz der Blätter war abzulesen, ob die Pflanzen ausreichend mit Wasser versorgt waren. Vor allem kurz nach der Pflanzung wurde im Bedarfsfall von Hand mittels Schlauchbrause gegossen bzw. mit Wasser besprüht, um das Absterben zu verhindern. Im gesamten Versuchsverlauf wurden die Triebspitzen regelmäßig zurückgeschnitten, um einen guten Pflanzenaufbau zu erzielen. Auch das Entfernen vertrockneter Blätter war erforderlich.

2.1.2.2 pH-Wert / Leitfähigkeit

Die Messung des pH-Wertes erfolgte mit einer pH-Elektrode (WTW Sen Tix 41) an einem WTW pH 325-Messgerät. Die Leitfähigkeit der Nährlösung wurde mit einer Leitfähigkeitselektrode (WTW Tetra Con 325) gemessen.

Das Messen des pH-Wertes und der Leitfähigkeit in der Nährlösung erfolgte 1 x pro Woche und diente dazu, Anhaltspunkte über den Versorgungszustand der Pflanzen zu erhalten. Bei pH-Werten über 8 bzw. unter 4,5 wurde die Wasserqualität angepasst. Alarmsignale waren ebenfalls Leitfähigkeitswerte (EC-Wert) über 2000 µs cm^{-1}. Bei Erreichen dieses Grenzwertes wurde die Nährlösung komplett ausgetauscht.

2.1.2.3 Erfassung der Wasserabgabe der Begrünungssysteme

Der Wasserverbrauch (= Wasserabgabe) der Begrünungssysteme wurde über das in das Vorratsgefäß nachgefüllte Volumen an Wasser ermittelt. Die Nachfüllmenge wurde in Listen festgehalten.

Zur exakten Ermittlung des zeitlichen Verlaufes der Wasserabgabe durch die Begrünungssysteme wurde unter jedes Begrünungssystem eine Plattformwaage (Fa. Soehnle, Sonderauflösung 300 kg / 50 g) eingebaut. Mit Hilfe eines am Institut für Gartenbau geschriebenen Programms wurden alle 10 Minuten die Massen der Systeme mitgeloggt und auf einem Laptop gespeichert. Aus diesen Werten lassen sich die Wasserabgaben pro System bzw. pro m² bezogen auf unterschiedliche Zeiteinheiten berechnen.

2.1.2.4 Messung der Klimaparameter im Gewächshaus

Mit einem bereits vorhandenes WiSensys Funkmesssystem wurden Temperatur, relative Luftfeuchte, CO_2-Gehalt der Luft und die PAR-Strahlung aufgezeichnet. Die verwendeten Komponenten sind im Anhang aufgeführt (Tab. 36 bis Tab. 40).

2.2 Ergebnisse und Diskussion von Versuch 1: Ermittlung der Wasserabgabe der Substrate

Die stündlich erfassten Messwerte der Wasserabgabe nach Wassersättigung ohne weitere Bewässerung (siehe Tab. 2) zeigten deutliche Unterschiede zwischen den untersuchten Substraten (Abb. 4). Bei den Varianten Vertigreen (Steinwolle mit Kunststoffabdeckung) und Wallflore (Steinwolle ummantelt mit Bändchengewebe) betrug die Wasserabgabe während des Versuchszeitraumes von etwa 6 Tagen konstant etwa 30 g h^{-1} m^{-2}. Dagegen ging die Wasserabgabe bei Wonderwall (Filz) von zunächst 90 g h^{-1} m^{-2} innerhalb von 24 Stunden auf 10 g h^{-1} m^{-2} zurück. Die Grüne Wand (Oasis) hatte während der ersten 72 h eine Wasserabgaberate von 60 bis fast 90 g h^{-1} m^{-2}, während der folgenden 72 h ging diese bis auf 10 g h^{-1} m^{-2} zurück. Der Fassadengarten (körniges, mineralisches Substrat im Korb) wies zunächst eine ähnlich hohe Wasserabgaberate wie die Grüne Wand von etwa 80 g h^{-1} m^{-2} auf, die dann nach 24 h kontinuierlich bis auf 30 g h^{-1} m^{-2} nach 120 h zurückging.

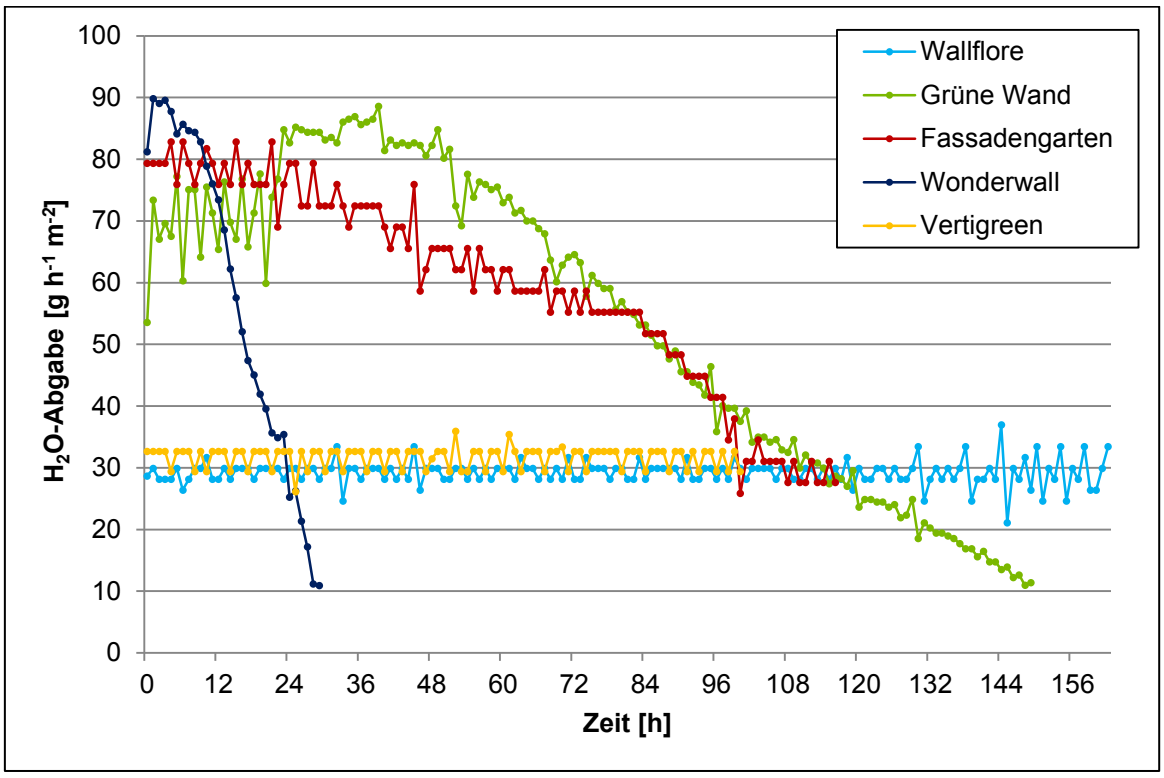


Abb. 4: Zeitlicher Verlauf der Wasserabgabe nach Wassersättigung

2.3 Ergebnisse und Diskussion von Versuch 2: Ermittlung der Verdunstungsleistung der Begrünungssysteme (ohne Pflanzen) unter kontrollierten Bedingungen

Für die Darstellung der Ergebnisse von Versuch 2 (siehe Tab. 3) wurde beispielhaft ein Tag mit nach unseren Erfahrungen optimierter Bewässerung (Tab. 13) ausgewählt. Grafiken zu einem Beispieltag mit Bewässerung nach Anbieterempfehlung sind im Anhang unter Abb. 93 und Abb. 94 zu finden. Die Auswahl repräsentativer Tage erfolgte anhand der Klimadaten im Gewächshaus.

In den Grafiken wurden die über den Masseverlust alle 10 Minuten ermittelten Wasserabgaben auf jeweils 1 m² begrünbare Substratfläche bezogen. Die Werte wurden für einen Tag von 8:00 - 19:50 Uhr (hellere Säulenteile) und eine Nacht von 20:00 – 7:50 Uhr (dunklere Säulenteile) summiert dargestellt.

Für die Darstellung der Wasserabgabe im zeitlichen Verlauf wurden die in 10 Minuten-Intervallen erfassten Wasserabgaben für einen Tag (8:00 - 19:50 Uhr) schrittweise aufsummiert. Durch die Summierung gelingt es, eine stetige Kurve zu generieren. Mittels der Steigung der Kurven lassen sich Rückschlüsse auf die Höhe der Wasserabgabe pro Zeit ziehen.

Da die Systeme Moving Wall, Vertiko, Wonderwall und Vertical Green bei der Bewässerung nach Anbieterempfehlung aus gärtnerischer Sicht zu trocken waren, um eine ausreichende Versorgung der Pflanzen zu gewährleisten, wurden bei diesen Systemen die Wassergaben im Rahmen der optimierten Bewässerung erhöht.

Abb. 5 zeigt exemplarisch die Wasserabgabe der sechs untersuchten Begrünungssysteme für 24 Stunden bei optimierter Bewässerung (Tab. 13). Die höchsten Wasserabgaben pro Quadratmeter wurden mit rund 1000 g m^{-2} bei den Systemen Vertical Green, Grüne Wand und Moving Wall ermittelt. Das entspricht umgerechnet 42 g m^{-2} h^{-1}. Die Wasserabgabe am Tag betrug etwa 1/3 bis 1/2 der Wasserabgabe über 24 Stunden. Die niedrigste Wasserabgabe wurde mit ca. 200 g m^{-2} in 24 h (8 g m^{-2} h^{-1}) bei dem System Wonderwall gemessen. Etwas höhere Wasserabgaben von rund 300 g m^{-2} in 24 h (12 g m^{-2} h^{-1}) hatten die Systeme Vertiko und Wallflore.

Obwohl bei optimierter Bewässerung vom 6.11.13 bis 7.11.13 bei den meisten Systemen eine etwas geringere Wasserabgabe gemessen wurde (Abb. 5) als bei der Bewässerung nach Anbieterempfehlung (Anhang, Abb. 93) blieb doch das Verhältnis der Wasserabgaben der Systeme zueinander sehr ähnlich. Eine Ausnahme war das System Moving Wall, bei dem sich die Wasserabgabe stark erhöhte, da hier die Bewässerung um mehr als das 10-fache gesteigert wurde. Bei Wonderwall wurde dagegen selbst durch die verzehnfachte Bewässerungsmenge keine erhöhte Wasserabgabe festgestellt. Das Material blieb weiterhin sehr trocken. Das niedrige Niveau der Wasserabgabe trotz optimierter und somit bei den meisten Systemen erhöhter Bewässerung gegenüber der Anbieterempfehlung hing mit der Temperatur und Einstrahlung und somit auch der relativen Luftfeuchte im Gewächshaus an dem dargestellten Tag zusammen. Bei der Auswahl der Grafiken stand die Darstellung von Trends im Vordergrund, die Höhe der absoluten Werte sollte nicht überbewertet werden.

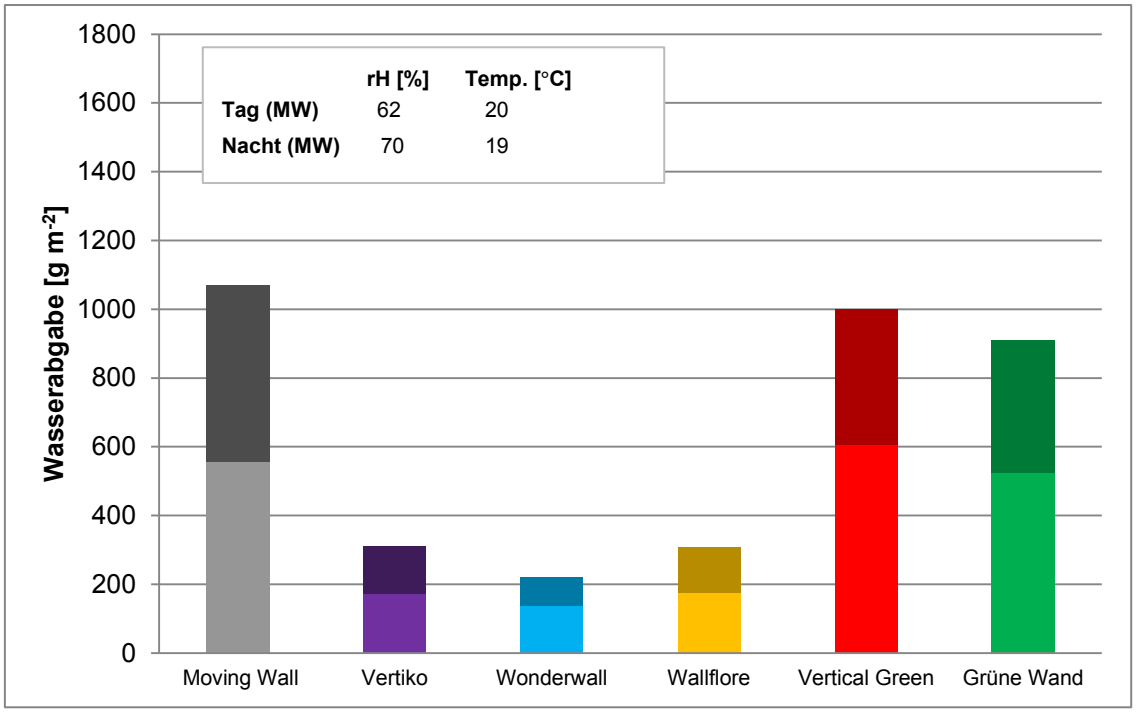


Abb. 5: Wasserabgabe ohne Begrünung bei optimierter Bewässerung (Summe vom 6.11.13 8:00 Uhr bis 7.11.13 7:50 Uhr) [hellere Säulenteile: 8:00-19:50 Uhr, dunklere Säulenteile: 20:00-7:50 Uhr]

Am 6.11.13 blieb die relative Luftfeuchte im Raum über den Tag hinweg relativ konstant zwischen 55 und 65 % (Abb. 6). Da die Luftfeuchte sich über den Tag wenig änderte, war auch keine Veränderung der Wasserabgaberaten der Begrünungssysteme im Tagesverlauf festzustellen. Die Wasserabgaben der Systeme Moving Wall, Vertical Green und Grüne Wand waren vergleichbar hoch. Dies war ebenso der Fall bei den Systemen Vertiko, Wonderwall und Wallflore. An anderen, z.B. Abb. 94 im Anhang, dargestellten Tagen, an denen die relative Luftfeuchte einen Tagesgang aufwies, wurde eine tendenzielle Reduktion der Wasserabgaberate pro Zeit bei höherer Luftfeuchte bei den Systemen Vertical Green und Grüne Wand beobachtet (Selbstregulation).

Dagegen wurde bei keinem der untersuchten Systeme ein Einfluss der Bewässerungszeitpunkte und -intervalle auf die Wasserabgabe festgestellt. Bei einer konstanten Luftfeuchte verlief die Wasserabgabe gleichmäßig über den ganzen Tag. Die Wasserabgaberaten schwankten bei allen Systemen nur in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte (siehe Selbstregulation).

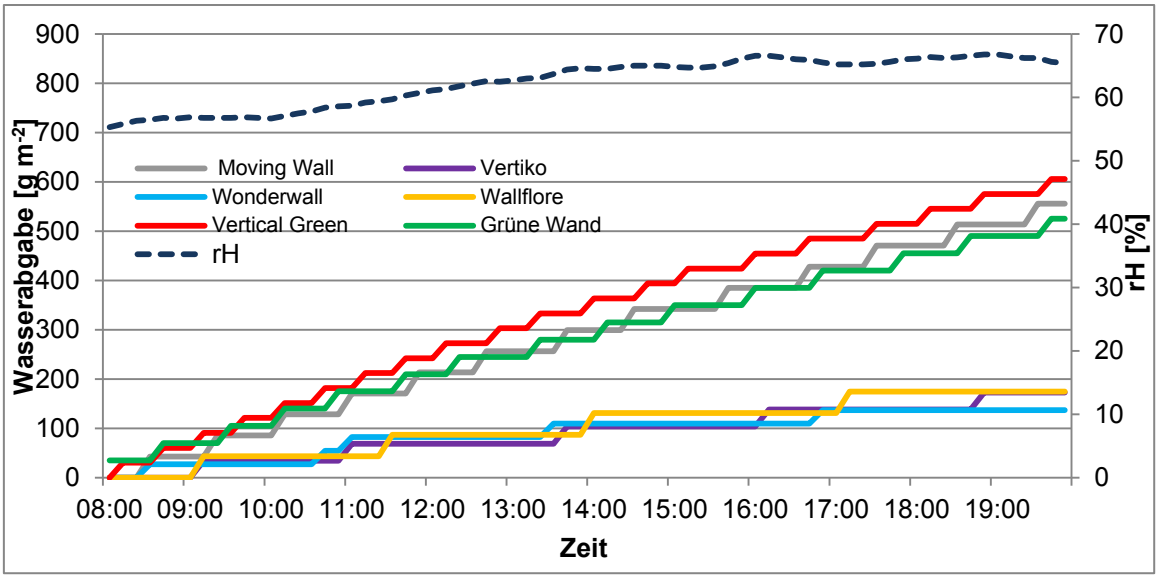


Abb. 6: Wasserabgabe ohne Begrünung bei optimierter Bewässerung (aufsummierte Werte vom 6.11.13 8:00 bis 19:50 Uhr) in Relation zur relativen Luftfeuchte

Für die Systeme Vertical Green und Grüne Wand wurde eine deutliche Beziehung zwischen der Wasserabgabe (Tagessumme über 24 h) und der relativen Luftfeuchte (Mittelwert über 24 h) im Gewächshaus direkt vor dem System mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,61 bzw. 0,66 festgestellt (Tab. 14).

Abb. 7 für Vertical Green und Abb. 8 für Grüne Wand zeigen, dass die Wasserabgabe mit steigender relativer Luftfeuchte zurückgeht. Dies ist ein Hinweis auf die Selbstregulationsfähigkeit der Systeme (siehe unten Selbstregulation). Dadurch kann eine Überfeuchtung der Raumluft vermieden werden.

Für keines der Begrünungssysteme konnte eine Beziehung zwischen der Wasserabgabe und dem Wassergehalt der Luft (Mittelwert über 24 h) ermittelt werden. Die Korrelation zwischen Wasserabgabe und Temperatur bzw. Einstrahlung (PAR Nord und Süd) war meist nur schwach ausgeprägt.

Tab. 14: Korrelationen zwischen Wasserabgabe und rel. Luftfeuchte, Wassergehalt, Temperatur bzw. Einstrahlung (PAR) für den Zeitraum ohne Pflanzen

VG ohne Pfl.	Name	n	Korrelation (R^2) der Tagessumme Wasserabgabe [g m^{-2} d^{-1}] mit				
			rel. Luftfeuchte* (MW 24 h) [%]	Wassergehalt* (MW 24 h) [g kg^{-1}]	Temperatur* (MW 24 h) [°C]	PAR Nord (MW 24 h) [mV]	PAR Süd (MW 24 h) [mV]
gesamter Auswertungszeitraum							
1	Moving Wall	20	0,13	0,00	0,26	0,02	0,06
2	Vertiko	17	0,17	0,00	0,40	0,05	0,13
3	Wonderwall	20	0,30	0,05	0,13	0,11	0,17
4	Wallflore	19	0,04	0,02	0,26	0,30	0,50
5	Vertical Green	19	0,61	0,08	0,35	0,02	0,01
6	Grüne Wand	20	0,66	0,14	0,22	0,01	0,00

* Messpunkt oben vor System

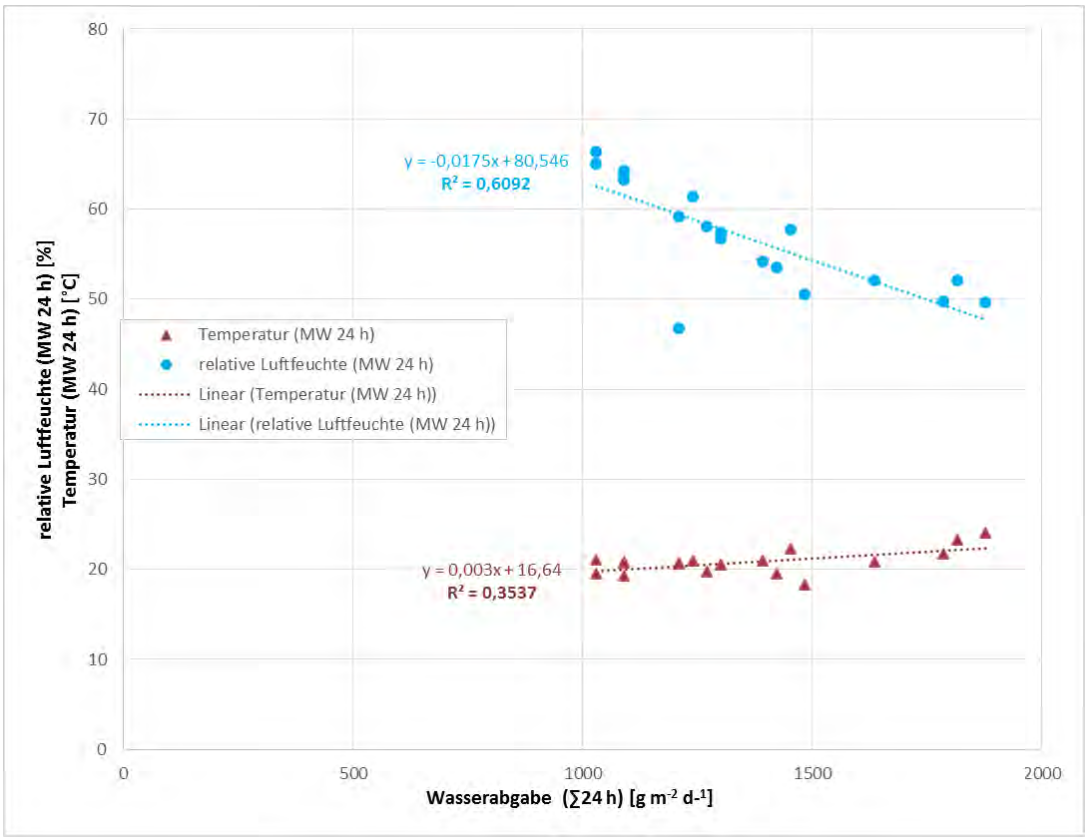


Abb. 7: Korrelation zwischen der Wasserabgabe (Σ 24 h) [g m^{-2} d^{-1}] und der relativen Luftfeuchte (MW 24 h) [%] bzw. der Temperatur (MW 24 h) [°C] für Vertical Green (VG 5) ohne Pflanzen

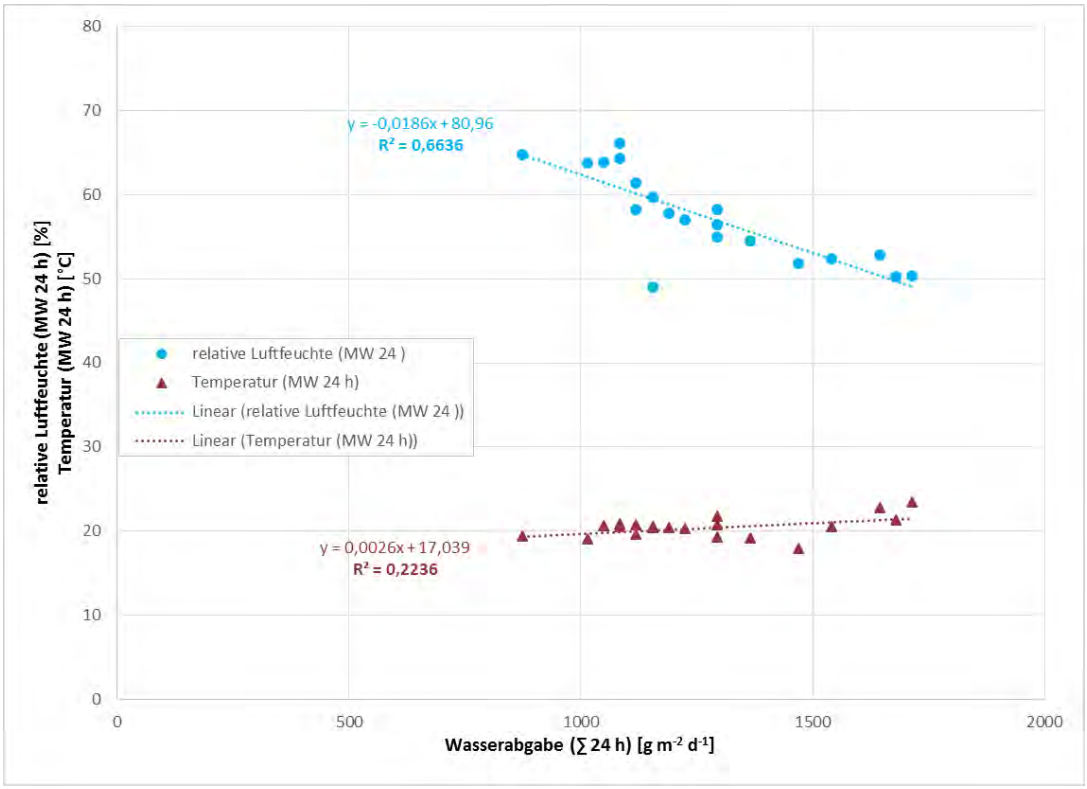


Abb. 8: Korrelation zwischen der Wasserabgabe (Σ 24 h) [g m^{-2} d^{-1}] und der relativen Luftfeuchte (MW 24 h) [%] bzw. der Temperatur (MW 24 h) [°C] für Grüne Wand (VG 6) ohne Pflanzen

Selbstregulation

Die Wasserabgabe durch Transpiration bzw. Evaporation basiert auf einem Ausgleich der Konzentration des Wasserdampfes in gesättigter (Blatt-Stomata / feuchte Wand) und ungesättigter Umgebung (Luft). Ist das Gefälle der Konzentration bei niedriger Luftfeuchte hoch, wird viel Wasser nachgeführt. Je höher die Luftfeuchte desto niedriger wird das Gefälle und die Wasserabgabe sinkt. Eine Reduktion ist schon bei Feuchtewerten um 60 % feststellbar, allerdings fällt sie erst bei 98% relativer Luftfeuchte auf nahe Null.
Die Wasserversorgung des Grüne-Wand-Systems beruht auf der Saugspannung des Substrates und dieses wiederum auf dem Dampfdruckdefizit gegenüber der Raumluft. D.h. je trockner die Raumluft, desto mehr Wasser gibt die Substratplatte ab und umso häufiger saugt sie aus dem angebotenen Reservoir Wasser über das Vlies nach. Es gibt daher keine Zwangsbewässerung. Je mehr Feuchte in der Raumluft vorhanden ist, desto geringer ist das Dampfdruck-Defizit und umso weniger Wasser gibt die Wand an den Raum ab und saugt auch weniger aus dem Reservoir. Eine Substratfeuchte von etwa 40 % wird jedoch immer aufrecht erhalten.
Dadurch reguliert sich einerseits die Wasserabgabe selbst, andererseits erlaubt die Kenntnis über die immer gleiche chemisch-physikalische Zusammensetzung des Substrates die Berechnung der nötigen Platten-Anzahl, um die gewollte und maximal erlaubte relative Luftfeuchte den örtlichen Bedingungen anzupassen (persönliche Auskunft von M. Radtke und B. Häring, 15.03.2015; per e-mail).

Auch Systeme wie Vertical Green, die zeitgesteuert über Tropfer mit Wasser versorgt werden, zeigten tendenziell die Fähigkeit zur Selbstregulation. Hier wurde ebenfalls ein Rückgang der Wasserabgabe bei hoher Luftfeuchte beobachtet.

2.4 Ergebnisse und Diskussion von Versuch 3: Ermittlung der Anpassungsfähigkeit der Begrünungssysteme an sich verändernde Klimabedingungen

Abweichend zum Versuchsplan (Tab. 4) wird die Anpassungsfähigkeit der Begrünungssysteme an sich verändernde Klimabedingungen anhand von Daten aus dem Versuchszeitraum mit Begrünung (Versuch 4) dargestellt, da hierfür eine größere Variation der Klimabedingungen vorliegt.

Temperatur

In Abb. 9 bis Abb. 14 sind für die einzelnen Begrünungssysteme die täglichen Wasserabgabesummen unterteilt nach den eingestellten Heiztemperaturen von 18, 21 und 25 °C aufgeführt.

Für die Systeme Moving Wall, Vertiko, Wallflore und Grüne Wand konnte kein eindeutiger Einfluss der Heiztemperatur auf die Höhe der täglichen Wasserabgabesumme festgestellt werden. Die Schwankung der Werte war relativ groß. Hinzu kommt das Problem, dass die eingestellte Heizungstemperatur eine Soll-Temperatur darstellt und nicht in jedem Fall der erreichten Ist-Temperatur im Gewächshaus entspricht.

Bei den Systemen Wonderwall und Vertical Green war tendenziell die Wasserabgabe bei 25 °C höher als bei den niedrigeren Temperaturen.

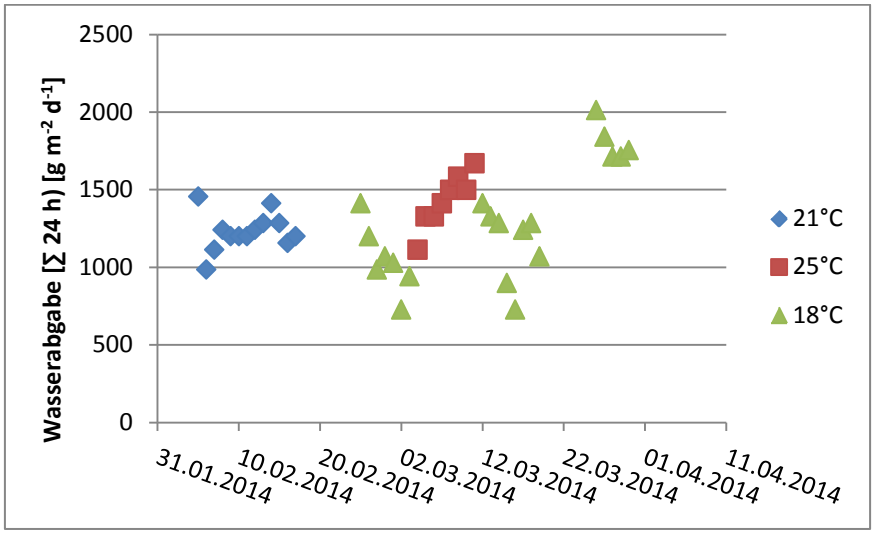


Abb. 9: Wasserabgabe (∑ 24 h) von Moving Wall mit Begrünung bei einer Heiztemperatur von 18, 21 bzw. 25°C

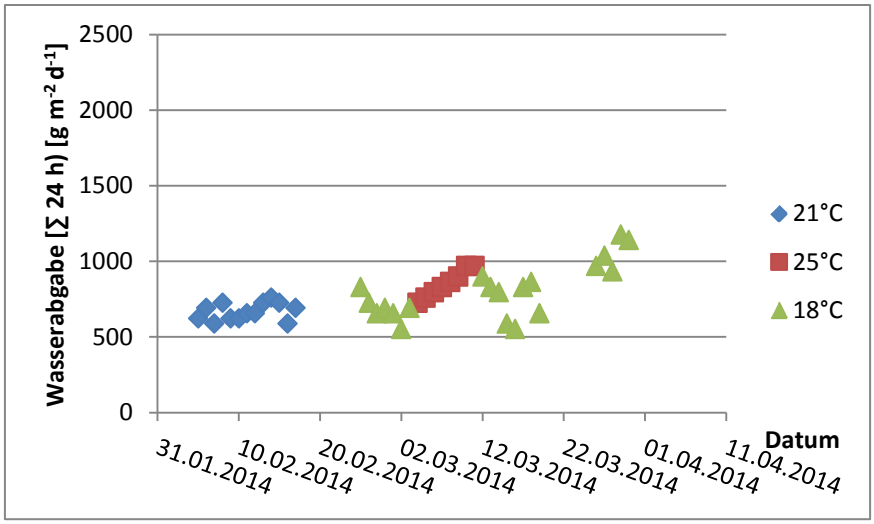


Abb. 10: Wasserabgabe (∑ 24 h) von Vertiko mit Begrünung bei einer Heiztemperatur von 18, 21 bzw. 25°C

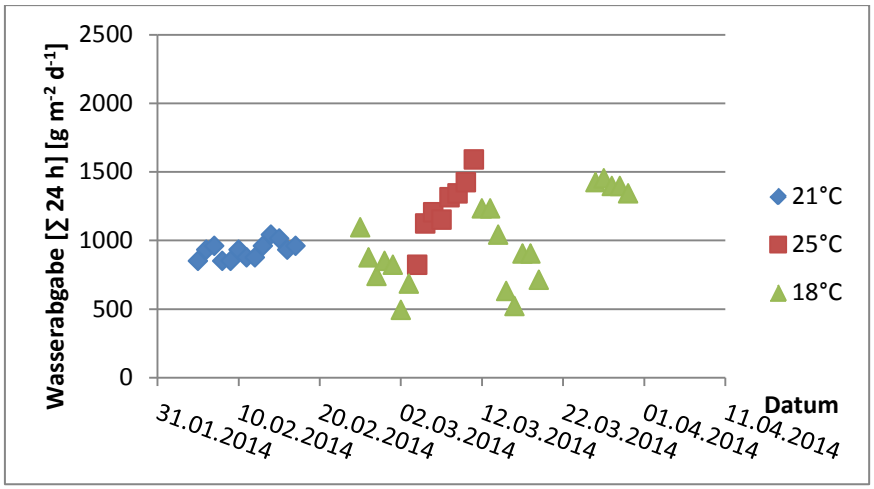


Abb. 11: Wasserabgabe (∑ 24 h) von Wonderwall mit Begrünung bei einer Heiztemperatur von 18, 21 bzw. 25°C

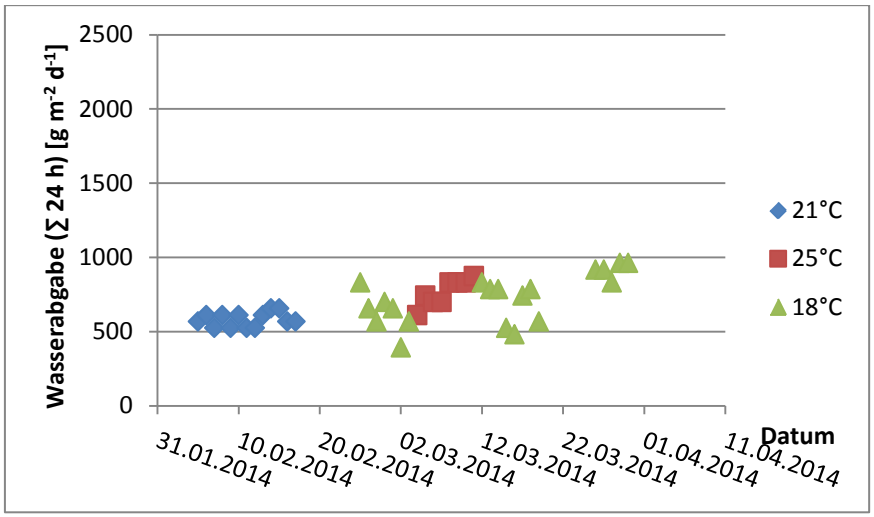


Abb. 12: Wasserabgabe (∑ 24 h) von Wallflore mit Begrünung bei einer Heiztemperatur von 18, 21 bzw. 25°C

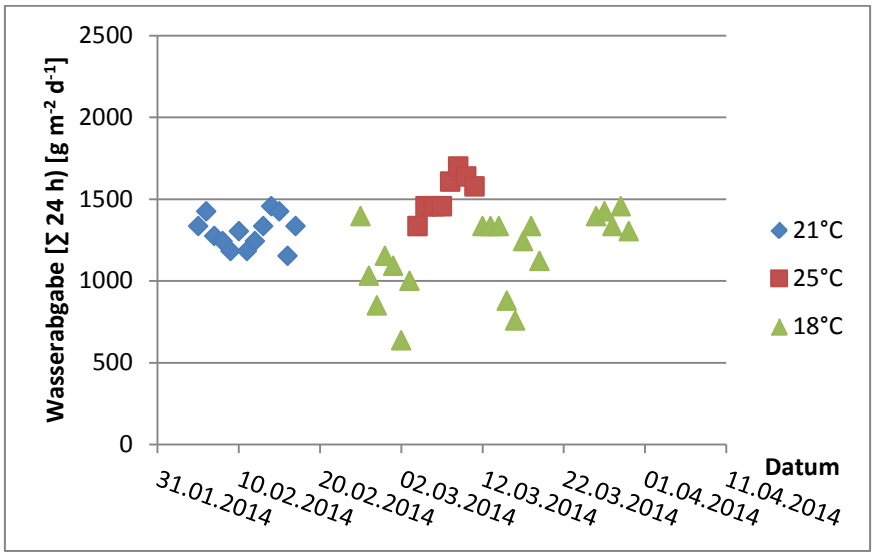


Abb. 13: Wasserabgabe (∑ 24 h) von Vertical Green mit Begrünung bei einer Heiztemperatur von 18, 21 bzw. 25°C

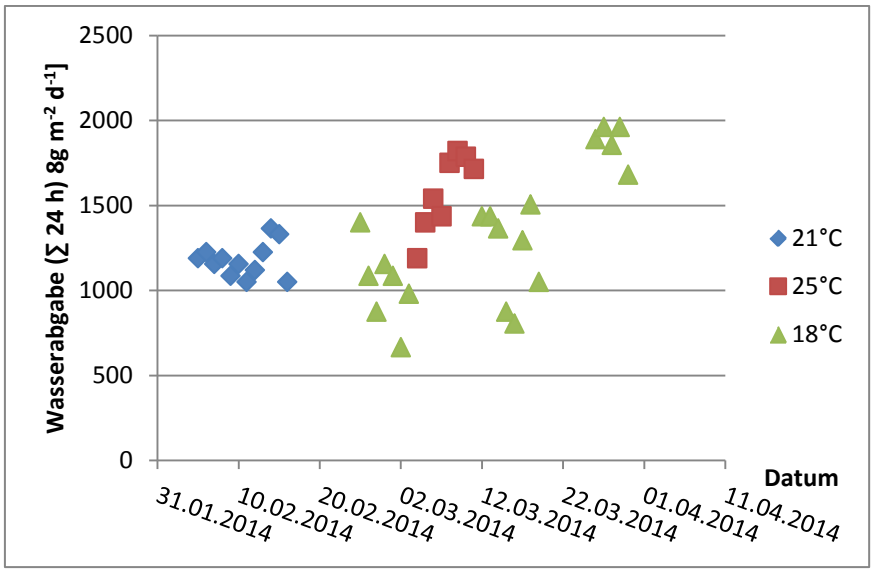


Abb. 14: Wasserabgabe (∑ 24 h) von Grüne Wand mit Begrünung bei einer Heiztemperatur von 18, 21 bzw. 25°C

Die Korrelationen zwischen Wasserabgabe und relativer Luftfeuchte sind bei Versuch 4 (2.5.2) für den gesamten Zeitraum und alle Heiztemperaturen zusammen dargestellt (Tab. 16).

Wird die Beziehung zwischen Wasserabgabe und relativer Luftfeuchte getrennt nach den eingestellten Heiztemperaturen betrachtet, so zeigte sich für die Heiztemperatur 18 °C für alle Systeme eine sehr gute Beziehung. Bei isolierter Betrachtung der 21 °C Werte ergaben sich für alle Systeme außer Moving Wall deutlich bessere Korrelationen als für den gesamten Auswertungszeitraum (Tab. 15 und Tab. 16). Die Einschränkung auf die Werte bei 25 °C Heiztemperatur führte dagegen zu besseren Korrelationen zwischen Wasserabgabe und relativer Luftfeuchte bei den Systemen Moving Wall, Vertiko und Wonderwall als bei Wallflo-

re, Vertical Green und Grüne Wand. Die Aussagekraft dieser Werte ist allerdings aufgrund der geringen Stichprobengröße von n = 8 nicht überzubewerten.

Tab. 15: Korrelationen zwischen Wasserabgabe und rel. Luftfeuchte, Wassergehalt, Temperatur bzw. Einstrahlung (PAR) für den Zeitraum mit Pflanzen getrennt nach 18°C, 21°C und 25°C Heiztemperatur

VG mit Pfl.	Name	n	Korrelation (R^2) der Tagessumme Wasserabgabe [g m^{-2} d^{-1}] mit		
			rel. Luftfeuchte* (MW 24 h) [%]	Temperatur* (MW 24 h) [°C]	PAR Süd (MW 24 h) [mV]
18 ° Heiztemperatur, opt. Bewässerung über 24 h					
1	Moving Wall	21	0,76	0,17	0,64
2	Vertiko	21	0,63	0,20	0,74
3	Wonderwall	21	0,70	0,22	0,65
4	Wallflore	21	0,81	0,19	0,80
5	Vertical Green	21	0,83	0,54	0,51
6	Grüne Wand	21	0,80	0,23	0,73
21 ° Heiztemperatur, opt. Bewässerung über 24 h					
1	Moving Wall	13	0,13	0,00	0,01
2	Vertiko	13	0,52	0,35	0,70
3	Wonderwall	13	0,46	0,35	0,33
4	Wallflore	13	0,47	0,34	0,31
5	Vertical Green	13	0,86	0,40	0,50
6	Grüne Wand	13	0,79	0,45	0,58
25 ° Heiztemperatur, opt. Bewässerung über 24 h					
1	Moving Wall	8	0,94	0,01	0,67
2	Vertiko	8	0,85	0,16	0,70
3	Wonderwall	8	0,82	0,08	0,39
4	Wallflore	8	0,69	0,14	0,39
5	Vertical Green	8	0,37	0,28	0,13
6	Grüne Wand	8	0,63	0,33	0,08

* Messpunkt oben vor System

Relative Luftfeuchte

Die relative Luftfeuchte ließ sich im Gewächshaus nicht regeln, sodass dieser Einflussfaktor nicht untersucht werden konnte.

Aussagen zum Einfluss der relativen Luftfeuchte auf die Wasserabgabe lassen sich aber sowohl aus den Versuchen 2 und 4 als auch aus dem Versuchsteil im Mustergebäude ziehen, in denen festgestellt wurde, dass die Wasserabgabe mit steigender Luftfeuchte im Raum deutlich zurück ging (siehe 2.3 Selbstregulation).

Luftbewegung

Die Luftbewegung wurde mit Hilfe eines vor den Begrünungssystemen im Abstand von 1,4 m zur Wandoberfläche und in einer Höhe von 1,15 m (Ventilatormitte) aufgestellten Ventilators erhöht. Dabei lief der Ventilator vor jedem Begrünungssystem jeweils für einen Tag von 7:00 bis 17:00 Uhr auf Stufe 1. Die sich dadurch ergebenden Windgeschwindigkeiten wurden mit einem Hitzedrahtanemometer in 0,1 m Abstand vor der Wand gemessen. Ohne Ventilator betrug die Windgeschwindigkeit 0 m s^{-1}. Mit Ventilator wurden im unteren Bereich der Begrünungssysteme 0,2 - 0,46 m s^{-1}, in der Mitte 0,2 - 0,7 m s^{-1} und im oberen Bereich 0,1 - 0,26 m s^{-1} gemessen.

Abb. 15 zeigt die Wasserabgaben der Begrünungssysteme in Form von Tagessummen, wobei die Systeme nacheinander jeweils einen Tag mit dem Ventilator angeblasen wurden. Diese Erhöhung der Luftbewegung führte zu einer deutlich sichtbaren Anhebung der Wasserabgabe bei den Systemen Moving Wall, Wonderwall, Vertical Green und Grüne Wand. Der Abtransport von gesättigter Luft an der Substratoberfläche förderte die weitere Verdunstung. Bei den Systemen Vertiko und Wallflore war die Verstärkung der Wasserabgabe zwar vorhanden aber weniger ausgeprägt. Vermutlich war der Einfluss der Luftbewegung auf die Wasserabgabe bei diesen Systemen geringer, da sowohl bei Vertiko als auch bei Wallflore die wasserspeichernden Substrate mit einem Abdeckvlies (Vertiko) bzw. Bändchengewebe (Wallflore) versehen sind, die die Evaporation aus dem Substrat einschränken.

Die relative Luftfeuchte direkt vor den Begrünungssystemen änderte sich nur marginal, da das verdunstete Wasser sofort durch den Ventilator im gesamten Raum verwirbelt wurde.

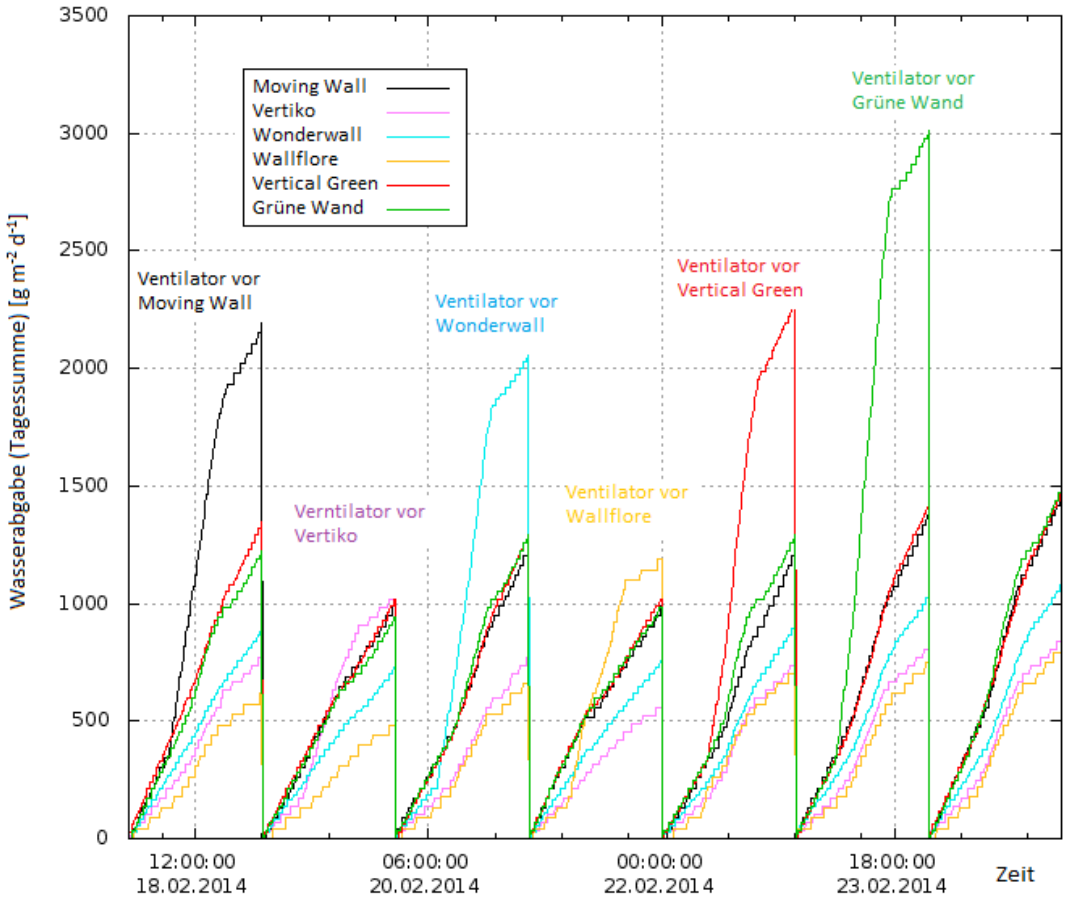


Abb. 15: Wasserabgabe (Tagessummen) mit Begrünung zu Zeiten mit erhöhter Luftbewegung vor den Systemen

Einstrahlung

Während der Versuchszeit im Gewächshaus wurde keine Variation der Einstrahlung vorgenommen, da dies nicht im Versuchsplan vorgesehen war. Um Innenraumbedingungen zu simulieren, wurde das Tageslicht mittels Lamellenschattierung reduziert.

Wie in Kapitel 2.5.2 beschrieben, wurden aber dennoch gute Korrelationen zwischen Wasserabgabe und Einstrahlung festgestellt – bei hoher Einstrahlung wurde mehr Wasser abgegeben.

2.5 Ergebnisse und Diskussion von Versuch 4: Ermittlung der Leistungsfähigkeit der Begrünungssysteme bzw. deren Veränderung durch Begrünung der Substrate

Für die Darstellung der Ergebnisse (Material und Methoden siehe Tab. 5) wurde beispielhaft je ein Tag mit optimierter Bewässerung tagsüber sowie ein Tag mit optimierter Bewässerung auf 24 h verteilt anhand der Klimadaten im Gewächshaus ausgewählt.

2.5.1 Systeme mit Begrünung – Bewässerung am Tag

Nach Bepflanzung der Systeme mit *Philodendron hederaceum* und einer Akklimatisationsperiode für die Pflanzen wurde bei den Systemen Moving Wall, Vertiko, Wonderwall und Wallflore eine deutlich höhere Wasserabgabe festgestellt als ohne Pflanzen (Abb. 16), obwohl bei diesen die Bewässerungsdauer und -häufigkeit gegenüber dem Versuch ohne Pflanzen nicht maßgeblich verändert wurde. Bei Wallflore wurde die gegebene Wassermenge bezogen auf den Versuch ohne Pflanzen deutlich erhöht. Bei Vertical Green und Grüne Wand wurde nur eine geringe Erhöhung der Wasserabgabe mit Begrünung festgestellt (bei geringfügiger Reduktion der Wassergabe bei der Grünen Wand und einer deutlichen Verminderung der Wassergabe bei Vertical Green, siehe Tab. 13). Bei der Interpretation der oben genannten Ergebnisse muss berücksichtigt werden, dass bei der begrünten Variante die relative Luftfeuchte im Raum um ca. 10 % reduziert war. Dieser Umstand trägt, wie in Abb. 8 gezeigt, ebenfalls zu einer Erhöhung der Wasserabgabe bei.

Dennoch geben die Ergebnisse einen Hinweis darauf, dass bei den Systemen Moving Wall, Vertiko, Wonderwall und Wallflore zusätzlich zur Wasserabgabe der unbegrünten Substrate die Wasserabgabe durch Transpiration der Pflanzen erfasst wurde. Dagegen veränderten sich die Wasserabgaben der Systeme mit vollflächigen Substratplatten wie Vertical Green und Grüne Wand durch die Begrünung nicht. Dies lag z.T. sicherlich an dem etwas reduzierten Wasserangebot. Zusätzlich könnte sich die Erhöhung der Wasserabgabe durch Transpiration der Pflanzen mit der Verminderung der Wasserabgabe der Substrate durch Abdeckung der Verdunstungsfläche mit Pflanzen ausgeglichen haben.

Die Wasserabgabe verteilte sich zu etwa gleichen Teilen auf Tag und Nacht.

Die Pflanzen in den Systemen Moving Wall und Wonderwall zeigten Welkeerscheinungen trotz der hohen Wassergabe.

Umgerechnet wurden durch das System Moving Wall etwa 67 g Wasser pro Stunde an dem Beispieltag abgeben. Für Vertiko und Wallflore lag die stündliche Abgabe bei etwa 25 g und

für Wonderwall bei ca. 31 g. Etwa 46 g pro Stunde gab das System Vertical Green und ca. 40 g die Grüne Wand ab.

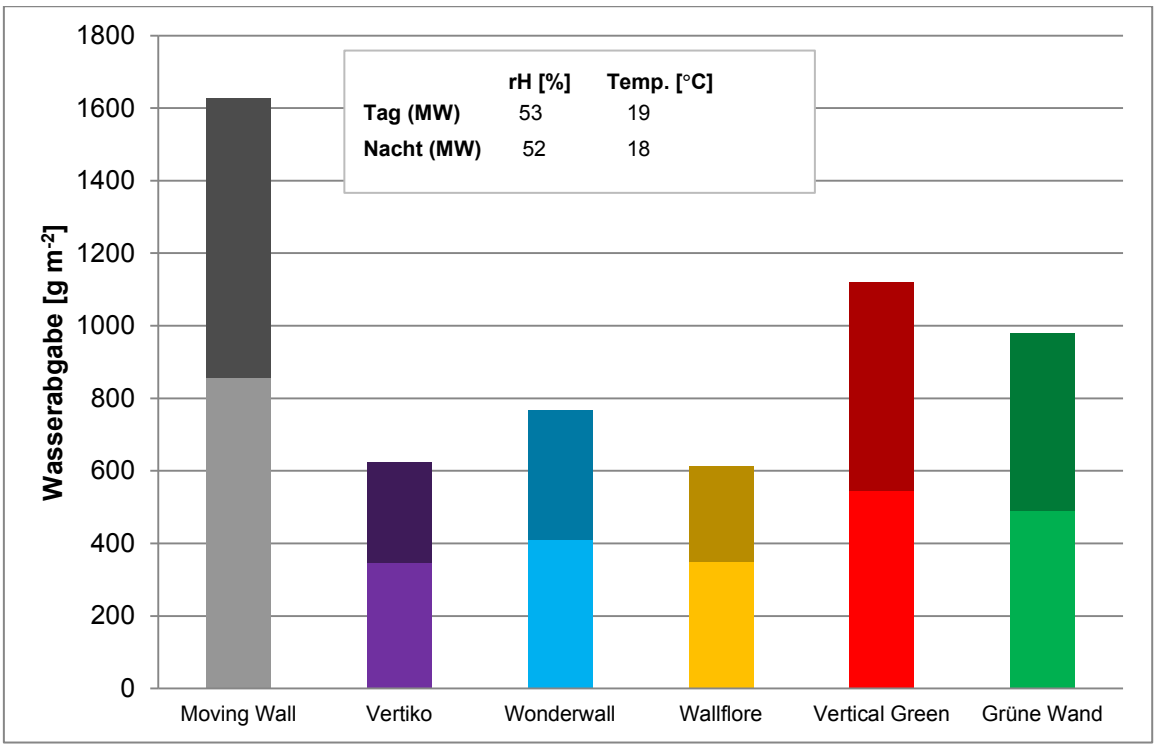


Abb. 16: Wasserabgabe mit Begrünung bei optimierter Bewässerung tagsüber (Summe vom 27.1.14 8:00 bis 28.1.14 7:50 Uhr) [hellere Säulenteile: 8:00-19:50 Uhr, dunklere Säulenteile: 20:00-7:50 Uhr]

Ähnlich wie bei der unbegrünten Variante mit optimierter Bewässerung dargestellt, zeigte auch am 27.1.14 die relative Luftfeuchte keinen deutlichen Tagesgang. Somit veränderten sich die Wasserabgaberaten im Tagesverlauf nur wenig (Abb. 17). Tendenziell ist aber ebenfalls eine Verringerung der Wasserabgabe bei steigender Luftfeuchte bei allen Systemen außer bei Moving Wall zu beobachten.

Wie in dem Versuchsteil ohne Begrünung (Versuch 2) wurde bei keinem der untersuchten Systeme ein Einfluss der Bewässerungszeitpunkte und -intervalle auf die Wasserabgabe festgestellt.

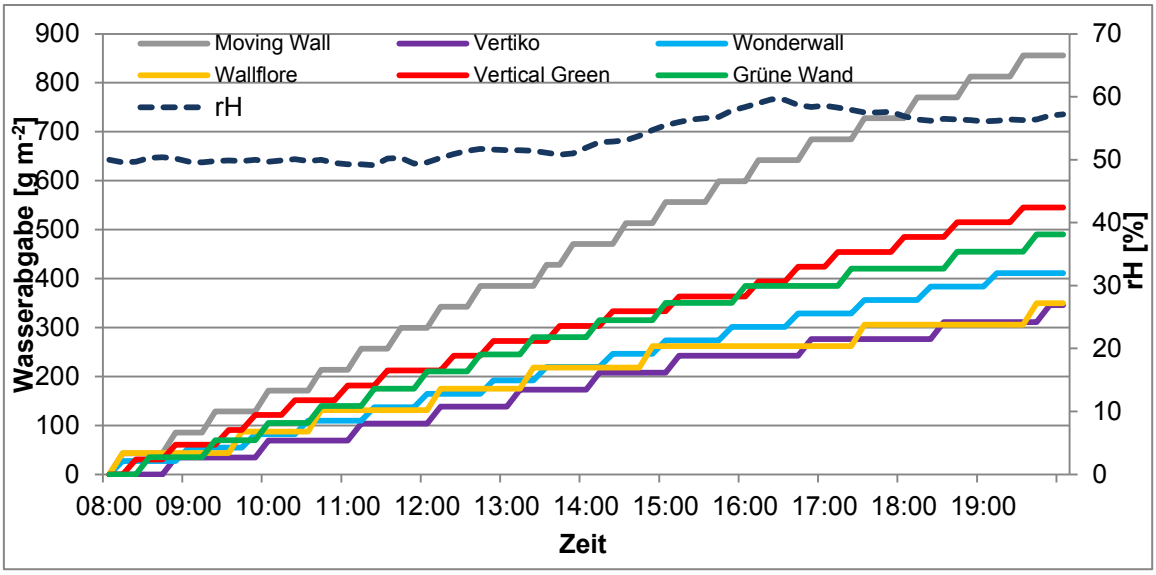


Abb. 17: Wasserabgabe mit Begrünung bei optimierter Bewässerung tagsüber (aufsummierte Werte vom 27.1.14 8:00 bis 19:50 Uhr) in Relation zur relativen Luftfeuchte

2.5.2 Systeme mit Begrünung – Bewässerung auf 24 h verteilt

Die Verteilung der Wassergaben auf 24 Stunden führte zu Veränderungen der Wasserabgabe im Vergleich zur Wassergabe tagsüber (Abb. 18). Bei den Systemen Vertiko, Wonderwall, Vertical Green und Grüne Wand erhöhte sich die Wasserabgabe jeweils um etwa 100 - 200 g m^{-2} d^{-1}. Da die zugeführte Wassermenge nicht geändert wurde, könnte die vermehrte Wasserabgabe von der mit 46 - 49 % niedrigeren relativen Luftfeuchte im Vergleich zu dem Beispiel für Bewässerung am Tag (52 - 53 %) beeinflusst gewesen sein. Bei Moving Wall kam es jedoch zu einer deutlichen Reduktion der Wasserabgabe. Bei Wallflore war kein Einfluss festzustellen.

Die Umrechnung auf die Wasserabgabe pro Stunde an dem gewählten Beispieltag ergab für Moving Wall 56 g, Vertiko 29 g, Wonderwall 40 g, Wallflore 25 g, Vertical Green 55 g und die Grüne Wand 50 g (jeweils ca. Werte).

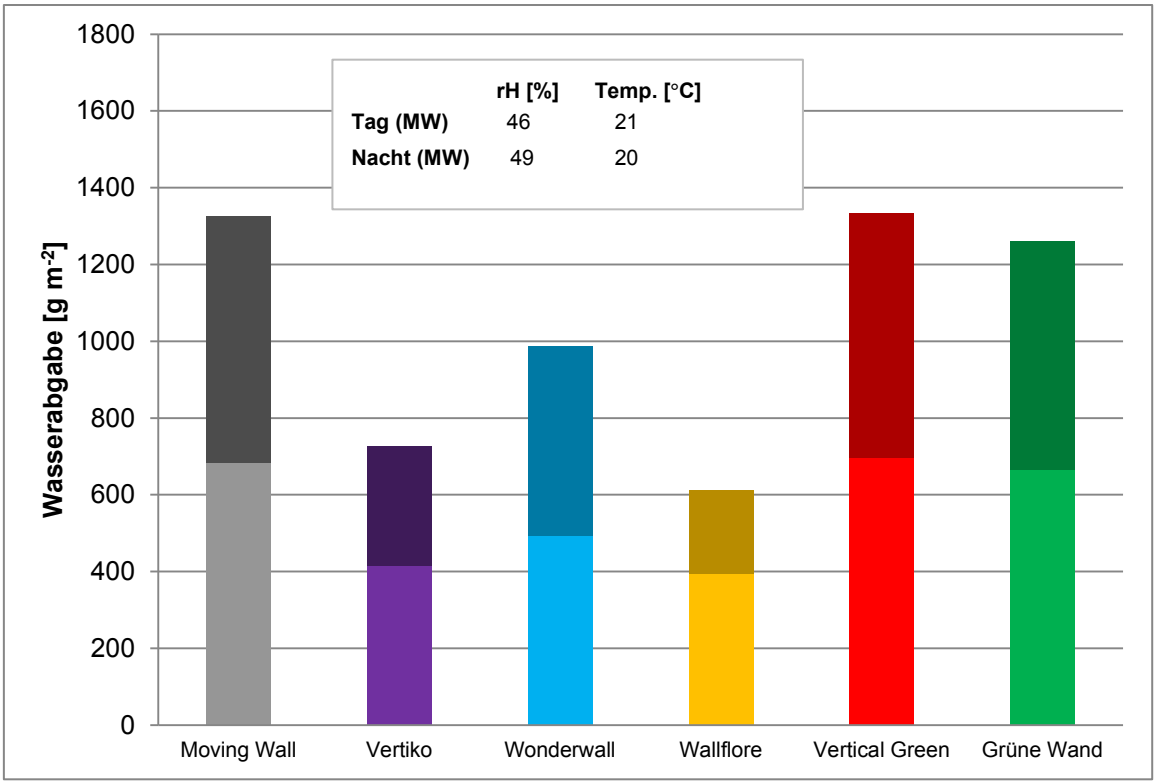


Abb. 18: Wasserabgabe mit Begrünung bei optimierter Bewässerung verteilt auf 24 h (Summe vom 13.2. 8:00 Uhr bis 14.2.14 7:50 Uhr) [hellere Säulenteile: 8:00-19:50 Uhr, dunklere Säulenteile: 20:00-7:50 Uhr]

Am dargestellten Tag wies die relative Luftfeuchte im Raum einen deutlichen Tagesgang auf (Abb. 19). Bei allen Systemen konnte tendenziell eine reduzierte Wasserabgabe bei steigender Luftfeuchte festgestellt werden.

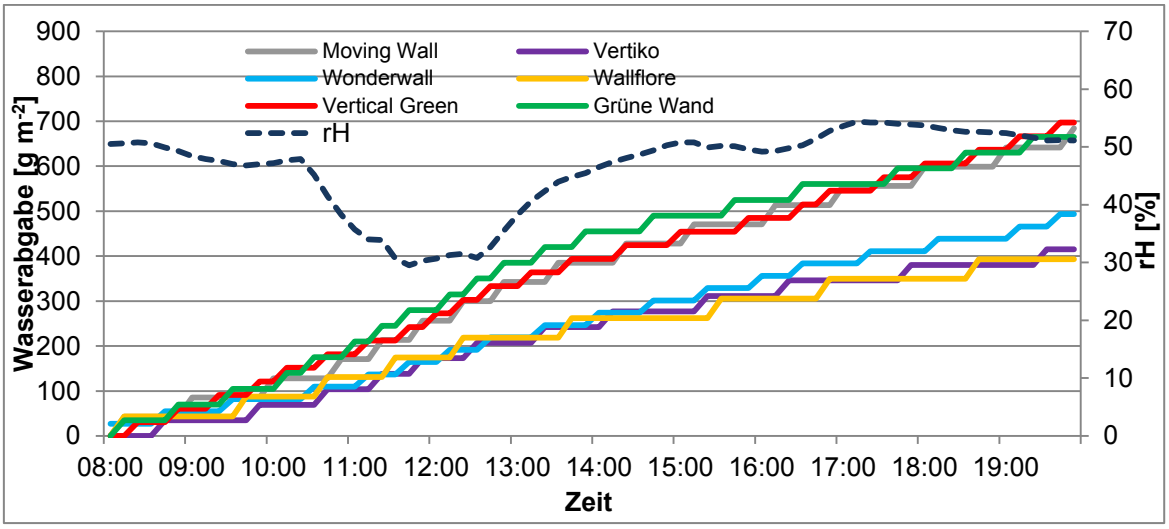


Abb. 19: Wasserabgabe mit Begrünung bei optimierter Bewässerung verteilt auf 24 h (aufsummierte Werte vom 13.2.14 8:00 bis 19:50 Uhr) in Relation zur relativen Luftfeuchte

Auch für den Versuchszeitraum mit Begrünung konnten die engsten Beziehungen zwischen der Wasserabgabe und der relativen Luftfeuchte vor dem System bei Vertical Green (R^2 = 0,86) und vor der Grünen Wand (R^2 = 0,76) ermittelt werden (Tab. 16, Abb. 20, Abb. 21). Mit steigender Luftfeuchte reduzierte sich, gleich laufend wie im Versuchsteil ohne Pflanzen, die Wasserabgabe der Systeme (Selbstregulation). Auch für die anderen Systeme wurden gute Beziehungen (R^2 = 0,55 bis 0,71) zwischen Wasserabgabe und relativer Luftfeuchte vor dem System festgestellt.
Zwischen der Wasserabgabe der Systeme und dem Wassergehalt der Raumluft ließ sich keine Beziehung herstellen. Auch die Beziehung zwischen der Raumtemperatur und der Wasserabgabe war nur schwach ausgeprägt. Eine Ausnahme stellte Vertical Green dar, wo ein R^2 von 0,59 berechnet wurde.
Gute Korrelationen der Wasserabgabe zur Einstrahlung (PAR Süd) ergaben sich für die Systeme Vertiko, Wonderwall, Wallflore und Grüne Wand. Hier wurde mit steigender Einstrahlung mehr Wasser abgegeben (z.B. Grüne Wand in Abb. 21).

Tab. 16: Korrelationen zwischen Wasserabgabe und rel. Luftfeuchte, Wassergehalt der Raumluft, Temperatur bzw. Einstrahlung (PAR) für den Zeitraum mit Pflanzen

VG mit Pfl.	Name	n	Korrelation (R^2) der Tagessumme Wasserabgabe [g m^{-2} d^{-1}] mit				
			rel. Luftfeuchte* (MW 24 h) [%]	Wassergehalt der Raumluft* (MW 24 h) [g kg^{-1}]	Temperatur* (MW 24 h) [°C]	PAR Nord (MW 24 h) [mV]	PAR Süd (MW 24 h) [mV]
Gesamter Auswertungszeitraum							
1	Moving Wall	54	0,55	0,25	0,06	0,07	0,21
2	Vertiko	53	0,50	0,16	0,13	0,47	0,80
3	Wonderwall	53	0,71	0,09	0,29	0,30	0,58
4	Wallflore	53	0,64	0,26	0,08	0,41	0,78
5	Vertical Green	53	0,86	0,01	0,59	0,07	0,26
6	Grüne Wand	54	0,76	0,13	0,27	0,35	0,68
* Messpunkt oben vor System							

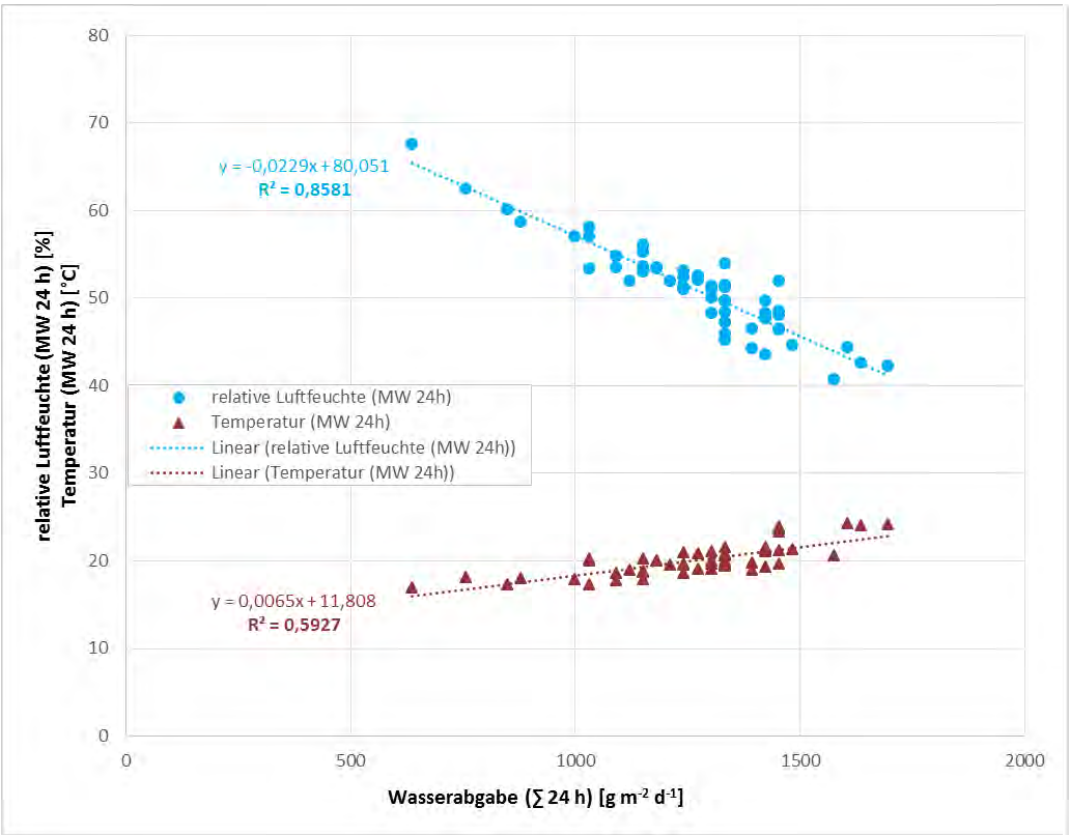


Abb. 20: Korrelation zwischen der Wasserabgabe (Σ 24 h) [g m^{-2} d^{-1}] und der relativen Luftfeuchte (MW 24 h) [%] bzw. der Temperatur (MW 24 h) [°C] für Vertical Green (VG 5) mit Pflanzen

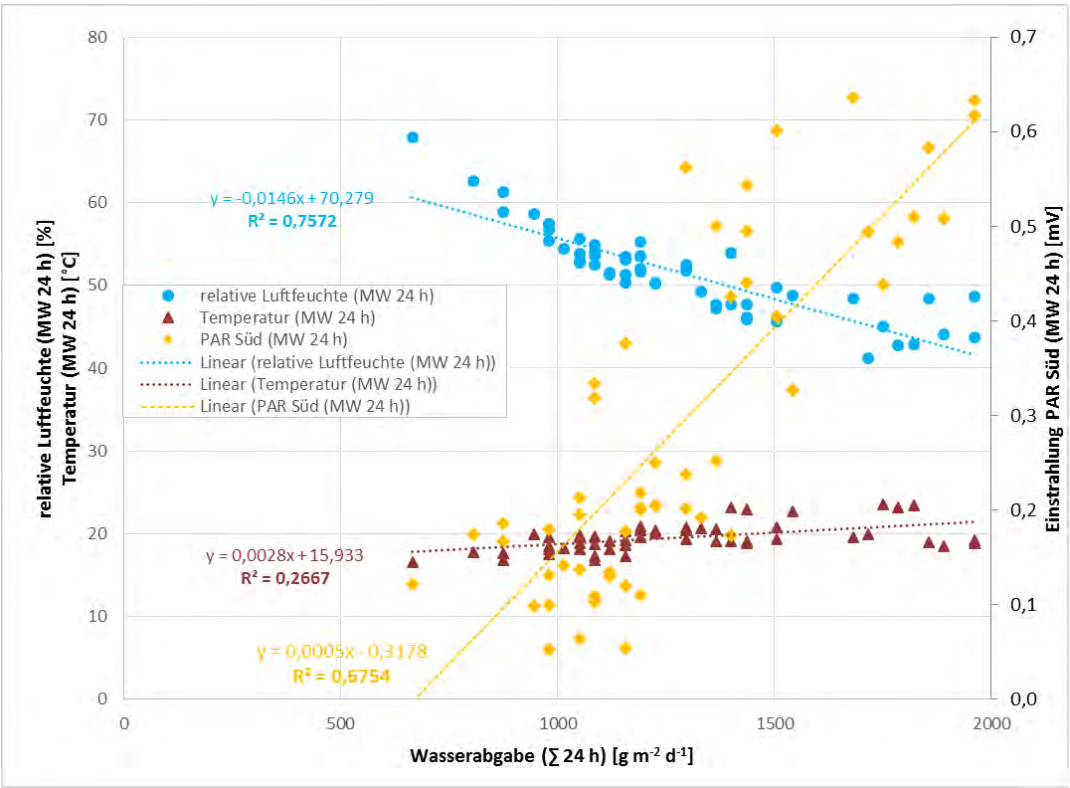


Abb. 21: Korrelation zwischen der Wasserabgabe (Σ 24 h) [g m^{-2} d^{-1}] und der relativen Luftfeuchte (MW 24 h) [%], der Temperatur (MW 24 h) [°C] bzw. der Einstrahlung PAR Süd (MW 24 h) [mV] für Grüne Wand (VG 6) mit Pflanzen

Bewässerungsmenge, -dauer

Es konnte keine Beziehung zwischen der Wasserabgabe der Systeme und der Bewässerungsdauer festgestellt werden. Dies lässt sich mit einer versuchsbedingt zu geringen Variation der Bewässerungsdauer und einer großen Variabilität in der Wasserabgabe der Systeme bei gleicher Bewässerungsdauer begründen.

2.5.3 Erscheinungsbild der Begrünungssysteme zum Versuchsende

Abb. 22 bis Abb. 27 zeigen das Erscheinungsbild der Begrünungssysteme mit Pflanzen zum Versuchsende in Kalenderwoche 14-2014.

Bei den Systemen Moving Wall und Wonderwall waren viele Pflanzenausfälle zu verzeichnen. Die Pflanzen litten unter der unzureichenden Wasserversorgung und welkten trotz erhöhter Wassergabe häufig während des Versuches. Der kapillare Wasserübergang aus dem Filzmaterial der Systeme in das Vermehrungssubstrat (Oasis-Würfel) der Pflanzen funktionierte nicht zufriedenstellend. Daher war die beobachtete, mangelnde Wasserversorgung vermutlich weniger durch das System als durch die Wahl des Vermehrungssubstrates begründet, da ein Kapillarbruch zwischen Substrat und Begrünungssystem entstand. Zu Beginn des Versuches wurde ein ähnliches Phänomen auch bei den Systemen Vertiko und Wallflore beobachtet. Hier gelang es den Pflanzen aber in das in den Taschen enthaltene, wasserspeichernde Substrat bei Vertiko bzw. in die Steinwolle bei Wallflore einzuwurzeln und sich ausreichend mit Wasser zu versorgen.

Die Systeme Vertical Green und Grüne Wand boten den Pflanzen die beste Wasserversorgung. Das resultierte in einem sehr guten Erscheinungsbild der Pflanzen über den gesamten Versuchszeitraum.

Abb. 22: Moving Wall zum Versuchsende KW 14-2014

Abb. 23: Vertiko zum Versuchsende KW 14-2014

Abb. 24: Wonderwall zum Versuchsende KW 14-2014

Abb. 25: Wallflore zum Versuchsende KW 14-2014

Abb. 26: Vertical Green zum Versuchsende KW 14-2014

Abb. 27: Grüne Wand zum Versuchsende KW 14-2014

2.5.4 Erfahrungen und Probleme im praktischen Einsatz

Während der Versuchsdauer (unbegrünt und begrünt) fielen bei den Systemen Vertiko und Wonderwall zum Teil mehrfach die Bewässerungspumpen aus. Außerdem verstopften die Bewässerungsschläuche, sodass eine sichere Bewässerung nicht gewährleistet war.

Bei dem System Moving Wall kam es in Folge der stark erhöhten Bewässerung zum Auftreten von Schimmel an dem Filzmaterial (vor allem an der nicht bewässerten und nicht bepflanzten Rückseite), obwohl die Bewässerung für die Pflanzen noch nicht ausreichend war.

Die Wahl des Vermehrungssubstrates (Oasis-Würfel) war in der Kombination mit Filz- und Steinwollsubstraten ungünstig. Der kapillare Wassertransport funktionierte nicht ausreichend und führte zu einem Wassermangel (Trockenstress) der Pflanzen.

Trotz weit über die Anbieterempfehlung hinausgehender Wassergaben ließ sich bei den Systemen Moving Wall und Wonderwall keine für die Pflanzen ausreichende Substratfeuchte erzielen.

Bei dem System Vertical Green spritzte häufiger Wasser von den Bewässerungsdüsen so ungünstig auf die Blätter, dass es von dort auf den Boden tropfte. Da es sich bei dem im Versuch verwendeten System um einen Prototyp handelt, ist anzunehmen, dass dieses Problem in folgenden Systemen konstruktiv behoben sein wird.

2.6 Fazit Teil 1 - Entscheidung für ein vertikales Begrünungssystem für das Mustergebäude

Auf Basis der vorliegenden Versuchsergebnisse und in Absprache mit den Projektpartnern wurde entschieden, das System **Grüne Wand** für die geplanten Versuche in dem Mustergebäude einzusetzen

Die Gründe für diese Entscheidung waren:

- eine vergleichsweise hohe Wasserabgabe
- eine an die relative Luftfeuchte im Raum angepasste Selbstregulation der Wasserabgabe
- kein Auftreten technischer und pflanzenbaulicher Probleme in den Versuchen im Gewächshaus
- die Möglichkeit einer Anpassung der Modulgröße an die Raumgröße (berechenbare Auslegung)
- der Umstand, dass es das einziges System ist, das nicht mit Überschussbewässerung, sondern mit einem Dochtsystem arbeitet und somit eine geringere Gefahr der Überfeuchtung birgt.

3 Voruntersuchung zu verschiedenen Mustergebäuden

3.1 Definition von Anforderungen an die Mustergebäude

Konzeptionell wurde entschieden, im ersten Winter in zwei verschiedenen Mustergebäuden jeweils zwei unterschiedliche Räume ohne Begrünungssystem unter realer Nutzung zu vermessen. Im Späteren war geplant die Räume bzw. Gebäude, die in Bezug auf die Raumluftfeuchte das kritischere Raumklima aufweisen, mit Begrünungssystemen auszustatten.

Zur Auswahl möglicher Mustergebäude wurden Kriterien erarbeitet, um einen möglichst positiven Effekt durch die Begrünungssysteme zu ermöglichen sowie eine gute Projektdurchführung mit breitem Multiplikationseffekt zu erzielen. Die Auswahlkriterien waren:

- Ein energetisch hocheffizientes Gebäude bis nahezu Passivhausstandard (15 kWh/m²a Jahresheizenergiebedarf) mit dichter Gebäudehülle.
- Ein bestehendes Problem mit zu niedriger Luftfeuchte (im Winter) in den Räumen.
- Das Vorhandensein von mindestens vier vergleichbaren Räumen pro Gebäude.
- Nach Möglichkeit nicht zu kleine Räume (> 30 m²), da das Begrünungssystem sonst überdimensioniert sein könnte.
- Das Gebäude sollte öffentlich zugänglich sein.
- Die Nutzer sollten bereit sein, die Pflanzenwände ein Jahr lang in ihren Räumen aufzustellen sowie grundsätzliches Interesse an dem Projekt haben.
- Gute Erreichbarkeit von Freising und Garching (Raum Freising, Erding, München).

Auf dieser Basis wurden verschiedene Gebäude ausgesucht und im Weiteren genauer analysiert. Da sich die Auswahl nach o. g. Kriterien als schwierig gestaltete, wurden die Aspekte erneut diskutiert. Danach wurden die Anforderungen an den Energiestandard etwas gelockert, auch weil große Dämmschichten und eine dichte Gebäudehülle nicht als ursächlich für eine geringe Raumluftfeuchte zu sehen sind.

3.2 Bestandsaufnahme und Bewertung möglicher Mustergebäude

Insgesamt wurden 12 ausgewählte Gebäude analysiert und auf Grundlage der oben definierten Anforderungen bewertet.

Tab. 17: Vergleich und Bewertung möglicher Mustergebäude

	Montessorischule Aufkirchen	FOSBOS Erding	Gymnasium Sonnthofen	Holzhochhaus Bad Aibling	Passivhaus Fam. Kolb Beilstein	Ämtergebäude Bayreuth	Verwaltung AZV Etting	Garching BA3 (BA2) ZAE Bayern	Bürogebäude Gützow-Prüzen	Bürogebäude FNR Memmingen	Möbelhaus Kohler Sankt Alban	Bio-Solar-Haus Freising	Erweiterung Finanzamt
Heizenergiebedarf [kWh/m²a]	< 15	< 15	< 15	> 15	< 15	< 15	14	15	< 15	< 15	< 15	< 15	> 15
Mech. Lüftungsanlage	-	ja	ja	ja	-	ja	ja	ja (nein)	-	ja	-	-	
Erwartete rel. Luftfeuchtigkeit [%]	> 40%	> 40%	> 40%	-	30%	10%	-	< 20%	-	> 40%	-	30%	
Entfernung nach Weihenstephan [km]	20	20	188	100	300	210	15	20	730	160	430	2	
Zugänglichkeit der Räume	gut	gut	gut	-	-	-	-	gut	-	-	-	mittel	
Platz für Pflanzenwände	nein	ja	ja	-	-	-	-	ja	-	-	-	ja	
Anzahl vergleichbarer Räume	-	> 6	> 6	8	-	> 4	-	4	-	-	-	6	
Raumgröße (> 30 m²)	-	> 30	> 30	-	-	-	12	30 (16,5)	-	-	-	> 30	
Nutzung	Schule	Schule	Schule	Büro / Wohng.	Büro / Wohng.	Büro	Büro	Büro	Büro	Büro	-	Büro	

Das Bürogebäude des Möbelhauses Kohler und das Ämtergebäude in Bayreuth kamen nicht in Frage, da hier wegen extrem niedriger Luftfeuchte ein Befeuchter nachgerüstet wurde.

Das Gymnasium in Sonthofen, das Passivhaus der Fam. Kolb in Beilstein, das Bürogebäude FNR in Gülzow-Prüzen, das Bio-Solar-Haus in Sankt Alban sowie das Holzhochhaus in Bad Aibling kamen wegen zu großer Entfernungen nicht in die engere Auswahl. Hier wäre eine Betreuung der Gebäude nur mit hohem zeitlichem Aufwand möglich gewesen.

Auch die Schulgebäude schienen weniger gut geeignet, da hier durch die hohe Feuchtelast der Schüler ein geringes Feuchteproblem erwartet wurde.

Das Verwaltungsgebäude des Abwasserzweckverbandes Eiting erfüllte sehr viele Kriterien, jedoch wurde es wegen der kleinen Räume (ca. 12 m²) nicht ausgewählt. Hier bestand die Gefahr der Überfeuchtung im Sommer und der Platz für die Pflanzenwände wäre voraussichtlich nicht vorhanden gewesen.

Gute Voraussetzungen erfüllen das Gebäude des ZAE Bayern in Garching und das Finanzamt in Freising. Am ZAE Bayern stehen dabei zwei unterschiedliche Bauabschnitte von 2012 (BA3) und 2002 (BA2) zur Verfügung. In beiden Bauabschnitten ist bekannt, dass niedrige Luftfeuchten auftreten. Während im BA3 größere Räume zur Verfügung stehen, ist der BA2 nach Westen orientiert, was für die Pflanzenwände aufgrund der günstigeren Lichtverhältnisse von Vorteil war. In den kleineren Räumen musste das Begrünungssystem detailliert ausgelegt werden, damit im Sommer keine Überfeuchtung eintritt. Möglich war eine geringere Bestückungsdichte oder eine Reduktion der Verdunstung über das Trägermaterial. Ein großer Vorteil des ZAE Bayern bestand darin, dass der Projektpartner direkt vor Ort ist, eine hohe Bereitschaft der Nutzer besteht, am Projekt teilzunehmen und dass Gebäude sowie Technik sehr gut bekannt sind.

Der Erweiterungsbau des Finanzamt in Freising, der im Januar 2014 vollständig bezogen wurde, erfüllte zwar nicht die strengen Anforderungen von nahezu Passivhausstandard, allerdings lag ein guter EnEV-Standard vor. Die großen Vorteile lagen in der sehr kurzen Entfernung zur Hochschule Weihenstephan-Triesdorf und das Vorhandensein genügend größer Räume für die Kampagne. Messdaten zur Luftfeuchte waren aufgrund des jungen Baualters noch nicht vorhanden, jedoch wurde ein Problem mit zu niedriger Luftfeuchte erwartet.

In beiden Objekten (ZAE Bayern und Finanzamt Freising) wurden in einer ersten Messreihe von Februar bis März 2014 die klimatischen Bedingungen ausgewählter Büroräume gezielt untersucht, um anschließend für die zweite Messreihe das optimale Gebäude auswählen zu können.

3.3 Beschreibung der Mustergebäude

Die beiden ausgewählten Mustergebäude,

- das Finanzamt in 85354 Freising, Prinz-Ludwig-Straße 26 und
- das ZAE Bayern in 85748 Garching, Walther-Meißner-Str.6

sowie die relevanten Büroräume werden nachfolgend näher beschrieben.

3.3.1 Finanzamt in Freising

Das Finanzamt in Freising wurde 2013 um einen repräsentativen Gebäudeteil (s. Abb. 28 und Abb. 29 orange gekennzeichnet) erweitert. Der Gebäudeteil verfügt über fünf oberirdische und ein unterirdisches Geschoss, wobei das Dachgeschoss leicht zurückgesetzt ist.

Vollständig bezogen wurde der Gebäudeteil im Januar 2014. In diesem neu erstellten Gebäudebereich wurden die Behaglichkeitsmessungen durchgeführt.

Abb. 28: Ansicht des 2013 errichteten Erweiterungsbaus des Freisinger Finanzamtes; Bildnachweis [13]

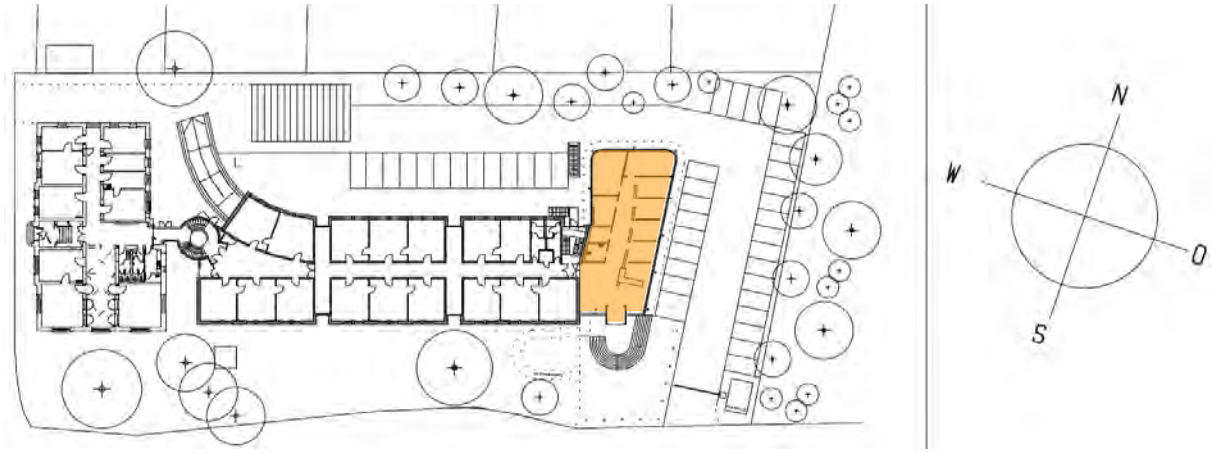


Abb. 29: Lageplan Finanzamt Freising (Erweiterungsbau orange gekennzeichnet)

Tab. 18 zeigt eine Übersicht über den hohen energetischen Standard der Gebäudehülle. Als Vergleichswert dienen die Bauteilanforderungen der aktuell gültigen EnEV 2009, die bei einer Änderung, Erweiterung oder dem Ausbau von Gebäuden erfüllt werden müssen. Die tatsächlich realisierten U-Werte des Neubaus liegen deutlich unter den Anforderungen der EnEV 2009.

Tab. 18: Energetische Bauteileigenschaften der Gebäudehülle am Finanzamt Freising und Anforderungen der EnEV 2009 [2]

Bauteil	U-Wert	EnEV 2009 Bauteil anforderung
Außenwand	0,12 W/m²K	0,24 W/m²K
Fenster	1,20 W/m²K (g-Wert = 0,42)	1,30 W/m²K
Flachdach	0,17 W/m²K	0,20 W/m²K
Kellerwand	0,17 W/m²K	0,30 W/m²K
Kellerboden	0,23 W/m²K	0,30 W/m²K

Als Energieträger für den gesamten Gebäudekomplex des Finanzamts kommt Gas zum Einsatz. Der gemeinsame Brenner für alle Gebäudeteile verfügt über eine Nennwärmeleistung von 300 kW. Die Wärmeübergabe im Erweiterungsbau erfolgt über Heizkörper. Eine Ausnahme bilden das Erdgeschoss und das Dachgeschoss, in denen eine Fußbodenheizung zum Einsatz kommt. Eine aktive Kühlung der Räume ist nicht realisiert worden, die Lüftung erfolgt manuell über die Fenster.

Die ca. 82 m² große Photovoltaikanlage auf dem Dach hat eine Nennleistung von 11,5 kW und sorgt für eine eigene regenerative Stromerzeugung, bei der der Ertrag vollständig ins Netz eingespeist wird. Der Primärenergiebedarf des Erweiterungsbaus liegt bei 89,48 kWh/m²a.

Die Raumklimamessungen wurden in zwei großen Büros im 1. OG des Erweiterungsbaus durchgeführt. Abb. 30 zeigt die Lage und Größe der beiden Räume.

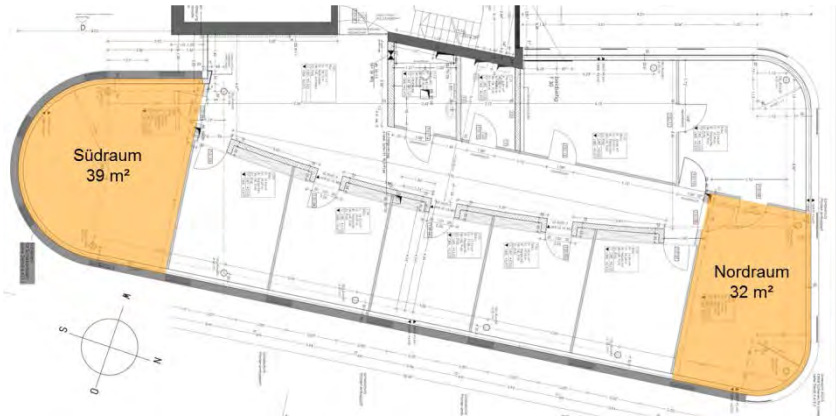


Abb. 30: Ausgewählte Räume (orange gekennzeichnet) im 1.OG Finanzamt Freising

Es wurden je ein nach Süden und ein nach Norden orientierter Raum mit einer Grundfläche von 39 m² bzw. 32 m² ausgewählt. Beide Räume haben derzeit vier Arbeitsplätze und sind relativ gleichmäßig von morgens bis abends besetzt.

3.3.2 ZAE Bayern in Garching

Das Gebäude des ZAE Bayern in Garching gliedert sich insgesamt in drei Bauabschnitte. Für die Messung des Raumklimas wurden die Räume im Bauabschnitt 3 (BA3) und Bauabschnitt 2 (BA2) untersucht (s. Abb. 31 und Abb. 32).

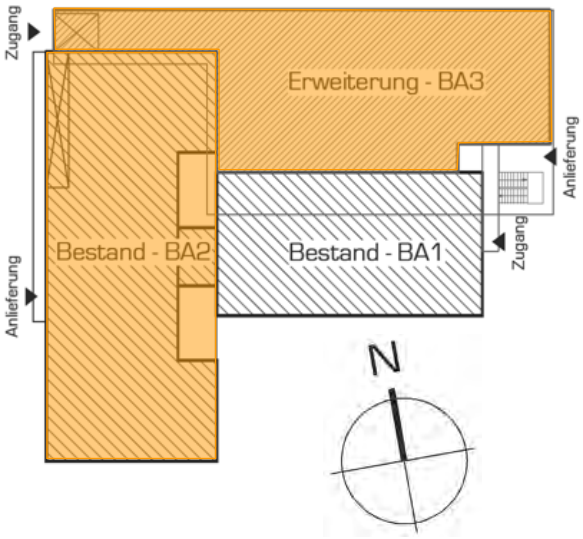


Abb. 31: Lageplan des ZAE Bayern mit relevanten Bauabschnitten (orange gekennzeichnet)

Abb. 32: Außenansicht des ZAE Bayern (BA3 mit Glasfassade, BA2 mit Holzverkleidung)

Der BA2 wurde 2002 fertig gestellt und ist ein Leichtbau in Holzständerbauweise. Er verfügt über drei oberirdische Geschosse. Tab. 19 zeigt einen Überblick über den energetischen Standard der Gebäudehülle. Zusätzlich sind als Vergleich die Bauteilanforderungen der aktuell gültigen EnEV 2009 aufgeführt, die bei der Änderung, Erweiterung oder dem Ausbau von Gebäuden nicht überschritten werden dürfen.

Tab. 19: Energetische Bauteileigenschaften der Gebäudehülle des ZAE Bayern für BA2 und BA3 und Anforderungen EnEV 2009 [2]

Bauteil	BA2 (Bj. 2002)	BA3 (Bj. 2012)	EnEV 2009 Bauteilanforderung
Außenwand	0,24 W/m²K	0,15 W/m²K	0,24 W/m²K
Pfosten-Riegel-Fassade	-	0,75 W/m²K	1,30 W/m²K
Außenwand UG	-	0,29 W/m²K	0,30 W/m²K
Fenster	1,15 W/m²K	0,90 W/m²K	1,30 W/m²K
Flachdach	0,18 W/m²K	0,15 W/m²K	0,20 W/m²K
Bodenplatte	0,25 W/m²K	0,15 – 0,27 W/m²K	0,30 W/m²K

Die Wärmeerzeugung übernimmt ein Pelletkessel mit solarer Unterstützung, der sowohl den BA2 als auch den BA1, der inzwischen durch einen Neubau ersetzt wird, mit Wärme versorgt. In den Laboren sorgen Heizkörper für die Wärmeübergabe. Dagegen sind in den Büros Heiz-/ Kühlsegel eingesetzt, die im Sommer auch zur Gebäudekühlung genutzt werden und durch Einzelraumregelung gesteuert werden. Als Wärmesenke dient dabei eine thermische Grundwassernutzung. Die Lüftung erfolgt manuell über Fenster. Die Gebäudeheizlast des BA2 lag bei der Erbauung bei ca. 35 kW. Durch den Anbau des BA3 im Jahr 2012 wurden die Nordfassade komplett und die Ostfassade teilweise zu einer Innenwand umfunktioniert, sodass die aktuelle Heizlast niedriger liegt.

Der BA3 wurde 2012 als Stahlbetonskelettbau erstellt. Er besitzt ebenfalls drei oberirdische Geschosse, ist jedoch zusätzlich teilweise unterkellert. Tab. 19 zeigt den hohen energetischen Standard der Gebäudehülle, die aktuelle EnEV wird auch hier deutlich unterschritten.

Die Büros im 1. und 2. OG des BA3 werden mit Deckensegeln geheizt, gekühlt und sind dabei zentral geregelt. Auch hier wird die thermische Grundwassernutzung zur Gebäudekühlung eingesetzt. Die Wärmeerzeugung erfolgte bisher über den Pelletkessel im BA2 und wird zukünftig über einen Gasbrennwertkessel mit Solarunterstützung erfolgen. Das Labor im Erdgeschoss wird über eine Bauteilaktivierung in der Bodenplatte und der Decke temperiert. Das Foyer, die Nebenräume und die Galerien werden über eine Fußbodenheizung versorgt. Zusätzlich werden die innenliegenden Büros über eine zentrale Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung mechanisch belüftet.

Der Heizwärmebedarf des BA3 liegt nach Berechnung mit dem Passivhaus Projektierungs-Paket (PHPP) vom Passivhaus Institut bei ca. 15 kWh/m²a und entspricht damit den Anforderungen an eine hocheffiziente Gebäudehülle. Der Endenergiebedarf für Heizwärme weist 25,7 kWh/m²a auf.

Abb. 33 zeigt die Lage und Größe der untersuchten Räume im Gebäudekomplex des ZAE Bayern. Im BA2 wurde ein westorientierter Raum im 2.OG ausgesucht. Im BA3 ein nördlich orientierter Raum im 1.OG.

Abb. 33: Ausgewählte Räume (orange gekennzeichnet) am ZAE Bayern in Garching

Der Raum im BA2 hat eine Grundfläche von 17 m² und verfügt über zwei Arbeitsplätze. Der Raum im BA3 erfasst eine Grundfläche von 33 m² und besitzt vier Arbeitsplätze.

4 Referenzmessungen in den ausgewählten Mustergebäuden

4.1 Messdatenerfassung in den Mustergebäuden

4.1.1 Konzept der Messdatenerfassung

Das grundlegende Konzept zur Aufnahme der nötigen Messdaten wurde mit Sensoren in den zu untersuchenden Räumen realisiert, die ihre Werte an einen Datenlogger übermitteln. Dort wurden die Daten zwischengespeichert und als Tagesfiles automatisiert auf einen Datenbankserver am ZAE Bayern übermittelt. Die graphische Auswertung dieser Daten erfolgte über das webbasiertes Tool „Medview“, das auf den Datenbankserver zugreifen kann. Eine nähere Erläuterung zu Medview und der Datenauswertung folgt in Kapitel 4.2.5.

4.1.2 Definition von Anforderungen an die Messtechnik

Die Messung der klimatischen Bedingungen in den einzelnen Büroräumen erfolgte über unterschiedliche Messgrößen:

- 4 x Raumlufttemperatur (zwei Standorte in jeweils zwei Höhen)
- 4 x Raumluftfeuchte (zwei Standorte in jeweils zwei Höhen)
- 1 x CO_2-Konzentration (Analyse des Lüftungsverhaltens, Luftqualität)
- 1 x Strahlungsintensität (in Hinblick auf das Pflanzenwachstum)
- 1 x Präsenz

Die Messreihen wurden auf einem zentralen Datenlogger gespeichert, der pro Raum sieben Eingänge (bei kombinierten Temperatur- und Feuchtesensoren) aufnehmen kann.

Zusätzlich wurden für die beiden Gebäude die Außenluftbedingungen aufgezeichnet, die sich auf die Wetterstation des Meteorologischen Institutes München (MIM) in Garching [14] und des Agrarmeteorologischen Messnetzes Bayern in Freising [15] beziehen.

Da sich die zu untersuchenden Räume innerhalb der Gebäude in einiger Entfernung voneinander befinden, wurde für jeden Raum eine unabhängige Stand-Alone-Lösung favorisiert. Somit wurden Probleme bei der Datenübermittlung zwischen den Räumen vermieden (z. B. Kabelverbindung, Funknetz). Die Messtechnik sollte einfach auf- und abzubauen sein und sich in die bestehenden Räume ohne großen Aufwand integrieren lassen.

Um die Messdaten kontinuierlich abrufen und auswerten zu können, wurde eine Fernauslese der Datenlogger über Funk oder W-LAN angestrebt. Ein Anschluss an das gebäudeinterne Netzwerk wurde am Finanzamt in Freising, im Gegensatz zum Standort ZAE Bayern, ausgeschlossen.

4.1.3 Auswahl und Beschreibung der Messtechnik

Nach ausführlicher Analyse verschiedener Messtechnik-Produkte wurde das Messsystem der Firma Ahlborn ausgewählt. Den Ausschlag dafür gaben u. a. die Systemkosten, der gute Technische Support sowie gute Erfahrungen mit dem System in der Vergangenheit. Im Anhang werden die Komponenten näher beschrieben.

4.2 Messkampagne in Mustergebäuden ohne Begrünungssysteme

4.2.1 Installation Messtechnik

Für die Installation der Sensoren in den jeweiligen Räumen wurden mobile Deckenstützen eingesetzt, die teleskopartig an die Raumhöhen angepasst werden können. Somit konnte die Messtechnik zerstörungsfrei und flexibel positioniert werden. Zusätzlich boten die Stützen die Möglichkeit, Kabel zur Decke zu führen und dort im Raum weiter zu verlegen. Abb. 34 zeigt exemplarisch die Installation der Sensoren.

Abb. 34: Befestigung der Sensoren an den Deckenstützen (links: Primärstütze, rechts: Sekundärstütze)

Die Installation bestand aus einer Primärstütze, die neben einem Datenlogger, einem Präsenzmelder, einen CO_2-Sensor auch zwei auf die Höhe verteilte Kombisensoren für Temperatur und Feuchte (T/F-Sensor) aufnahm (s. Abb. 34 links). Beim Finanzamt in Freising war zusätzlich noch das GPRS-Modem inklusive Antenne installiert. Die Sekundärstütze wurde mit zwei Kombisensoren für Temperatur und Feuchte sowie einem Strahlungssensor ausgestattet (s. Abb. 34 rechts). Die Verbindung zur Primärstütze erfolgte über eine deckengebundene Kabelverbindung.

Die Montage der Sensoren erfolgte über Kabelbinder auf Rohrdämmungsmanschetten, die neben einer einfachen Montage die notwendige thermische Entkopplung der Sensoren von der Stütze sicherstellten. Zusätzlich wurde ein Abstand geschaffen, um zu gewährleisten, dass die Sensoren von der Raumluft umströmt werden konnten.

Bei der Positionierung der Stützen wurde das Ziel verfolgt, die Primärstütze mit dem CO_2-Sensor möglichst im Bereich eines Schreibtischarbeitsplatzes zu montieren. Die Sekundärstütze mit dem Strahlungssensor sollte dagegen an der Stelle positioniert werden, an der später ein Begrünungssystem aufgestellt werden könnte. Die unteren Temperatur- und Feuchtesensoren sowie der CO_2-Sensor wurden in etwa auf Kopfhöhe einer sitzenden Person ausgerichtet, der Strahlungssensor auf mittlerer Höhe eines Begrünungssystems. Die oberen Temperatur- und Feuchtesensoren dienten jeweils der zusätzlichen Messung von vertikalen Unterschieden bei Temperaturschichtung der Raumluft.

Nachfolgend werden die genauen Positionierungen jedes Sensors im Grundriss und Schnitt dargestellt. Die Bezeichnung des Fühlers entspricht dem Kanalnamen in den Auswertungen bzw. im Auswertungs-Tool Medview.

4.2.2 Messaufbau am Finanzamt in Freising

Die genaue Lage der Deckenstützen und Sensoren im Raum sowie die Höhe der einzelnen Sensoren sind für den Süd- und Nordraum des Finanzamtes in Abb. 35 und Abb. 36 dargestellt.

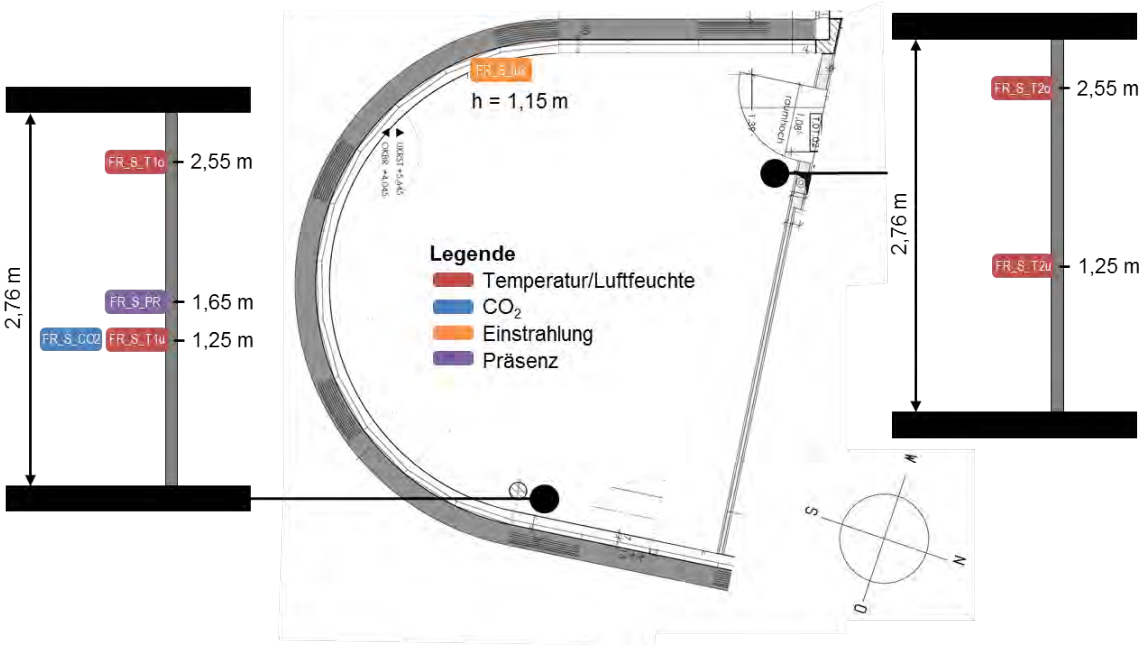


Abb. 35: Anordnung der Messtechnik am Finanzamt Freising (Südraum)

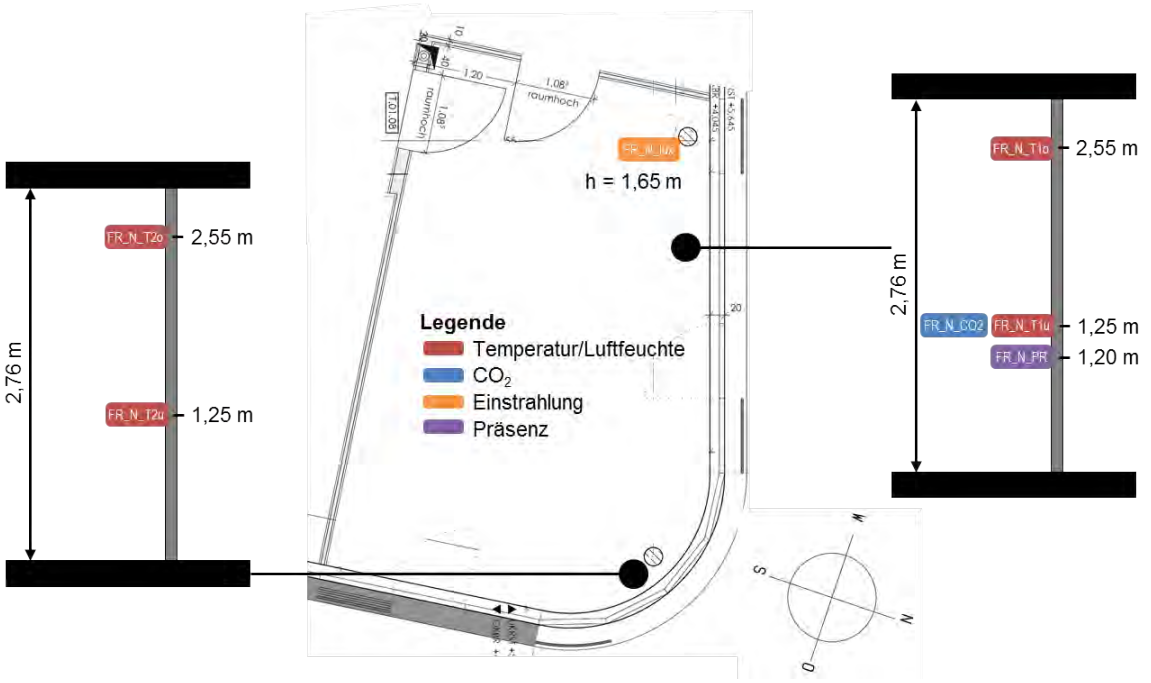


Abb. 36: Anordnung der Messtechnik am Finanzamt Freising (Nordraum)

4.2.3 Messaufbau am ZAE Bayern in Garching

Die genaue Lage der Deckenstützen und Sensoren im Raum sowie die Höhe der einzelnen Sensoren für die Räume am ZAE Bayern werden in Abb. 37 und Abb. 38 dargestellt.

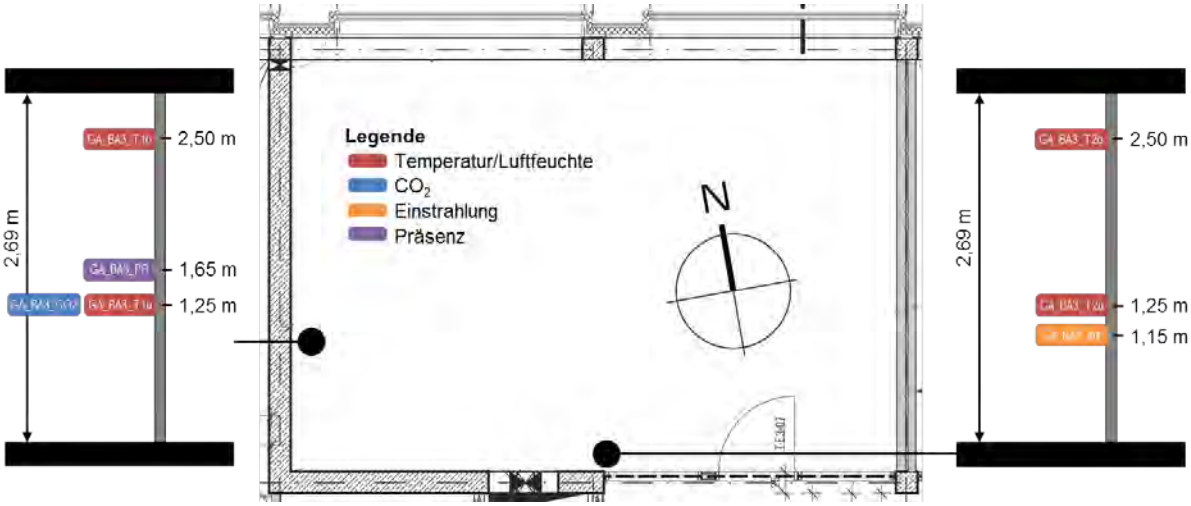


Abb. 37: Anordnung der Messtechnik am ZAE Bayern in Garching auf der Nordseite des BA3

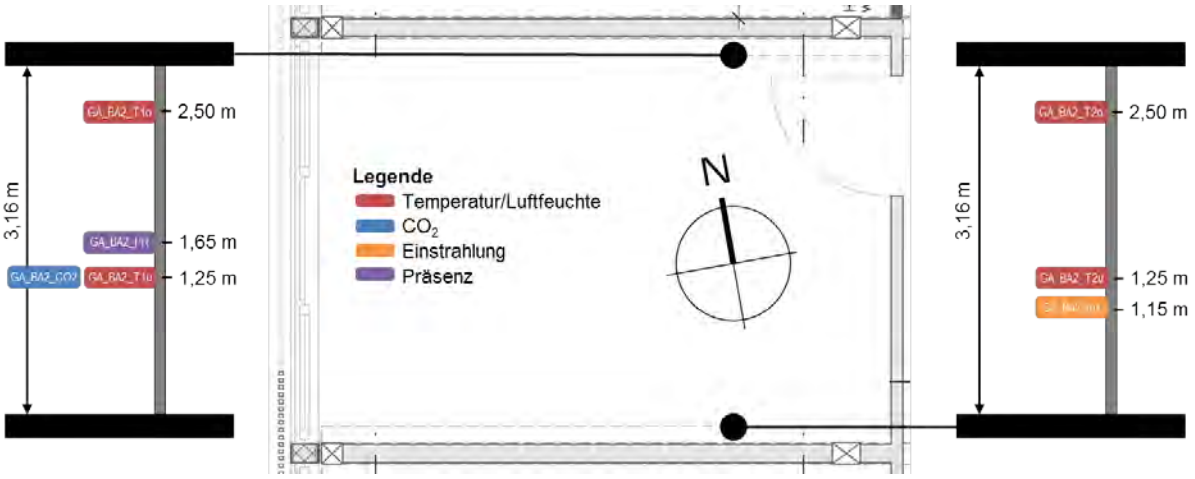


Abb. 38: Anordnung der Messtechnik am ZAE Bayern in Garching auf der Westseite des BA2

4.2.4 Einrichten von Datenübermittlung und Datenbank

Die Verwaltung der Datalogger erfolgte mit der Software AMR WinControl der Firma akrobit® software GmbH. Das Programm war auf einen für das Projekt eingerichteten Messrechner am ZAE Bayern installiert. Über die Software konnten die Datalogger über die Netzwerkschnittstelle konfiguriert sowie die Daten von den einzelnen Standorten zeitgesteuert abgerufen werden.

Am Untersuchungsstandort Garching waren die Datalogger direkt mit dem hausinternen LAN-Netzwerk verbunden. Die Verbindung zu den Datenloggern im Finanzamt Freising wurde über einen Funkmodemrouter, der die Mobilfunkstandards GSM, GPRS, EDGE und UMTS unterstützt, hergestellt. Die topologische Ankopplung des Messrechners an das Medview^2-System über ISDN, DSL und LAN wird in Abb. 39 schematisch dargestellt.

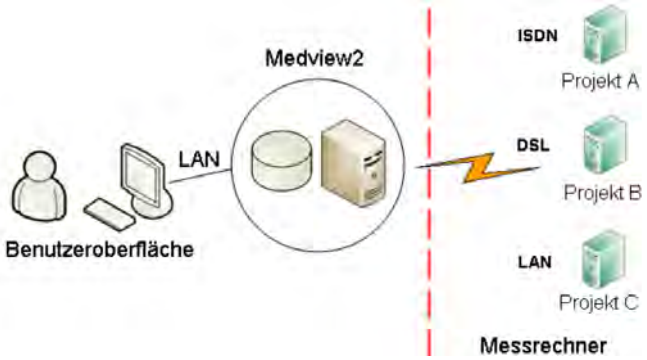


Abb. 39: Medview^2 Topologie

Einmal pro Tag wurden nachts um 2:00 Uhr über AMR WinControl die Daten von den Loggern abgerufen und auf dem Messrechner gespeichert. Von diesem wurden sie um 3:00 Uhr mit einem Upload Skript in die Medview^2-Datenbank importiert und systematisch in Schemata, Datensätzen und Messkanälen gespeichert (siehe Anhang Abb. 100).

Die Wetterdaten vom Messturm in Garching wurden automatisiert in die Datenbank übertragen, wohingegen die Klimawerte aus Freising per Hand als z. B. ASCII Wochenfiles aus dem Internet ausgelesen und importiert werden mussten. Die Speicherung in der Datenbank erfolgte dann automatisiert.

4.2.5 Visualisierung der Messdaten

Medview[2] ist ein am ZAE Bayern über viele Jahre entwickeltes, webbasiertes Werkzeug zur Visualisierung und Auswertung von Messdaten. Durch den Einsatz einer Datenbank ist die Verarbeitung der Daten auch bei großen Datenmengen effizient. Berechnungen und Diagrammgenerierung können direkt auf dem Server ausgeführt werden und belasten dadurch nicht die Clientsysteme.

Zudem können Auswertungen zeitgesteuert aufgerufen werden. Der Datenexport ist direkt aus der Datenbank durch ein Webinterface, Excel, Perl oder sonstige Datenbankprogramme (z. B. DBVisualizer) möglich. Ein Screenshot ist im Anhang der Abb. 101 zu entnehmen.

4.3 Ergebnisse der Messkampagne ohne Begrünungssysteme

4.3.1 Außenklima in Garching und Freising

In unmittelbarer Entfernung zu den Untersuchungsgebäuden in Freising und Garching befinden sich meteorologische Wetterstationen, die für die Auswertung herangezogen wurden. Der neue Oskar von Miller Turm in Garching ist seit September 2011 in Betrieb und gehört zum Meteorologischen Institut München (MIM) in Garching. Dieses ist Teil der Fakultät Physik der Ludwig-Maximilians-Universität München und betreibt Messstationen für Lehre und Forschung in München, Garching und auf der Zugspitze [14].

Das Agrarmeteorologische Messnetz Bayern mit 132 agrarmeteorologischen Messstationen, zu dem auch die Wetterstation in Freising gehört, wird im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten von der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft betrieben. Dieses Messnetz liefert die wesentliche Datenbasis für das von der Bayerischen Landwirtschaftsberatung verfolgte Leitbild des Integrierten Pflanzenbaus. Dabei bildet die laufende und detaillierte Aufzeichnung von Witterungsdaten eine wesentliche Grundlage für Forschungsprojekte und dient darüber hinaus dem Landesamt für Umweltschutz für Hochwasserwarnungen [16].

Tab. 20 zeigt eine Übersicht zur Lage der Wetterstationen und deren Entfernung vom jeweiligen Mustergebäude.

Tab. 20: Beschreibung der Wetterstationen in Garching und Freising [11] [12]

	Oskar von Miller Turm Garching	**Wetterstation Freising**
Geographischer Standort	11°39'51"E / 48°15'41"N	11°43'20"E / 48°24'32"N
Entfernung zum Gebäude	0,87 km	1,45 km
Betreiber	Meteorologisches Institut München (MIM)	Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft

In der Tab. 21 ist ein Vergleich der Auswertung von Klimadaten beider Standorte im Untersuchungszeitraum dargestellt.

Tab. 21: Vergleich der klimatischen Verhältnisse der Standorte Garching und Freising

Stationen		Wetterturm Garching	Wetterstation Freising
Messkanäle		TL_2m_GA RH_2m_GA	TL_2m_FR RH_2m_FR
Außentemperatur [°C]	Mittel	5,7	5,3
	Max	22,3	20,8
	Min	-5,5	-4,2
rel. Außenfeuchte [%]	Mittel	75,0	76,3
	Max	100,0	99,9
	Min	17,8	18,2
Wassergehalt [g/kg]	Mittel	4,3	4,2
	Max	6,6	6,5
	Min	2,4	2,0
Untersuchungszeitraum 16.02.14 bis 24.03.14			

Zu erkennen ist, dass sich die relevanten Klimadaten in Freising und Garching kaum unterschieden. Für die weiteren Untersuchungen konnte somit von einem nahezu identischen Klima an den Standorten ausgegangen werden. Nicht berücksichtigt werden konnten lokale Einflüsse wie Grad der Verbauung, Reflektionen von Nachbargebäuden etc.

Abb. 40 stellt den zeitlichen Verlauf der klimatischen Verhältnisse in Freising im Untersuchungszeitraum dar. Auffällig waren die milden Temperaturen im Februar und März 2014. Die niedrigste Temperatur lag bei -4,2 °C, die höchste bei 20,8 °C. Die relative Luftfeuchte schwankte zwischen 18 % und 100 %.

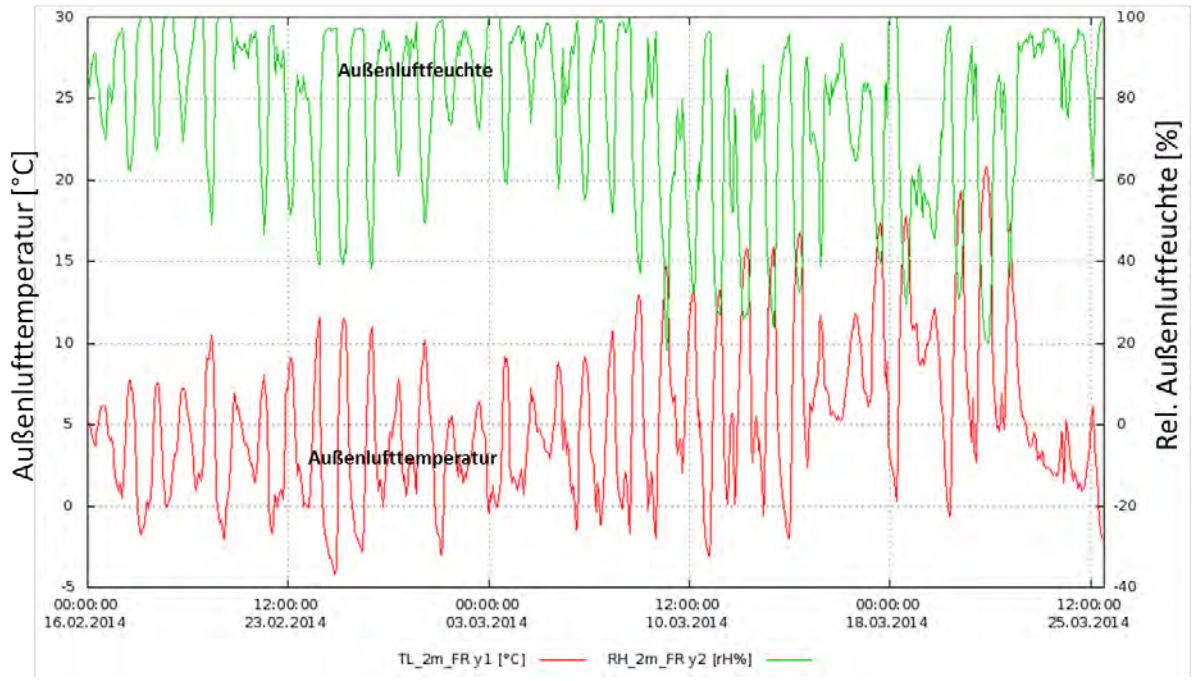


Abb. 40: Klima an der Wetterstation Freising im Untersuchungszeitraum (16.02.2014 – 24.03.2014)

4.3.2 Raumklimatische Charakteristika der untersuchten Büroräume

Bei der Analyse der Messdaten fallen bestimmte Nutzungsmuster auf. In Abb. 41 ist ein typisches Wochenprofil, beginnend am Montagmorgen, für den BA3 in Garching dargestellt. Gut zu erkennen ist das Lüftungsverhalten. Während der Lüftung sanken Raumlufttemperatur und CO_2-Konzentration ab. Die Raumlufttemperaturen erreichten danach schnell wieder den Heizungssollwert, wohingegen die CO_2-Konzentration langsamer, in Abhängigkeit von der Personenbelegung anstieg. Typisch war ein Stoßlüften zum Beginn der Arbeitszeit. Am Feierabend und insbesondere am Wochenende sank die CO_2-Konzentration langsam auf Außenbedingungen von etwa 400 ppm.

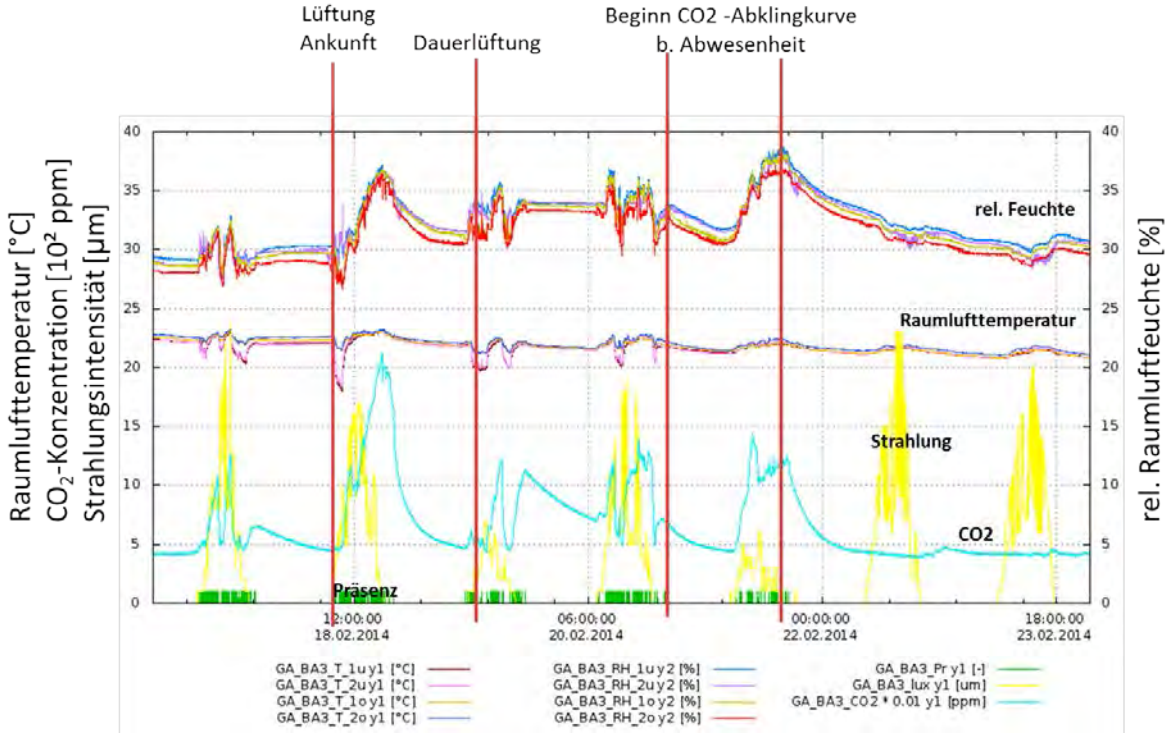


Abb. 41: Typisches Wochenprofil des BA3 am ZAE Bayern

Bei einer genaueren Betrachtung eines Tagesprofils lässt sich das Nutzungsverhalten noch detaillierter analysieren. Abb. 42 zeigt den Freisinger Nordraum am Dienstag, den 11.03.2014. Es handelte sich um einen bedeckten Tag (geringe Strahlungsintensitäten ohne ausgeprägten Peak) bei Außenlufttemperaturen bis 14 °C.

Morgens um 6 Uhr wurde automatisch die Heizung gestartet. Die Raumlufttemperatur stieg von der Nachtabsenkung auf den eingestellten Tagessollwert an (Punkt 1). Um 7:30 Uhr erschienen die ersten Mitarbeiter und lüfteten das Büro, die Temperatur fiel kurzzeitig ab. Bis 11:00 Uhr wurde bei gleicher Temperatur nicht gelüftet, die relative Feuchte sowie die CO_2-Konzentration stiegen an. Der folgende Lüftungsvorgang (Punkt 3) sorgte für deutlich verbesserte Raumluftbedingungen (insbesondere bei der CO_2-Konzentration). Am Nachmittag war kein deutlicher Anstieg der Messwerte mehr zu erkennen. Gründe dafür konnten Dauerlüften über Kippfenster, eine geringere Belegungsdichte oder eine geöffnete Zimmertür sein. Nach Feierabend (Punkt 4) fiel die Temperatur leicht, wodurch die relative Feuchte im Raum anstieg. Die CO_2-Konzentration sank asymptotisch ab.

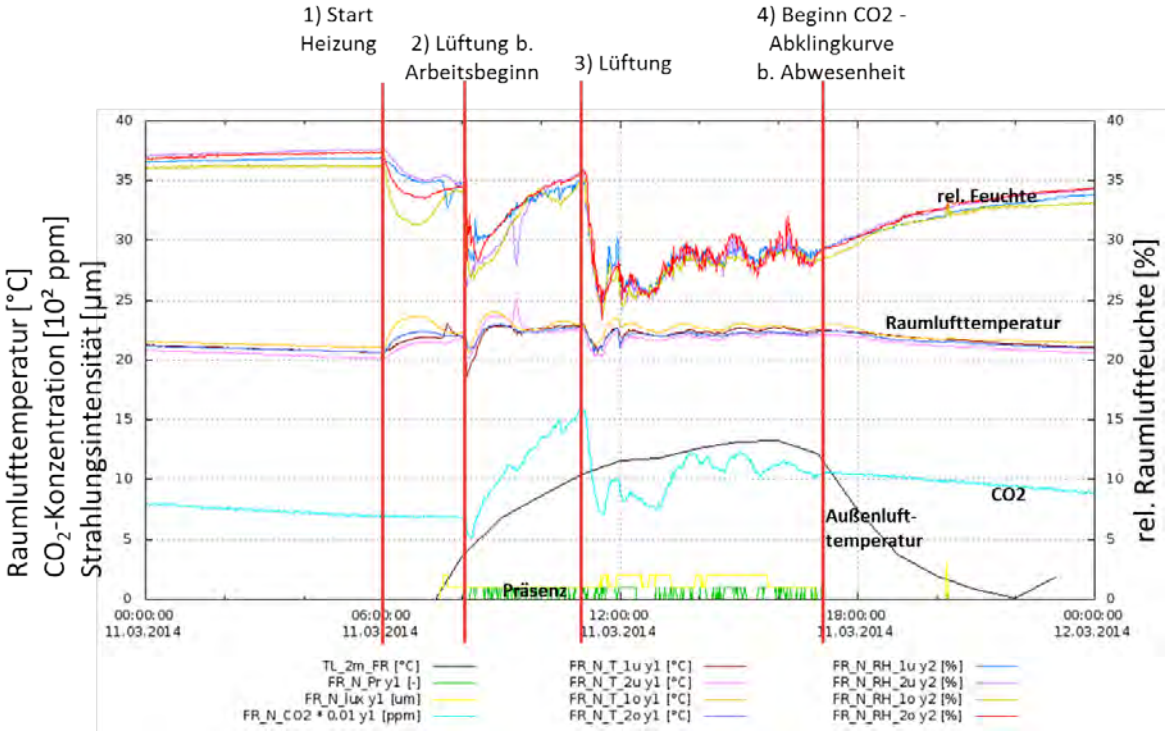


Abb. 42: Typisches Tagesprofil Finanzamt Freising Nordraum

4.3.3 Bewertung der Untersuchungsräume in Bezug auf kritische Luftfeuchten

Die Bewertung der Raumklimata in Bezug auf den Komfort in Büroräumen erfolgte durch die Behaglichkeitsfelder nach Leusden und Freymark [4]. Der grün umfasste Bereich in den folgenden Diagrammen beschreibt behagliche Luftzustände, die rote Linie umfasst noch behagliche Komfortbedingungen. Außerhalb dieser Linie liegen nicht akzeptable Verhältnisse (z. B. rel. Feuchten unter 18 %).

Für den ersten Messzyklus ohne Begrünungssystem wurden alle vier Räume im Untersuchungszeitraum vom 16.02.2014 bis 24.03.2014 analysiert. Nachfolgend werden die Raumluftbedingungen (Raumlufttemperatur und relative Raumluftfeuchte) während der Arbeitszeit als zeitlich über eine Stunde gemittelte Werte dargestellt. Die Anwesenheitszeiten stellen sich wie folgt dar:

- ZAE Bayern in Garching: Montag bis Freitag 7:30 - 17:00 Uhr
- Finanzamt in Freising: Montag bis Donnerstag 6:00 - 16:00 Uhr, Freitag 6:00 - 12:00 Uhr

Die Punkte sind zusätzlich in Abhängigkeit des absoluten Wassergehalts der Außenluft farblich gekennzeichnet. Je dunkler die Punkte eingefärbt sind, desto niedriger ist der Wassergehalt der Außenluft. Die orange Farbe signalisiert den höchsten Wassergehalt.

Für das Finanzamt in Freising ergaben sich für den Nordraum (Abb. 43) und für den Südraum (Abb. 44) folgende Bedingungen:

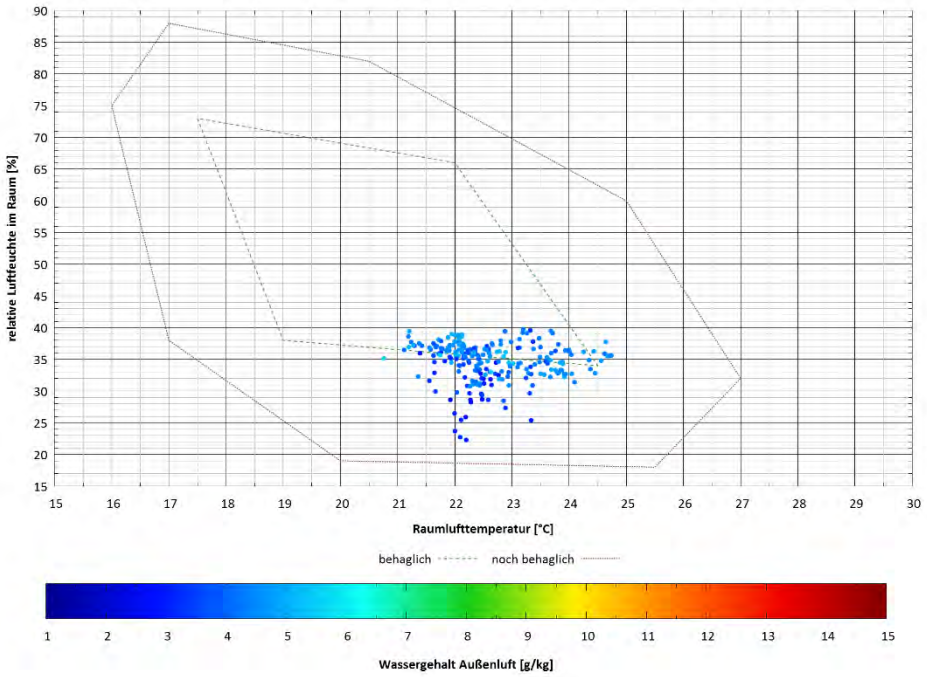


Abb. 43: Freising Nord: Raumluftbedingungen in Abhängigkeit des Wassergehalts der Außenluft als Stundenmittelwerte

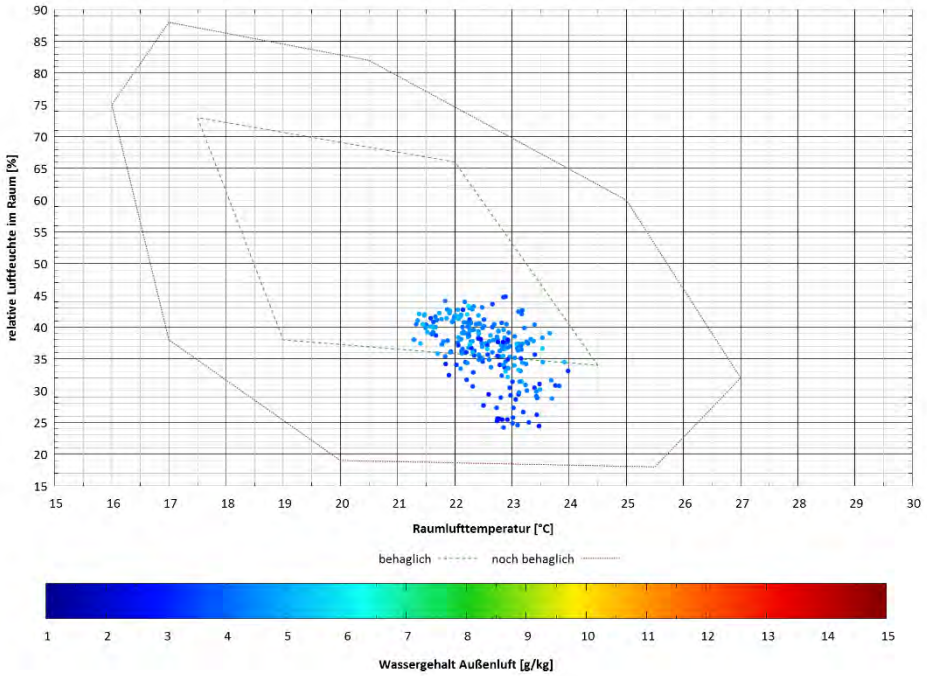


Abb. 44: Freising Süd: Raumluftbedingungen in Abhängigkeit des Wassergehalts der Außenluft als Stundenmittelwerte

Alle Stundenmittelwerte lagen im rot umfassten, erweiterten Behaglichkeitsfeld. Ein Großteil der Werte fiel sogar in das strenger definierte Behaglichkeitsfeld (insbesondere im Südraum). In den Räumen wurde nur selten eine relative Feuchte von 25 % unterschritten. Im Untersuchungszeitraum schwankte die relative Raumluftfeuchte im Nordraum zwischen 20 – 40 % und im Südraum zwischen 20 – 45 %, wobei der Nordraum tendenziell höhere Raumlufttemperaturen aufwies. Der Südraum zeigt im Untersuchungszeitraum nur eine relativ geringe Schwankungsbreite bezüglich der Raumtemperaturen (21 – 24 °C).

Für das Gebäude des ZAE Bayern in Garching ergaben sich für den Raum im BA2 (s. Abb. 45) und für den Raum im BA3 (s. Abb. 46) folgende Bedingungen:

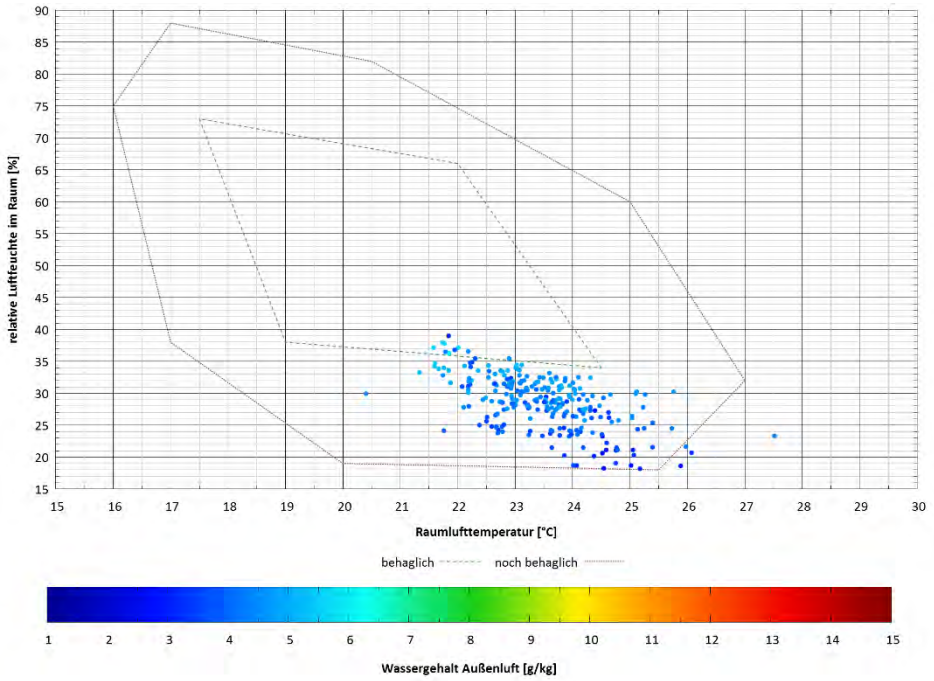


Abb. 45: ZAE Bayern BA2: Raumluftbedingungen in Abhängigkeit des Wassergehalts der Außenluft als Stundenmittelwerte

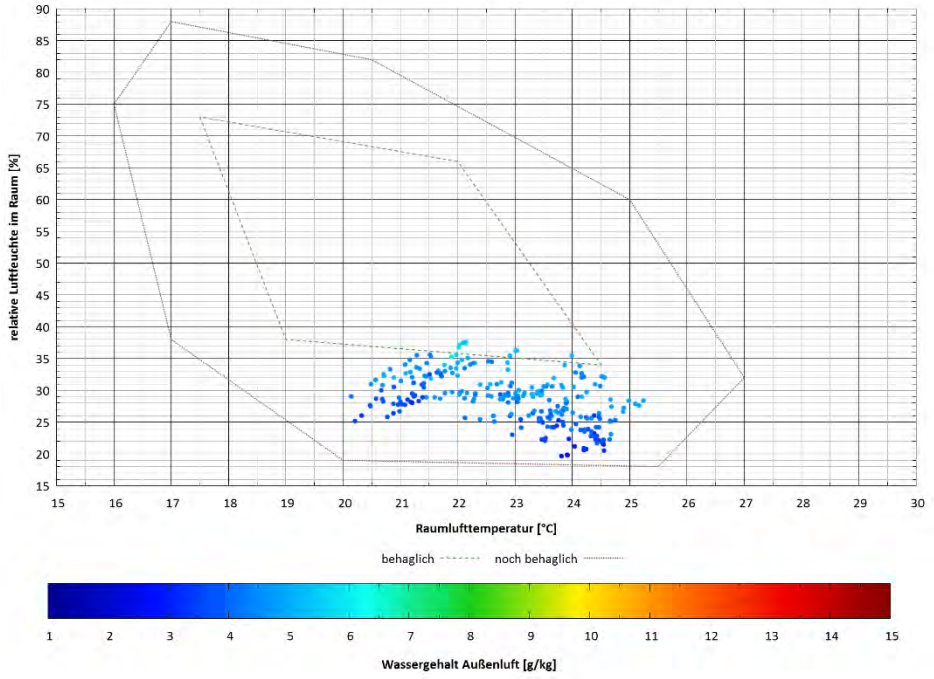


Abb. 46: ZAE Bayern BA3: Raumluftbedingungen in Abhängigkeit des Wassergehalts der Außenluft als Stundenmittelwerte

Im Vergleich zum Finanzamt Freising lagen die Werte der relativen Raumluftfeuchte deutlich niedriger. Die Werte schwankten hier zwischen 15 – 30 % in beiden Bauabschnitten. Fast

alle Messwerte lagen außerhalb des strengeren Behaglichkeitsfelds. Teilweise waren diese sogar außerhalb bzw. knapp an der Grenze des erweiterten Behaglichkeitsfelds. Auffällig ist außerdem, dass am ZAE Bayern deutlich häufiger Raumlufttemperaturen von über 24 °C auftraten und somit die Schwankungsbreite größer war. Die unterschiedlichen Bauweisen (BA2 als leichter Holzbau, BA3 als schwerer Massivbau) wirkten sich auf den Raumkomfort kaum aus.

Anzumerken ist, dass der Winter 2013/2014 vergleichsweise mild ausfiel. In einem kalten Winter oder durchschnittlich kalten Winter ist demnach in beiden Gebäuden mit noch trockenerer Luft in den Räumen zu rechnen.

Fazit in Bezug auf die Gebäudewahl für die zweite Messkampagne mit Begrünungssystem

Der zweite Messzyklus mit Einbau von Begrünungssystemen (Mai 2014 bis März 2015) sollte in einem Gebäude mit einem nachgewiesenen Befeuchtungsbedarf in Bezug auf zu niedrige relative Luftfeuchten erfolgen. Nach den oben beschriebenen Ergebnissen war demnach das ZAE Bayern gegenüber dem Finanzamt Freising zu favorisieren.

4.3.4 Untersuchungszeiträume

Neben dem ersten Messzyklus ohne Begrünungssysteme, in dem die vier untersuchten Räume in Garching und Freising im Zeitraum vom 16.02.2014 bis 24.03.2014 analysiert wurden, wurde ein zweiter Messzyklus mit Begrünungssystem vom 09.06.2014 bis 27.03.2015 untersucht. Dabei schloss die zweite Messreihe sowohl den Sommer und Übergang als auch die Winterzeit mit ein.

Anfangs wurden anhand von Wochenmittelwerten der Außentemperatur die Zeiträume, wie in Abb. 47 zu sehen, festgelegt. Gemäß der VDI Richtlinie 4655 wurde der Winter (blau) für Außentemperaturen im Bereich kleiner 5 °C, von 5 °C bis 15 °C die Übergangszeit (grün) und größer 15 °C der Sommer (rot) definiert.

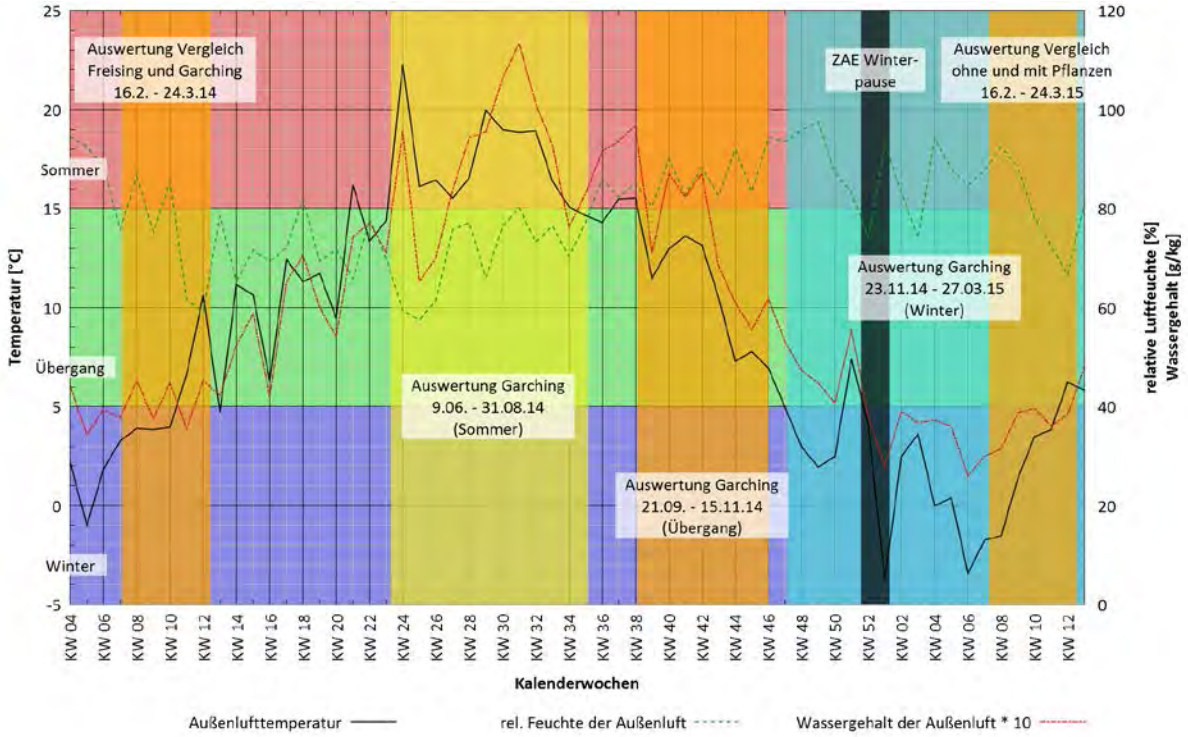


Abb. 47: Messzeiträume

Bei der Datenauswertung mit Begrünungssystemen wurde die Definition der Untersuchungszeiträume angepasst, indem Tagesmittelwerte der Außentemperatur gebildet und gemäß der VDI Richtlinie in Form von Typtagen klassifiziert wurden. Diese Typtage wurden dann unabhängig davon, ob die Tage chronologisch zusammenhängen, entsprechend den Jahreszeiten zugeordnet.

4.3.5 Charakteristika von Raumluftbedingungen mit niedriger relativer Luftfeuchte

Zunächst wurde anhand der Messdaten untersucht, unter welchen Außenluftbedingungen tendenziell niedrige Raumluftfeuchten auftreten. Dabei ist der Ein- bzw. Austrag von Feuchte zwischen Raum und Umgebung im Wesentlichen von zwei Faktoren abhängig: der Luftwechselrate und dem Unterschied des Wassergehalts zwischen Raumluft und Außenluft.

Da in beiden untersuchten Gebäuden der ersten Messkampagne über Fenster gelüftet wurde und die wesentlichen Parameter zur Bestimmung der Luftwechselrate nicht erfasst werden konnten, war eine analytische Betrachtung nicht möglich. Maßgebende Faktoren wären hierbei z. B. die Windgeschwindigkeit, der Öffnungsquerschnitt, Druckverhältnisse und insbesondere das Nutzerverhalten (Öffnen von Fenster und Türen).

Somit lassen sich weitere Aussagen über eine Abhängigkeit nur über den Feuchtegehalt der Außenluft machen. Dabei sind Temperatur und Feuchte der Luft maßgebend. Die Luft kann umso mehr Feuchtigkeit aufnehmen, je wärmer sie ist. Ein absolutes Maß, nämlich der absolute Wassergehalt, lässt sich aus den beiden genannten Größen beschreiben. Abb. 48 zeigt den Zusammenhang der feuchterelevanten Klimaparameter im Untersuchungszeitraum. Der Wassergehalt folgt dabei nicht mehr ganz so deutlich dem ausgeprägten Tag-Nacht-Zyklus von relativer Feuchte und Temperatur. Aufgrund der milden Temperaturen fehlen Werte mit sehr geringen absoluten Feuchten (< 3 g kg^{-1}).

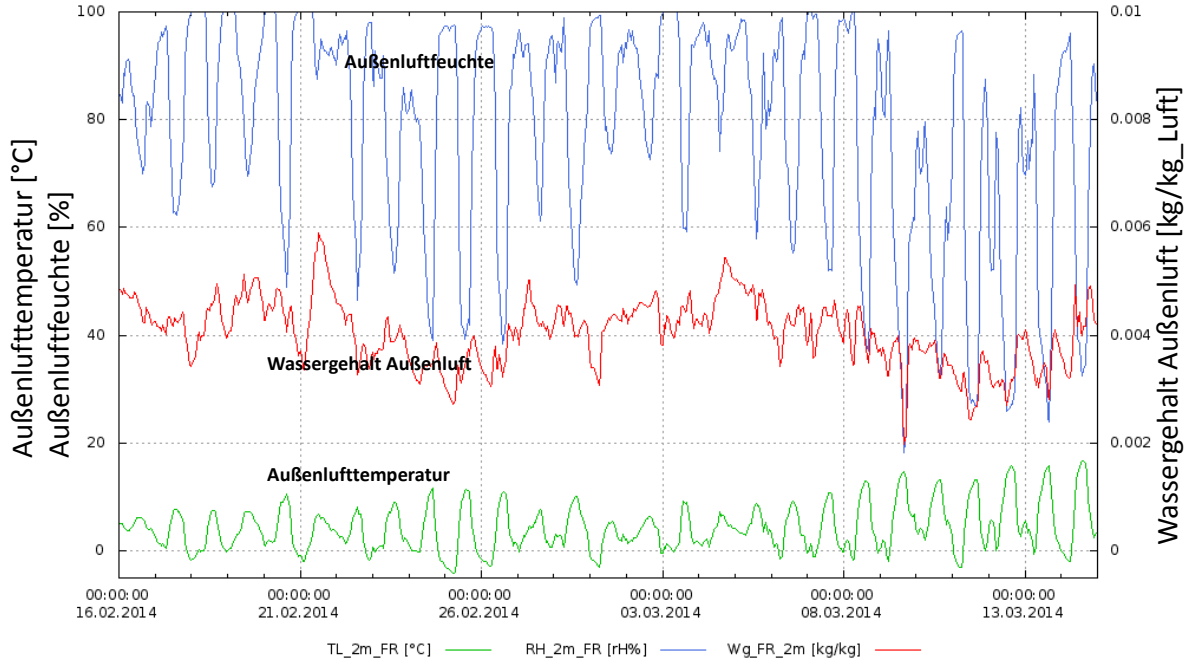


Abb. 48: Zusammenhang von feuchterelevanten Klimaparametern der Wetterstation Freising im Untersuchungszeitraum

In den folgenden Diagrammen aus dem BA3 in Garching (Abb. 49 bis Abb. 51) sind exemplarisch für alle Untersuchungsräume die Stundenmittelwerte der Raumluft in Abhängigkeit von Wassergehalt der Außenluft, relativer Außenluftfeuchte und Außenlufttemperatur aufgetragen.

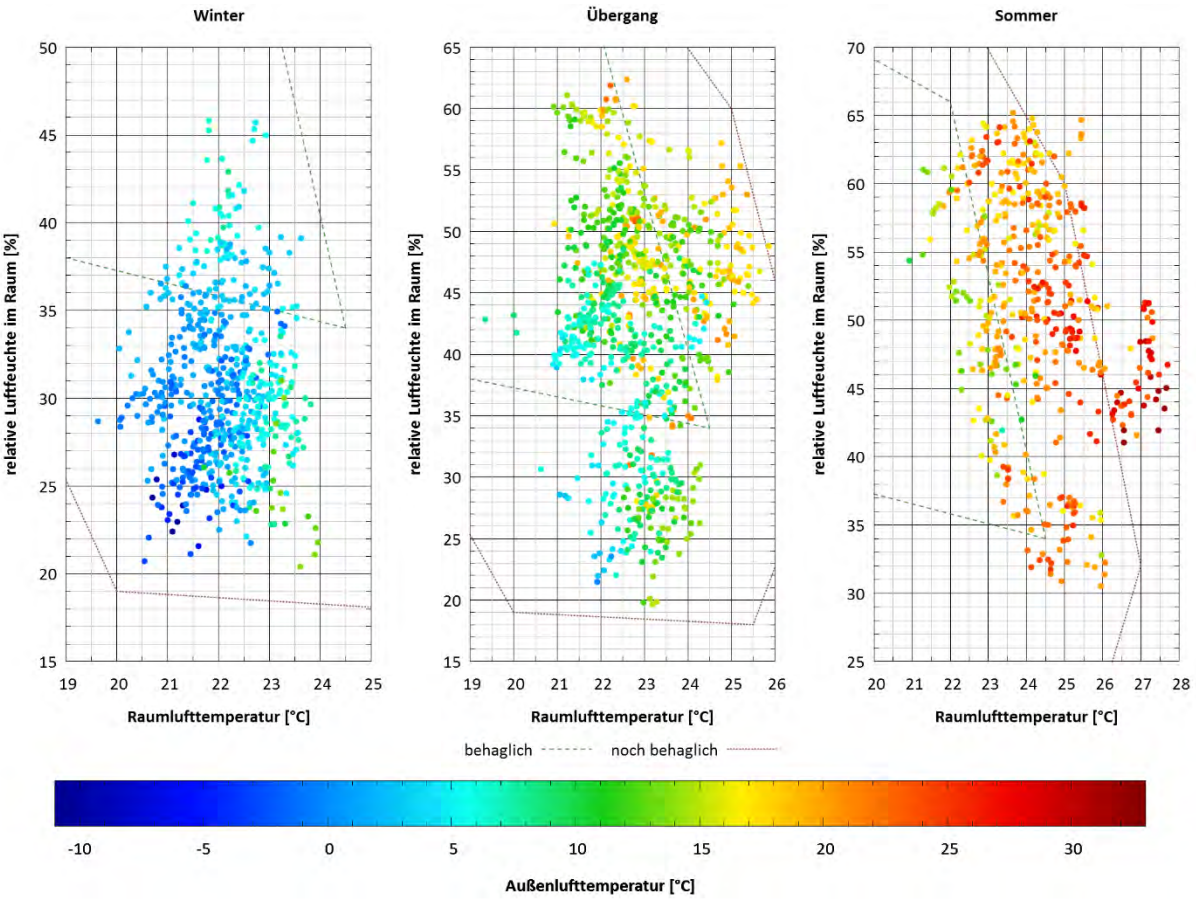


Abb. 49: Abhängigkeit des Raumkomforts von der Außentemperatur am Beispiel ZAE Bayern BA3 als Stundenmittelwerte

Die Abb. 49 zeigt den Einfluss der Außenlufttemperatur auf die relative Feuchte und Temperatur der Raumluft. Zu erkennen ist, dass sich an kalten Typtagen die Außenlufttemperatur sowohl auf die Raumlufttemperatur als auch auf die relative Luftfeuchte auswirkte. Bei niedrigen Außenlufttemperaturwerten waren die Werte der Temperatur und der relativen Luftfeuchte im Raum gering und stiegen mit der Zunahme der Außenlufttemperatur an, da der Wassergehalt bei niedrigen Außenlufttemperaturen ebenfalls sehr gering war. An warmen Typtagen ist eine Korrelation der Außenlufttemperatur nur mit der Raumlufttemperatur zu sehen, da einerseits schon höhere Wassergehalte in der Außenluft vorlagen und andererseits die Temperaturänderung der Frischluft im Raum deutlich kleiner wurde.

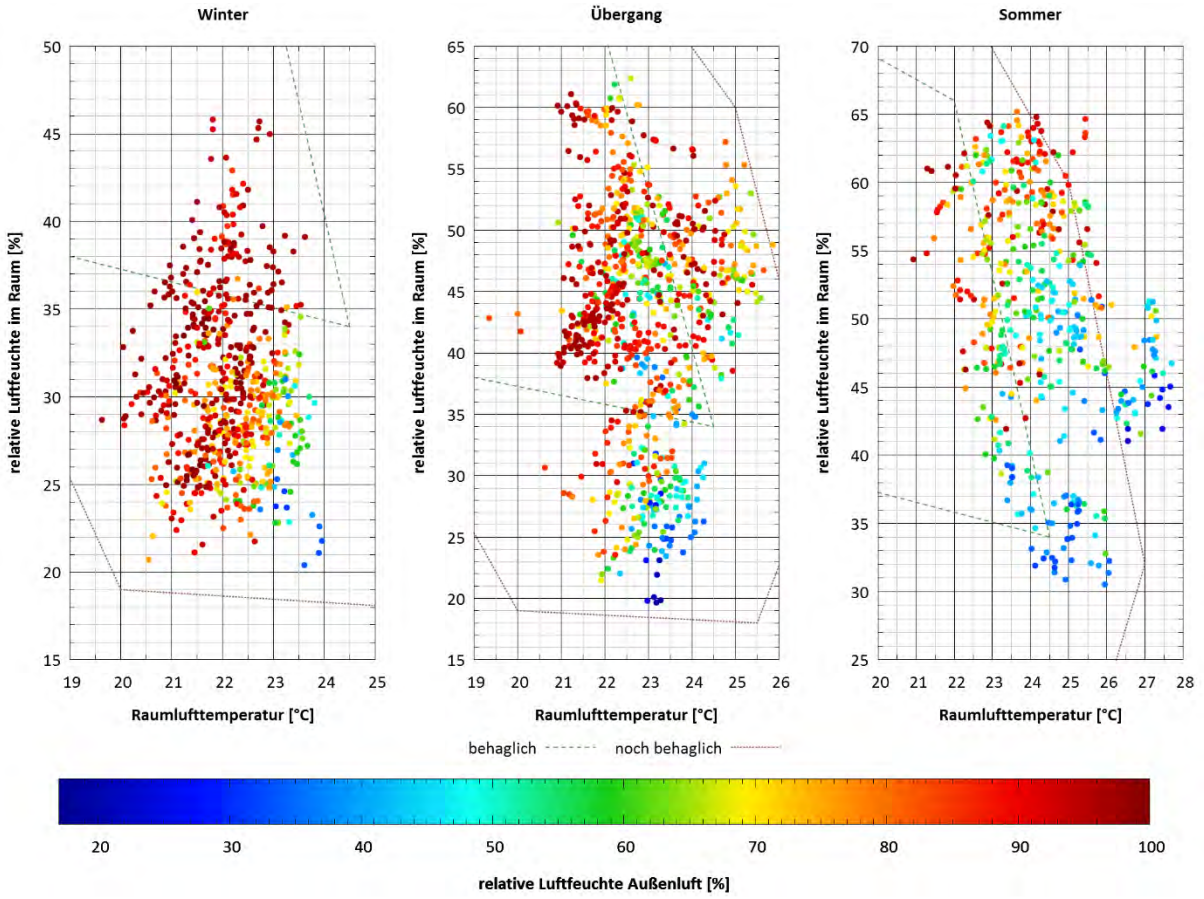


Abb. 50: Abhängigkeit des Raumkomforts von der Außenluftfeuchte am Beispiel ZAE Bayern BA3 als Stundenmittelwerte

Während der Winter- und Übergangszeit ist an der gleichmäßigen Farbverteilung (Abb. 50) zu erkennen, dass sich die relative Luftfeuchte der Außenluft kaum auf den Raumkomfort auswirkte. Die relative Luftfeuchte ist stark temperaturabhängig und eine hohe relative Luftfeuchte bei niedrigen Temperaturen weist dennoch einen niedrigen Wassergehalt auf. Zudem befanden sich die Werte der relativen Luftfeuchte der Außenluft an Winter und Übergangstagen meistens zwischen 75 % und 100 %. An warmen Typtagen entsprachen die Außenluftwerte Temperatur und relative Feuchte meistens den Raumluftwerten, somit war ein deutlicherer Einfluss der relativen Luftfeuchte der Außenluft auf die relative Luftfeuchte im Raum zu erkennen.

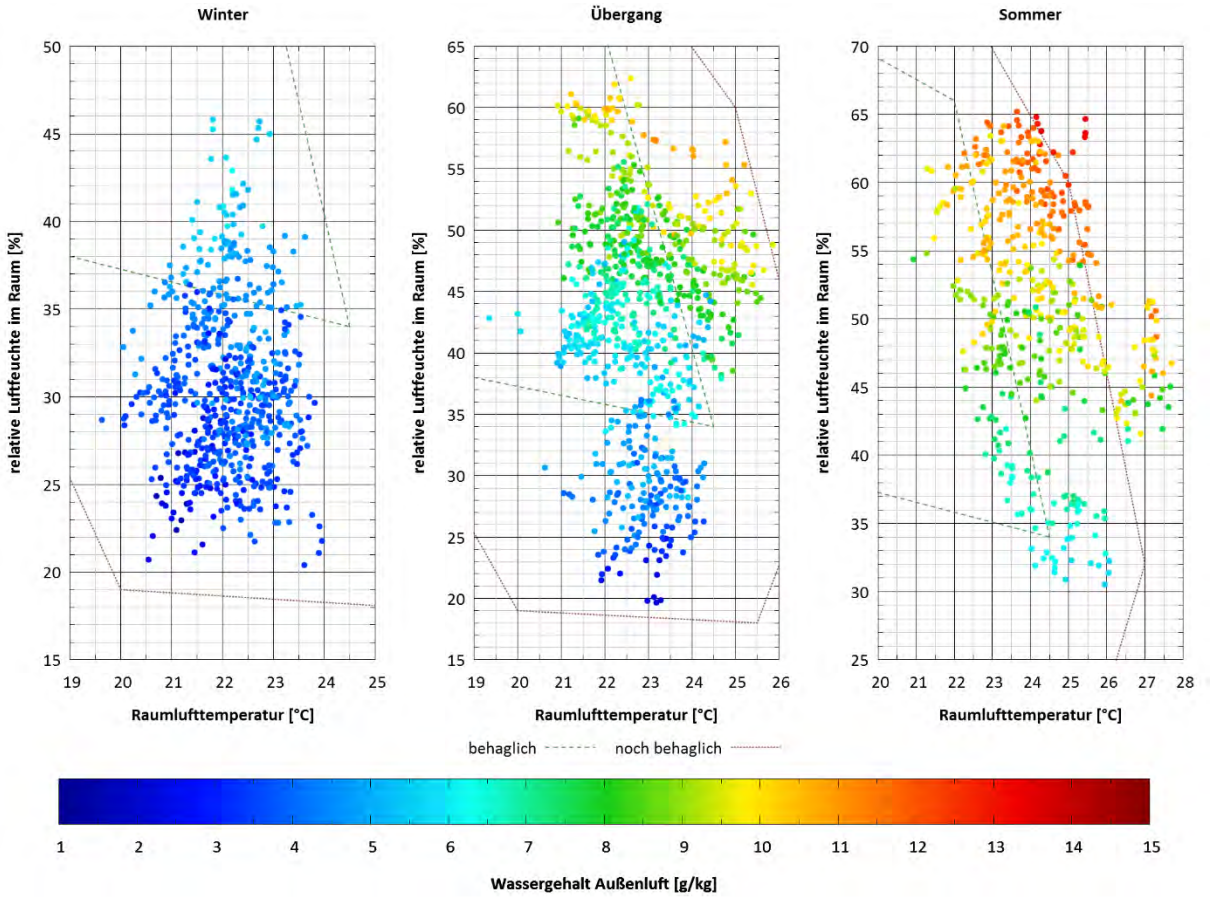


Abb. 51: Abhängigkeit des Raumkomforts vom Wassergehalt der Außenluft am Beispiel ZAE Bayern BA3 als Stundenmittelwerte

Der Einfluss des Wassergehalts der Außenluft auf die Raumklimawerte ist in Abb. 51 zu sehen. Der Wassergehalt ist temperaturunabhängig und gibt die absolute Menge an Wasserdampf in der Luft an. An der vertikalen Farbverteilung der Punkte in den Diagrammen ist erkennbar, dass der Wassergehalt an allen drei Typtagen einen direkten Einfluss auf die relative Luftfeuchte im Raum hatte. Niedrige Wassergehalte, die wegen der Sättigungseigenschaften der Luft nur an Winter- und Übergangstagen zu finden sind, gingen mit niedrigen Werten relativer Luftfeuchte im Raum einher. Hohe Wassergehalte an warmen Typtagen korrespondierten mit hohen relativen Luftfeuchten im Raum.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass nicht immer ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Luftfeuchten im Raum und Außenluftbedingungen abzuleiten war. Ursächlich dafür ist das sich ändernde Lüftungsverhalten der Nutzer bei kalten Außentemperaturen. Geringere Lüftungszeiten führen dazu, dass sich die geringen Feuchten der Außenluft nur eingeschränkt in Innenräumen wiederfinden.

Diese Erkenntnisse sind nur begrenzt auf Gebäude mit mechanischen Lüftungsanlagen zu übertragen. Dort werden bei Wärmerückgewinnungssystemen (WRG) ohne Feuchterückgewinnung selbst bei kalten Außentemperaturen mit niedrigem Wassergehalt definierte Frischluftwechsel gefahren und es kommt vermehrt zu Problemen mit zu trockener Luft im Innenraum. Als Gegenmaßnahme kann eine WRG mit Feuchterückgewinnung z. B. mit einem Sorptionsrad oder ein Befeuchtungssysteme eingesetzt werden. Im nachfolgenden Kapitel wird der Einsatz der Begrünungssysteme zur Anhebung der relativen Raumluftfeuchte untersucht.

4.4 Messkampagne im Mustergebäude mit Begrünungssystemen

4.4.1 Gebäudecharakterisierung und Raumauswahl

Aufgrund der Bewertungsergebnisse aus Kapitel 4.3.2 und der Erkenntnis, dass die relative Luftfeuchtigkeit in den Büroräumen am ZAE Bayern in Garching im Vergleich zum Finanzamt in Freising deutlich niedriger lag und sich daraus ein erhöhtes Potential für den Einfluss eines Begrünungssystems in diesen Gebäuden erschließt, wurde das ZAE Bayern als Mustergebäude für die Begrünung ausgewählt. Zudem bieten die unterschiedlichen Bauweisen – wie in Kapitel 3.3.2 erläutert – mit einer Holzbauweise des BA2 und einem Stahlbetonskelettbau des BA3 die Möglichkeit, die Ergebnisse der Begrünungssysteme im Hinblick auf die Gebäudecharakteristika zu analysieren.

Abb. 52: Ausgewählte Räume mit Begrünungssystem (grün gekennzeichnet) und Referenzräume (rot) am ZAE Bayern in Garching

Mit einem Begrünungssystem wurden die beiden bereits untersuchten Räume ausgestattet. Ergänzend dazu wurde ein drittes Begrünungssystem ebenfalls im BA2 im 2.OG aufgebaut. Als Referenzräume ohne Begrünungssystem dienten zum einen ein 17 m² großer Raum mit zwei Arbeitsplätzen im 1.OG des BA2 und ein Raum mit 24 m² und drei Arbeitsplätzen im 2.OG des BA3 (siehe Abb. 52).

Folglich standen für die Untersuchungen drei Büros mit Begrünungssystemen und zwei Referenzräume ohne Begrünung zur Verfügung, wobei innerhalb der Bauabschnitte die Referenzräume den untersuchten Räumen mit Begrünungssystem sehr ähnlich waren, jedoch in einem anderen Stockwerk lagen. Dadurch sollte sichergestellt werden, dass zwischen diesen Räumen kein Luftaustausch stattfinden kann.

4.4.2 Aufbau und Messdatenerfassung mit Begrünungssystemen

4.4.2.1 Einbau der Begrünungssysteme

Wie in Kapitel 4.4.1 beschrieben, wurde entschieden, die Begrünung in den Büroräumen mit dem System Grüne Wand durchzuführen.

Die Berechnung der erforderlichen Verdunstungsfläche für die unterschiedlich großen Büroräume erfolgte durch die Firma HRP basierend auf den Raumdaten, die mit dem Fragebogen zur Raumklimatisierung erhoben wurden (siehe Kapitel 4.5.8 und im Anhang).

Tab. 22: Auslegung der erforderlichen Begrünungsfläche für die Büroräume

Büroraum	Raumfläche	Wasserdefizit	erforderliche Begrünungsfläche	realisierte Begrünungsfläche
A.1.02	33,4 m²	ca. 5,7 l d^{-1}	ca. 1,7 m²	1,44 m²
B.2.01	16,7 m²	ca. 2,7 l d^{-1}	ca. 0,8 - 1,0 m²	0,72 m²
B.2.03	16,7 m²	ca. 2,7 l d^{-1}	ca. 0,8 - 1,0 m²	0,72 m²

Die erforderlichen Begrünungsflächen (Tab. 22) basieren auf der angestrebten Erhöhung der Luftfeuchte um 12-15 %, ausgehend von einer relativen Luftfeuchte von 30 %.

Der Unterschied zwischen den erforderlichen und den realisierten Begrünungsflächen entstand, da sich die Fläche systembedingt aus Platten à 0,24 m² (0,4 m x 0,6 m) zusammensetzte.

Das System Grüne Wand ist im Normalfall beidseitig mit je 6 Platten bestückt (2,88 m²). Es wurden zur Realisierung der angestrebten Begrünungsflächen im Raum A.1.02 einseitig 6 Platten verwendet. In den kleineren Räumen B.2.01 und B.2.03 wurden einseitig 3 Platten verwendet und die restliche Fläche mit einer grau gestrichenen Styroporplatte abgedeckt.

In den Räumen B.2.01 und B.2.03 wurden die gleichen Modelle (Version 1) der Grünen Wand verwendet, wie in dem Versuch im Gewächshaus. Diese besitzen einen Kunststoffbehälter mit einem Wasserreservoir von 110 l und eine Edelstahl-Trägerkonstruktion zur Aufnahme der begrünten Platten. Die Bewässerung erfolgt mit zwei redundanten Tauchpumpen über das patentierte Wasserverteilsystem (Dochtsystem) mit Hilfe einer Zeitsteuerung.

Im Raum A.1.02 wurde ein neueres, weiterentwickeltes Modell (Version 2) der Grünen Wand eingesetzt. Dieses besteht aus einem GFK-Innengefäß für einen Wasservorrat von 75 l, ummantelt von einer Edelstahlverkleidung. Die Bewässerung erfolgt ebenfalls über das Wasserverteilsystem mit einer zeitgesteuerten Pumpe neben dem Wasservorratsgefäß. Die Größe und Befestigung der begrünten Platten unterscheidet sich nicht von der Version 1.

Alle Systeme wurden mit einer von der Raumdecke abgehängten Belichtung (Leuchtstoffröhre FSL T5 21 W / 840 / CW, mit Reflektoren) mit Zeitsteuerung zur Belichtung der Pflanzen versehen.

Die Begrünung der Systeme erfolgte mit *Philodendron hederaceum*. Pro Platte wurden 80 Stecklinge direkt in die Phenolharzschaumplatten (Oasis) gesteckt und in der Waagerechten in einer Gärtnerei vorkultiviert bis die Pflanzen gut eingewurzelt waren.

Der Aufbau der Grünen Wände erfolgte am 27.5.2014 (Tab. 23). Zunächst wurde die Wasserabgabe der Systeme, wie im Projektantrag vorgesehen, über das jeweils nachgefüllte

Wasservolumen ermittelt. Ab 16.12.14 wurden, wie auch im Versuchsteil im Gewächshaus, Waagen zur Erfassung der Wasserabgabe über den Masseverlust eingesetzt, um den zeitlichen Verlauf der Wasserabgabe exakter erfassen zu können.

Tab. 23: Zeitliche Vorgehensweise zur Vermessung der Büroräume

Datum	Tätigkeit
27.05.14	Aufbau der Grünen Wände in den Büroräumen
28.07.14	Installation der Belichtung
05.12.14	Anbringung Reflektoren an den Lampen
16.12.14	Einbau der Waagen zur genauen Erfassung der Wasserabgabe
12.03.15	Ausbau der Waagen / Ende des Auswertungszeitraumes

Abb. 53: Versuchsanordnung mit Grüner Wand auf der Waage in Raum A.1.02

Da aufgrund der hohen Karbonathärte des Leitungswassers in Garching für die Bewässerung der Grünen Wände Umkehrosmosewasser bzw. eine Mischung aus Umkehrosmosewasser und Leitungswasser erforderlich war, wurde zur Produktion von Umkehrosmosewasser eine 4-stufige Direct Flow Umkehrosmoseanlage (Wasserhaus Micro DF) mit zusätzlichen Vorratstank in einem Nebenraum installiert.

Pflege

Die Pflege der Begrünung erfolgte zu Versuchsbeginn wöchentlich und ab Mitte Juli 2014 in der Regel alle zwei Wochen durch eine Gärtnerin der HSWT. Bei Bedarf wurden zusätzliche Pflegetermine eingeschoben.

Im Rahmen der Pflege wurden folgende Kontrollen und Tätigkeiten durchgeführt:

- Kontrolle der Systemtechnik (Bewässerungspumpe, Belichtung, korrekter Einbau des Bewässerungsvlieses)
- Messung von pH-Wert und Leitfähigkeit der Nährlösung
- Nachfüllen von Wasser und Zudosierung von Dünger
- Reinigung des Filters vor der Pumpe (1x pro Monat)
- Kontrolle des Pflanzenwachstums (Vitalität, Nährstoffmangelsymptome)
- Kontrolle auf Schädlingsbefall der Pflanzen
- Rückschnitt der Pflanzen bei Bedarf

Nach der Erstbefüllung mit Osmose- und Leitungswasser im Verhältnis 1:1 wurde in der Regel mit reinem Osmosewasser aufgefüllt, um ein Ansteigen des pH-Wertes in der Nährlösung zu reduzieren. Die nachgefüllten Wassermengen wurden in Listen erfasst, um daraus den Wasserverbrauch nach Volumen zu berechnen.

Zur Nährstoffversorgung der Pflanzen wurde dem Osmosewasser kontinuierlich Düngerstammlösung zugegeben, sodass eine Nährlösung mit 0,04 ‰ entstand. Verwendet wurde der Dünger Ferty 9 Hydro (10 % NO_3-N, 5 % NH_4-N, 7 % P_2O_5, 22 % K_2O, 6 % MgO, 0,03 % B, 0,002 % Cu, 0,12 / Fe, 0,05 % Mn, 0,005 % Mo, 0,01 % Zn). Die Ca-Versorgung der Pflanzen erfolgte über gelegentliche Leitungswassergaben (Garchinger Leitungswasser, 16 °dH).

Der Zielwert für die Nährlösung war eine Leitfähigkeit von 500 µS cm^{-1} (= 0,5 EC). Eine Düngung erfolgte nur bei Unterschreiten dieses Wertes. Ein maximaler Wert von 2000 µS cm^{-1} sollte in der Nährlösung nicht überschritten werden. In diesem Fall wäre ein Austausch der Nährlösung erforderlich gewesen.

Ein Ansteigen des pH-Wertes über 7,5 sollte vermieden werden, um eine gute Nährstoffverfügbarkeit zu gewährleisten und Schäden an den Pflanzen zu vermeiden.

Während des Versuchszeitraumes waren keine Pflanzenschutzmaßnahmen erforderlich, da kein Befall mit Schädlingen festgestellt wurde.

Bewässerungszyklen

Zu Versuchsbeginn (27.05.14 - 04.08.14) wurde die Version 1 der grünen Wand in Raum A.1.02 durchgängig 0,5 Minuten in 10 Minuten bewässert. Die Systeme in den Räumen B.2.01 und B.2.03 wurden tagsüber von 8:00 bis 20:00 Uhr jeweils 0,5 Stunden bewässert gefolgt von 1 Stunde Pause. In der Nacht wurde durch die 2. Pumpe, die auch mittags einen Gießvorgang übernahm, 3 mal 0,5 Stunden bewässert.

Ab dem 05.08.15 erfolgte die Bewässerung in den Räumen B2.01 und B.2.03 kontinuierlich den ganzen Tag mit jeweils 30 Minuten Bewässerung im Wechsel mit 30 Minuten Pause. Dabei wurde von 0:00 bis 12:00 Uhr die erste Pumpe und von 12:00 bis 0:00 Uhr die zweite eingesetzt. In Raum A.1.02 wurde den ganzen Tag jeweils 15 Minuten, gefolgt von 30 Minuten Pause, bewässert.

Ab dem 25.09.2014 wurde die Bewässerung einheitlich für alle Systeme geschaltet. Dabei wurden nachts 3 mal 2 Stunden Pause realisiert, um zu vermeiden, dass anaerobe Fäulnisprozesse ablaufen und um den aeroben Abbau von pflanzlichem Verrottungsmaterial auf den Platten zu begünstigen. Die Bewässerungszeit betrug immer 15 Minuten, wobei die Pausen je nach Tages- und Jahreszeit variierten (siehe Tab. 24).

Tab. 24: Bewässerungszyklen ab 25.09.14

Zeit	Bewässerung	Pause
7:00 - 22:00 *Sommer*	15 Min	30 Min
7:00 - 22:00 *Heizperiode*	15 Min	15 Min
22:00 - 22:15	15 Min	
22:15 - 0:15		2 h
0:15 - 0:30	15 Min	
0:30 - 2:30		2 h
2:30 - 2:45	15 Min	
2:45 - 4:45		2 h
4:45 - 5:00	15 Min	
5:00 - 7:00		2 h

Belichtung

Bei der verwendeten Pflanzenart *Philodendron hederaceum* handelt es sich um eine tropische Pflanze, die am Naturstandort unter Bäumen wächst. Hinsichtlich ihrer Lichtverwertung ist sie daran angepasst, kurzzeitig hohe Lichtintensitäten zu nutzen, die je nach Sonnenstand auf die Blätter treffen. Die Pflanzen benötigen mindestens 12 h Licht und 6 Stunden Dunkelheit in 24 Stunden. Dabei reichen geringe Lichtintensitäten von 5-6 µmol m^{-2} s^{-1} aus.

Da sich einige Büronutzer durch die zunächst probeweise eingestellten Belichtungszeiten geblendet fühlten, wurde ab 25.09.14 die Belichtungszeit optimiert: Licht an: 15:00 - 3:00 Uhr und Licht aus: 3:00 - 15:00 Uhr. Dabei wurde berücksichtigt, dass in die Westbüros erst ab 15:00 Tageslicht gelangt. Die Belichtung sollte das Tageslicht ergänzen und deswegen von 15:00 bis 3:00 Uhr eingeschaltet werden. Damit wurde auch die am Tag störende Blendung reduziert und 6 h Nacht für die Pflanzen blieben gewahrt. Zusätzlich wurden die Lampen mit Reflektoren versehen, um das Licht auf die Pflanzen zu richten und die Blendung zu reduzieren.

4.4.2.2 Ergänzung der Messdatenerfassung

Zusätzlich zum ersten Messzyklus, in dem nur in zwei Büroräumen Messtechnik eingebaut war, wurden gemäß der Raumauswahl in Kapitel 4.4.1 die neuen Räume mit der gleichen Messtechnik ausgestattet. In Ergänzung zu Kapitel 4.2.1 wurden in allen Räumen zum einen Fenster- und Türschließkontakte in Magnetausführung der Firma Abus, die gemäß den Abb. 54 und Abb. 55 in den Räumen angebracht wurden und zum anderen ein Bestrahlungssensor der Firma Ahlborn montiert bzw. an den Begrünungssystemen befestigt (Schlechtpunkt). Zudem wurden Datalogger für die elektrische Leistungsmessung der Pumpen, Zeitschaltuhren und Belichtung eingerichtet. Darüber hinaus wurde in einem der kleinen Büros (B.2.01) ein Türschließer eingebaut, um einen Raum mit überwiegend geschlossener Tür untersuchen zu können, sowie ein Substrattemperaturfühler für das Berechnungsmodell der

Verdunstungsleistung des Substrates angebracht. Der Aufbau der Messtechnik in den Räumen ist den Abb. 54 und Abb. 55 zu entnehmen.

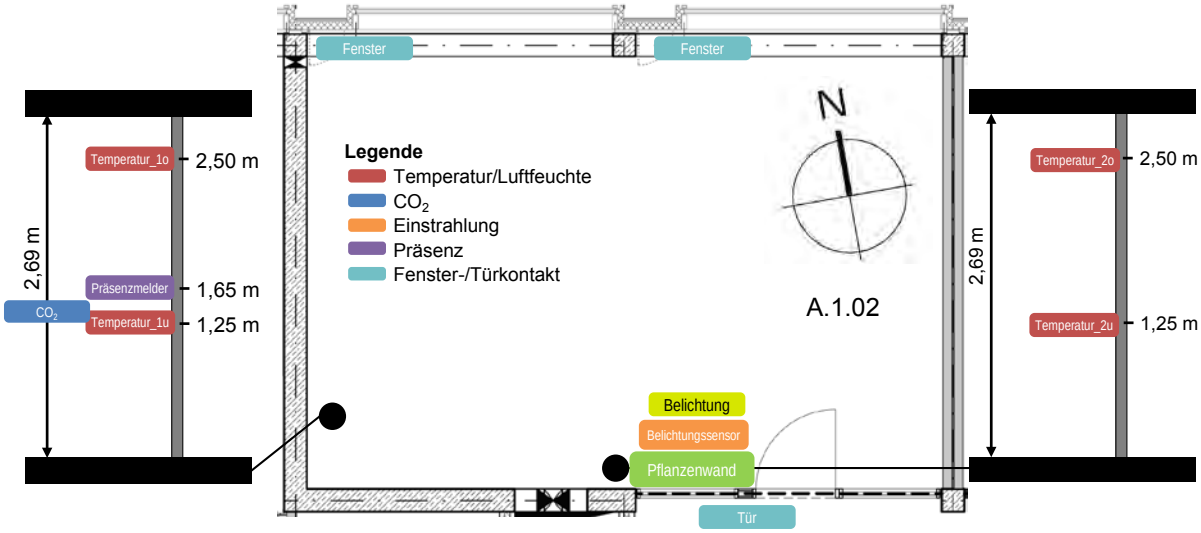


Abb. 54: Standort des Begrünungssystems und Anordnung der Messtechnik im großen Büro A.1.02

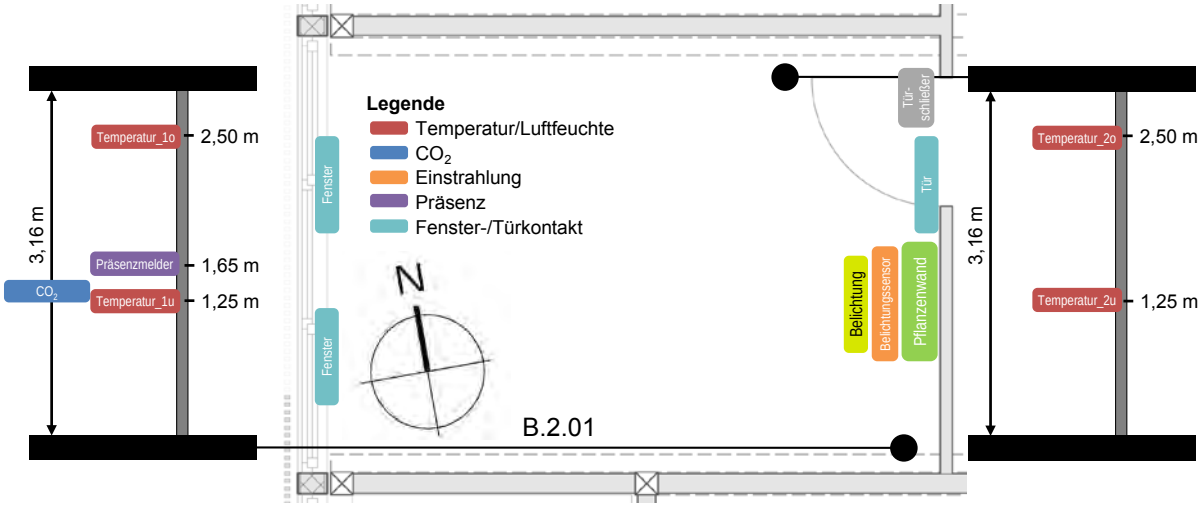


Abb. 55: Standort des Begrünungssystems und Anordnung der Messtechnik im kleinen Büro B.2.01

Die Montage der Schließkontakte ist in der Abb. 56 zu sehen.

Abb. 56: Tür- und Fensterschließkontakte

Kontrolle der Nährlösungsparameter

Die Messung des pH-Wertes erfolgte mit einer pH-Elektrode (WTW Sen Tix 41) an einem WTW pH 325-Messgerät. Die Leitfähigkeit der Nährlösung wurde mit einer Leitfähigkeitselektrode (WTW Tetra Con 325) gemessen.

Waagen

Zur exakten Ermittlung des zeitlichen Verlaufes der Wasserabgabe durch die Begrünungssysteme wurde unter jeder Grünen Wand eine Plattformwaage (Fa. Soehnle, Sonderauflösung 300 kg / 50 g) eingebaut. Mit Hilfe eines am Institut für Gartenbau geschriebenen Programms wurden alle 10 Minuten die Massen der Systeme erfasst und auf einem Laptop gespeichert. Über Fernabfrage waren sowohl eine Kontrolle der Aufzeichnung als auch ein Neustart der Aufzeichnung von Weihenstephan aus möglich.

4.5 Ergebnisse und Diskussion der Messkampagne mit Begrünungssystemen im Mustergebäude

Ziel dieses Projektes war es, die Untersuchungen nicht nur in einer Klimakammer mit modifizierbaren Bedingungen durchzuführen, sondern einen realen Einsatz des Begrünungssystems in Büroräumen zu prüfen. Damit verbunden sind unterschiedliche Randbedingungen in den Büroräumen bedingt durch das unterschiedliche Nutzerverhalten.

4.5.1 Wohlfühlaspekt

Um den Wohlfühlfaktor und das Befinden der Nutzer in einem Raum mit Begrünungssystem herauszufinden, wurde eine Nutzerbefragung durchgeführt.

In dieser Befragung wurde zuerst nach den Unterschieden hinsichtlich des Raumkomforts seit dem Einbau der Begrünungssysteme gefragt und ob die Begrünung einen Einfluss auf den Arbeitsalltag hatte. Ein weiterer Aspekt war der Versuchsaufbau in den Büros und inwiefern dieser als störend empfunden wurde. Die abschließende Frage handelte davon, ob die Begrünung dauerhaft in den Büros installiert werden sollte.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das Begrünungssystem die Raumluft im Winter feuchter machte und dieser Umstand positive Auswirkungen auf Haut- und Nasenschleimhäute hatte. Einen Einfluss auf den Arbeitsalltag nahm die Begrünung allerdings nicht. Als störend empfanden einige der Befragten die Pumpengeräusche, die aber durch einen Einbau von besonders leisen Pumpen minimiert werden könnten. Das künstliche Licht über dem Begrünungssystem markierte niemand als blendend oder störend, nachdem die Belichtungszeiten optimiert waren. Zeitweilig wurden Geruchsbelästigungen erwähnt. Diese hingen mit der technisch nicht korrekt ausgeführten Reduzierung der Begrünungsfläche in den kleineren Büros zusammen, die zur Stockfleckenbildung auf der nicht bewachsenen Seite geführt hatte. Ab dem Zeitpunkt der korrekten Abdeckung der trockenen Seite wurde kein moderiger Geruch mehr berichtet. Die Mehrheit der Befragten befürwortete eine dauerhafte Installation der Begrünungssysteme, da diese unter anderem auch als Sichtschutz in großen Büros fungieren kann.

Aus statistischer Sicht muss darauf hingewiesen werden, dass die geringe Anzahl der Probanden (n=8) keine belastbare Auswertung zulässt.

4.5.2 Pflanzenbauliche Auswertung

Pflanze

Das Pflanzenwachstum und -erscheinungsbild war während der gesamten Versuchslaufzeit gut (Abb. 57 bis Abb. 59). In Raum A.1.02 wiesen die Pflanzen ein geringfügig schlechteres Erscheinungsbild auf als in den anderen Räumen, da zu Beginn des Versuchszeitraumes die Bewässerungspumpe ausgefallen war und die Pflanzen dadurch Trockenstress erlitten hatten.

Aus der satt-grünen Blattfarbe, den kleinen Blattspreiten und den kurzen Internodien lässt sich ableiten, dass das Lichtangebot (Summe aus natürlichem Tageslicht und Zusatzbelichtung) für das Pflanzenwachstum ausreichend war. Das Pflanzenwachstum war nach oben zur Lichtquelle ausgerichtet.

Für gelegentlich aufgetretene Blattflecken konnte keine Ursache ermittelt werden – das Nährstoffangebot war optimal, Schädlinge wurden nicht festgestellt.

Abb. 57: Grüne Wand in Raum A.1.02 am 11.2.2015

Abb. 58: Grüne Wand in Raum B.2.01 am 11.2.2015

Abb. 59: Grüne Wand in Raum B.2.03 am 11.2.2015

Nährlösung

Abb. 60 zeigt den Verlauf des pH-Wertes und der Leitfähigkeit der Nährlösung während der Versuchslaufzeit vom 04.06.2014 bis 24.03.2015.

Die pH-Werte lagen trotz der überwiegenden Verwendung von Osmosewasser zwischen 7 und 8. Dennoch wurden keine durch den hohen pH-Wert verursachten Pflanzenschäden beobachtet.

Am 12.09.2014 wurde in allen Systemen ein kompletter Wasseraustausch vorgenommen, da vermutet wurde, dass ein moderiger Geruch im Raum durch verunreinigtes Wasser bedingt sein könnte. Allerdings wurde später festgestellt, dass der Geruch von dem durchfeuchteten Vlies der abgedeckten Hälfte ausging. Beim Wasserwechsel wurden alle Gefäße mit Osmose- und Leitungswasser im Verhältnis 1:1 unter Zusatz von 0,04 ‰ Dünger aufgefüllt. In der Folge ließen sich dann auch im Raum A.1.02 (Version 2 Grüne Wand) die Leitfähigkeiten auf die angestrebten 500 µS cm^{-1} einstellen. Diese lagen zu Versuchsbeginn bei 700 µS cm^{-1}, vermutlich bedingt durch eine hohe Düngung in der Anzuchtphase.

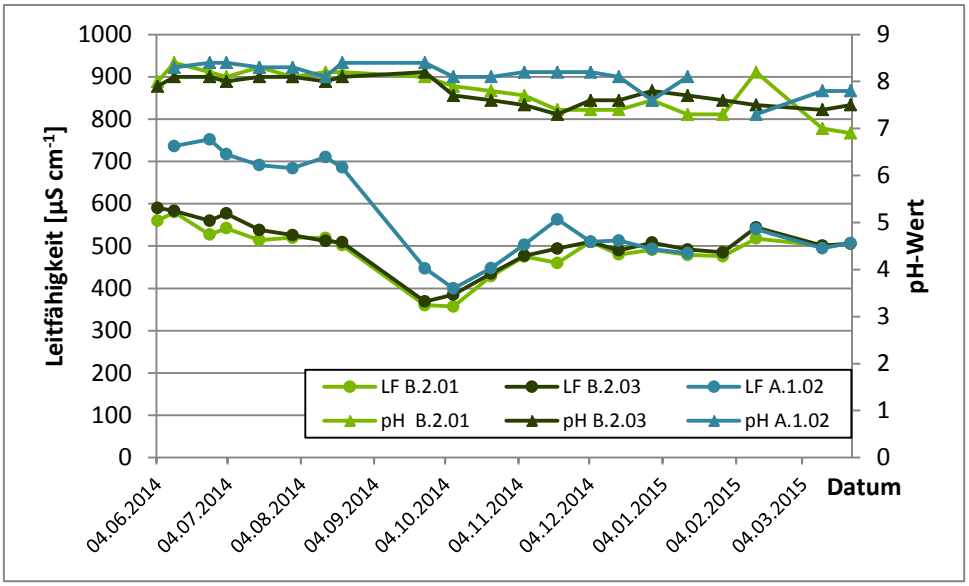


Abb. 60: Entwicklung des pH-Wertes und der Leitfähigkeit in der Nährlösung während der Versuchslaufzeit vom 04.06.2014 bis 24.03.2015

Die Gehalte an Stickstoff (N), Phosphat (P_2O_5) und Kalium (K_2O) (Tab. 25) lagen deutlich unter den üblicherweise im Objektbereich für Pflanzgefäße angestrebten Werten. Dies war allerdings beabsichtigt, um übermäßiges Wachstum der Pflanzen zu vermeiden und nur die Qualitätserhaltung der Pflanzen zu gewährleisten. Nährstoffmangelsymptome wurden nicht beobachtet.

Tab. 25: Analyse des Wassers und der Nährlösungen

Probe	Karbonat-härte °dH	Gesamt-härte °dH	pH-Wert	Leitfähig-keit (25°C) µS cm^{-1}	Salz g l^{-1}	N mg l^{-1}	P_2O_5 mg l^{-1}	K_2O mg l^{-1}
Leitungswasser	15	16	7,5	404	0,21	0	0,1	0,1
Osmosewasser	1	0	7,0	39	0,02	0	0,3	0,1
Raum A.1.02	10	14	7,6	529	0,28	19	6,2	17
Raum B.2.01	10	13	7,1	497	0,26	33	11,9	28,1
Raum B.2.03	11	13	7,5	493	0,26	27	13,2	34,3

Pumpen

In den Räumen B.2.01 und B.2.03, die mit der Version 1 der Grünen Wand ausgestattet waren, traten während der Versuchslaufzeit keine Probleme mit den Bewässerungspumpen auf. Gelegentlich wurde die Geräuschentwicklung durch die Pumpen als störend empfunden.

In Raum A.1.02, mit der Version 2 der Grünen Wand, traten wiederholt während des gesamten Versuchszeitraumes Probleme mit der Bewässerungspumpe auf. Diese äußerten sich in einer verminderten Pumpleistung bis hin zum Ausfall. Teilweise konnten Luftblasen bzw. Pflanzenfasern im Ansaugschlauch für die Probleme verantwortlich gemacht werden. Es war auch zwei Mal ein Austausch der Pumpe erforderlich.

Anpassung der Begrünungsfläche an die Raumgröße

Bei der Reduktion der Begrünungsfläche auf eine an die Raumgröße angepasste Teilfläche ist darauf zu achten, dass die wasserführende und die nicht bewachsene Seite handwerklich-technisch korrekt getrennt sind. Sonst kann es zu einer Durchfeuchtung der abgedeckten Seite kommen, die Schimmelbildung gekoppelt mit Modergeruch begünstigt. Die Verwendung einer angestrichenen Styroporplatte hat sich hierbei bewährt.

4.5.3 Wasserabgaben der Begrünungssysteme in den Büroräumen

Bei der Auswertung der Daten wurde der Wasserverbrauch durch die Begrünungssysteme mit der Wasserabgabe in Form von Evaporation durch die Oberfläche und Transpiration durch die Pflanzen als Beitrag zur Luftfeuchte gleich gesetzt. Der Einbau von Wasser in die Pflanzensubstanz wurde dabei vernachlässigt.

Anhand der nachgefüllten Wassermengen wurde für den gesamten Versuchszeitraum von Juni 2014 bis März 2015 der Wasserverbrauch durch die Begrünungssysteme ermittelt (Tab. 26). Im Mittel über alle Monate wurden von den beiden kleineren Begrünungen in den Räumen B.2.01 und B.2.03 jeweils 1 Liter pro Tag verbraucht. In dem größeren Büro mit der doppelten Begrünungsfläche lag der Verbrauch im Mittel bei 1,5 l pro Tag.

In der Summe wurden von den kleinen Begrünungssystemen 259 l bzw. 273 l und von dem großen System 425 l Wasser während der rund 10 Monate Versuchslaufzeit verbraucht.

Auch die Wasserabgabe als Wochensumme (Abb. 61) zeigt, dass die doppelte Fläche des Begrünungssystems in Raum A.1.02 nicht zu einer doppelt so hohen Wasserabgabe wie in den Räumen B.2.01 und B.2.03 mit halb so großer Begrünungsfläche führte. Begrünungs- und somit Verdunstungsfläche und Wasserabgabe verhielten sich nicht linear zu einander.

Die Wasserabgabe von den beiden reduzierten Wänden in Raum B.2.01 und B.2.03 verlief in vergleichbarer Höhe.

Tab. 26: Mittlerer, täglicher Wasserverbrauch ermittelt aus den Wassernachfüllmengen und Summe der im Versuchszeitraum gegebenen Wassermenge

Jahr	Monat	Wasserverbrauch MW [l d^{-1}]		
		Raum B.2.01	Raum B.2.03	Raum A.1.02
2014	Jun.	1,4	1,6	1,7
	Jul.	0,8	0,9	1,4
	Aug.	1,2	1,3	1,3
	Sep.	0,8	0,9	0,8
	Okt.	0,9	0,9	1,4
	Nov.	0,7	0,9	1,4
	Dez.	0,7	0,8	1,7
2015	Jan.	0,9	1,0	1,8
	Feb.	1,4	1,0	1,4
	Mär.	0,8	1,0	2,0
MW		**1,0**	**1,0**	**1,5**
Summe		**259 l**	**273 l**	**415 l**

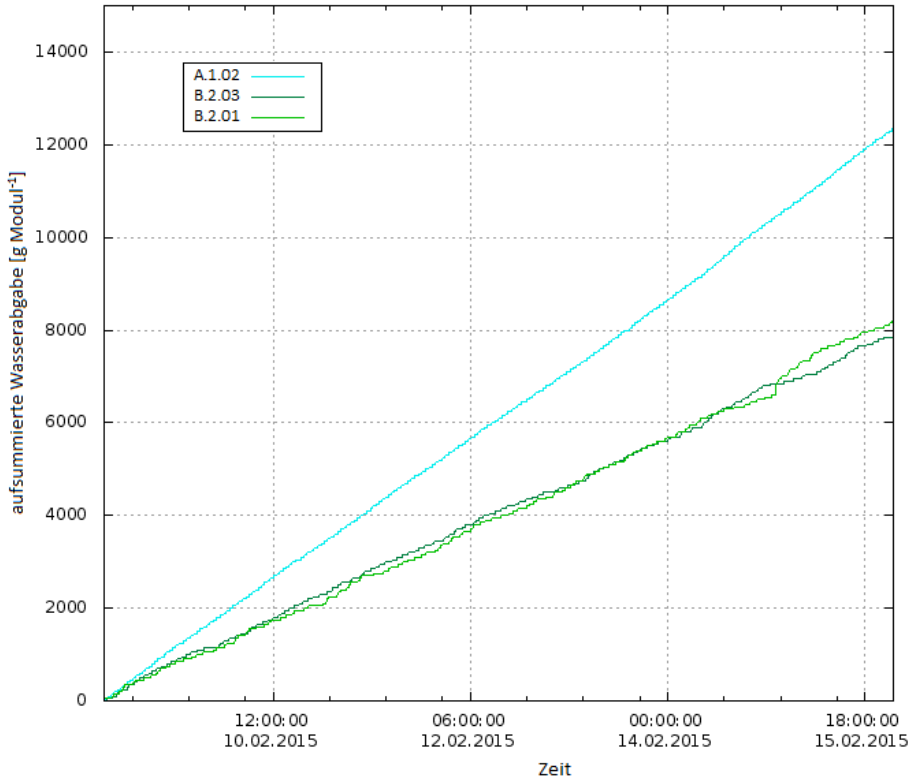


Abb. 61: Wasserabgabe durch die Begrünungssysteme (aufsummiert über 1 Woche) in den Räumen A.1.02, B.2.01 und B.2.03

Die Darstellung der Wasserabgabe durch die Begrünungssysteme in den Büroräumen erfolgte für den Zeitraum vom 16.12.2014 bis 12.03.2015, da dort die Wasserabgabe mit Hilfe des Masseverlustes der Systeme über die Waagen genau erfasst wurde.

Abb. 62 zeigt für diese Zeitspanne für den Raum A.1.02 den Verlauf der Wasserabgabe pro Modul in Form von Summen über jeweils einen Tag (∑ 24 h). Zusätzlich ist der Verlauf der relativen Luftfeuchte im Raum und der Raumtemperatur aufgetragen.

Wie zu erwarten, war der Verlauf der Wasserabgabe und der relativen Luftfeuchte gegenläufig zueinander: Bei niedriger relativer Luftfeuchte wurde viel Wasser abgegeben und bei hoher relativer Luftfeuchte deutlich weniger (siehe Selbstregulation 2.3).

Die Raumtemperaturen lagen im Tagesverlauf relativ konstant bei etwa 22 °C.

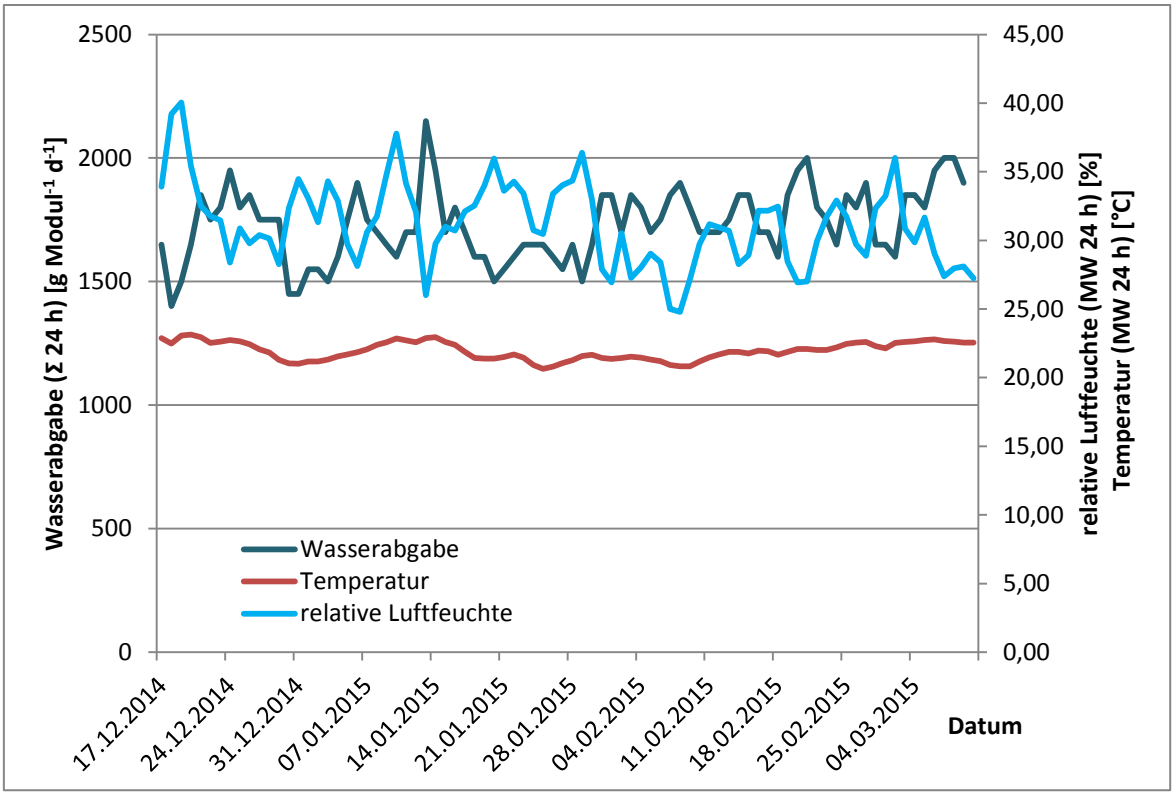


Abb. 62: Verlauf der Wasserabgabe (Σ 24 h) [g Modul^{-1} d^{-1}] , Raumlufttemperatur (MW 24 h) [°C] und relativen Luftfeuchte (MW 24 h) [%] in Raum A.1.02

In den Abb. 63 bis Abb. 66 wurden exemplarisch für den Raum A.1.02 die Wasserabgaben des Begrünungssystems über den Tagesverlauf aufsummiert. Zusätzlich wurden die Verläufe der relativen Luftfeuchten und Temperaturen im Raum dargestellt. Als Beispiele wurden ein Arbeitstag und ein Sonntag, jeweils an einem Tag mit niedriger und an einem Tag mit hoher Ausgangsluftfeuchte, ausgewählt. Die Abbildungen für die Büroräume B.2.01 und B.2.03 sind im Anhang unter Abb. 102 bis Abb. 109 zu finden.

Die Sonntage unterschieden sich von den Arbeitstagen durch ungestörte Verhältnisse bei den relativen Luftfeuchten, die daher sehr konstant waren. An den Arbeitstagen mit Nutzung der Räume, Tür- und Fensteröffnung usw. waren deutlich stärkere Schwankungen im Verlauf der relativen Feuchte zu beobachten.

In dem großen Büro A.1.02 wurden an einem ungestörten Sonntag bei einer Anfangsluftfeuchte von etwa 25 % ca. 1800 g Wasser relativ gleichmäßig verteilt über 24 h abgegeben (Abb. 63). Das entspricht einer Wasserabgabe von 75 g pro Stunde. Trotz dieser relativ hohen Wasserabgabe blieb die relative Luftfeuchte über den ganzen Tag konstant bei etwa 25 %.

Dagegen wurde bei einer höheren Anfangsluftfeuchte von ca. 38 % weniger Wasser (1600 g pro Tag = 67 g pro Stunde) durch die Begrünung im Tagesverlauf abgegeben (Abb. 64). Hier sank die relative Luftfeuchte im Laufe des Tages leicht auf ca. 34 % ab.

An einem Arbeitstag mit niedriger Anfangsluftfeuchte um etwa 25 % wurden gleichmäßig über den Tag verteilt in der Summe ca. 1700 g Wasser (= 71 g h^{-1}) in Büro A.1.02 abgegeben (Abb. 65). Während der Arbeitszeit schwankte die relative Luftfeuchte, um sich dann geringfügig höher als am Morgen bei ca. 28 % einzupendeln.

Dagegen wurde bei höherer Anfangsluftfeuchte von rund 35 % nur 1400 g Wasser (= 58 g h^{-1}) gleichmäßig verteilt über den Tag abgegeben (Abb. 66). Hier stieg die relative Luftfeuchte nach Schwankungen während der Arbeitszeit auf etwa 42 % an.

Im Raum B.2.01 wurde an einem ungestörten Sonntag ebenfalls eine konstante relative Luftfeuchte im Raum festgestellt. War diese zu Anfang niedrig (ca. 24 %) änderte sie sich auch durch eine Wasserabgabe von ca. 1100 g (= 46 g h^{-1}) über den Tag verteilt nicht (Abb. 102). Bei höherer Anfangsluftfeuchte von etwa 42 % wurde eine Wasserabgabe von nur 600 g in 24 h (= 25 g h^{-1}) gemessen, dabei fiel die relative Luftfeuchte im Tagesverlauf auf knapp 40 % ab (Abb. 103).
Bei niedriger Anfangsluftfeuchte wurde auch an dem Beispielarbeitstag mit ca. 1100 g so viel Wasser von der Begrünung abgegeben wie an dem Sonntag. Vermutlich war an diesem Tag wenig Betrieb in dem Büro, da die relative Luftfeuchte im Tagesverlauf vergleichsweise konstant blieb (Abb. 104). Bei höherer Luftfeuchte von etwa 42 % wurde auch an einem Arbeitstag mit 800 g in der Summe (33 g h^{-1}) deutlich weniger Wasser abgegeben und es kam abgesehen von kurzfristigen Schwankungen zu keiner Erhöhung der Luftfeuchte im Büro (Abb. 105).
Die im Vergleich zum Büro A.1.02 halbierte Begrünungsfläche im Büro B.2.01 führte zwar zu einer reduzierten Wasserabgabe, die sich aber nicht linear zur Flächenreduktion verhielt.

In dem Büro B.2.03 wurde am ungestörten Sonntag eine etwas höhere Wasserabgabe (1300 g in 24 Stunden = 54 g h^{-1}) durch das Begrünungssystem gemessen als in Büro B.2.01, obwohl die Luftfeuchte mit ca. 24 % und die Temperatur ähnlich lagen (Abb. 106). Bei höherer Anfangsluftfeuchte von etwa 42 % verliefen sowohl Luftfeuchte als auch Temperatur und Wasserabgabe (600 g in 24 h) analog zum Büro B.2.01 mit gleicher Raum- und Systemgröße (Abb. 107).
Auch an dem Arbeitstag mit niedriger Luftfeuchte verliefen Wasserabgabe, Luftfeuchte und Temperatur in den beiden kleinen Räumen sehr ähnlich (Abb. 108).
Allerdings wurde in Büro B.2.03 mit 600 g in 24 h weniger Wasser abgegeben als in Büro B.2.01, obwohl die höhere Ausgangsfeuchte mit etwa 45 % vergleichbar war. Sie unterlag allerdings in Büro B.2.03 weniger Schwankungen im Tagesverlauf (Abb. 109).

In den Räumen B.2.01 und A.1.02 erfolgte die Wasserabgabe ohne ersichtlichen Einfluss der Bewässerungszeitpunkte gleichmäßig über den Tag. Dagegen konnte für die Wasserabgabe in Raum B.2.03 an einigen Tagen tendenziell ein Einfluss der Bewässerungszeitpunkte festgestellt werden. Während der jeweils zweistündigen, nächtlichen Bewässerungspausen war keine bzw. nur eine geringe Wasserabgabe zu verzeichnen. Bei stündlicher Bewässerung am Tag erfolgte die Wasserabgabe gleichmäßig.

Ein Selbstregulationseffekt, wie er für die Versuche im Gewächshaus sowohl ohne als auch mit Begrünung beschrieben wurde, war für die Grünen Wände in den Büroräumen nicht anhand der über den Tag summierten Wasserabgaberaten feststellbar. Dies kann zum einen in dem relativ gleichmäßigen Verlauf der relativen Luftfeuchten in den Büroräumen begründet sein. Zum anderen wurde die Luftfeuchte nicht wie im Gewächshaus direkt vor dem System sondern im Raum gemessen. Dennoch zeigte sich der Selbstregulationseffekt anhand der Korrelationsrechnung und der zeitlichen Verläufe von Wasserabgabe und relativer Luftfeuchte über einen längeren Zeitraum.

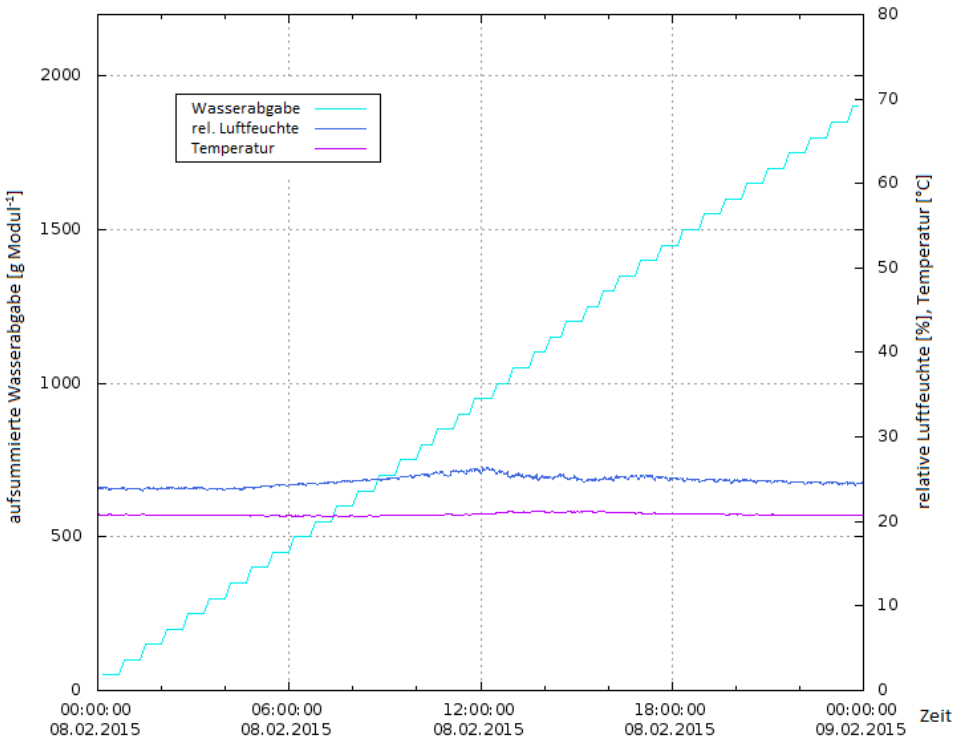


Abb. 63: Wasserabgabe durch das Begrünungssystem (aufsummiert über 24 h) in Raum A.1.02 an einem Sonntag bei niedriger relativer Luftfeuchte

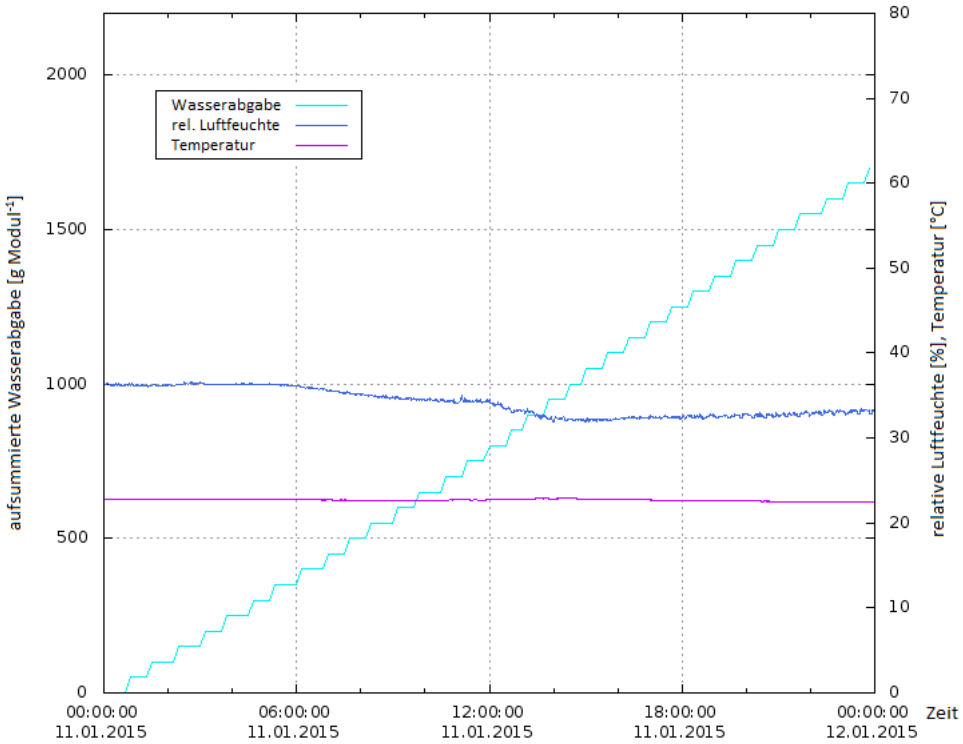


Abb. 64: Wasserabgabe durch das Begrünungssystem (aufsummiert über 24 h) in Raum A.1.02 an einem Sonntag bei höherer relativer Luftfeuchte

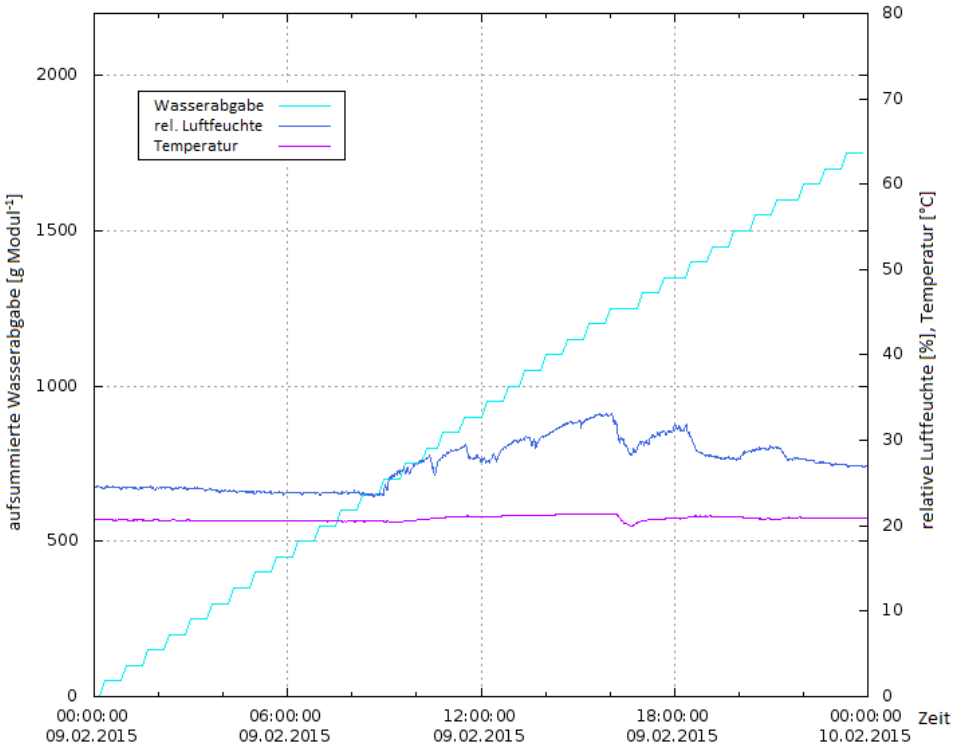


Abb. 65: Wasserabgabe durch das Begrünungssystem (aufsummiert über 24 h) in Raum A.1.02 an einem Arbeitstag bei niedriger relativer Luftfeuchte

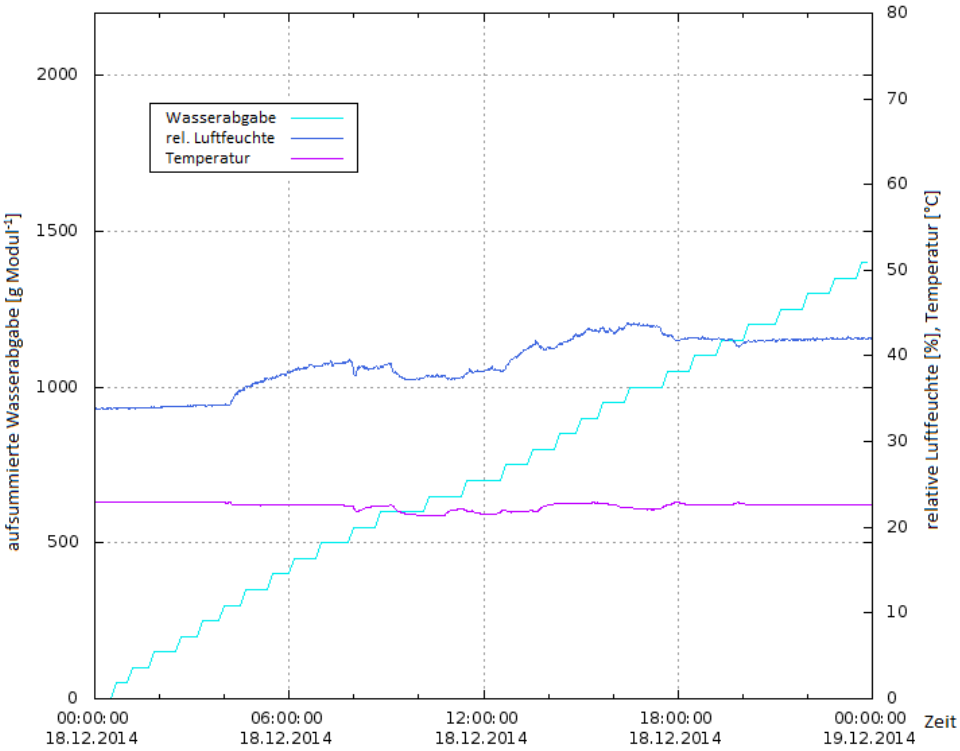


Abb. 66: Wasserabgabe durch das Begrünungssystem (aufsummiert über 24 h) in Raum A.1.02 an einem Arbeitstag bei höherer relativer Luftfeuchte

In Tab. 27 sind die Korrelationskoeffizienten (R^2) für die Beziehung zwischen Wasserabgabe und relativer Luftfeuchte bzw. Wassergehalt der Luft für die einzelnen Büroräume aufgeführt.

Es konnte nur für das große Büro A.1.02 eine zufriedenstellende Korrelation ($R^2 = 0,67$) zwischen Wasserabgabe und relativer Luftfeuchte ermittelt werden.

Der Bezug zwischen Wasserabgabe und Wassergehalt in der Raumluft ist in allen Büros geringer als zur relativen Luftfeuchte. Auch die Betrachtung der ungestörten Verhältnisse in der Nacht führte zu keiner Erhöhung der Korrelationskoeffizienten zwischen Wasserabgabe und Wassergehalt.

Zwischen der Wasserabgabe und der Raumtemperatur bestand keine statistisch belastbare Beziehung.

Tab. 27: Korrelationen zwischen Wasserabgabe und rel. Luftfeuchte, Wassergehalt bzw. Temperatur

Büro	**n**	**Korrelation (R^2) zwischen**			
		Wasserabgabe (Σ 24 h) [g Modul^{-1}] und **relativer Luftfeuchte** (MW 24 h) [%]	**Wasserabgabe** (Σ 24 h) [g Modul^{-1}] und **Wassergehalt** der Luft (MW 24 h) [g kg^{-1}]	**Wasserabgabe** (Σ 12 h **Nacht**) [g Modul^{-1}] und **Wassergehalt** der Luft (MW 12 h **Nacht**) [g kg^{-1}]	**Wasserabgabe** (Σ 24 h) [g Modul^{-1}] und **Temperatur** (MW 24 h) [°C]
A.1.02	83	0,67	0,34	0,28	0,13
B.2.01	63	0,27	0,21	0,03	0,04
B.2.03	63	0,46	0,33	0,15	0,41

Abb. 67 zeigt die Beziehung zwischen Wasserabgabe und relativer Luftfeuchte bzw. Temperatur und es wird deutlich, dass bei niedriger Luftfeuchte im Raum die Wasserabgabe im Vergleich zu hoher Luftfeuchte deutlich anstieg. Dies lässt sich mit der Selbstregulation des Begrünungssystems erklären (siehe 2.3). Ein Einfluss der Temperatur auf die Wasserabgabe war nicht feststellbar.

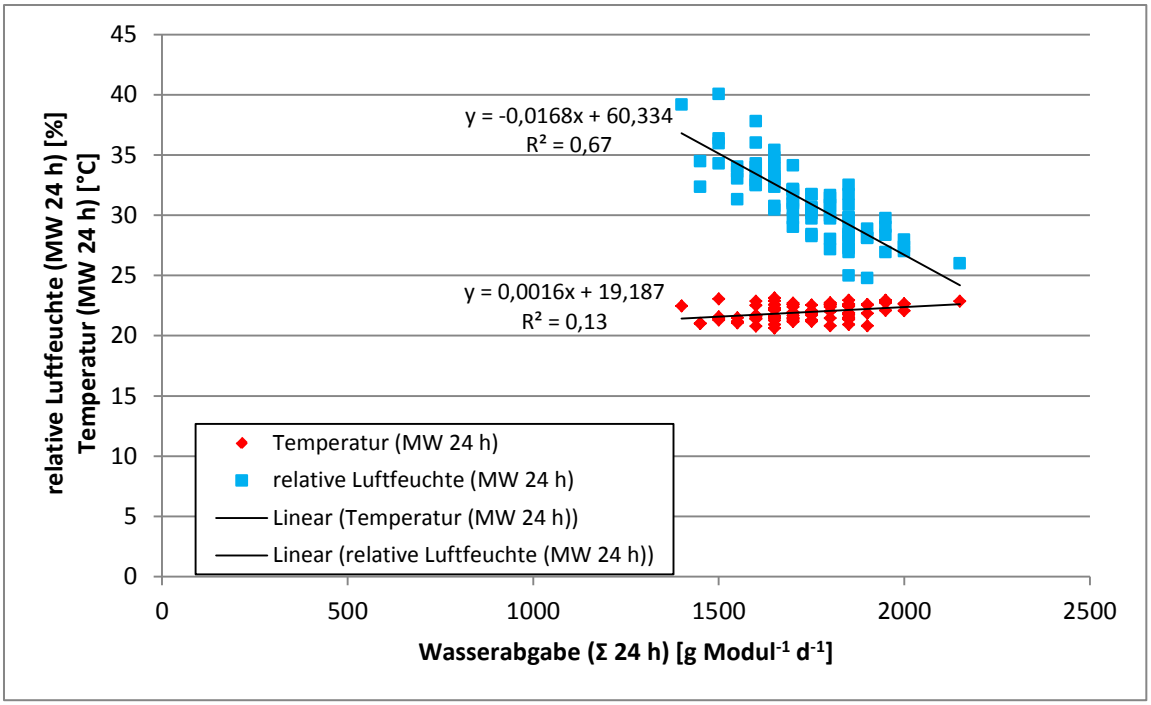


Abb. 67: Korrelation zwischen der Wasserabgabe (Σ 24 h) [g Modul^{-1} d^{-1}] und der relativen Luftfeuchte (MW 24 h) [%] bzw. der Temperatur (MW 24 h) [°C] in Raum A.1.02

Da die Räume über Fensterlüftung mit Frischluft versorgt werden, kann hier keine Aussage über den Einfluss der Luftwechselrate auf die Wasserabgabe gemacht werden, da die Luftwechselraten nicht zu ermitteln waren. Mit der Öffnung von Türen und Fenstern sowie der Raumnutzung durch den Menschen bestehen unkalkulierbare Einflussfaktoren auf die Höhe der sich einstellenden relativen Luftfeuchte.

4.5.4 Raumklimatische Charakteristika der untersuchten Büroräume

Das typische Tagesprofil eines Büroraumes mit einem Begrünungssystem im Vergleich zu einem Büro ohne Begrünungssystem weist nur geringe Unterschiede auf. Das Nutzungsmuster ist identisch mit dem in Kapitel 4.3.2 beschriebenen, welches unter anderem den Einfluss des Lüftungsverhaltens auf die Raumlufttemperatur, CO_2-Konzentration und die relative Raumluftfeuchte sowie den Wassergehalt dokumentiert.

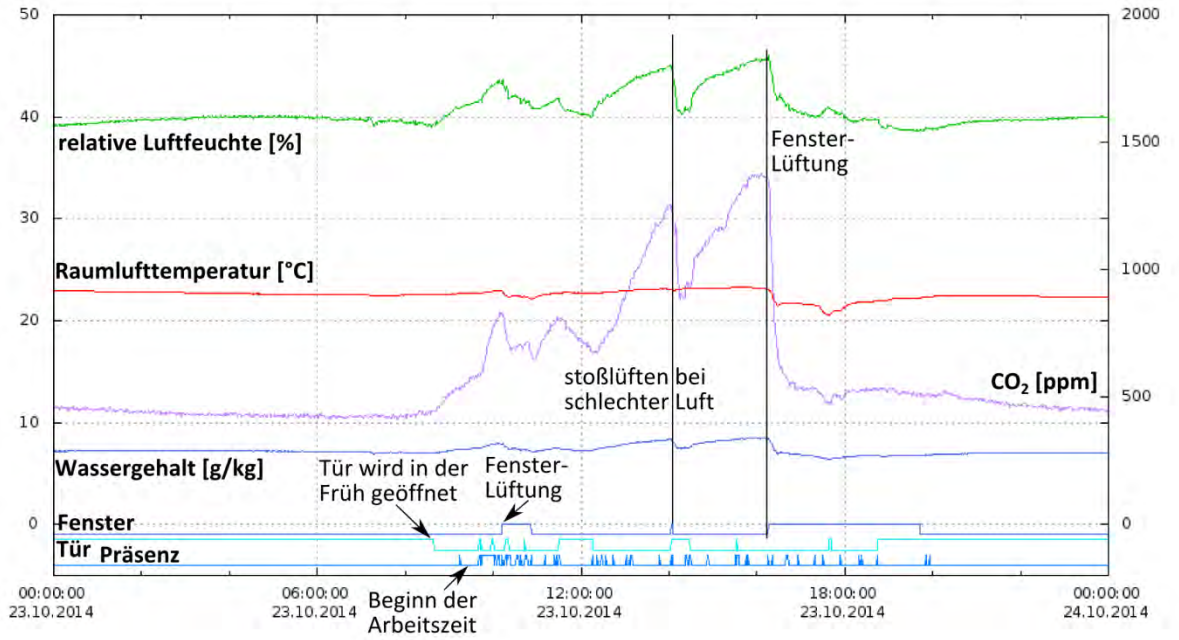


Abb. 68: Typisches Tagesprofil A.1.02 mit Begrünungssystem

Durch eine Montage der Tür- und Fensterschließkontakte können weitere Störfaktoren aufgezeigt werden, die auf die Raumklimatik Einfluss nehmen. In diesem Beispiel vom 23.10.2014 wurde um 08.15 Uhr die Tür geöffnet und um 10.00 Uhr die erste Fensterlüftung durchgeführt. Den direkten Luftaustausch mit der Außenluft verdeutlichen die zweite und dritte Fensterlüftung um 14 Uhr und 16 Uhr. Zudem kann auch die Vermischung der Raumluft mit der Luft auf dem Flur die Wirksamkeit eines Begrünungssystems beeinflussen. Insbesondere der Raum A.1.02 im BA3 stellt einen Sonderfall dar, da der Raum nicht an einen Flur, sondern an ein Großraumbüro mit automatischem Lüftungssystem anschließt und somit bei geöffneter Tür der Einfluss einer Lüftungsanlage existiert.

Das folgende Säulendiagramm (Abb. 69) zeigt prozentual die Häufigkeit der offenstehenden Türen und geöffneten Fenster. Allerdings wird hierbei nicht unterschieden, ob Tür und Fenster komplett oder nur teilweise geöffnet waren. Einen besonders hohen Anteil an einer geöffneten Tür wiesen die Räume A.2.01, B.1.02 und B.2.03 auf. Die übrigen beiden Räume (A.1.02 und B.2.01) dagegen hatten ihre Türen nur in der Hälfte der Zeit geöffnet. Speziell der Raum B.2.01, in dem neben einer geringeren Türöffnung auch das Fenster weniger geöffnet wurde, eignete sich sehr gut für eine klimatische Untersuchung mit einem Begrünungssystem.

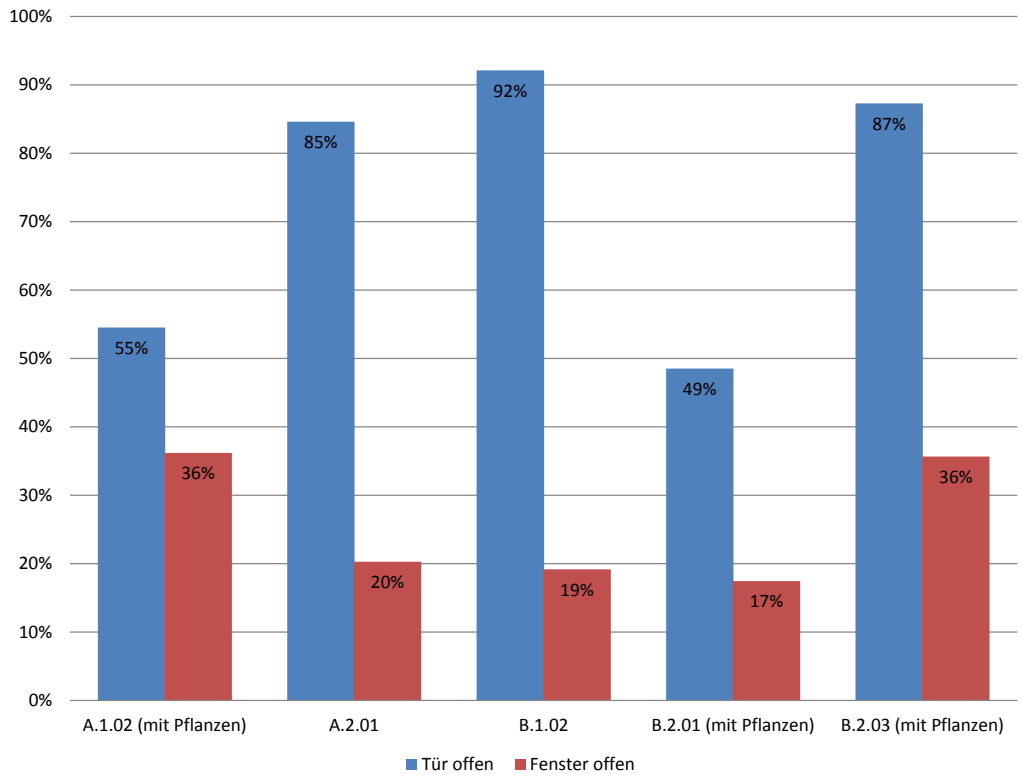


Abb. 69: Prozentuale Öffnungszeiten von Tür und Fenster während der Arbeitszeit (7:30 – 17:00 Uhr) über den gesamten Messzeitraum vom 09.06.2014 bis 27.03.2015

Die prozentualen Öffnungszeiten von Tür und Fenster während der Arbeitszeit im Messzeitraum Sommer, Übergang und Winter sind im Anhang (Abb. 110, Abb. 111, Abb. 112) hinterlegt.

4.5.5 Bewertung der Untersuchungszeiträume in Bezug auf kritische Luftfeuchten

Anschließend an die Bewertung der Untersuchungsräume aus dem ersten Messzeitraum in Kapitel 4.3.3 folgt die Auswertung der drei Büroräume mit Begrünungssystem im Vergleich mit den Referenzräumen in Form von Behaglichkeitsdiagrammen. Diese Diagramme definieren sich über die Raumlufttemperatur und die relative Raumluftfeuchtigkeit in Abhängigkeit des Wassergehalts der Außenluft oder in Abhängigkeit von der relativen Außenluftfeuchtigkeit oder der Außenlufttemperatur (siehe Anhang Abb. 113 bis Abb. 134). In den folgenden Diagrammen sind exemplarisch für alle Untersuchungsräume die Stundenmittelwerte der Raumluft in Abhängigkeit vom Wassergehalt der Außenluft in der Winterperiode und für den Raum B.2.01 in der Sommerperiode aufgetragen.

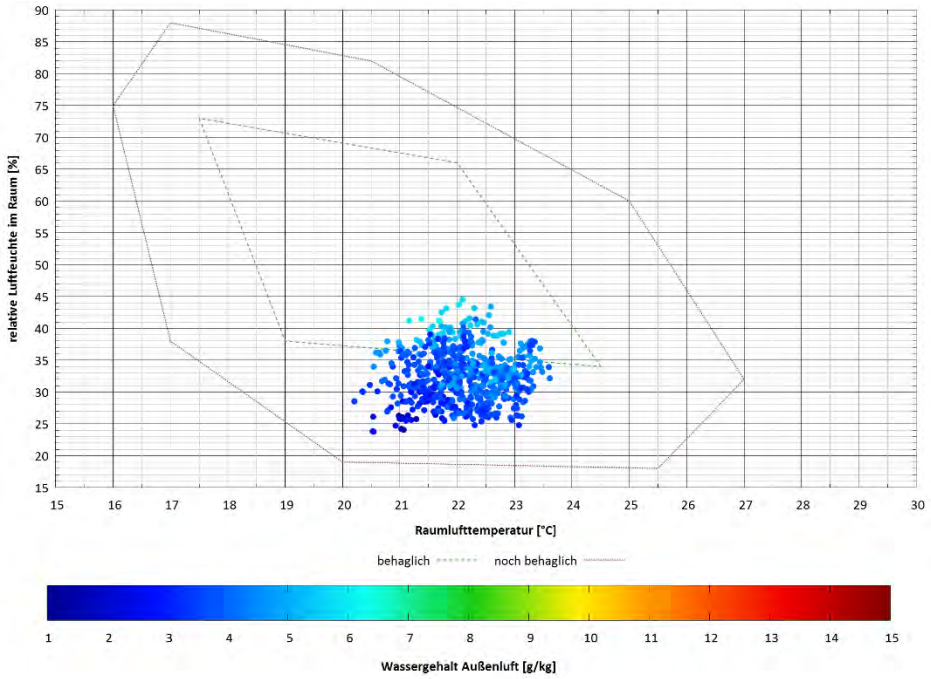


Abb. 70: Behaglichkeitsdiagramm A.1.02 mit Begrünungssystem für den Typtag Winter

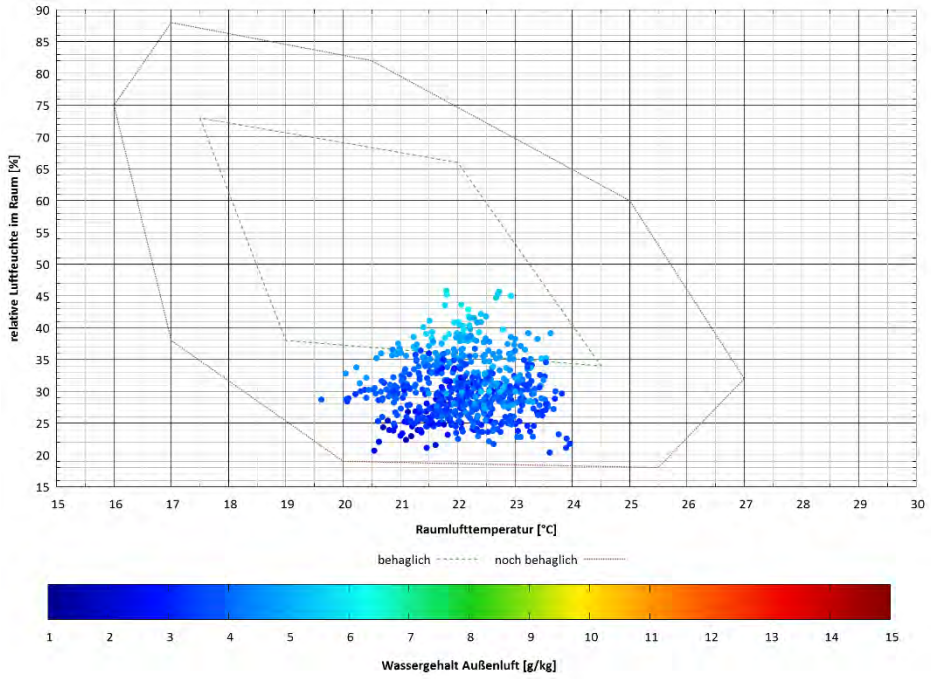


Abb. 71: Behaglichkeitsdiagramm A.2.01 Referenzraum für den Typtag Winter

Die Behaglichkeitsdiagramme stellen den Zusammenhang zwischen der relativen Luftfeuchte im Raum und der Raumlufttemperatur mit dem Wassergehalt der Außenluft dar. Dabei zeigte sich, dass in den beiden großen Büros alle Punkte im Behaglichkeitsbereich lagen und der Wassergehalt der Außenluft in den Wintermonaten unter 7 g kg^{-1} lag. Speziell der Referenzraum wies eine größere Temperaturspanne von 19 °C bis 24 °C auf und einige Punkte fielen unter 25 % relative Luftfeuchte, hingegen lag die relative Luftfeuchte des begrünten Raumes im Durchschnitt bei über 30 %.

Bei den kleinen Büros mit Begrünungssystem (B.2.01 und B.2.03) verschoben sich die Punktewolken in der Hinsicht, dass im Mittel eine höhere relative Luftfeuchte mit Ausreißern bis über 50 % relative Luftfeuchtigkeit und wärmere Raumlufttemperaturen erreicht wurden. Auch hier lagen einzelne Werte unterhalb von 25 % rF. Raumlufttemperaturen von über 24 °C waren vermehrt aufgetreten.

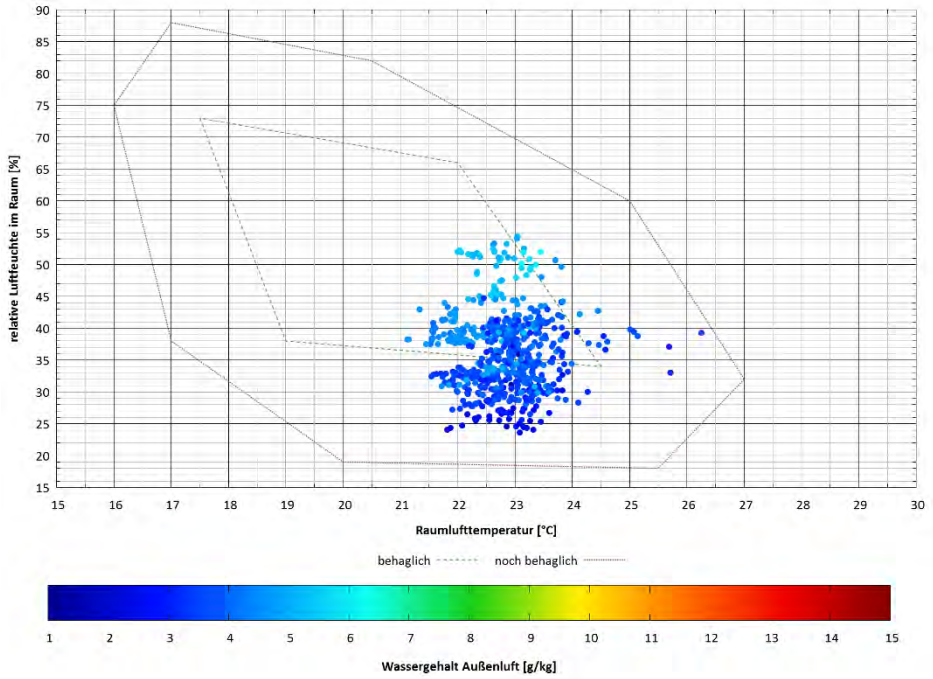


Abb. 72: Behaglichkeitsdiagramm B.2.01 mit Begrünungssystem für den Typtag Winter

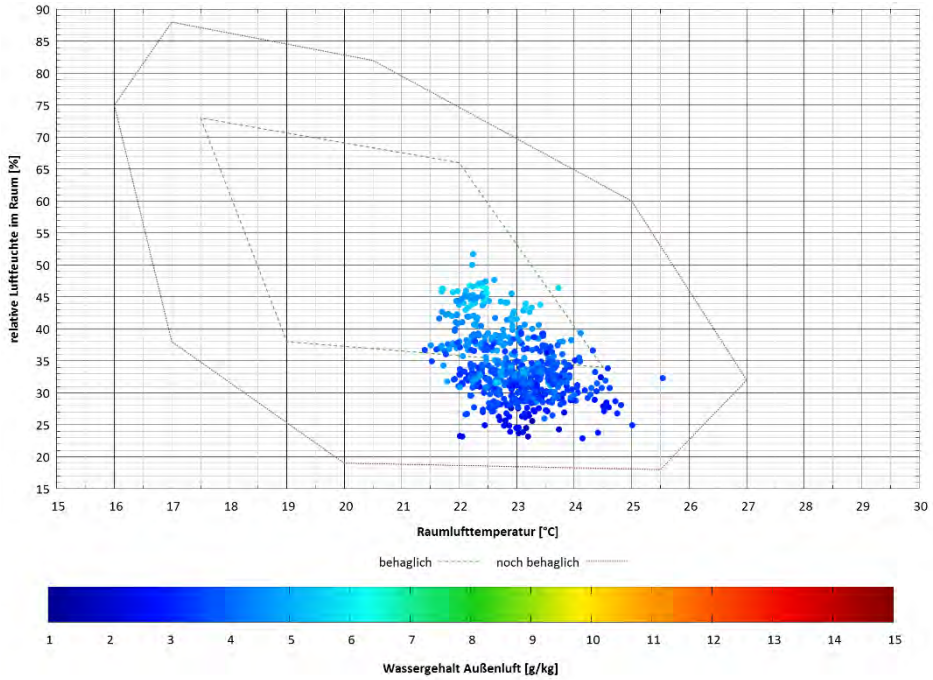


Abb. 73: Behaglichkeitsdiagramm B.2.03 mit Begrünungssystem für den Typtag Winter

Die Punktewolke des Referenzraumes (Abb. 74) lag bei einer kühleren Raumtemperatur (~19 °C – 23,5 °C) und ähnlichen Luftfeuchten (25 % – 50 %) genauso in den Behaglichkeitszonen wie die vorherigen Behaglichkeitsdiagramme. Die niedrigeren Raumlufttemperaturen resultierten vermutlich aus der Lage des Büros, das im 1.OG liegt und aufgrund der Verschattung durch das Nachbargebäude eine deutlich geringere solare Einstrahlung aufwies.

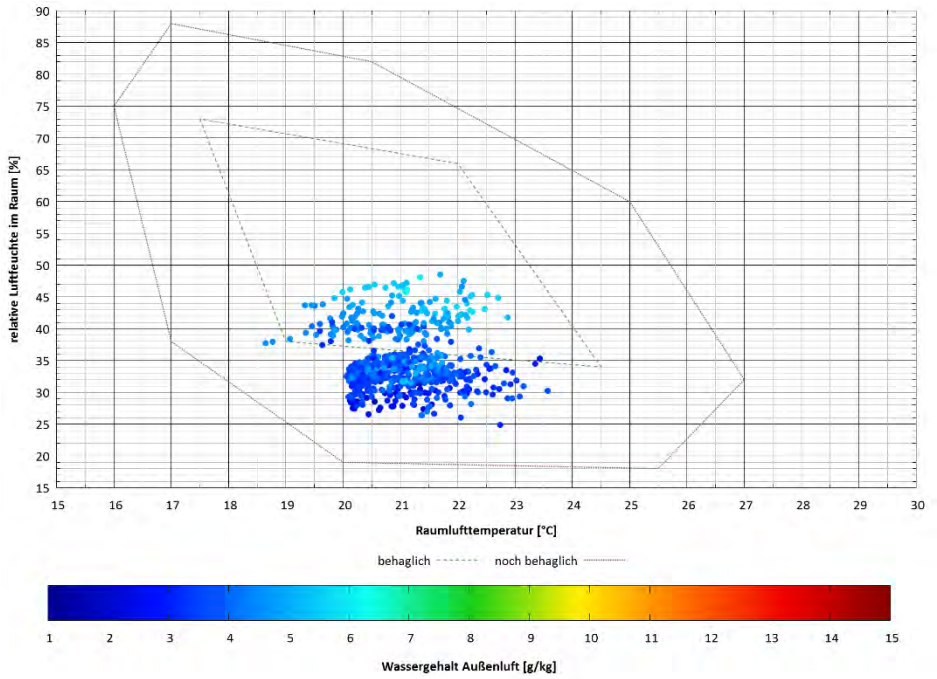


Abb. 74: Behaglichkeitsdiagramm B.1.02 Referenzraum in Abhängigkeit des Wassergehalts der Außenluft für den Typtag Winter

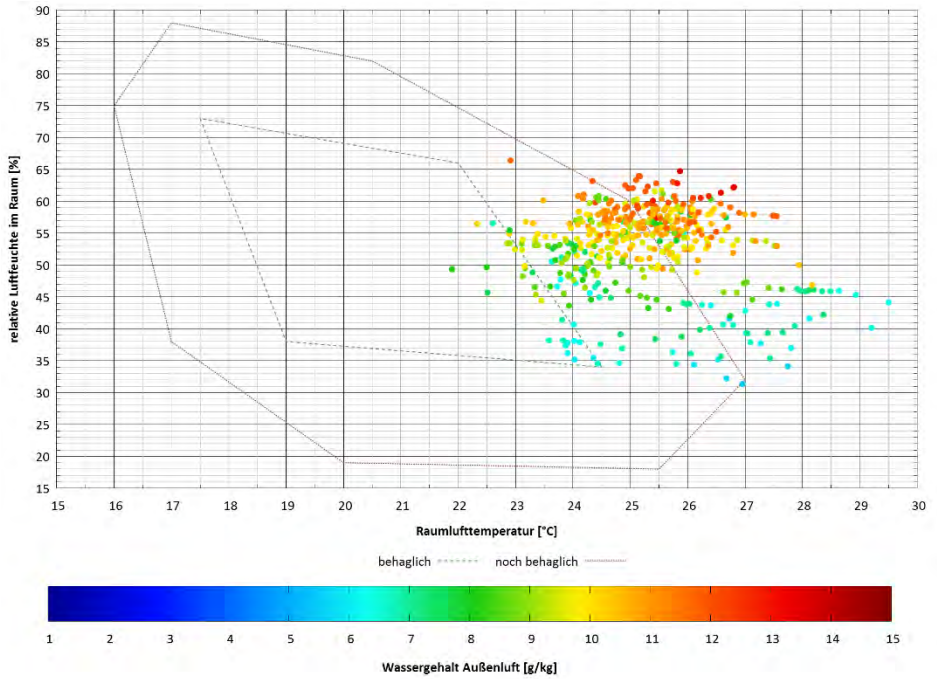


Abb. 75: Behaglichkeitsdiagramm B.2.01 mit Begrünungssystem für den Typtag Sommer

Der Vergleich der Behaglichkeitsdiagramme zwischen dem Typtag Winter und dem Typtag Sommer wird exemplarisch anhand des Raumes B.2.01 dargelegt. Dabei offenbaren sich extreme Unterschiede hinsichtlich des Wassergehaltes der Außenluft (erkennbar an den Farben der Punkte) und der relativen Luftfeuchte im Raum. Die Punktewolke hat sich aus dem mittleren, unteren Bereich der Komfortzone in die rechte obere Ecke der Zone verlagert und wies einige Punkte außerhalb der erweiterten Behaglichkeitszone aus. Nur wenige Werte lagen innerhalb des engeren Behaglichkeitsfelds. Die relative Luftfeuchte bewegte sich im Bereich von 30 % bis 65 %. Die Raumlufttemperaturen schwankten im Bereich von 22 °C bis 29,5 °C. Raumlufttemperaturen von über 26 °C waren keine Seltenheit.

Weitere Behaglichkeitsdiagramme zu den Typtagen Übergangs- und Sommerzeit sowie in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit und der Außenlufttemperatur sind im Anhang (Abb. 113 bis Abb. 134) hinterlegt.

Die Behaglichkeitsdiagramme haben gezeigt, dass in den untersuchten Räumen unterschiedliche Raumlufttemperaturen herrschten. Da die relative Luftfeuchte stark von der Lufttemperatur abhängt, wurde, um die Datenauswertung in den Behaglichkeitsdiagrammen vergleichbarer und auch die Relationen zwischen Außenluft und Raumluft deutlicher aufzuzeigen, ein t-x-Diagramm gewählt, in dem sowohl die Lufttemperatur [°C] und der Wassergehalt [g/kg] als auch die relative Luftfeuchtigkeit φ [%] ausgewiesen werden. Alle t-x-Diagramme sind auf einen Luftdruck von 956,68 hPa normiert. Dieser Luftdruck lässt sich aus der internationalen Höhenformel für eine Höhe von 482 m berechnen, was die offizielle Höhenangabe für Garching aus den Karten des Bayrischen Landesvermessungsamtes ist [17], [18]. Identisch zu den vorherigen Behaglichkeitsdiagrammen sind auch in den t-x-Diagrammen die Behaglichkeits- bzw. Raumkomfortzonen eingezeichnet.

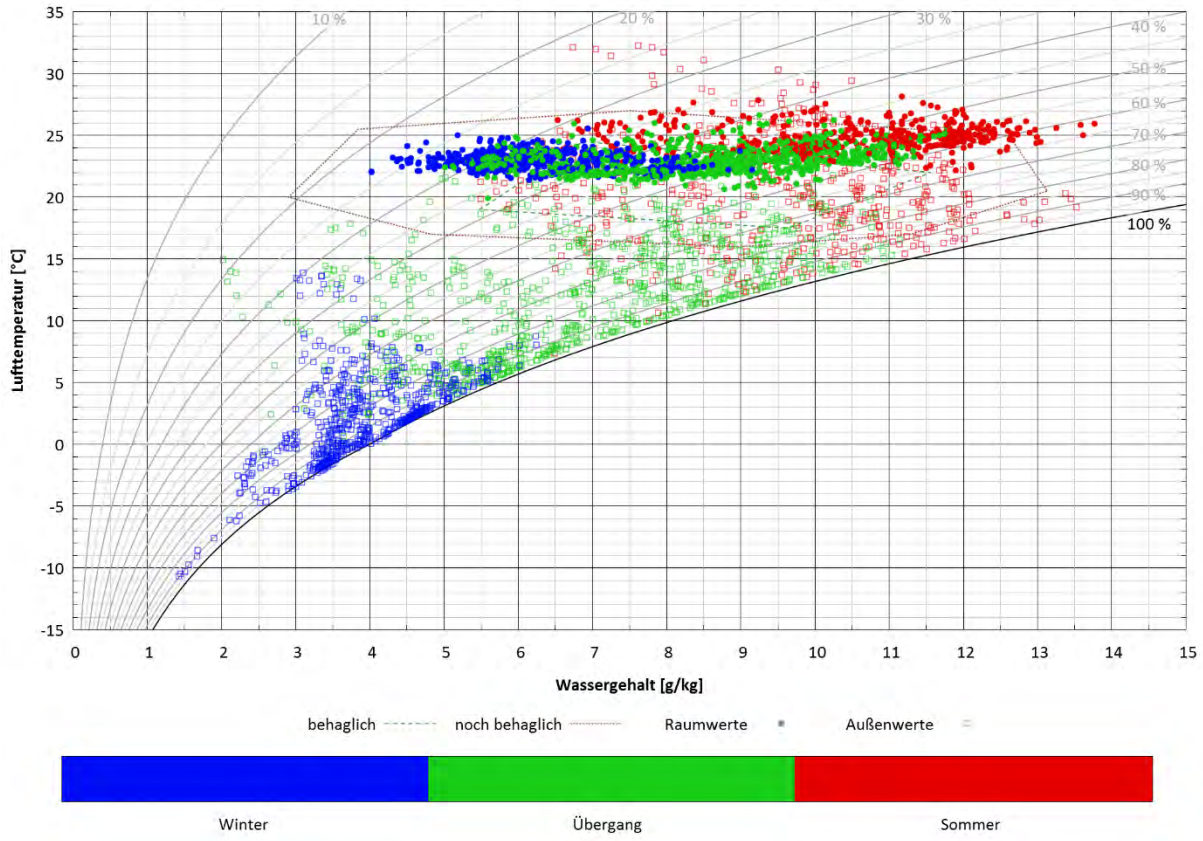


Abb. 76: t-x-Diagramm zu Raum B.2.03 mit Begrünungssystem, Stundenmittelwerte der Raum- und Außenluft

In Abb. 76 sind die Stundenmittelwerte der Raum- und Außenluft des Raumes B.2.03 nach Sommer (rot), Übergang (grün) und Winter (blau) kategorisiert. Jeder Raumwert (gefüllter Punkt) wird durch die Lufttemperatur, den Wassergehalt und die relative Luftfeuchtigkeit definiert und bezieht sich auf den dazugehörigen Außenwert (ungefüllter Punkt). Im Sommer lagen einzelne Punkte in diesem Beispiel außerhalb der Behaglichkeitszone.

Das t-x-Diagramm verdeutlicht die Beziehung zwischen Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit und Wassergehalt. Die Sättigungsdampfdrucklinie (100 % relative Luftfeuchtigkeit) stellt eine Randbedingung bzw. ein Maximum der relativen Luftfeuchtigkeit dar. Entlang dieser Sättigungslinie werden bei kalten Temperaturen geringe Wassergehaltswerte und mit dem Anstieg der Lufttemperatur immer höhere Wassergehalte erreicht. Unterhalb der Sättigungslinie findet eine Kondensation statt. Oberhalb der Sättigungslinie ist der Wassergehalt unabhängig von der Lufttemperatur, da die Luft beispielsweise bei einem Wassergehaltswert von 3 g kg^{-1} Temperaturen von -4 °C (98 % Luftfeuchte), 3 °C (60 %) oder auch 13,5 °C (30 %) einnehmen kann. Weitere Diagramme zu den übrigen Räumen sind im Anhang (Abb. 135 bis Abb. 138) zu finden.

Um die Vergleichbarkeit der Raumwerte der Punktewolken mit denen der Außenwerte herzustellen, wurden aus den Punktewolken Mittelwerte gebildet. Dabei wurden die Punkte anhand der Außenlufttemperatur in 5-Kelvin-Schritten kategorisiert. Gemäß der nachfolgenden Abb. 77 ergaben sich insgesamt neun Kategorien für die Außenlufttemperatur. Jeder Mittelwert wurde aus Anschaulichkeitsgründen mit dem Punkt der nächsten Kategorie durch eine Linie verbunden.

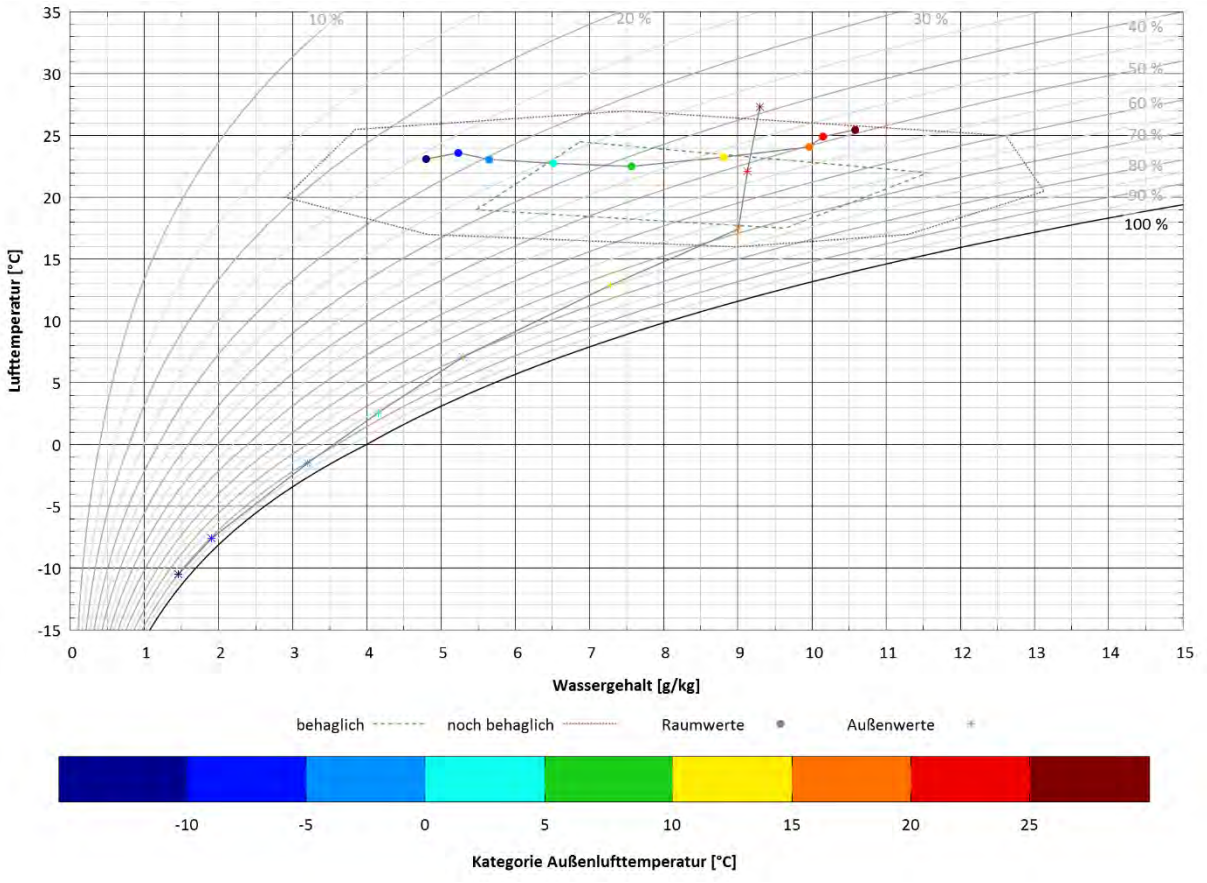


Abb. 77: t-x-Diagramm zu Raum B.2.03 mit Begrünungssystem, kategorisiert nach der Außenlufttemperatur in 5 Kelvin Schritten

Beispielsweise liegt der hellblaue Punkt bei einer Außentemperatur von -1,5 °C, einem Wassergehalt von 3,2 g kg^{-1} auf der 90 % Luftfeuchtigkeitslinie. Analog dazu weist der hellblaue Punkt im Raum eine Temperatur von 23 °C, einen Wassergehalt von 5,6 g kg^{-1} und eine relative Luftfeuchtigkeit von knapp über 30 % auf und befindet sich daher in der noch behaglichen Komfortzone. Im Gegensatz zur vorherigen Abbildung liegen hier alle Raumwerte in der Behaglichkeitszone. Im Bereich von 0 °C bis 15 °C Außenlufttemperatur finden sich die korrelierenden Raumwerte im engen Behaglichkeitsbereich wieder.

Sowohl die Außen- als auch die Raumluftwerte stellen eine Wassergehaltszunahme in Relation zum Anstieg der Außenlufttemperatur dar, z. B. ein Anstieg des Wassergehaltes im Raum von 4,8 g kg^{-1} auf 10,6 g kg^{-1}. Auch die relative Luftfeuchtigkeit weitet sich im Raum von ca. 25 % bis auf 50 % aus. Weitere t-x-Diagramme dieser Kategorie sind im Anhang hinterlegt (Abb. 139 bis Abb. 142).

Welchen Anteil davon das Begrünungssystem beiträgt, wird in den folgenden Kapiteln erläutert, indem ein ausführlicher Vergleich zwischen den Räumen mit Begrünungssystem und den Referenzräumen erfolgt.

4.5.6 Veränderung des Raumkomforts durch Begrünung im Vergleich zum unbegrünten Referenzraum im gleichen Versuchsjahr

Bei dem Vergleich der zuvor gezeigten Behaglichkeitsdiagrammen in den Abb. 70 bis Abb. 75 mit den entsprechenden Referenzräumen lassen sich nur geringe Veränderungen erkennen und auf das Begrünungssystem zurückführen. Daher wird in den folgenden Kapiteln der Raumkomfort mit Hilfe des t-x-Diagrammes und den entsprechenden Wassergehaltsvergleichen analysiert und zudem der Einfluss des Begrünungssystems während und nach der Arbeitszeit untersucht.

„Während der Arbeitszeit“ definiert sich als Untersuchungszeitraum – werktags von 07:30 Uhr bis 17:30 Uhr – mit einer hohen Personenpräsenz in den Büros.

Die Zeiten „außerhalb der Arbeitszeit“ sind definiert von 17:00 Uhr bis 23:59 Uhr und von 00:00 Uhr bis 7:30 Uhr während eines Werktags sowie ganztags an den Wochenenden und während der Weihnachtspause (24.12.14 -5.1.15).

Da der Verlauf der relativen Luftfeuchte von dem Verlauf des Wassergehalts und der Raumlufttemperatur abhängig ist, wurde für die Darstellung der Differenzen zwischen den begrünten und unbegrünten Büros der Wassergehalt dargestellt, um die Berechnung von Differenzen zu ermöglichen.

Abb. 78 zeigt den Verlauf des Wassergehalts in der Raumluft des großen Büros mit Begrünung (A.1.02) und in dem dazugehörenden Referenzraum ohne Begrünung (A.2.01) für den gesamten Versuchszeitraum. Von Juni bis Mitte Dezember lagen die Wassergehalte (Mittelwerte über 24 h) in beiden Büros zwischen 7 und 13 g kg^{-1}, wobei keine eindeutigen Unterschiede zwischen dem begrünten und dem unbegrünten Büro festzustellen waren. Allerdings ist eine Befeuchtung der Luft bei hohen Wassergehalten unerwünscht, um eine Überfeuchtung zu vermeiden.

Ab Ende Oktober sank der Wassergehalt in beiden Büros dauerhaft unter 8 g kg^{-1}. Ab Mitte Dezember lagen die Wassergehalte meist unter 6 g kg^{-1} und bei diesen niedrigen Ausgangswerten zeigte sich eine Differenzierung zwischen begrüntem und unbegrüntem Büro. Dieses ist im Detail in Abb. 143 (im Anhang) dargestellt. Bei niedrigen Wassergehalten unter etwa 6 g kg^{-1} lagen die Wassergehalte in der Raumluft des begrünten Büros von Mitte De-

zember 2014 bis Mitte März 2015 in der Regel deutlich über den Wassergehalten des unbegrünten Büros - eine positive Wirkung der Begrünung auf den Wassergehalt in der Raumluft ist unter diesen Bedingungen also festzustellen und auch gewünscht.

Auch hier zeigte sich der Selbstregulierungseffekt der Grünen Wand in den Sommermonaten und der Übergangszeit durch eine geringere Wasserabgabe.

.

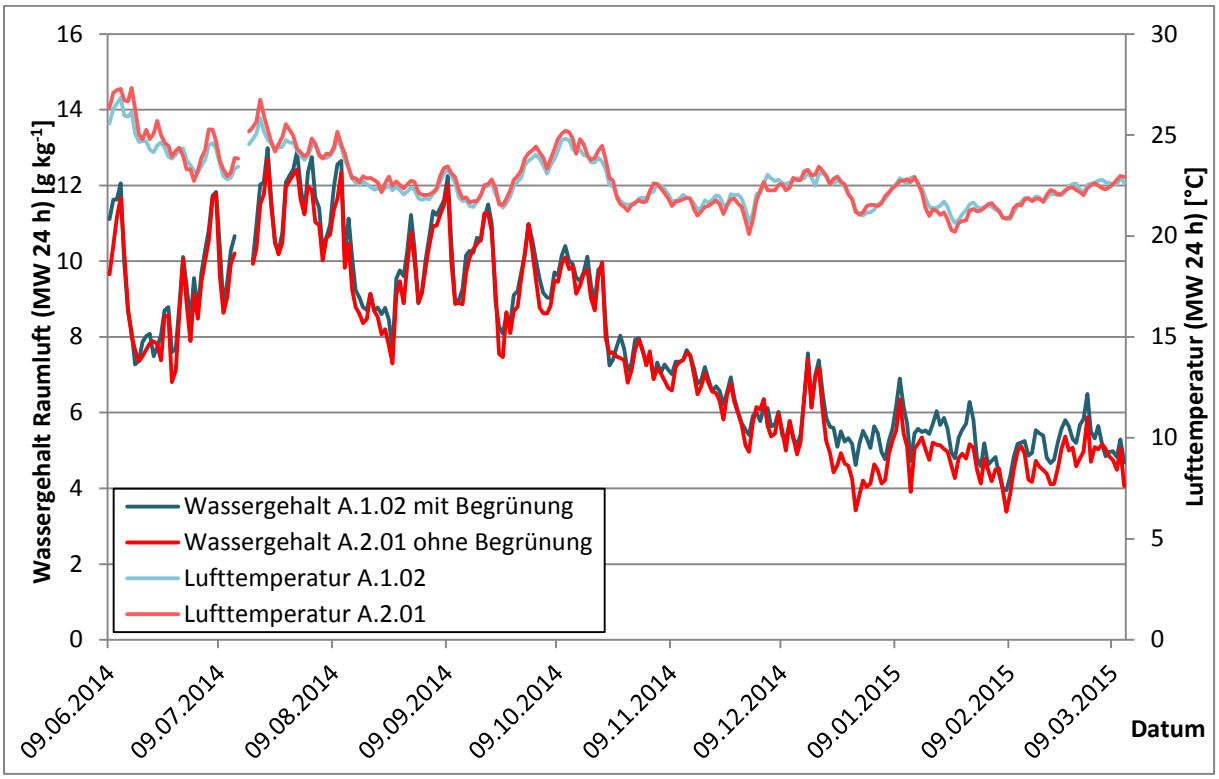


Abb. 78: Vergleich der Wassergehalte in der Raumluft (MW über 24 h) im großen Büro mit Begrünung (A.1.02) und ohne Begrünung (A.2.01) im Zeitraum vom 09.06.2014 bis 12.03.2015

In Abb. 79 wird der Vergleich zwischen dem begrünten Raum A.1.02 mit dem unbegrünten Referenzraum A.2.01 im t-x-Diagramm herangezogen. Die Wertepaare einer Außenlufttemperatur-Kategorie (z. B. -10 °C) zeigen den Anstieg des Wassergehalts im Raum auf. Dieser ist bei kalten Außentemperaturen im Mittel deutlich höher als bei warmen Temperaturen. Die ersten sechs Punkte von unter -10 °C bis 15 °C Außenlufttemperatur (dunkelblau bis gelb) weisen kaum eine Raumlufttemperaturdifferenz zum Raum mit Begrünungssystem auf (eingestellter Sollwert der Temperaturregelung 19,3 °C). Dagegen ist jeder einzelne Punkt nach rechts verschoben und weist auf einen höheren Wassergehalt und relative Luftfeuchtigkeit aufgrund des Begrünungssystems hin. Durch den Vergleich bzw. Verlauf der Wassergehalte – in der vorherigen Abbildung – wird dieser Effekt bestätigt. Der Wassergehalt mit Begrünungssystem liegt bei kalten Außenlufttemperaturen bis 5 °C um bis zu 0,5 g kg^{-1} höher als der beim Referenzraum. Bei wärmeren Temperaturen fällt die Differenz deutlich niedriger aus.

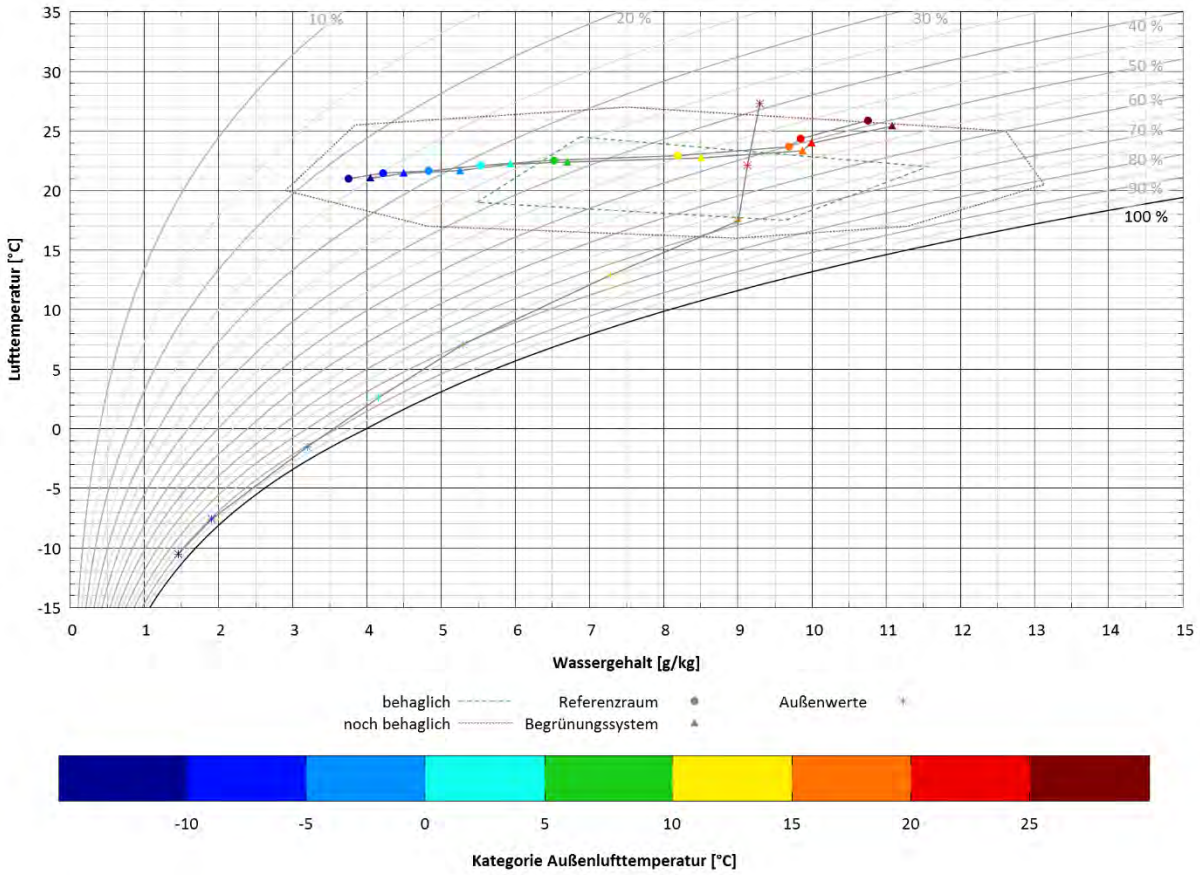


Abb. 79: t-x-Diagramm zu Raum A.1.02 mit Begrünungssystem und zu Referenzraum A.2.01 ohne Begrünungssystem kategorisiert nach der Außenlufttemperatur in 5-Kelvin-Schritten

Für den Verlauf der Wassergehalte der kleineren Büros ergab sich ein ähnliches Bild – B.1.02 als Kontrolle ohne Begrünung mit B.2.01 und B.2.03 jeweils mit Begrünung (Abb. 80). Von Mitte Juni 2014 bis Anfang Oktober lagen die Wassergehalte in der Raumluft zwischen 7 und 14 g kg^{-1}, dabei waren keine eindeutigen Unterschiede zwischen den unbegrünten und begrünten Räumen festzustellen. Tendenziell lag der Wassergehalt in Raum B.2.01 mit Begrünung etwas über dem des Referenzraums und dem anderen begrünten Büro (B.2.03), die beide auf etwa gleichem Niveau verliefen. Zwischen Mitte September und Mitte Oktober waren die Wassergehalte mit 8 bis 12 g kg^{-1} etwas niedriger als zuvor. Auch hier lagen sie in Büro B.2.01 tendenziell höher. Eine klare Differenzierung zwischen den begrünten und unbegrünten Büros wird ab Mitte Oktober bei Wassergehalten unter 10 g kg^{-1} sichtbar. Die Wassergehalte im unbegrünten Referenzraum lagen deutlich niedriger als in den begrünten Büros, wobei der Wassergehalt in Raum B.2.01 immer deutlich über dem von Raum B.2.03 lag (Abb. 144, Anhang). Dieser Unterschied bei gleicher Raumgröße und Begrünungsfläche lässt sich durch das Nutzerverhalten in den beiden Büros erklären. In Raum B.2.03 stand die Türe die meiste Zeit des Tages offen (87 %) und somit fand ein steter Luft- und auch Feuchteaustausch mit dem Flur statt. Zusätzlich war auch das Fenster zu 36 % der Zeit geöffnet. Bei Raum B.2.01 war sowohl die Türe (49 %) als auch das Fenster (17 %) überwiegend geschlossen und somit trug die Wasserabgabe des Begrünungssystems in erster Linie zur Erhöhung des Wassergehaltes in der Raumluft bei (siehe Abb. 69).

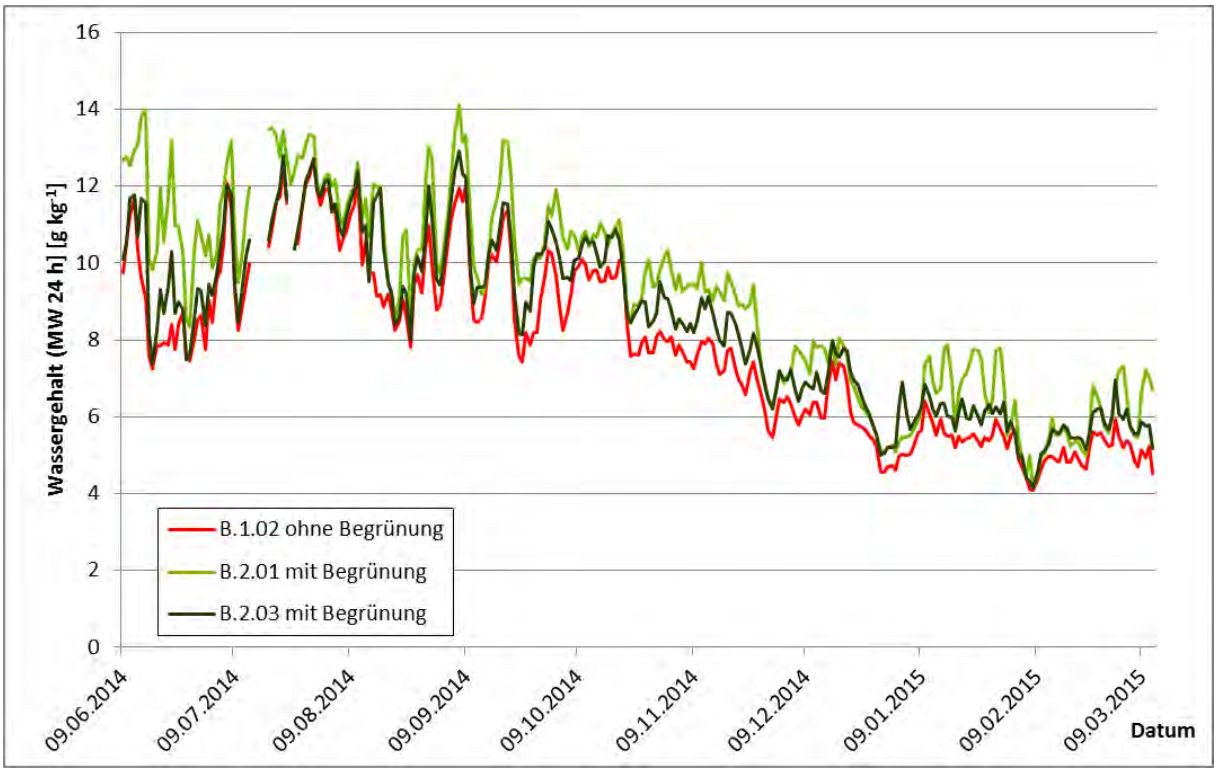


Abb. 80: Vergleich der Wassergehalte in der Raumluft (MW über 24 h) in kleinen Büros mit Begrünung (B.2.01 und B.2.03) und ohne Begrünung (B.1.02) im Zeitraum vom 09.06.2014 bis 12.03.2015

Auch für die Unterschiede im Niveau der Wassergehalte zwischen den großen und den kleinen Büros ist das Nutzerverhalten mitverantwortlich. Der Wassergehalt im großen begrünten Büro lag im Mittel für den gesamten Versuchszeitraum mit 7,87 g kg^{-1} deutlich niedriger als in den kleineren begrünten Büros mit 9,14 und 8,44 g kg^{-1} (Tab. 28). Das Luftvolumen im Verhältnis zur Begrünungsfläche unterschied sich nicht zwischen den großen und kleinen Büros und bietet daher keine Erklärung für die unterschiedlichen Niveaus der Wassergehalte.

Tab. 28: Minimal-, Maximal- und Mittelwerte der Wassergehalte in der Raumluft in den begrünten und unbegrünten Büros (09.06.14 - 12-03.2015) sowie Luftvolumen des Raumes

	Wassergehalt in der Raumluft (MW 24 h) [g kg^{-1}]				
	A.1.02 mit Begrünung	A.2.01 ohne Begrünung	B2.01 mit Begrünung	B.2.03 mit Begrünung	B1.02 ohne Begrünung
Min	3,95	3,38	4,15	4,16	4,07
Max	12,99	12,70	14,10	12,91	12,70
Mittelwert	7,87	7,52	9,14	8,44	7,80
Luftvolumen [m³]	103	74	53	53	53
Luftvol./Begrünungsfläche	72	-	73	73	-

Der Vergleich der Minimal-, Maximal- und Mittelwerte zeigte, dass für die beiden großen Büros nur geringe Unterschiede hinsichtlich des Wassergehaltes im begrünten und unbegrünten Raum bestanden (Tab. 28). Diese müssten aufgrund der Raumnutzeranzahl von 4 Personen im begrünten (A.1.02) und 3 Personen im unbegrünten Raum (A.2.01) sowie der ge-

ringeren Türöffnungszeiten im begrünten Raum deutlicher ausfallen. Die größten Unterschiede durch die Begrünung wurden in Raum B.2.01 mit überwiegend geschlossener Zimmertür festgestellt. Für Raum B.2.03 mit häufig geöffneter Tür waren die Unterschiede zum Referenzraum sowohl bei den Minimal- und Maximal- als auch bei den Mittelwerten der Wassergehalte weniger stark ausgeprägt.

Um den Einfluss des Begrünungssystems auf das Klima im Büro im Vergleich zum unbegrünten Referenzraum darzustellen, wurden in der Abb. 81 aus den Stundenmittelwerten – ähnlich der Abb. 76 – Durchschnittswerte sowohl für den begrünten als auch den unbegrünten Raum gebildet und in Beziehung zu den Außenwerten in Form von Verbindungspfeilen gebracht. Zusätzlich erfolgte eine Aufteilung der Werte in die Typtage Sommer, Übergang und Winter. Über den Pfeilen steht jeweils der Differenzwert des Wassergehaltes.

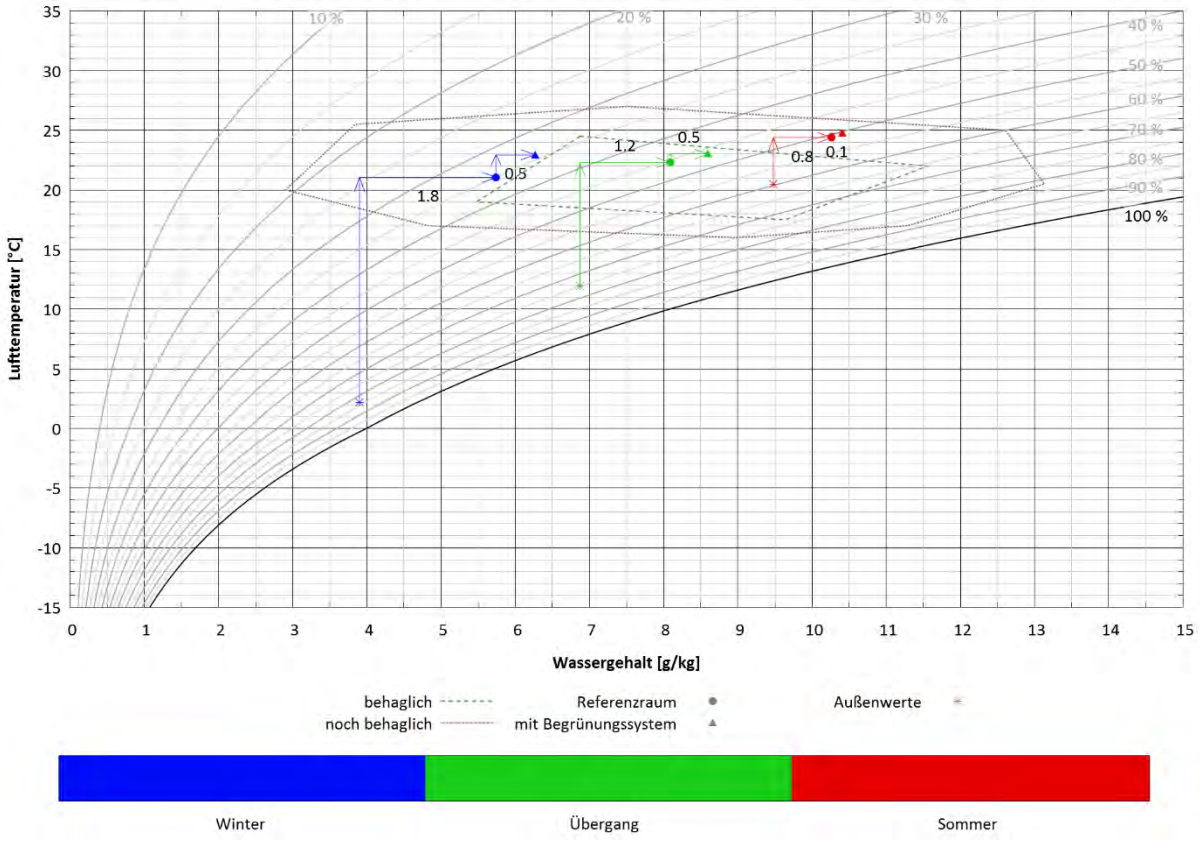


Abb. 81: t-x-Diagramm zu Raum B.2.03 mit Begrünungssystem im Vergleich zum Referenzraum B.1.02

Im Winterdurchschnitt (blau) lagen die Außenwerte bei über 2 °C Lufttemperatur, einem Wassergehalt von 3,9 g kg^{-1} und einer relativen Luftfeuchtigkeit von fast 85 %. Der Referenzraum B.1.02 wies im Mittel eine Lufttemperatur von 21 °C, eine relative Luftfeuchtigkeit von 35 % und einen Wassergehaltsanstieg gegenüber des Außenwertes um 1,8 g kg^{-1} auf 5,7 g kg^{-1} auf. Im Büro B.2.03 erhöhte sich der Wassergehalt um 0,5 g kg^{-1} potenziell durch das Begrünungssystem. Da auch die Lufttemperatur um 2 °C höher lag, blieb die relative Luftfeuchte in etwa gleich. In der Übergangszeit (grün) war ebenso eine Wassergehaltszunahme um 0,5 g kg^{-1} und ein leichter Anstieg der relativen Luftfeuchtigkeit zu verzeichnen. Im Sommer (rot) hatten die Außenwerte grundsätzlich einen hohen Wassergehaltswert und

das Begrünungssystem erhöhte diesen in Bezug auf den Referenzraum dann nur um 0,1 g kg^{-1}(Selbstregulierung).

Wesentlich deutlichere Ergebnisse lieferte im Folgenden der Vergleich des Raumes B.2.01 mit dem gleichen Referenzraum.

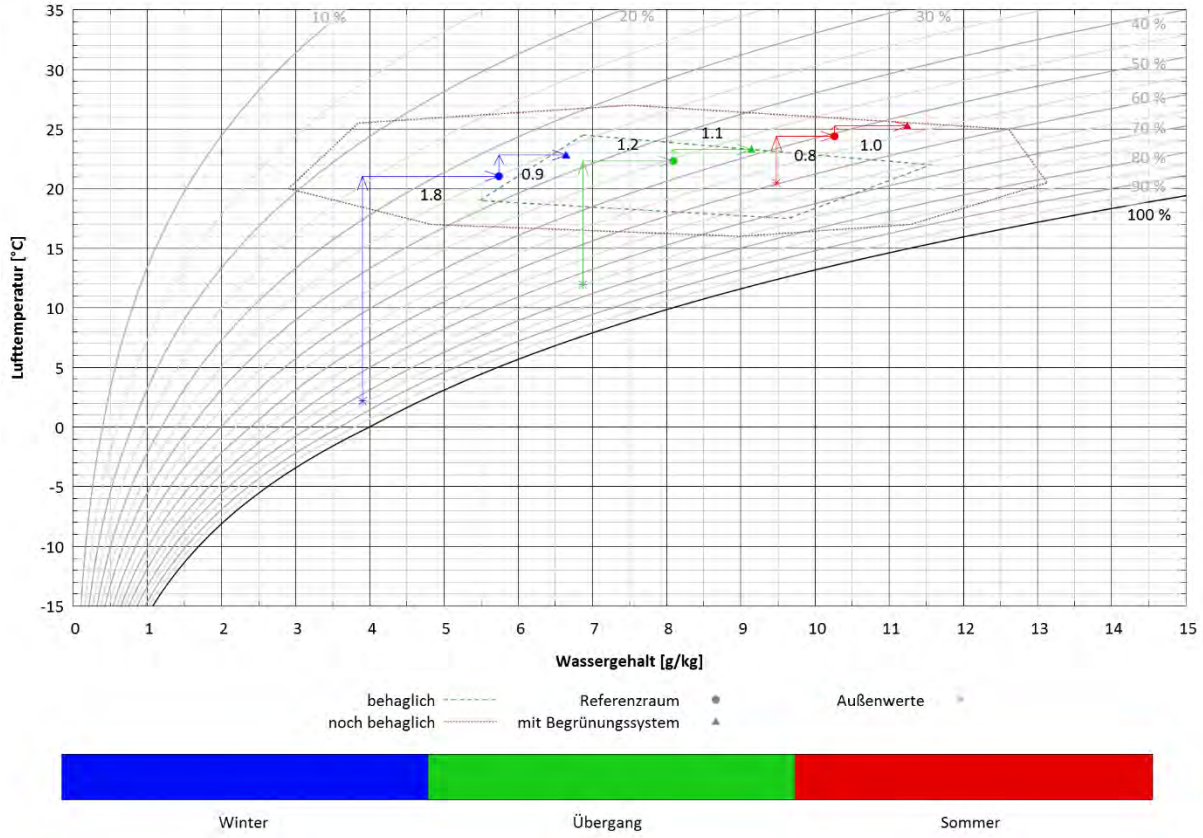


Abb. 82: t-x-Diagramm zu Raum B.2.01 mit Begrünungssystem im Vergleich zum Referenzraum B.1.02

Die Differenz des Wassergehaltes durch das Begrünungssystem im Vergleich zum Referenzraum verzeichnete in den Wintermonaten fast eine Verdoppelung in Bezug auf den Gehaltsanstieg zum Raum B.2.03 (Abb. 81) und hob den Raum von der noch behaglichen in die behagliche Komfortzone. Zudem verbesserte sich auch die relative Luftfeuchtigkeit. Diese Effekte spiegelten sich auch in den anderen Zeiträumen wider. Die Erhöhung des Wassergehalts lag im Mittel in allen Jahreszeiten bei ca. 1,0 g kg^{-1} und führte im Sommer zu einer Überfeuchtung. In dieser Zeit lag der mittlere Raumzustand damit knapp an der Grenze des Behaglichkeitsfeldes

Die Ursache für den Unterschied zwischen diesen beiden Räumen mit Begrünungssystem lag größtenteils im Nutzerverhalten. Denn die Nutzer des Raumes B.2.01 fielen dadurch auf, dass sie die Türe und das Fenster verhältnismäßig selten geöffnet haben und demzufolge eine Durchmischung mit der Außenluft oder der Luft auf dem Flur in geringerem Maß stattfand. Der Einfluss der Außenluftfeuchte und des Luftaustausches mit dem Flur war deshalb weniger stark ausgeprägt.

Diese Erkenntnis wird durch das t-x-Diagramm in Abb. 83 bekräftigt, indem ebenfalls der Vergleich zwischen dem Raum mit Begrünungssystem B.2.01 und dem Referenzraum B.1.02 aufgezeigt wird, allerdings fließen in die Bewertung nur die Tage ein, in denen werktags von 7:30 Uhr bis 17:00 Uhr die Türe geschlossen war. Fenster und Präsenz werden

dabei nicht berücksichtigt. Für den Referenzraum werden anschließend die Werte zu denselben Zeitpunkten herangezogen. Die Werte wurden nach dem Tagesmittelwert der Außenlufttemperatur kategorisiert.

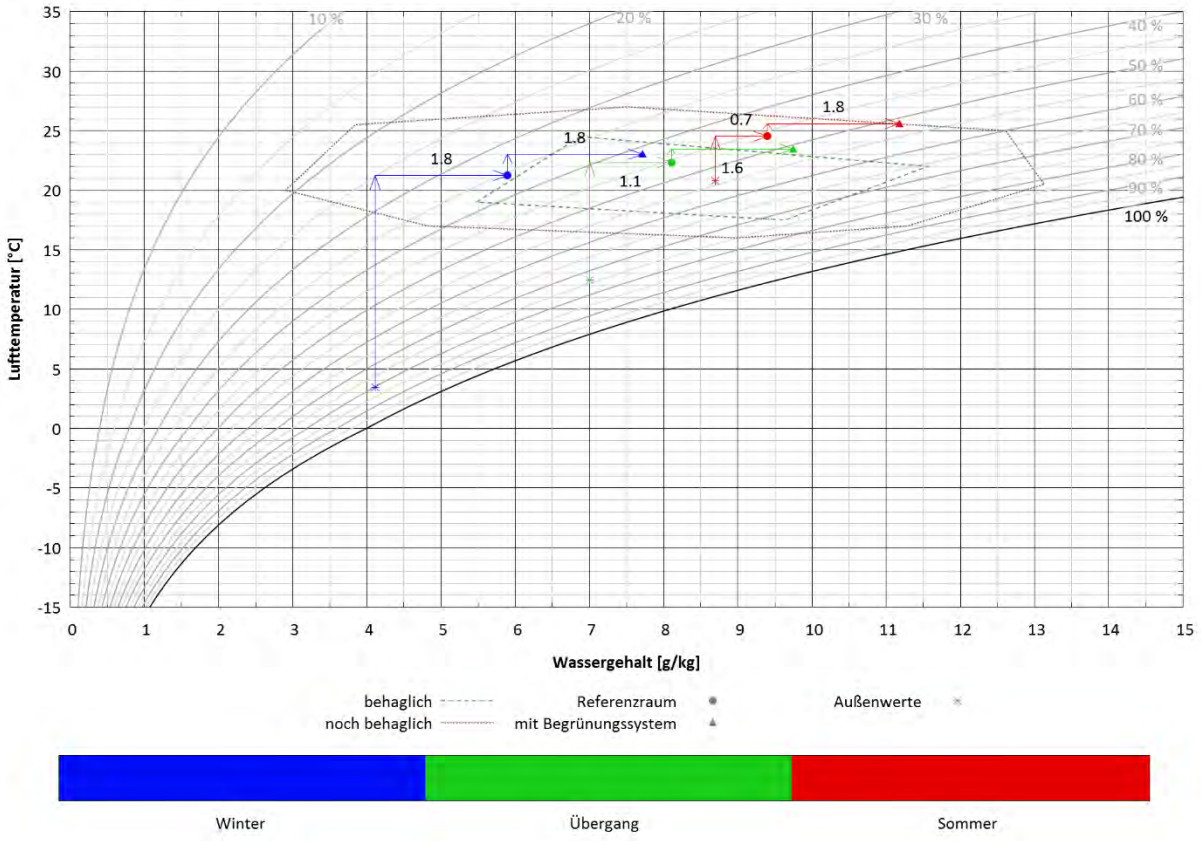


Abb. 83: t-x-Diagramm zu Raum B.2.01 mit Begrünungssystem im Vergleich zum Referenzraum B.1.02 bei geschlossener Tür

Da bei dieser Untersuchung nur die Werte zu den Zeiten berücksichtigt wurden, zu denen die Türe von Raum B.2.01 geschlossen war, mussten auch die Werte der Außenluft und des Referenzraumes für diese Zeitintervalle neu bestimmt werden. Der Wassergehalt stieg bei geschlossener Tür um 1,8 g kg^{-1} im Winter auf bis zu 7,7 g kg^{-1}. Darüber hinaus ließ sich auch, trotz höherer Raumlufttemperaturen, ein Luftfeuchtigkeitsanstieg von 35 % des Referenzraumes auf 42 % mit Begrünungssystem feststellen. Ähnliche Zunahmen sind auch auf den Übergang und Sommer zu übertragen. Dabei ist anzumerken, dass hierbei die Öffnungszeiten und der Öffnungsgrad des Fensters nicht berücksichtigt wurden.

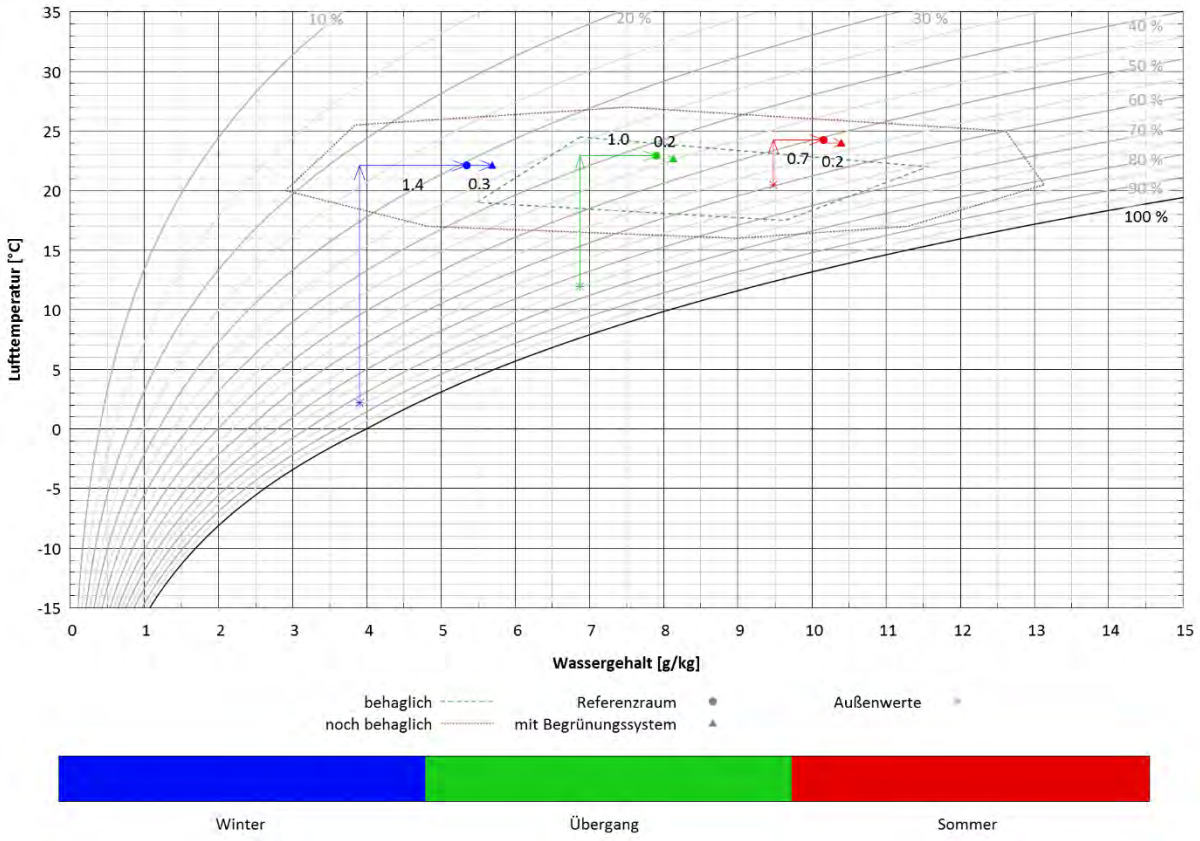


Abb. 84: t-x-Diagramm zu Raum A.1.02 mit Begrünungssystem im Vergleich zum Referenzraum A.2.01

Die Auswirkungen des Begrünungssystems in dem großen Büro fielen deutlich schwächer aus als in den kleinen Büros. Das Temperaturniveau blieb annähernd gleich und der Wassergehalt stieg leicht um 0,2 g kg^{-1} bis 0,3 g kg^{-1}. Die Gründe hierfür können der hohe Öffnungsgrad des Fenster im Raum mit Begrünungssystem mit über 36 % und der der Tür im Referenzraum mit über 85 % gewesen sein und der daraus resultierende ausgeprägte Austausch mit der Außenluft durch geöffnete Fenster und Türen (siehe Abb. 69). Insbesondere der Einfluss einer Lüftungsanlage im Vorraum bzw. Flur machte sich bei geöffneter Tür bemerkbar. Zudem fällt auf, dass die Differenz zu den Außenwerten nicht so stark ausgeprägt war, wie in den kleinen Büros.

In Tab. 29 sind jeweils die 10 Tage aufgeführt, an denen die höchsten Differenzen im Wassergehalt zwischen dem begrünten Raum und dem unbegrünten Referenzraum auftraten. Absolut gesehen, wurden die höchsten Differenzen in Raum B.2.01 festgestellt, gefolgt von Raum B.2.03. Die im Vergleich geringsten Differenzen wiesen die Wassergehalte in den großen Büros auf. Daraus lässt sich die Schlussfolgerung ziehen, dass die Wirksamkeit der Begrünung hinsichtlich der Erhöhung des Wassergehaltes in der Raumluft in Raum B.2.01 deutlich höher war als in B.2.03 und A.1.02.

In B.2.01 und B.2.03 traten jeweils die höchsten Differenzen überwiegend im Sommer, in A.1.02 dagegen mehrheitlich im Winter auf. Dieser Aspekt sollte jedoch nicht überbewertet werden, da bei dieser einfachen Differenzrechnung Randbedingungen wie geöffnete Türen und Fenster bzw. Wochenende / Arbeitstag keine Berücksichtigung fanden. Die Werte in Tab. 29 sollen lediglich die maximal aufgetretenen Differenzen zum unbegrünten Büro darstellen.

Um die Differenzen im Wassergehalt in Form von Änderungen in der relativen Luftfeuchte auszudrücken, wurden die Wassergehalte in normierte relative Luftfeuchten umgerechnet. Diese Normierung basiert auf einem Mittelwert der gemessenen Raumtemperaturen und einem für alle Werte gleichen, normierten Luftdruck.

Der deutlichste Effekt der Begrünung konnte in Raum B.2.01 mit um fast 20 %-Punkten höheren Luftfeuchten im Vergleich zum Referenzraum B.1.02 festgestellt werden. Der Einfluss war in diesem Büro am deutlichsten ausgeprägt, da die Tür und die Fenster überwiegend geschlossen waren (siehe Abb. 69) und die befeuchtete Luft somit nicht abgeführt wurde.

Bei gleicher Bürogröße und gleicher begrünter Fläche fiel der Effekt in Raum B.2.03 dagegen mit einer Zunahme der relativen Luftfeuchte um bis zu rund 14 %-Punkte aufgrund der häufig offen stehenden Tür sichtbar geringer aus.

Die Begrünung des großen Büros A.1.02 führte zu maximalen Anstiegen der Luftfeuchte um etwa 8 %-Punkte gegenüber dem unbegrünten Referenzraum A.2.01. Auch hier waren Tür und Fenster relativ häufig geöffnet. Zusätzlich ist hier zu beachten, dass der Raum bei geöffneter Tür an ein Großraumbüro mit automatischem Lüftungssystem anschließt, dessen Einfluss sich somit auf die Befeuchtungsleistung bemerkbar machte.

Tab. 29: Tage mit den 10 höchsten Differenzen im Wassergehalt zwischen dem begrünten und dem unbegrünten Büro und in den normierten relative Luftfeuchten (Versuchszeitraum 09.06.2014 bis 12.03.2015

Differenz begrünt - unbegrünt								
A.1.02 - A.2.01			B.2.01 - B.1.02			B.2.03 - B.1.02		
Datum	Wassergehalt [g kg^{-1}]	rel. Luftfeuchte normiert [%-Punkte]	Datum	Wassergehalt [g kg^{-1}]	rel. Luftfeuchte normiert [%-Punkte]	Datum	Wassergehalt [g kg^{-1}]	rel. Luftfeuchte normiert [%-Punkte]
30.12.14	1,35	8,28	15.06.14	4,85	19,45	17.08.14	2,75	13,79
31.12.14	1,31	8,07	22.06.14	4,79	19,89	16.08.14	2,61	13,29
01.01.15	1,28	7,78	14.06.14	4,19	17,07	15.06.14	2,47	9,95
29.12.14	1,20	7,22	19.06.14	4,14	17,83	14.06.14	2,08	8,49
23.12.14	1,18	6,88	21.06.14	3,85	17,02	28.09.14	2,03	11,40
09.06.14	1,45	6,55	23.06.14	3,20	14,23	22.06.14	1,90	7,93
29.01.15	1,12	6,27	18.07.14	3,07	13,94	04.01.15	1,88	11,29
03.01.15	1,00	6,05	09.06.14	2,92	13,15	15.08.14	1,85	9,23
04.01.15	0,98	5,92	16.08.14	2,82	14,36	27.09.14	1,70	9,59
02.01.15	0,94	5,71	17.08.14	2,82	14,12	21.06.14	1,53	6,81

Anhand der errechneten Differenzen der Wassergehalte in den begrünten und unbegrünten Büros wurden für den Zeitraum vom 16.12.14 bis 12.3.15, in dem die Wasserabgabe exakt über den Masseverlust erfasst wurde, Tage mit den höchsten Differenzen ausgewählt. Für diese Tage wurden für jedes Büro an einem Arbeitstag sowie an einem Sonntag bzw. Urlaubstag die Wassergehalte in der Raumluft im Vergleich zum unbegrünten Referenzraum und die Wasserabgabe durch das Begrünungssystem dargestellt (Abb. 85, Abb. 86 sowie im Anhang Abb. 145 bis Abb. 148).

In dem großen, begrünten Büro A.1.02 lag die Wasserabgabe durch die Begrünung sowohl an einem Arbeitstag als auch an einem Urlaubstag bei rund 1400 g Modul^{-1} d^{-1} (Abb. 85 und Abb. 86). Diese Wasserabgabe wirkte sich über den Tag gesehen nicht erhöhend auf den Wassergehalt in der Raumluft aus, sondern erhielt das höhere Niveau aufrecht. An dem Urlaubstag lag der Wassergehalt konstant bei etwas über 5 g kg^{-1} und an dem Arbeitstag bei 6 g kg^{-1}. Hier traten starke Schwankungen während der Arbeitszeit auf, am Ende des Tages war der Wassergehalt sogar tendenziell etwas geringer. Die Wassergehalte im unbegrünten Referenzraum (A.2.01) wiesen einen ähnlichen Verlauf auf wie im begrünten Büro, lagen jedoch auf einem niedrigeren Niveau (etwa 1,3 g kg^{-1} niedriger).

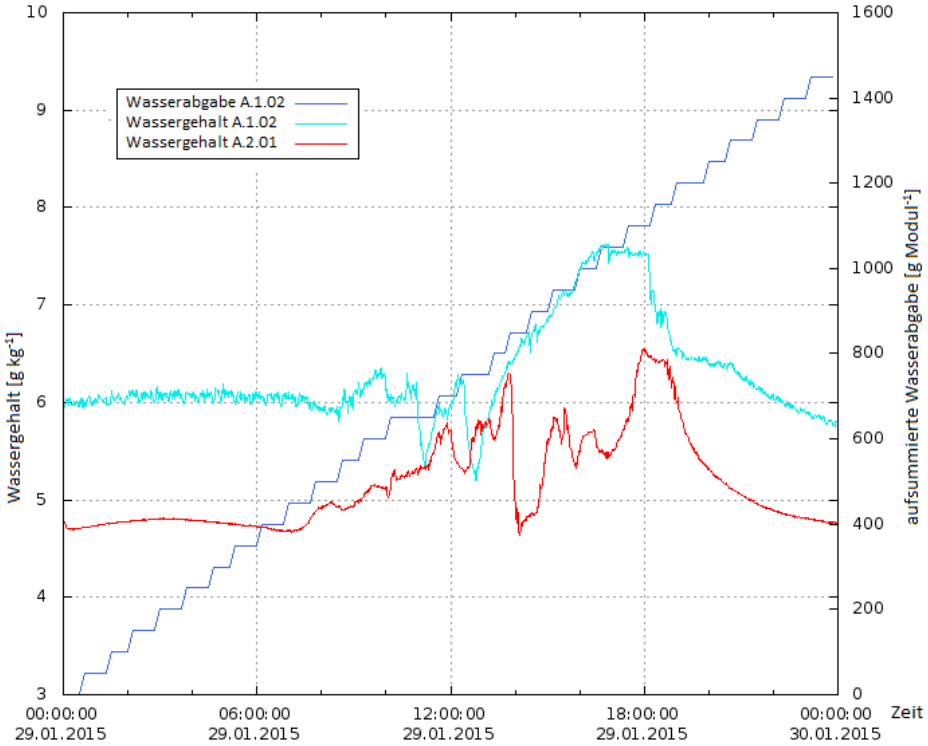


Abb. 85: Vergleich der Wassergehalte in der Raumluft im unbegrünten (A.2.01) und begrünten (A.1.02) Büro und Wasserabgabe (aufsummiert über 24 h) durch das Begrünungssystem in A.1.02 an einem Arbeitstag

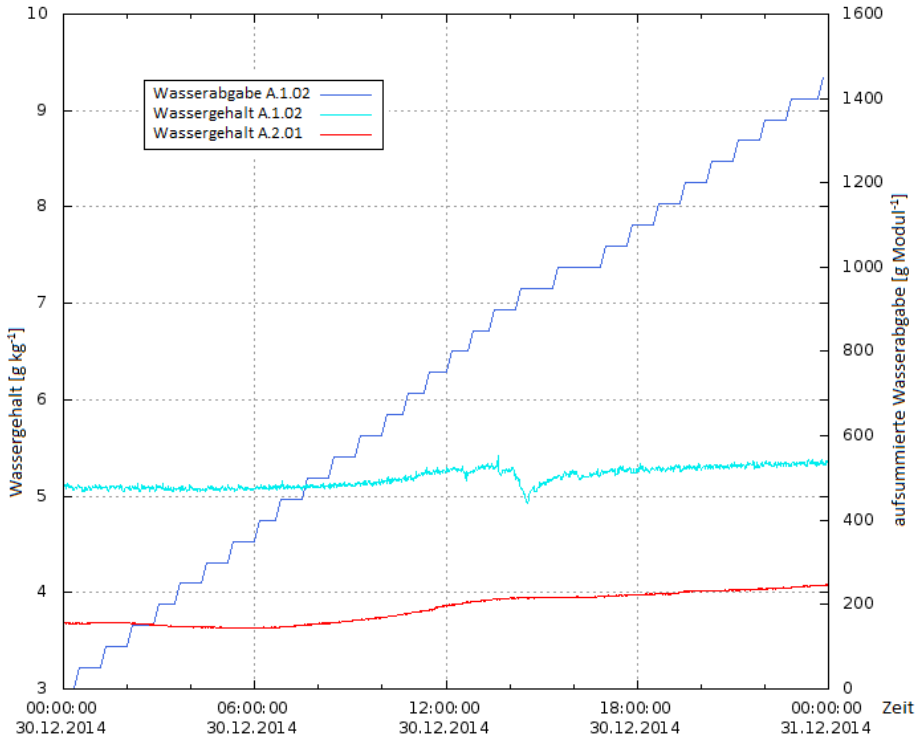


Abb. 86: Vergleich der Wassergehalte in der Raumluft im unbegrünten (A.2.01) und begrünten (A.1.02) Büro und Wasserabgabe (aufsummiert über 24 h) durch das Begrünungssystem in A.1.02 an einem Urlaubstag

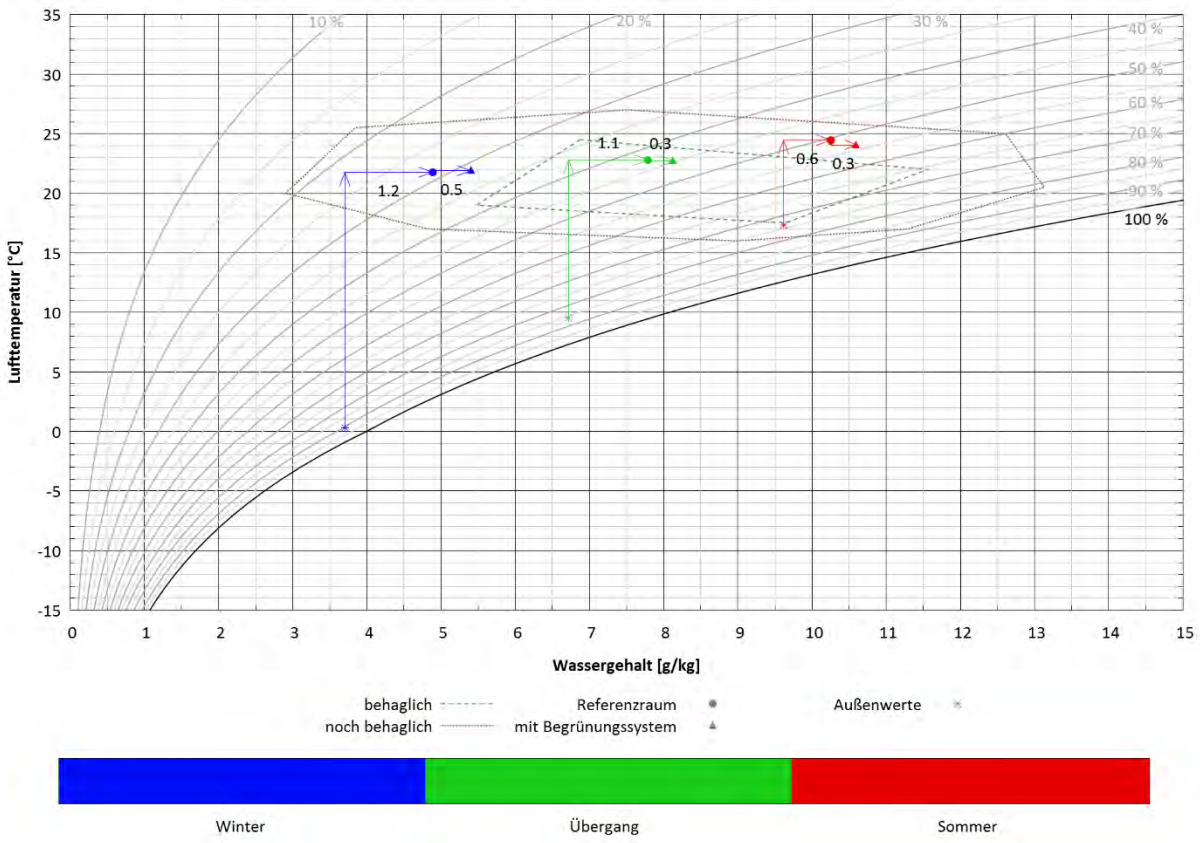


Abb. 87: t-x-Diagramm zu Raum A.1.02 mit Begrünungssystem im Vergleich zum Referenzraum A.2.01 außerhalb der Arbeitszeit

Der Raumkomfort außerhalb der Arbeitszeit unterschied sich von Raum zu Raum, da das Nutzungsverhalten auch ab dem Zeitpunkt, wenn die Nutzer den Raum verlassen, Einfluss hatte. Beispielsweise stand die Tür in den großen Büroräumen A.1.02 und A.2.01 außerhalb der Arbeitszeit fast durchgehend offen. Der Wassergehalt und die relative Luftfeuchtigkeit (Abb. 87) zeigten hier bezüglich des erhöhten Wassergehalts außerhalb und während der Arbeitszeit (Abb. 84) keine signifikanten Unterschiede.

In Büro B.2.03 unterschieden sich die Wasserabgaben durch das Begrünungssystem an dem Arbeitstag mit in der Summe etwa 900 g Modul^{-1} d^{-1} deutlich von dem Sonntag mit 600 g Modul^{-1} d^{-1} (Abb. 147 und Abb. 148 im Anhang). Dennoch lag der Wassergehalt der Raumluft an dem Sonntag mit etwa 7,2 g kg^{-1} höher als an dem Arbeitstag (6,8 g kg^{-1} mit Schwankungen im Tagesverlauf). Hier zeigte sich wiederum die Fähigkeit zur Selbstregulation durch die Grüne Wand, durch die bei gegebenem hohem Wassergehalt in der Luft die Wasserabgabe reduziert wurde.

Der Vergleich von Raum B.2.01 mit dem Referenzraum zeigte an den gewählten Beispieltagen außerhalb der Arbeitszeit mit hohen Differenzen, dass bei Wassergehalten über 7 g kg^{-1} die Wasserabgabe etwa 600 g Modul^{-1} d^{-1} betrug (Abb. 146 im Anhang). Bei niedrigeren Wassergehalten war die Wasserabgabe mit 900 g Modul^{-1} d^{-1} deutlich höher.

In dem kleineren Büro B.2.01 verlief der Wassergehalt in der Raumluft, abgesehen von Schwankungen während der Arbeitszeit, am Arbeitstag und am Sonntag auf einem vergleichbaren Niveau von etwa 7,5 g kg^{-1} und somit deutlich höher als im Raum A.1.02 (Abb. 145 und Abb. 146 im Anhang). Im unbegrünten Referenzraum B.1.02 lag der Wassergehalt mit 5,2 bis 5,8 g kg^{-1} etwas höher als in A.2.01. Die Wasserabgabe durch das Begrünungssystem war an dem Sonntag (850 g Modul^{-1} d^{-1}) geringfügig höher als an dem Arbeitstag (700 g Modul^{-1} d$^{-1)}$. Sie wirkte sich in beiden Fällen nicht sichtbar auf den Wassergehalt im Tagesverlauf aus, sondern hielt das erhöhte, bereits eingestellte Niveau, aufrecht.

Beim Vergleich des großen Büros (Abb. 87) mit dem folgenden Diagramm (Abb. 88) des kleinen Büros B.2.01 waren deutlich stärkere Effekte außerhalb der Arbeitszeit festzustellen, da dort ein Türschließer eingebaut wurde, der die Tür dieses Büros außerhalb der Arbeitszeit durchgehend geschlossen hielt.

Bei einer Gegenüberstellung der Abb. 88 mit dem Raumkomfort-Diagramm (Abb. 82) während der Arbeitszeit offenbarten sich deutlich höhere Wassergehalte (ca. 0,1 g kg^{-1} bis 0,8 g kg^{-1}) und ein Anheben der relativen Luftfeuchtigkeit um maximal 5 %-Punkte. Gerade in den Sommermonaten wurden Werte außerhalb der Behaglichkeitszone erreicht, die eine ausreichende Selbstregulierung in dieser Zeit in Frage stellen und zu einer Überfeuchtung führen würden.

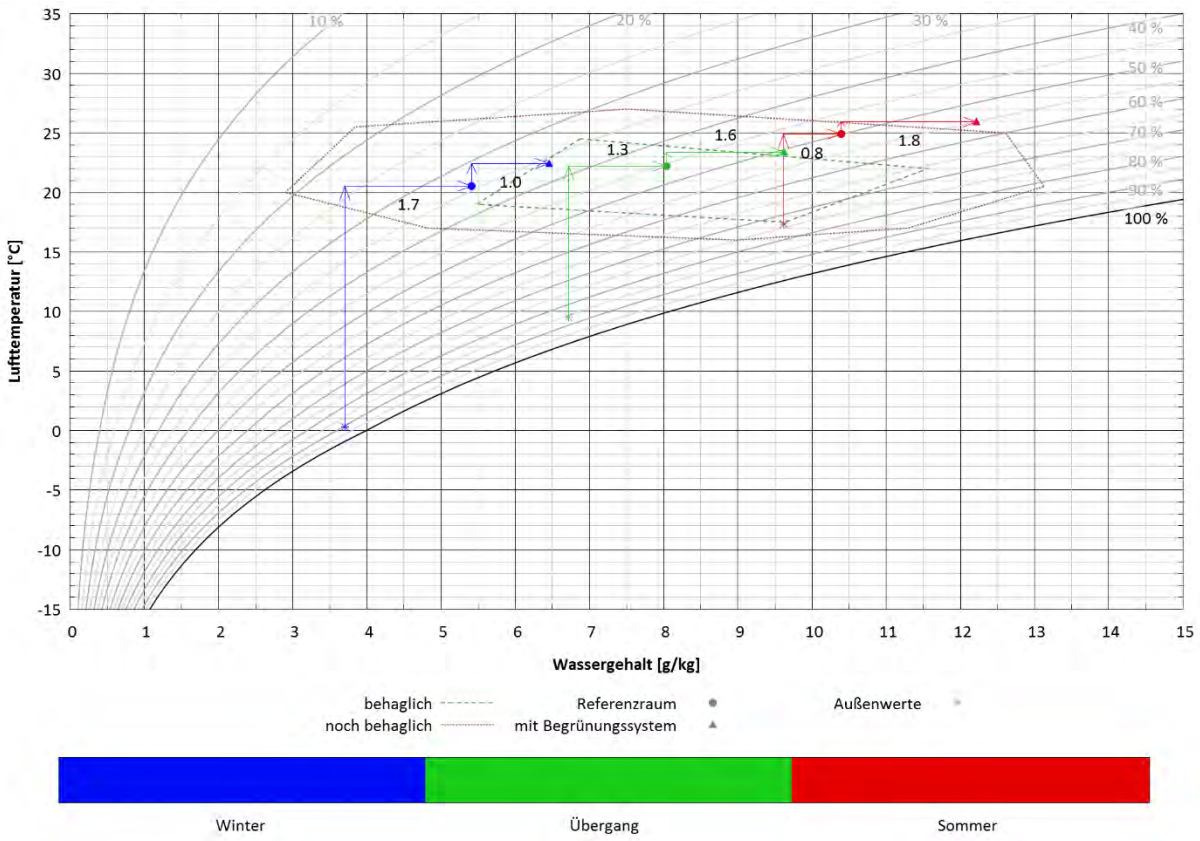


Abb. 88: t-x-Diagramm zu Raum B.2.01 mit Begrünungssystem im Vergleich zum Referenzraum B.1.02 außerhalb der Arbeitszeit

Bei Betrachtung der Zeiten außerhalb der Arbeitszeit nur an Wochenenden (Abb. 89) verstärkte sich der vorher beschriebene Effekt auf Wassergehalt und relative Luftfeuchtigkeit.

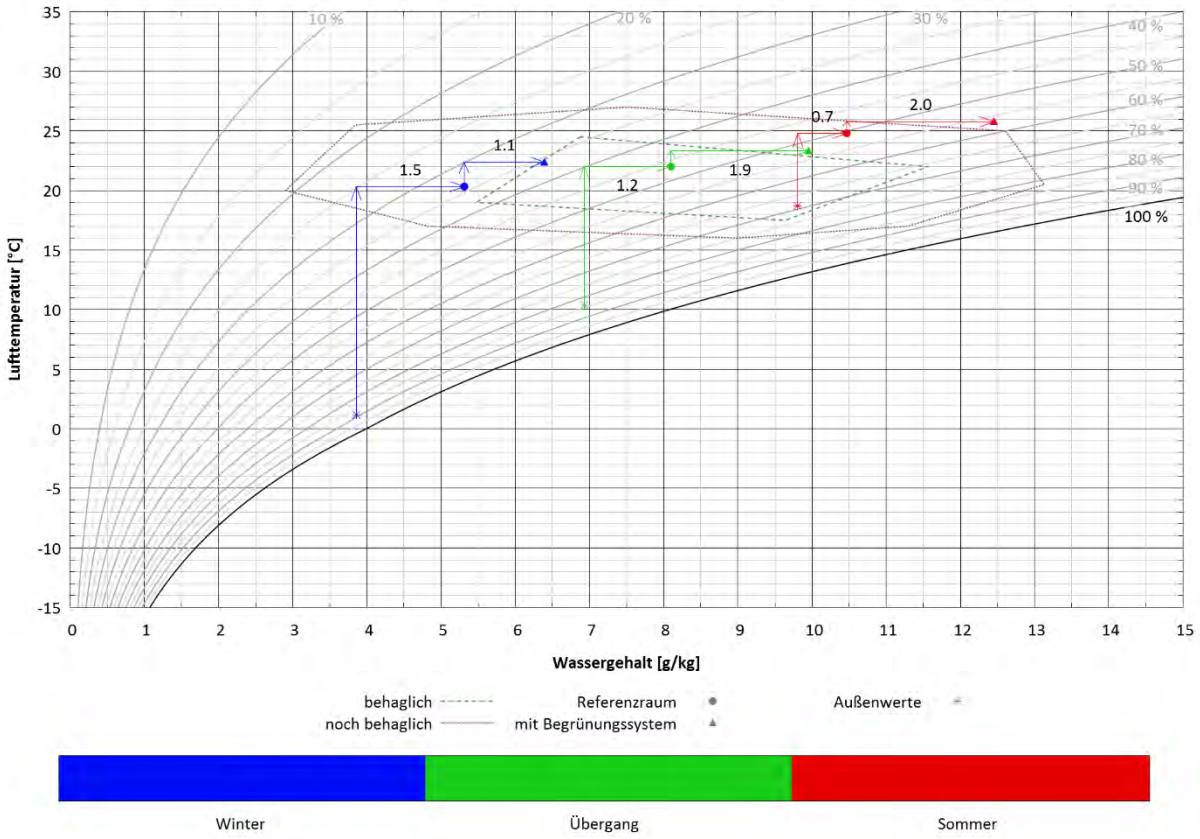


Abb. 89: t-x-Diagramm zu Raum B.2.01 mit Begrünungssystem im Vergleich zum Referenzraum B.1.02 außerhalb der Arbeitszeit an Wochenenden

Die Diversifizierung in „außerhalb der Arbeitszeit“ an Wochentagen und weitere Diagramme „außerhalb der Arbeitszeit“ sind im Anhang (Abb. 149 ff.) hinterlegt.

Der Vergleich mit den unbegrünten Referenzräumen anhand der t-x-Diagramme und der Analyse der Wassergehalte hat eine Veränderung des Raumkomforts durch ein Begrünungssystem verdeutlicht. Speziell der Anstieg des Wassergehaltes im Winter um 0,3 g kg^{-1} bis 0,9 g kg^{-1} zeigte sich sowohl im Vergleich der Wassergehalte als auch in den t-x-Diagrammen. Die Untersuchungen bei geschlossener Tür und insbesondere außerhalb der Arbeitszeit verstärkten den Effekt des Einbaus eines Begrünungssystems, indem sie die Zunahme des Wassergehaltes und der relativen Luftfeuchte nahezu verdoppelten, wenn nur geringe Luftwechselraten vorhanden waren.

4.5.7 Veränderung des Raumkomforts durch Begrünungssysteme im Vergleich zur Messung ohne Begrünungssysteme im Vorjahr

Die Betrachtung eines Raumes in der 1. Messperiode im Vorjahr ohne ein Begrünungssystem und des gleichen Raumes in der 2. Messperiode mit Begrünungssystem läßt auf aussagekräftige Ergebnisse schließen, da die Raumbeschaffenheit identisch ist und das Nutzerverhalten, wie der Einfluss der Fenster und Türlüftung, ähnlich sein sollten. Folglich können Störfaktoren reduziert werden. Um den gleichen Raum aus den zwei Messperioden miteinander vergleichen zu können, wurden Außenluftwerte des Vorjahres und des aktuellen Jahres zusammengefasst, die sich nicht mehr als 0,5 K in der Temperatur und 0,1 g kg^{-1} im Wassergehalt unterscheiden. Aus diesen Wertepaaren wurde der Mittelwert für das resultierende Außenluftwertepaar gebildet. Die Werte wurden nach den Typtagen gruppiert und anschließend über die Gruppen Mittelwerte gebildet. Da sich die 1. Messperiode vom 16.02.2014 bis 24.03.2014 erstreckte, liegen bei dieser Untersuchung keine Werte für die Sommerzeit vor. In der 1. Messperiode wurden die Räume A.1.02 und B.2.03 gemessen und in der nächsten Messperiode mit den Begrünungssystemen ausgestattet.

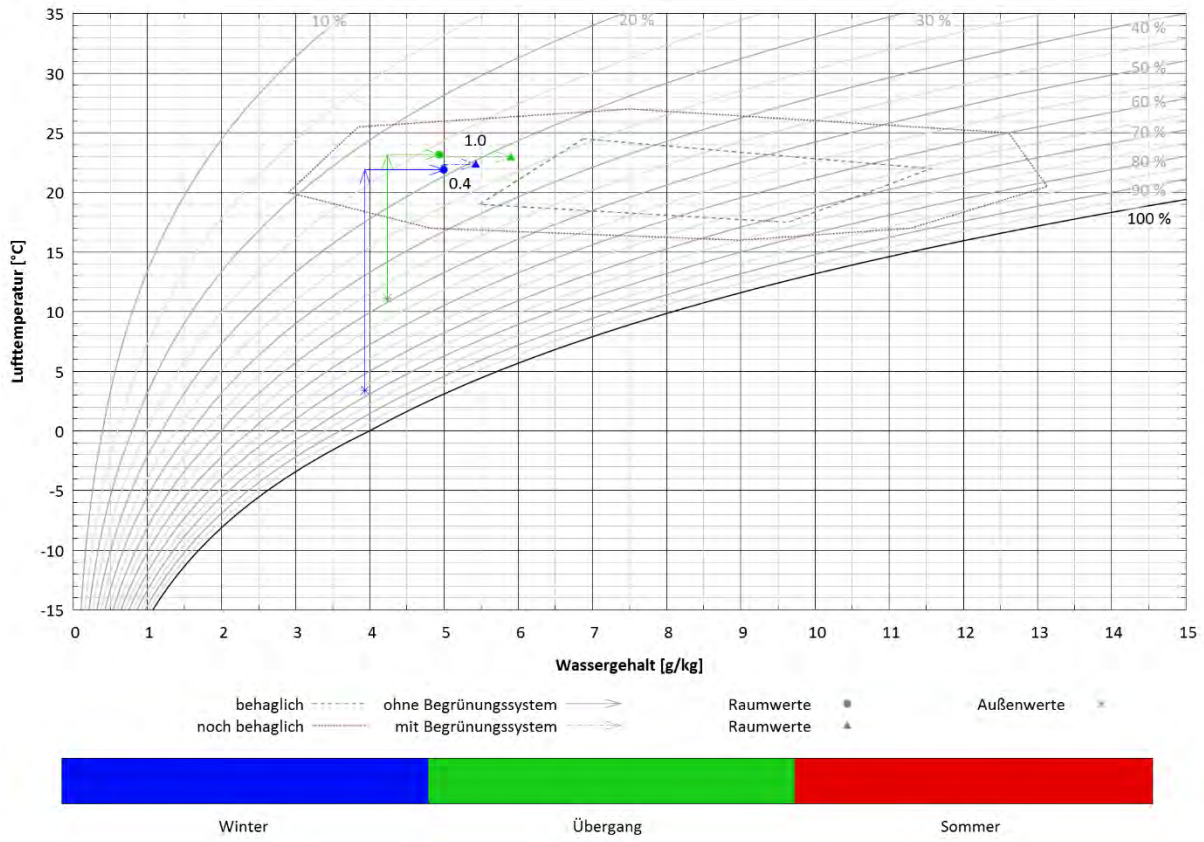


Abb. 90: t-x-Diagramm zu Raum A.1.02 Vergleich mit Begrünungssystem zum Vorjahr ohne Begrünungssystem

Der große Raum A.1.02 lag im Winter ohne Begrünungssystem bei einem Wassergehalt von 5 g kg^{-1}, einer Lufttemperatur von 22 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 28 %. Durch die Einbindung eines Begrünungssystems in diesem Raum erhöhte sich der Wassergehalt um 0,4 g kg^{-1} auf 5,4 g kg^{-1}, die Lufttemperatur lag minimal höher, dennoch lag die relative Luftfeuchte um 2-3 % höher. Noch deutlicher zeigt sich dieser Effekt in der Übergangszeit, in der die Luftfeuchtigkeit von 27 % auf 32 % und der Wassergehalt sogar um 1 g kg^{-1} anstie-

gen und potenziell das Begrünungssystem den Raumkomfort in die Richtung der grünen Komfortzone verbesserte.

Analog zum Großraumbüro A.1.02 wies das kleine Büro B.2.03 auf ein identisches Resultat beim Vergleich mit Begrünungssystem zum Vorjahr ohne Begrünungssystem hin. Die Raumtemperatur lag in beiden Zeiträumen etwas höher als im Großraumbüro, dagegen wurde die Differenz des Wassergehaltes im Winter ebenso mit 0,4 g kg^{-1} beziffert. Der Unterschied des Wassergehaltes in der Übergangszeit war mit 1,1 g kg^{-1} leicht höher. Ebenfalls im Großraumbüro nahm die relative Luftfeuchtigkeit dabei um ca. 5 %-Punkte zu.

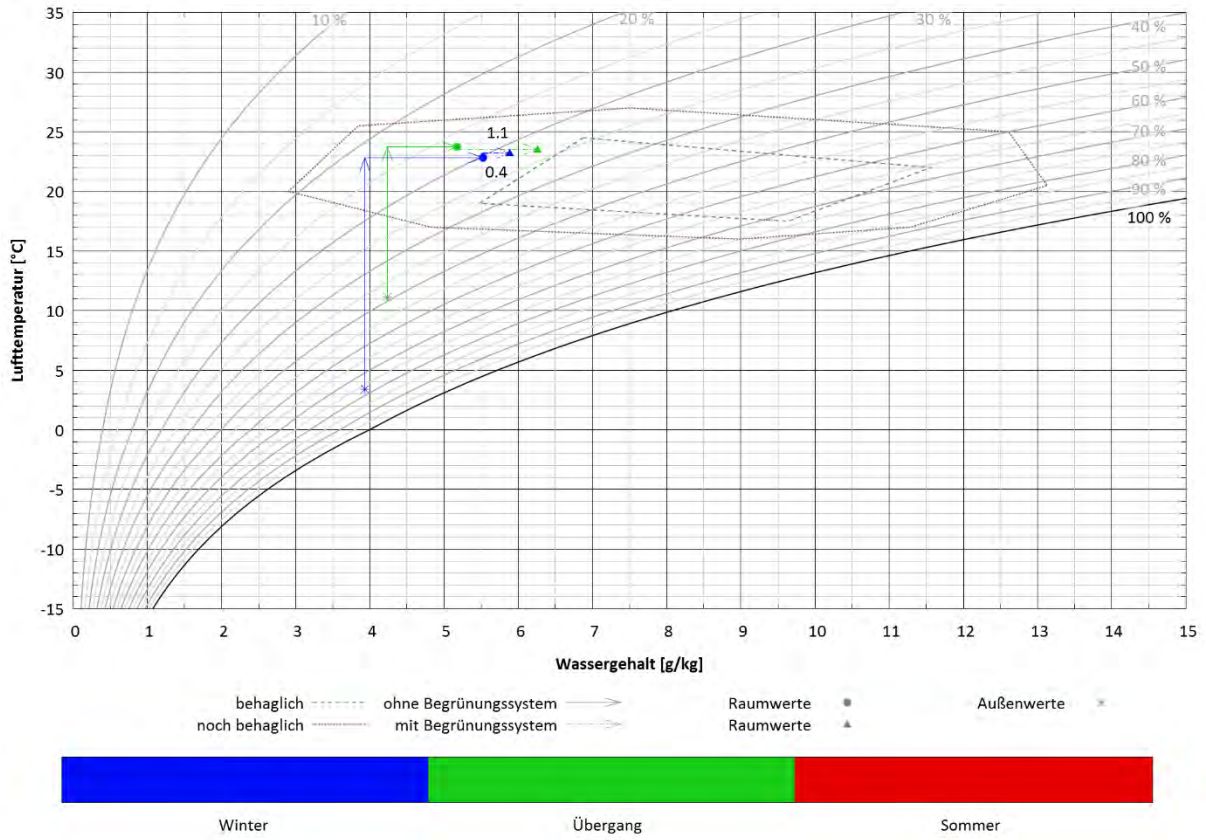


Abb. 91: t-x-Diagramm zu Raum B.2.03, Vergleich mit Begrünungssystem zum Vorjahr ohne Begrünungssystem

Die Veränderung des Klimas durch Begrünung verglichen mit den Messungen ohne Begrünungssysteme aus dem Vorjahr verdeutlichte, wie auch schon der Vergleich mit den Referenzräumen, eine Erhöhung des Wassergehaltes zwischen 0,4 g kg^{-1} und 1,1 g kg^{-1} und einen Anstieg der relativen Luftfeuchtigkeit von 2 bis 5 %-Punkte.

4.5.8 Berechnungsgrundlagen und Auslegung der Wandgröße

Die Berechnung und Auslegung der Wandgröße erfolgte durch den Projektpartner Fa. Häring Radtke Partner. Ein Fragebogen zur Auslegung des Begrünungssystems, den die Nutzer der Büros im Vorfeld ausgefüllt hatten, diente dabei als Grundlage. Die exakten Berechnungen wurden im Rahmen dieses Projektes leider nicht zur Verfügung gestellt. Daher erfolgt im Folgenden eine Beschreibung von Berechnungsgrundlagen unter Berücksichtigung der VDI-

Richtlinie 6022 Blatt 6. Diese Richtlinie schreibt für alle Formen der Raumluftbefeuchtung eine Regelung oder einen Hygrostaten vor, der eine Überbefeuchtung verhindert [19].

Für die Auslegung sind mindestens folgende Punkte zu beachten:

Standort, Bauart/Bauweise, Nutzungsart, Raumvolumen, Raumlufttemperatur, Luftfeuchte (relativ, absolut), Luftwechselrate, Akustik, Umgebungsluftqualität, Wasseranschluss, Wasserqualität, Stromanschluss und Energieeffizienz

Weitere Kriterien für die Befeuchtungsleistung sind:

Luftwechselrate durch Zwangsbelüftung und durch freie Lüftung (Fenster und Tür), Komfortanforderungen an die Raumluft bzgl. Temperatur und relativer Luftfeuchte, punktuelle Feuchtequellen im Raum (adiabatische Kühlung durch Verdunstung) und Orts- und Höhenangaben des Standortes.

Der Standort für das Mustergebäude ist Garching und liegt auf 482 m Höhe über NN und befindet sich nach dem Deutschen Wetterdienst in der Klimaregion 13 [20]. Für die Klimaregionen wurden Testreferenzjahre veröffentlicht. Aus den Testreferenzjahren wurden mit der mitgelieferten Software die Klimadaten für Garching berechnet (siehe Anhang Abb.156). Dabei wird die Höhe 482 m und ein mittleres Stadtgebiet mit 16000 Einwohnern einem mittleren Testreferenzjahr (1988 – 2007) aufgeprägt [21]. Aus diesen Daten wurde (den Tagesmittelwerten nach) der kälteste Wintertag mit dem niedrigsten Tagesmittelwert der relativen Luftfeuchte gewählt. Für Lufttemperatur, Luftdruck, Wassergehalt und relativer Luftfeuchte werden Tagesmittelwerte gebildet.

Tab. 30: Klimadaten Garching

Lufttemperatur	Luftdruck	Wassergehalt	Rel. Luftfeuchte
-10,6 °C	980,5 hPa	1,35 g/kg	76,7 %

Tab. 31: Eingangsdaten aus den Fragebögen (siehe Anhang)

Raum	A.1.02	B.2.03
Volumen	103,2 m³	52,8 m³
Personenzahl	4	2
Relative Luftfeuchte im Winter	30 %	30 %
Temperatur im Winter	20 °C	22 °C
Wunsch Temperatur	22 °C	21 °C
Wunsch relative Luftfeuchte	40 % - 50 %	40 % - 50 %
Tür und Nutzung	1 Tür, meistens geschlossen	1 Tür, meistens offen

Tab. 32: Wasserabgabe pro Person gemäß VDI 2078 [22]

Raum	A.1.02	B.2.03
Wasserabgabe pro Person	40 g/h (bei 22 °C)	35 g/h (bei 20 °C)

Der Luftwechsel muss abgeschätzt werden, da keine mechanische Lüftung, sondern nur Fensterlüftung vorliegt.

Da in dem Raum A.1.02 die Tür meistens geschlossen ist, wird angenommen, dass nur über das Fenster gelüftet wird und alle 1,5 h eine Stoßlüftung stattfindet. Dabei wird die Luft im Raum komplett ausgetauscht. Daraus resultiert ein Luftwechsel von 0,67 h^{-1} mit 100 % Außenluftanteil.

Für Raum B.2.03 wird angenommen, dass die Tür zum Gang immer offensteht und ein 10-facher Luftwechsel mit einem Außenluftanteil von 10% stattfindet. Die Zuluft für B.2.03 setzt

sich aus 90% Luft zu den angegebenen Bedingungen (30 %, 22 °C) und 10% Außenluft zusammen. Die Infiltration über die Gebäudehülle wird vernachlässigt. Feuchtesenken im Raum (z. B. Teppiche, Möbel, Papier etc.) wurden nicht berücksichtigt.

Aus den Komfortanforderungen (Wunschwerte) für relative Luftfeuchte und Raumlufttemperatur sowie dem mittleren Luftdruck des Standortes lassen sich mit der Software „EES“ (Engineering Equation Solver) die erforderlichen Wassergehalte der Raumluft berechnen. Alternativ können die Wassergehalte auch mit einem h-x-Diagramm bestimmt werden.

In EES liefert die Funktion HumRat(AirH2O;T;rh;P) in Abhängigkeit der Temperatur T, der relativen Feuchte rh und dem absoluten Druck P den Wassergehalt der Luft.

Die Erhöhung des Wassergehalts Δx errechnet sich aus dem Außenluftanteil und der Differenz des Außenluftwassergehaltes $x_{\text{Außenluft}}$ und dem Wunschwert $x_{\text{Raum,Wunsch}}$:

$$\Delta x = \left(x_{\text{Raum,Wunsch}} - x_{\text{Außenluft}}\right) n_{\text{Außenluft}} \qquad \left[\frac{\text{kg}}{\text{kg}}\right]$$

Δx	*kg/kg*	*Erhöhung des Wassergehaltes*
$x_{Raum,Wunsch}$	*kg/kg*	*Wassergehalt nach Wunschangaben*
$x_{Außenluft}$	*kg/kg*	*Wassergehalt der Außenluft*
$n_{Außenluft}$	*%*	*Außenluftanteil*

Die benötigte Bruttobefeuchtungsleistung X_{gesamt} ergibt sich aus dem Raumvolumen V ,der Luftwechselzahl n, der Dichte der Luft ρ_{Luft} und der Erhöhung des Wassergehaltes Δx:

$$X_{\text{gesamt}} = V\, n\, \rho_{\text{Luft}}\, \Delta x$$

X_{gesamt}	*kg/h*	*benötigte Bruttobefeuchtungsleistung*
V	*m³*	*Raumvolumen*
n	*1/h*	*Luftwechselrate*
ρ_{Luft}	*kg/m³*	*Dichte der Luft*

Für den Nettobefeuchtungsbedarf werden die inneren Lasten vom Bruttobefeuchtungsbedarf abgezogen:

$$X_{\text{gesamt}} - X_{\text{Personen}}$$

Damit erhält man einen Befeuchtungsbedarf für das Büro A.1.02 von 0,342 kg h^{-1} und für B.2.03 von 0,160 kg h^{-1}.

Es fällt das Verhältnis von Befeuchtungsbedarf A.1.02 zu B.2.03 von ca. 2 zu 1 auf, was sich auch in der Auslegung nach Kapitel 4.4.2.1 wiederspiegelt. Hier wurde ein etwas geringeres Wasserdefizit von umgerechnet 0,24 kg h^{-1} für A.1.02 bzw. 0,11 kg h^{-1} für B.2.03 berechnet. Daraus wurden für das System Grüne Wand spezifische Begrünungsflächen von 0,72 m² für die kleinen Büros und 1,44 m² für das große Büro abgeleitet.

4.5.9 Energieverbrauch durch Begrünung

Die Begrünungssysteme wurden mit einer von der Raumdecke abgehängten Belichtung und mit Pumpen, die für das Bewässerungssystem benötigt werden, versehen. Beide Komponenten wurden mit einer Zeitsteuerung ausgestattet.

Für den Versuchszeitraum wurde folgender Zeitplan gewählt: Von 15:00 Uhr bis 3:00 Uhr des Folgetages war die Belichtung eingeschaltet. Im Zeitraum von 7:00 Uhr bis 22:15 Uhr lief alle 15 Minuten die Bewässerung für eine Dauer von 15 Minuten. Danach wurde das Begrünungssystem um 00:15 Uhr, 2:30 Uhr und 4:45 Uhr jeweils für 15 Minuten bewässert.

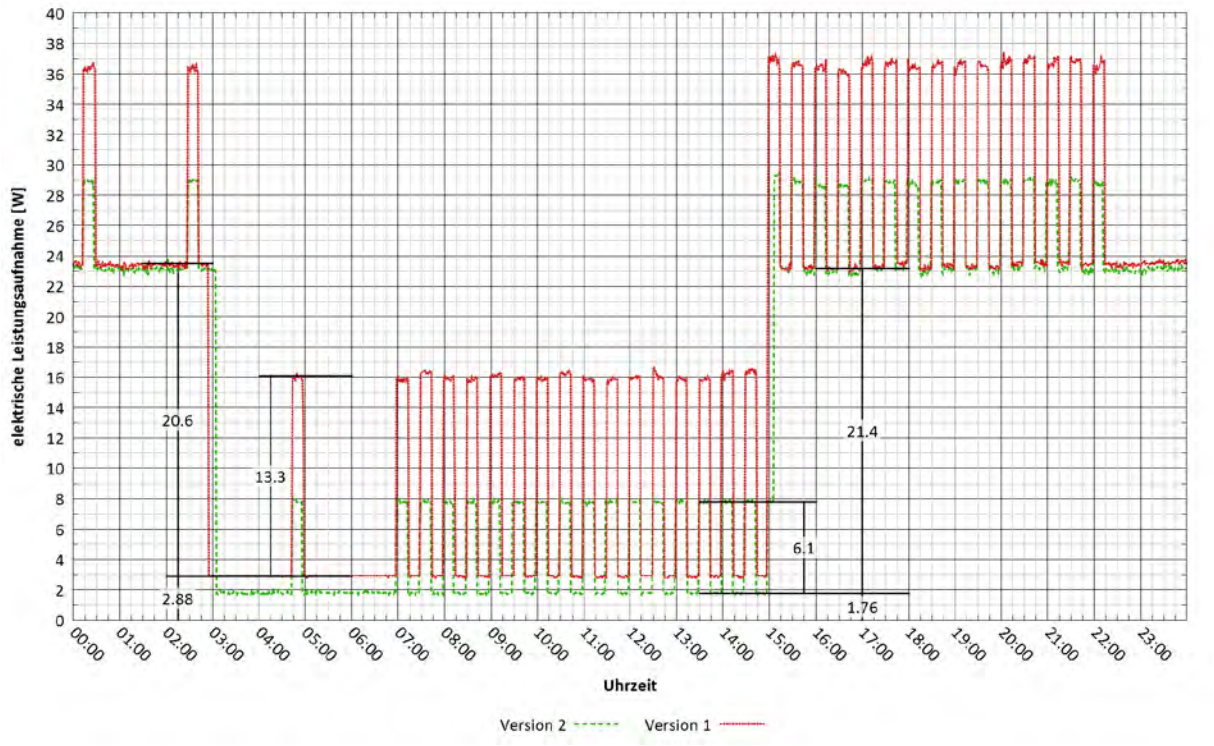


Abb. 92: Typischer Tagesverlauf der elektrischen Leistungsaufnahme der Version 1 und 2 der Grünen Wand

Für die beiden Begrünungssysteme konnten aus den aufgezeichneten Energieverbrauchsdaten folgende Leistungsaufnahmen den einzelnen Komponenten zugeordnet werden.

Tab. 33: Leistungsaufnahme Begrünungssystem

	Version 1	**Version 2**
Standby	2,88 W	1,76 W
Pumpe	13,3 W	5,8 W
Licht	20,6 W	21,2 W

Der oben beschriebene Zeitplan wird in der Abbildung der elektrischen Leistungsaufnahme (Abb. 92) verdeutlicht. Bis 3 Uhr war die Belichtung eingeschaltet und anschließend fiel die Leistung um die 20,6 W bzw. 21,2 W ab. Um 4:45 Uhr und von 7 Uhr bis 22:15 Uhr wurden die Pumpen für je 15 Minuten eingeschaltet, wobei sich ein Leistungsanstieg von 13,3 W bzw. 5,8 W zeigte. Ab 15 Uhr ist ein erneuter Leistungsanstieg zu verzeichnen, da zusätzlich

zu den Pumpenintervallen die Belichtung eingeschaltet wurde. Im Standby-Modus erzielten die Systeme eine Leistung von 2,88 W bzw. 1,76 W (Tab. 33).

Mit diesen Leistungsaufnahmen und den Betriebszeitplänen besitzt die Version 1 einen Strombedarf von rund 0,43 kWh pro Tag bzw. 156 kWh pro Jahr und die Version 2 rund 0,35 kWh pro Tag bzw. 127 kWh pro Jahr.

Verdunstungsenergie

Vom 17.12.14 bis 11.03.15 wurden die Pflanzenwände in den Büros gewogen. Aus den aufgezeichneten Daten kann für diesen Zeitraum eine mittlere Verdunstungsmenge pro Tag für jeden Raum berechnet werden. Über die Verdampfungsenthalpie (2447 kJ/kg) lässt sich die benötigte Energie (Verdunstungsenergie) pro Tag berechnen, die dem System „Raum“ entzogen wird. Dazu gehören der Büroraum mit seinen inneren thermischen Lasten (alle elektrischen Geräte, wie Pumpen, Computer, Bildschirme, Lampen und Personen) und die Raumheizung. Die dem Raum entzogene Energie kann dementsprechend den Heizbedarf ansteigen lassen.

Genauere Aussagen über die kühlende Wirkung der Pflanzenwände können nicht getroffen werden, da die Räume nicht bilanziert und keine Wärmemengen und Stromzähler in die Räume eingebaut wurden.

Wird der ermittelte Strombedarf von rund 0,43 kWh pro Tag (Version 1) bzw. von rund 0,35 kWh pro Tag (Version 2) in kJ umgerechnet, ergibt sich der Stromverbrauch nach Energieverbrauch durch Begrünungssystem pro Tag. Abschließend wurde noch die Verdunstungsenergie pro Tag durch den Stromverbrauch pro Tag dividiert, um die Verdunstungsenergie pro kJ Strom zu ermitteln (Tab. 34).

Tab. 34: Verdunstungsenergie Begrünungssystem

	A.1.02	**B.2.01**	**B.2.03**
Mittlere Verdunstung/ Tag	1742 g	1000 g	1015 g
Mittlere Verdunstungsenergie/ Tag	4262 kJ	2447 kJ	2484 kJ
Stromverbrauch nach Energieverbrauch durch Begrünungssystem / Tag	1260 kJ	1548 kJ	1548 kJ
Verdunstung kJ / kJ Strom	3,4	1,6	1,6

Die unterschiedlichen Raumtemperaturen gehen auf das Benutzerverhalten und die Benutzerwünsche zurück. Die Räume im Bauabschnitt BA2 (B.2.01 und B.2.03) verfügen über eine Einzelraumregelung, die den Kühleffekt der Pflanzenwand kompensiert. In Bauabschnitt BA3 (A.1.02) liegt dagegen eine zentrale Regelung vor.

Ein erhöhter Heizwärmebedarf durch die Begrünungssysteme konnte anhand der Auswertungen nicht eindeutig nachgewiesen werden.

5 Interpretation und Diskussion

5.1 Bewertung der Wasserabgabe durch das Begrünungssystem

Im Versuchsteil im Gewächshaus wurden für die grüne Wand mit Begrünung (1,44 m² Begrünungsfläche, siehe 2.5.) Wasserabgaben von etwa 50 g pro Stunde und m² festgestellt. Für die anderen Systeme lagen die Wasserabgaben zwischen 25 und 56 g m^{-2} h^{-1}.

Die im Büroraum ermittelten Wasserabgaben durch die grüne Wand wurden deutlich durch die Ausgangsluftfeuchten im Raum beeinflusst - bei niedrigen relativen Feuchten war die Wasserabgabe spürbar höher als bei höheren relativen Feuchten im Raum (Selbstregulationsfähigkeit). In den beiden kleinen Büros mit der reduzierten Begrünungsfläche von 0,72 m² wurden Wasserabgaben zwischen etwa 25 g $Modul^{-1}$ h^{-1} = 35 g m^{-2} h^{-1} bei hoher Luftfeuchte und ca. 54 g $Modul^{-1}$ h^{-1} = 76 g m^{-2} h^{-1} bei niedriger Luftfeuchte ermittelt (siehe 4.5.4). In dem großen Büro (1,44 m² Begrünungsfläche) lagen die stündlichen Abgaben zwischen 58 g $Modul^{-1}$ h^{-1} = 41 g m^{-2} h^{-1} (hohe Luftfeuchte) und 75 g $Modul^{-1}$ h^{-1} = 53 g m^2 h^{-1} (niedrige Luftfeuchte). Im Mittel der Werte bei niedriger und hoher Luftfeuchte lagen die Wasserabgaben bezogen auf den Quadratmeter begrünte Fläche mit rund 50 g m^{-2} h^{-1} im Büroraum in gleicher Größenordnung wie im Gewächshaus.

Die Wasserabgabe verhielt sich nicht linear zur Begrünungsfläche (siehe 4.5.3). Trotz doppelter Fläche in Raum A.1.02 war die Wasserabgabe pro Modul nur etwa 1,5-mal so hoch wie bei der reduzierten Begrünungsfläche in den Räumen B.2.01 und B.2.03. Diese Beobachtung könnte sich durch den Selbstregulierungseffekt erklären lassen, da sie möglicherweise auf das Feuchtigkeitsgefälle in der unmittelbaren Umgebung der begrünten Fläche zurückzuführen ist. Unmittelbar benachbarte Begrünungsflächen sättigen die Luft quasi gegenseitig und reduzieren dadurch über den Selbstregulierungseffekt die Wasserabgabe. Im Umkehrschluss dürfte dieser Effekt bei einer Flächenverdopplung durch ein zweites, gleich großes Begrünungssystem, das möglichst weit im Raum entfernt aufgestellt wird, nicht mehr so deutlich beobachtbar sein. Eine entsprechende Untersuchung wäre hinsichtlich der Frage der Auslegung der Begrünungsfläche erforderlich.

Verglichen mit anderen Feuchtequellen im Raum (Tab. 35) wird deutlich, dass der Beitrag der grünen Wand im Büroraum etwa doppelt so groß ist wie der eines mittelgroßen Gummibaumes. Ein schlafender Mensch gibt pro Stunde etwa die gleiche Menge Wasserdampf ab, wie die Begrünung mit 0,72 m² in dem kleinen Büro. Die höchsten Wassereinträge sind durch Quellen zu verzeichnen, die typisch für Wohnungen sind (Kochen, Wäsche, Dusche, etc.) aber in Büroräumen nicht auftreten. Daher kann hier die vertikale Begrünung, vor allem bei niedrigen Ausgangsluftfeuchten, durchaus einen Beitrag zur Erhöhung der Luftfeuchte leisten.

Tab. 35: Eintrag von Feuchtigkeit als Wasserdampf in Wohnungen (nach [23])

Quelle	Wasserdampfabgabe
Schlafender Mensch	40 - 50 g/h
Mensch bei Hausarbeit	90 g/h
Mensch bei körperlich anstrengender Arbeit	175 g/h
Topfpflanzen	7 - 15 g/h
Mittelgroßer Gummibaum	10 - 20 g/h
Wäschewaschen (Waschmaschine)	200 - 350 g/Waschgang
Trocknende Wäschen (4,5 kg, geschleudert)	50 - 200 g/h
Braten	600 g/h
Langzeitgericht	450 - 900 g/h
Geschirrspülmaschine	200 g/Spülgang
Wannenbad	1100 g/Bad
Duschbad	1700 g/Bad

5.2 Bewertung des Einflusses der Begrünungssysteme auf den Raumkomfort

Der Einfluss der Begrünungssysteme auf den Raumkomfort hängt nicht nur von der Wasserdampfabgabe des Begrünungssystems ab, sondern u. a. auch von der Luftwechselrate und dem Nutzerverhalten im Raum.

Der Vergleich mit den unbegrünten Referenzräumen anhand der t-x-Diagramme und der Analyse der Wassergehalte hat eine Veränderung des Raumkomforts durch ein Begrünungssystem verdeutlicht. Speziell der Anstieg des Wassergehaltes im Winter um 0,3 g kg^{-1} bis 0,9 g kg^{-1} zeigte sich sowohl im Vergleich der Wassergehalte als auch in den t-x-Diagrammen. Bei letzterem konnte durch die Anstiege des Wassergehaltes und der relativen Luftfeuchtigkeit eine Verbesserung des Raumkomforts festgestellt werden, indem sich die Durchschnittswerte an kalten Tagen von einem „noch behaglichen“ Raum zu einem „behaglichen“ Raum verbesserten.

Die Untersuchungen bei geschlossener Tür und insbesondere nach der Arbeitszeit zeigten bei geringen Luftwechselraten nahezu eine Verdoppelung der Zunahme des Wassergehaltes und der Zunahme der relativen Luftfeuchte. Dabei wurde in den Sommermonaten eine Gefahr der Überfeuchtung erkennbar, da die Werte dort teilweise den Bereich der Behaglichkeit bzw. des vertretbaren Raumkomforts verlassen.

Bei dem Vergleich der Räume mit Begrünungssystemen zum Vorjahr ohne Begrünungssysteme wurden die Störfaktoren, wie die Raumbeschaffenheit und das Nutzerverhalten (z.B. der Einfluss der Fenster und Türlüftung) minimiert. Die potenzielle Veränderung des Raumkomforts durch Begrünung zeigte sich in der Winter- und Übergangszeit anhand der t-x-Diagramme mit einer Erhöhung des Wassergehaltes zwischen 0,4 g kg^{-1} und 1,1 g kg^{-1} und einem Anstieg der relativen Luftfeuchtigkeit um 2 %-Punkte bis 5 %-Punkte.

Ohne Berücksichtigung von Rahmenbedingungen wie Nutzerverhalten und Ausgangsluftfeuchte wurden maximale Anstiege der normierten relativen Luftfeuchte von bis zu 20 %-Punkten in Raum B.2.101, knapp 14 %-Punkten für Raum B.2.03 und gut 8 %-Punkten für Raum A.1.02 im Vergleich zu den jeweiligen Referenzräumen ermittelt.

Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass die vertikale Begrünung unter Berücksichtigung der Störfaktoren den Raumkomfort im Winter durch eine Zunahme des Wassergehaltes

und der Luftfeuchte spürbar verbessern kann. Dabei wurde festgestellt, dass ein großer Teil der erforderlichen Feuchteeinträge aus anderen Quellen (im dynamischen Betrieb auch aus gespeicherter Feuchte) stammt und das Begrünungssystem im Mittel eher einen kleinen, aber wichtigen Beitrag leistet.

Die Wasserabgabe im Winter lag dennoch etwas unterhalb der Erwartungswerte.

Für eine Selbstregulierung lagen zunächst scheinbar widersprüchliche Resultate vor. Tatsächlich konnte für ähnliche Luftwechselraten gezeigt werden, dass das verwendete Begrünungssystem bei sehr hoher relativer Raumluftfeuchte eine geringere Erhöhung dieser aufweist als bei sehr niedriger relativer Luftfeuchte. Allerdings kommt dieser Effekt innerhalb des engen Komfortfensters („behaglich“, ca. 35 % rF - ca. 65 % rF) nur begrenzt zu Geltung und wird von anderen Effekten überlagert.

5.3 Grundlagen für einen Anforderungskatalog an Begrünungssysteme mit dem Ziel der Erhöhung der Luftfeuchte sowie Planungsgrundlagen und Handlungsempfehlungen

Der formulierte Anforderungskatalog basiert auf der VDI-Richtlinie 6022 Blatt 6 [19]: Luftbefeuchtung über dezentrale Geräte (Planung, Bau und Instandhaltung) und wird ergänzt durch die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass bei der Anwendung dieser VDI-Richtlinie weitere Dokumente zugrunde liegen:

DIN EN 13779:2007-09 Lüftung von Nichtwohngebäuden
DIN EN 15521:2012-12 Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden
LGA Baden-Württemberg Leitfaden: Handlungsempfehlung für die Sanierung von mit Schimmelpilzen befallenen Innenräumen
VDI 6022 Blatt 1:2011-07 Raumlufttechnik, Raumluftqualität; Hygieneanforderungen an Raumlufttechnische Anlagen und Geräte
VDI/DVGW 6023:2013-04 Hygiene in Trinkwasser-Installationen; Anforderungen an Planung, Ausführung, Betrieb und Instandhaltung [19]

Eine Produktzertifizierung einer dekorativen wasserbetriebenen Einrichtung erfolgt gemäß der „Grundlagen zur Produktzertifizierung analog VDI 6022 Blatt 1.1“:

- das Füll- und Nachspeisewasser muss Trinkwasserqualität haben
- Geräte und Einheiten müssen vollständig entleerbar sein
- alle Geräte und Einheiten müssen mit vertretbarem Aufwand reinigbar sein
- sofern Biozide oder biozidähnliche Materialien eingesetzt werden, muss deren Wirksamkeit für diesen Anwendungszweck nachgewiesen sein
- die Betriebstemperatur des Wasser muss unter 25 °C liegen
- sekundäre Wärmequellen (z.B. Scheinwerfer) sind zu vermeiden
- ein Wartungsnachweis, der im späteren Betrieb ausgefüllt wird, liegt vor
- das mikrobielle Wachstum begünstigende Lichtquellen sind zu vermeiden

Diese Anforderungen werden durch die folgenden, im Projekt gewonnenen, Erkenntnisse ergänzt. Der Schwerpunkt liegt dabei auf den Besonderheiten von begrünten Befeuchtungseinrichtungen und dem Anspruch von energetisch hocheffizienten Gebäuden.

Die Prüf- und Zertifizierungsstelle Druck und Papierverarbeitung (persönliche Auskunft von U. Steinmaier, 4.11.2014, per E-Mail) hat in der Vergangenheit bereits biologische Luftbefeuchter untersucht und kommt dabei zu vergleichbaren Anforderungen, die durch die im Projekt erarbeiteten Ergebnisse bestätigt und ergänzt werden können.

Die im Projekt gewonnenen Aussagen sind nur für mobile Systeme zutreffend, eine Übertragung auf wandgebundene Systeme ist nur eingeschränkt möglich.

Anforderungen an die allgemeine Systemtechnik

- das Gewicht des Systems (Fußbodenbelastung, Statik)
- die Sicherstellung, dass keine Lecks auftreten oder Wassertropfen auf Boden und Möbel gelangen
- eine elektrotechnisch sichere Ausführung
- die Regelbarkeit der Wasserabgabe in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte und Temperatur im Raum (im Projekt keine Regelung geprüft, aber Selbstregulationsfähigkeit der Systeme festgestellt)
- die Pumpe muss zuverlässig arbeiten; engmaschige Kontrolle, optimal ist Installation eines Alarmsystems (Feuchtefühler in der Matte)
- Störfaktoren für Raumnutzer, wie Pumpengeräusche und Lichtblendung, sollten auf ein Minimum reduziert werden
- ein niedriger Stromverbrauch
- Wartungs- und Kontrollmöglichkeiten für Systemtechnik sind erforderlich (Tropfer, Schläuche zugänglich und austauschbar)
- der Schutz der wasserführenden Behälter und Zuleitungen vor Lichteinfall, um Veralgung zu minimieren
- keine Reaktion der Systemkomponenten/Materialien mit der Nährlösung (Rost, Ausflockung bei Aluminium)

Anforderung an hygienerelevante Systemtechnik

- die Vermeidung eines zusätzlichen Keimeintrages in die Raumluft durch die Befeuchtung. Deswegen sollte die Wasserabgabe zur Luftbefeuchtung nur mittels passiver Verdunstung über das Substrat und durch Transpiration der Pflanzen stattfinden (kein Ventilator, der Luft durch das Substrat drückt und somit Keime aus dem Substrat in die Luft mitreißt), keine Aerosolbildung
- Hygienegutachten für System erstellen lassen (unter Verwendung von Düngerlösung und im Langzeitversuch)
- die Dimensionierung des Vorratstanks: ausreichend für mindestens 1 Woche, aber nicht unnötig groß, um zu lange Verweildauer des Wassers zu vermeiden
- die Verwendung von Wasser, das hinsichtlich mikrobiologischer Parameter Trinkwasserqualität aufweist (Leitungswasser, Umkehrosmosewasser, vollentsalztes Wasser und Mischungen derselben)
- regelmäßiger Wasseraustausch und Reinigung des Systems
- keine Verwendung von Bioziden im Wasser
- die Erwärmung des Wasservorrats durch sekundäre Wärmequellen (z.B. Belichtung) vermeiden
- die Düngerlösung (0,04 ‰) für Pflanzenwachstum ist erforderlich, fördert allerdings auch Bakterien- und Algenwachstum

- die Reduzierung der Begrünungs- und Verdunstungsfläche nur mit Materialien, die kein Wasser aufnehmen und somit nicht schimmeln können
- keine zersetzbaren Substratbestandteile
- möglichst wenig sich zersetzende Pflanzensubstanz auf der Substratoberfläche
- die Systemkomponenten sollten zur Reinigung gut zugänglich und ggf. zu desinfizieren sein (ohne Pflanzen)
- die Überfeuchtung des Raumes muss vermieden werden (Auslegung)
- eine regelmäßige Überprüfung des Systems hinsichtlich technischer und hygienischer Probleme

Anforderungen an die Pflanzen und die Bedingungen für das Pflanzenwachstum

- Unempfindlichkeit gegenüber Schwankungen der Substratfeuchte
- die Adaption an niedrige Lichtintensitäten
- geringe Krankheits- und Schädlingsanfälligkeit
- die Toleranz von niedrigen Luftfeuchten im Raum
- der Rückschnitt sollte ohne Verlust des pflanzentypischen Habitus möglich sein; im Idealfall Förderung der Verzweigung und dichte Begrünung durch diese Maßnahme
- das allergene Potential der Pflanzen beachten
- wenig Blatt- und Blütenfall
- die Kombination Vermehrungssubstrat und Wandsubstrat muss passen, optimaler kapillarer Übergang des Wassers zwischen den beiden Substraten soll gewährleistet sein (Vermeidung von Kapillarbrüchen)
- Erhaltungswachstum anstreben (Düngung und Licht abstimmen)
- in der Anwachsphase ist eine Bewässerung von Hand erforderlich, z.B. Befeuchtung mit Sprühflasche (besser schon eingewachsenes System im Gebäude aufstellen)
- ein Pflegeplan ist empfehlenswert (Kontrolle Nährlösung, Schädlinge)

Anforderungen an Bewässerung, Düngung und Wasserqualität

- die Wassergaben an den Pflanzenbedarf anpassen
- die Verwendung einer Düngerlösung ist erforderlich, um Erhaltungswachstum der Pflanzen zu garantieren
- pH-Regulierung ist über die Wasserqualität (Umkehrosmosewasser und kalkhaltiges Leitungswasser in unterschiedlichen Mischungsverhältnissen) möglich
- bei Verwendung von Leitungswasser mit hoher Karbonathärte ist ein Verschneiden mit Umkehrosmosewasser erforderlich, um ein Verkalken der Systemkomponenten zu reduzieren

Mindestanforderungen an das Licht für das Pflanzenwachstum

- Pflanzenart und Lichtangebot (natürlich und/oder künstlich) müssen aufeinander abgestimmt sein
- i.d.R. Zusatzbelichtung erforderlich
- das Licht muss auf die Pflanzen gerichtet sein; gleichmäßige Ausleuchtung der bewachsenen Fläche
- keine Blendung der Raumnutzer durch die Zusatzbelichtung
- 6 h Dunkelheit in der Nacht für die Pflanzen einplanen

Bei der Auslegung des Begrünungssystems sind folgende Faktoren zu berücksichtigen

- Standort des Gebäudes (Ort- und Höhenangabe)
- Bauart/Bauweise (z. B. Holz oder Beton, Leichtbauweise oder Massivbauweise)
- Nutzungsart des Gebäudes bzw. des Raumes
- Raumvolumen
- geforderte Raumluftkonditionen in Bezug auf Temperatur und Raumluftfeuchte (relativ, absolut)
- Luftwechselrate (Anzahl der Luftwechsel pro Stunde bei Zwangsbelüftung; Luftwechsel beim Öffnen von Türen und Fenstern)
- wasserspeichernde Materialien im Raum, z. B. Textilien, Holz, Papier
- punktuelle Feuchtequellen im Raum (adiabatische Kühlung durch Verdunstung)
- Anzahl der Personen im Raum
- Regulierung / Selbstregulierung des Systems
- Akustik (Geräuschentwicklung)
- Umgebungsluftqualität
- Wasseranschluss
- Wasserqualität
- Stromanschluss
- Energieeffizienz

Die im Projekt erfolgte Auslegung der Begrünungsfläche ist auf das System Grüne Wand der Fa. H & W Bewässerung GmbH bezogen. Die dabei berücksichtigen Faktoren sind jedoch generell für alle Systeme zur Auslegung relevant.

Zu beachtende Randbedingungen im Gebäude

Die Problematik energetisch hocheffizienter Gebäude ist, dass die dichten und hochwärmegedämmten Gebäudehüllen zwar den Heiz- und Primärenergiebedarf verringern, aber andererseits eine raumlufttechnische Anlage benötigen, um eine ausreichende Versorgung mit Frischluft zu gewährleisten. Bei einem Einsatz von mechanischen Lüftungsanlagen ohne Feuchterückgewinnung treten besonders häufig Probleme mit zu trockener Luft auf.
Die Übertragbarkeit der Leistung eines Begrünungssystems, die bei Fensterlüftung ermittelt wurde, auf Räume mit mechanischem Belüftungssystem ist nur eingeschränkt möglich, da die Luftwechselrate einen großen Einfluss hat und die Feuchte abgesaugt und trockene Luft eingeblasen werden würde.

Folgende Aspekte sind zu berücksichtigen:

- ein Problem mit zu geringer Luftfeuchte muss vorhanden sein.
- die Luftführung und Thermik im Raum ist unbedingt zu beachten. Eine Platzierung sollte im Zuluftbereich erfolgen. Dabei sollte das Begrünungssystem nicht direkt angeblasen werden, um den Keimeintrag zu minimieren. Eine Platzierung im Abluftbereich ist unbedingt zu vermeiden, da dadurch die zusätzliche Befeuchtung durch das Begrünungssystem direkt abgeführt werden würde
- ein freier und geeigneter Aufstellplatz muss vorhanden sein. Der Platz sollte mit möglichst viel Tageslicht ausgestattet sein, um den Einsatz der künstlichen Belichtung zu minimieren. Eine Zugänglichkeit für Wartungsarbeiten muss vorhanden sein. Die Aufstellung erfolgt idealerweise im Blickfeld der Nutzer (Wohlfahrtswirkung)

- die Raumnutzung ist zu berücksichtigen.
- bei Flächenkühlsystemen ist die Taupunkttemperatur durch die Luftfeuchteerhöhung zu beachten (Kondensatbildung)
- Raumlufthygiene und Raumkomfort müssen erfüllt werden
- freie Steckdosen sollten vorhanden sein.
- die Sicherheit im Zusammenspiel von Strom und Wasser ist zu beachten
- der Standort für Wasseraufbereitung und Wasseranschluss muss vorhanden sein.
- der Platz und der Standort für die Anschlussmöglichkeit einer Pflanzenbelichtung (am Begrünungssystem direkt oder an der Decke/ Wand)
- eine geringe Geräuschentwicklung der technischen Einbauten (Akustik im Raum beachten) ist wichtig, da ein Pumpengeräusch oder tropfendes Wasser vom Raumnutzer als unangenehm empfunden werden können

Fazit

Folgende Anforderungen an begrünte Befeuchtungssysteme und ihre hygienische Nutzung im energetisch hocheffizienten Gebäude werden als essentiell angesehen:

1. Befeuchtungsbedarf muss vorhanden sein
2. Gebäudecharakteristika energetisch hocheffizienter Gebäude (Art der Belüftungstechnik, Luftwechsel, Abluftführung) sowie geforderter Raumkomfort (z. B. Raumlufttemperatur und -feuchte) sind zu berücksichtigen
3. Hygienegutachten für System sollte vorhanden sein (unter Verwendung von Düngerlösung und im Langzeitversuch erstellt)
4. Vermeidung eines zusätzlichen Keimeintrages in die Raumluft
5. Regelbarkeit der Wasserabgabe in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte und Temperatur im Raum (Selbstregulierungsfähigkeit berücksichtigen)
6. Auslegung der Begrünungsflächen bezogen auf Raumcharakteristika und Leistungsfähigkeit des Systems
7. regelmäßige Überprüfung des Systems hinsichtlich technischer und hygienischer Probleme
8. Auswahl von unempfindlichen, toleranten Pflanzenarten
9. Verwendung einer Düngerlösung ist erforderlich, um Pflanzenwachstum zu ermöglichen
10. Pflanzenart und Lichtangebot (natürlich und/oder künstlich) müssen aufeinander abgestimmt sein, i.d.R. ist Zusatzbelichtung erforderlich

6 Zusammenfassung, Ausblick und weiterer Untersuchungsbedarf

6.1 Zusammenfassung

Im Rahmen des Projektes sollte geprüft werden, ob der Einsatz einer vertikalen, funktionalen Begrünung zur Lösung der Luftfeuchteproblematik in energetisch hocheffizienten Gebäuden geeignet ist und ob diese Unterstützung der Klimatisierung planbar ist.

Dazu wurden zunächst Untersuchungen zur Wasserabgabe von Substraten, die für vertikale Begrünungen eingesetzt werden können, in der Klimakammer durchgeführt. Die Substrate unterschieden sich deutlich in Ihrer Fähigkeit Wasser zu speichern und abzugeben.

Basierend auf diesen Ergebnissen wurden sechs unterschiedliche, vertikale Begrünungssysteme ausgewählt, die in den folgenden Versuchen näher untersucht wurden. Die Wahl fiel dabei auf die folgenden Systeme: Moving Wall (Sempergreen Vertical Systems, NL), Vertiko (Vertiko GmbH, D), Wonderwall (Copijn Utrecht, NL), Wallflore Flex (Wallflore Systems, NL), Vertical Green (Ruof Grün Raum Konzepte, D) und Grüne Wand (H&W Bewässerung GmbH, D).

Die Erfassung der Verdunstungsleistung dieser sechs Systeme erfolgte unter kontrollierten Bedingungen im Gewächshaus. Die im Raum herrschenden Klimaverhältnisse (v. a. Temperatur, relative Luftfeuchte) wurden kontinuierlich erfasst und zu den verdunsteten Wassermengen, die über den Gewichtsverlust ermittelt wurden, in Beziehung gesetzt. In der Folge wurde die Anpassungsfähigkeit der Verdunstungsleistung durch die Begrünungssysteme an sich verändernde Klimabedingungen geprüft. Die Verdunstungsleistung der Begrünungssysteme wurde sowohl ohne als auch mit Bepflanzung (*Philodendron hederaceum*) ermittelt. Die Bewässerungsdauer und -häufigkeit wurden hinsichtlich des Pflanzenwachstums optimiert. Ohne Begrünung der Substrate wurden bei Bewässerung nach Anbieterempfehlung Wasserabgaben zwischen 8 (Wonderwall) und 50 g m^{-2} h^{-1} (Vertical Green und Grüne Wand) ermittelt. Anhand der Abgaberaten pro Zeit wurde sichtbar, dass vor allem die Systeme Grüne Wand und Vertical Green die Fähigkeit zur Selbstregulation aufwiesen, da bei hoher Luftfeuchte im Raum die Wasserabgabe deutlich zurückging und sich bei niedriger Raumluftfeuchte verstärkte. Dies lässt sich auch mit den guten Korrelationen zwischen Wasserabgabe und relativer Luftfeuchte für Vertical Green und Grüne Wand belegen. Einen deutlichen Einfluss auf die Wasserabgabe hatten die Luftbewegung und die Einstrahlung, während der Einfluss der Temperatur sehr gering ausgeprägt war. In dem Versuchsteil mit Begrünung der Substrate wurden bei optimierter, auf 24 h verteilter Bewässerung Wasserabgaben zwischen 25 (Wallflore) und 50-56 g m^{-2} h^{-1} (Vertical Green, Grüne Wand, Moving Wall) ermittelt. Die guten Beziehungen zwischen Wasserabgabe des Systems und relativer Luftfeuchte konnten mit hohen Korrelationsfaktoren belegt werden und zeigen wieder die Fähigkeit zur Selbstregulation, wodurch die Gefahr einer Überfeuchtung des Raumes reduziert wird.

Die Systeme Vertical Green und Grüne Wand boten den Pflanzen die beste Wasserversorgung. Das resultierte in einem sehr guten Erscheinungsbild der Pflanzen über den gesamten Versuchszeitraum. Dagegen wiesen Moving Wall und Wonderwall Kümmerwuchs bis hin zu Pflanzenausfällen durch eine unzureichende Wasserversorgung auf, die auch durch stark erhöhte Wasserabgaben nicht zu vermeiden waren. Mitverursacht wurde die unzureichende Wasserversorgung durch einen Kapillarbruch zwischen Vermehrungs- und Wandsubstrat.

Parallel zu den Gewächshausversuchen erfolgte die periodische Erfassung von klimatechnisch relevanten Parametern (relative Luftfeuchte, Raumlufttemperatur, Strahlungsintensität,

CO_2-Konzentration und Präsenz) in zwei zur Auswahl stehenden, energetisch hocheffizienten Mustergebäuden (ZAE Bayern und Finanzamt Freising). Nach Auswertung der Messdaten fiel die Wahl auf die Räume des ZAE Bayern, da dort größere Probleme mit dem Raumkomfort, d. h. mit zu niedrigen Luftfeuchten im Raum, zu verzeichnen waren.

Im letzten Versuchsschritt wurde das System Grüne Wand, das in den Gewächshausversuchen eine hohe, sich selbstregulierende Verdunstungsleistung sowie keine technischen und pflanzenbaulichen Probleme aufwies, in drei Büroräume am ZAE Bayern integriert, um die Prüfung unter Praxisbedingungen fortzuführen. Es wurden die Wirkungen auf den Raumkomfort im Vergleich zu zwei Referenzräumen ohne Begrünung untersucht.

Die Wasserabgabe der Begrünungssysteme und die relative Luftfeuchte im Raum zeigten einen gegenläufigen Verlauf - bei niedriger Luftfeuchte wurde viel Wasser abgegeben und bei hoher Luftfeuchte deutlich weniger. Dies verdeutlicht die Fähigkeit zur Selbstregulation des Begrünungssystems Grüne Wand. In den beiden kleinen Büros mit der reduzierten Begrünungsfläche von 0,72 m² wurden Wasserabgaben zwischen etwa 25 g pro Modul (hohe Luftfeuchte) und ca. 54 g pro Modul (niedrige Luftfeuchte) pro Stunde ermittelt. In dem großen Büro (1,44 m² Begrünungsfläche) lagen die stündlichen Abgaben zwischen 58 und 75 g pro Modul. Dies führte in dem kleinen Büro, bei dem Tür und Fenster überwiegend geschlossen waren, maximal zu einer Erhöhung der normierten, relativen Luftfeuchte um knapp 20 %-Punkte gegenüber dem unbegrünten Referenzraum. Durch häufiges Offenstehen von Tür und Fenster reduzierte sich die maximale Erhöhung der relativen, normierten Luftfeuchte auf etwa 14 %-Punkte in dem anderen kleinen Büro bzw. auf etwa 8 %-Punkte in dem großen Büro.

Anhand von Behaglichkeitsdiagrammen wurden die Situationen der begrünten und nichtbegrünten Büroräume verglichen und sowohl zu den Wasserabgaben der Begrünungssysteme als auch zu den Außenluftbedingungen zu unterschiedlichen Jahreszeiten in Beziehung gesetzt. In den Behaglichkeitsdiagrammen haben die einzelnen Messwerte Punktwolken mit vereinzelten Ausreißern gebildet. Diese Punktewolken charakterisierten jeden Untersuchungsraum hinsichtlich der relativen Luftfeuchte im Raum und der Raumlufttemperatur in Abhängigkeit des Wassergehalts der Außenluft und verdeutlichten wie die Räume auf die Veränderungen der Außenluft reagieren.

Der Vergleich mit den unbegrünten Referenzräumen anhand der t-x-Diagramme und der Analyse der Wassergehalte hat eine Veränderung des Raumkomforts durch das Begrünungssystem aufgezeigt. Speziell der Anstieg des Wassergehaltes im Winter trat sowohl im Vergleich der Wassergehalte als auch in den t-x-Diagrammen auf. Die Untersuchungen während und insbesondere nach der Arbeitszeit verdeutlichten den Effekt des Einbaus eines Begrünungssystems. Die Veränderung des Klimas durch Begrünung verglichen mit den Messungen ohne Begrünungssysteme aus dem Vorjahr zeigte einen Anstieg des Wassergehaltes und der relativen Luftfeuchtigkeit.

In den Sommermonaten ist prinzipiell die Gefahr einer Überfeuchtung der Raumluft vorhanden, die durch das Vorhandensein einer Begrünung verstärkt werden kann.

Unter Berücksichtigung der für die Auslegung relevanten Faktoren wurde eine Berechnung der erforderlichen Wandgröße bezogen auf einen gegebenen Raum durchgeführt, und der Energieverbrauch eines Begrünungssystems untersucht.

6.2 Ausblick

Ziel des Projektes war es, den Einfluss einer funktionalen Begrünung auf die Klimatisierung eines energetisch hocheffizienten Gebäudes zu untersuchen. Der Schwerpunkt lag dabei auf der Integration einer biotechnischen Begrünung als funktioneller Bestandteil der grünen Architektur und auf der Planbarkeit der Klimatisierungsunterstützung durch die Begrünung. Mit den Untersuchungsergebnissen konnte gezeigt werden, dass durch den Einsatz einer vertikalen Begrünung im energetisch hocheffizienten Gebäude die Luftfeuchte erhöht werden konnte. Das zu Projektbeginn bestehende Wissensdefizit der Bauplaner und Endnutzer über die Wirkungsweise von Begrünungssystemen kann durch die Forschungsergebnisse deutlich reduziert werden. Die Auswahl der Begrünung kann sich auf konkreten, quantifizierbaren Daten zu Wirksamkeit und Anforderungen stützen und muss nicht mehr allein aus ästhetischen Betrachtungen gefällt werden. Es konnte gezeigt werden, dass die Auslegung von vertikalen Begrünungssystemen möglich ist. Bei mehreren der untersuchten Systeme war die Fähigkeit zur Selbstregulation vorhanden. Die Möglichkeiten zur aktiven Regelbarkeit der Befeuchtungsleistung in Abhängigkeit von der Luftfeuchte und Temperatur im Raum müssen noch detaillierter untersucht werden. Klare Anforderungen an Funktion und langfristigen Wartungsaufwand für derartige biotechnische Systeme sind erarbeitet worden.

Es ist künftig möglich, vertikale Begrünungssysteme als integrierten Bestandteil der Gebäudeklimatisierung einzusetzen und so dezentral Probleme mit der relativen Luftfeuchte zu lösen. Bei der Gebäudeintegration ist die Kombination mit den verschiedensten Gebäudeparametern (z. B. Standort, Art der Belüftungstechnik, Raumnutzung...) zu berücksichtigen. Neben dem positiven Auswirkungen auf die relative Luftfeuchte erzielen vertikale Begrünungssysteme bei der Raumgestaltung einen Zusatzbenefit wie beispielsweise ein steigender Wohlfühlfaktor, der Einsatz als dekoratives Designobjekt und ggf. eine Schallabsorption.

Die Kommunikation und der Wissensaustausch zwischen Architekten, Klimaprojektanten und Begrünern kann nun auf Basis wissenschaftlich geprüfter Fakten geführt werden, um die ganzheitliche Wirkung einer funktionalen Begrünung gleich zu Beginn der Planungsphase mit einzubeziehen und sich so von konventionellen Gebäuden abzuheben.

Sowohl die Schaffung gesicherter Produkt- und Leistungsgrundlagen für Gebäudeplaner als auch die Erstellung von Grundlagen für eine seriöse Beratung über effektive Produkte für den Endkunden wurden im Rahmen des Projektes erarbeitet.

Somit kann die Förderung des Einsatzes von Grün im Sinne einer biotechnischen Begrünung in der "Grünen Architektur" auf wissenschaftlich fundierte Fakten aufbauen, da Forschungsergebnisse zur Wirksamkeit vorhanden sind. Die funktionale Begrünung zur Optimierung der Klimatisierung in energetisch hocheffizienten Gebäuden kann zielführend eingesetzt werden.

Nach der Erstellung von Grundlagen für einen Anforderungskatalog an biotechnische Begrünungen sowie Handlungsanweisungen und Planungsunterlagen sollen diese den Architekten, Klimatechnikern und Innenraumbegrünern auf Messen, in Vorträgen auf Fachtagungen, Zeitschriftenartikeln und im Internet präsentiert werden. Erste Ergebnisse wurden im Bereich der Innenraumbegrünung bzw. des Gartenbaus bereits mehrfach in Form von Vorträgen auf Fachtagungen und mit Zeitschriftenartikeln präsentiert. Zusätzlich ist eine Integration der Forschungsergebnisse in die Richtlinien für Planung, Ausführung und Pflege von Innenraumbegrünungen der FLL (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V.) angestrebt.

6.3 Weiterer Untersuchungsbedarf

Die vorliegenden Ergebnisse ermöglichen es, Innenraumbegrünern, Architekten, Klimatechniken und anderen Gebäudeplanern, biotechnische Luftbefeuchter in Form von vertikalen Begrünungssystemen gezielter und berechenbarer einzuplanen. Dennoch besteht noch weiterer Forschungsbedarf:

Ein zusätzlicher Keimeintrag durch die Verwendung der vertikalen Begrünungssysteme zur Erhöhung der Luftfeuchte im Raum muss auf jeden Fall minimiert werden. Daher ist zur Absicherung von einerseits Gebäudenutzern und andererseits auch den Anbietern von Begrünungssystemen und den Planern, dringend eine Hygieneprüfung der zu verwendenden Systeme erforderlich. Diese Hygieneprüfung muss als Worst-Case Studie unter Verwendung von Düngerlösung und als Langzeitprüfung ausgeführt werden.

Der Einsatz von Feuchtefühlern im Substrat, auf denen eine Regelung der Bewässerung basiert, ist zu untersuchen. Bislang wurde die Bewässerung nur mittels Zeitschaltuhr gesteuert.

Forschungsbedarf besteht ebenfalls auf dem Gebiet der Regelbarkeit der Verdunstungsleistung von vertikalen Begrünungssystemen, um einerseits die maximale Leistungsfähigkeit der Systeme auszuschöpfen und aber andererseits auch eine Überfeuchtung des Raumes sicher zu verhindern.

Es fehlen bislang Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit und Nachhaltigkeit dieser Begrünungsform. Dies bezieht sich sowohl aus pflanzenbaulicher Sicht auf die Langlebigkeit der Pflanzen und der Systemtechnik, aber auch aus Sicht der Klimasteuerung auf die Aufrechterhaltung der Befeuchtungsleistung über mehrere Jahre.

Da im vorliegenden Projekt in energetisch hocheffizienten Büroräumen mit Fensterlüftung gearbeitet wurde, aber auch festgestellt wurde, dass die Raumnutzung und der Luftwechsel durch Tür- und Fensteröffnung eine große Rolle bei der Höhe der zu erreichenden Befeuchtungsleistung spielen, wären zusätzliche Untersuchungen in anderen Räumen bzw. Gebäuden sinnvoll. Insbesondere das Zusammenspiel zwischen dem Begrünungssystem und einem mechanischen Lüftungssystem sollte untersucht werden, beispielsweise der Einfluss durch eine Luftfeuchte- und CO_2-abhängige Regelung.

Weiterer Forschungsbedarf wäre im Bereich Bestandsgebäude bei der Fragestellung Nachrüstung einer mechanischen Lüftungsanlage oder Einbau eines Begrünungssystems hinsichtlich der Verbesserung des Raumkomforts und der Investitionskosten vorhanden.

Ebenfalls bislang nicht untersucht ist der Einfluss einer Klimaanlage und unterschiedlicher Heizungssysteme auf die mögliche Erhöhung der Luftfeuchte durch vertikale Begrünungen.

Ein möglicher Zusatzeffekt der vertikalen Begrünung, der aber noch nicht quantifiziert wurde, liegt in einem Schallschutzeffekt. Es wäre zu untersuchen, in welchem Maße die Systeme schallschluckend wirken. Zusätzlich wäre die komplette Nutzerzufriedenheit mit Hilfe von Befragungen zu ermitteln.

Ausführliche betriebswirtschaftliche Gegenüberstellungen von Kosten und Nutzen einer funktionalen Begrünung gegenüber einer technischen Lösung fehlen noch.

Für einzelne Begrünungssysteme sind Ansätze zur Auslegungsberechnung vorhanden. Eine Allgemeingültigkeit und Übertragbarkeit dieser Daten wäre zu prüfen. Hinsichtlich der Auslegung wäre die Frage der gegenseitigen Beeinflussung der Verdunstungsleistung bei größeren Begrünungsflächen zu prüfen. Es wäre zu prüfen, ob die Platzierung mehrerer kleiner

Einheiten im Raum eine größere Verdunstungsleistung aufweist als eine in der Summe gleich große einheitliche Fläche.

Die Energieeffizienz der Zusatzbelichtung für die Pflanzen ließe sich eventuell durch den Einsatz von LED-Lampen verbessern. Untersuchungen zu LEDs im Bereich der Innenraumbegrünung wären empfehlenswert.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Behaglichkeitszonen in Abhängigkeit von der Raumlufttemperatur und der relativen Luftfeuchte (eigene Darstellung in Anlehnung an Pistohl [4]) 7

Abb. 2: Schematische Darstellung der Wirkungsweise einer funktionalen, vertikalen Begrünung 8

Abb. 3: Versuchsaufbau für Versuch 2 bis 4 13

Abb. 4: Zeitlicher Verlauf der Wasserabgabe nach Wassersättigung 26

Abb. 5: Wasserabgabe ohne Begrünung bei optimierter Bewässerung (Summe vom 6.11.13 8:00 Uhr bis 7.11.13 7:50 Uhr) [hellere Säulenteile: 8:00-19:50 Uhr, dunklere Säulenteile: 20:00-7:50 Uhr] 28

Abb. 6: Wasserabgabe ohne Begrünung bei optimierter Bewässerung (aufsummierte Werte vom 6.11.13 8:00 bis 19:50 Uhr) in Relation zur relativen Luftfeuchte 29

Abb. 7: Korrelation zwischen der Wasserabgabe (Σ 24 h) [g m^{-2} d^{-1}] und der relativen Luftfeuchte (MW 24 h) [%] bzw. der Temperatur (MW 24 h) [°C] für Vertical Green (VG 5) ohne Pflanzen 30

Abb. 8: Korrelation zwischen der Wasserabgabe (Σ 24 h) [g m^{-2} d^{-1}] und der relativen Luftfeuchte (MW 24 h) [%] bzw. der Temperatur (MW 24 h) [°C] für Grüne Wand (VG 6) ohne Pflanzen 30

Abb. 9: Wasserabgabe (Σ 24 h) von Moving Wall mit Begrünung bei einer Heiztemperatur von 18, 21 bzw. 25°C 32

Abb. 10: Wasserabgabe (Σ 24 h) von Vertiko mit Begrünung bei einer Heiztemperatur von 18, 21 bzw. 25°C 33

Abb. 11: Wasserabgabe (Σ 24 h) von Wonderwall mit Begrünung bei einer Heiztemperatur von 18, 21 bzw. 25°C 33

Abb. 12: Wasserabgabe (Σ 24 h) von Wallflore mit Begrünung bei einer Heiztemperatur von 18, 21 bzw. 25°C 33

Abb. 13: Wasserabgabe (Σ 24 h) von Vertical Green mit Begrünung bei einer Heiztemperatur von 18, 21 bzw. 25°C 34

Abb. 14: Wasserabgabe (Σ 24 h) von Grüne Wand mit Begrünung bei einer Heiztemperatur von 18, 21 bzw. 25°C 34

Abb. 15: Wasserabgabe (Tagessummen) mit Begrünung zu Zeiten mit erhöhter Luftbewegung vor den Systemen 36

Abb. 16: Wasserabgabe mit Begrünung bei optimierter Bewässerung tagsüber (Summe vom 27.1.14 8:00 bis 28.1.14 7:50 Uhr) [hellere Säulenteile: 8:00-19:50 Uhr, dunklere Säulenteile: 20:00-7:50 Uhr] 38

Abb. 17: Wasserabgabe mit Begrünung bei optimierter Bewässerung tagsüber (aufsummierte Werte vom 27.1.14 8:00 bis 19:50 Uhr) in Relation zur relativen Luftfeuchte 39

Abb. 18: Wasserabgabe mit Begrünung bei optimierter Bewässerung verteilt auf 24 h (Summe vom 13.2. 8:00 Uhr bis 14.2.14 7:50 Uhr) [hellere Säulenteile: 8:00-19:50 Uhr, dunklere Säulenteile: 20:00-7:50 Uhr] 40

Abb. 19: Wasserabgabe mit Begrünung bei optimierter Bewässerung verteilt auf 24 h (aufsummierte Werte vom 13.2.14 8:00 bis 19:50 Uhr) in Relation zur relativen Luftfeuchte 40

Abb. 20: Korrelation zwischen der Wasserabgabe (Σ 24 h) [g m^{-2} d^{-1}] und der relativen Luftfeuchte (MW 24 h) [%] bzw. der Temperatur (MW 24 h) [°C] für Vertical Green (VG 5) mit Pflanzen 42

Abb. 21: Korrelation zwischen der Wasserabgabe (Σ 24 h) [g m^{-2} d^{-1}] und der relativen Luftfeuchte (MW 24 h) [%], der Temperatur (MW 24 h) [°C] bzw. der Einstrahlung PAR Süd (MW 24 h) [mV] für Grüne Wand (VG 6) mit Pflanzen 42

Abb. 22: Moving Wall zum Versuchsende KW 14-2014 43

Abb. 23: Vertiko zum Versuchsende KW 14-2014 44

Abb. 24: Wonderwall zum Versuchsende KW 14-2014 44

Abb. 25: Wallflore zum Versuchsende KW 14-2014 45

Abb. 26: Vertical Green zum Versuchsende KW 14-2014 45

Abb. 27: Grüne Wand zum Versuchsende KW 14-2014 46

Abb. 28: Ansicht des 2013 errichteten Erweiterungsbaus des Freisinger Finanzamtes; Bildnachweis [13] 50

Abb. 29: Lageplan Finanzamt Freising (Erweiterungsbau orange gekennzeichnet) 50

Abb. 30: Ausgewählte Räume (orange gekennzeichnet) im 1.OG Finanzamt Freising 51

Abb. 31: Lageplan des ZAE Bayern mit relevanten Bauabschnitten (orange gekennzeichnet) 52

Abb. 32: Außenansicht des ZAE Bayern (BA3 mit Glasfassade, BA2 mit Holzverkleidung) ..52

Abb. 33: Ausgewählte Räume (orange gekennzeichnet) am ZAE Bayern in Garching 53

Abb. 34: Befestigung der Sensoren an den Deckenstützen (links: Primärstütze, rechts: Sekundärstütze) 55

Abb. 35: Anordnung der Messtechnik am Finanzamt Freising (Südraum) 56

Abb. 36: Anordnung der Messtechnik am Finanzamt Freising (Nordraum) 57

Abb. 37: Anordnung der Messtechnik am ZAE Bayern in Garching auf der Nordseite des BA3 57

Abb. 38: Anordnung der Messtechnik am ZAE Bayern in Garching auf der Westseite des BA2 58

Abb. 39: Medview^2 Topologie 58

Abb. 40: Klima an der Wetterstation Freising im Untersuchungszeitraum (16.02.2014 – 24.03.2014) 61

Abb. 41: Typisches Wochenprofil des BA3 am ZAE Bayern 62

Abb. 42: Typisches Tagesprofil Finanzamt Freising Nordraum 63

Abb. 43: Freising Nord: Raumluftbedingungen in Abhängigkeit des Wassergehalts der Außenluft als Stundenmittelwerte 64

Abb. 44: Freising Süd: Raumluftbedingungen in Abhängigkeit des Wassergehalts der Außenluft als Stundenmittelwerte 64

Abb. 45: ZAE Bayern BA2: Raumluftbedingungen in Abhängigkeit des Wassergehalts der Außenluft als Stundenmittelwerte 65

Abb. 46: ZAE Bayern BA3: Raumluftbedingungen in Abhängigkeit des Wassergehalts der Außenluft als Stundenmittelwerte 65

Abb. 47: Messzeiträume 67

Abb. 48: Zusammenhang von feuchterelevanten Klimaparametern der Wetterstation Freising im Untersuchungszeitraum 68

Abb. 49: Abhängigkeit des Raumkomforts von der Außentemperatur am Beispiel ZAE Bayern BA3 als Stundenmittelwerte 68

Abb. 50: Abhängigkeit des Raumkomforts von der Außenluftfeuchte am Beispiel ZAE Bayern BA3 als Stundenmittelwerte 69

Abb. 51: Abhängigkeit des Raumkomforts vom Wassergehalt der Außenluft am Beispiel ZAE Bayern BA3 als Stundenmittelwerte 70

Abb. 52: Ausgewählte Räume mit Begrünungssystem (grün gekennzeichnet) und Referenzräume (rot) am ZAE Bayern in Garching 71

Abb. 53: Versuchsanordnung mit Grüner Wand auf der Waage in Raum A.1.02 73

Abb. 54: Standort des Begrünungssystems und Anordnung der Messtechnik im großen Büro A.1.02 76

Abb. 55: Standort des Begrünungssystems und Anordnung der Messtechnik im kleinen Büro B.2.01 76

Abb. 56: Tür- und Fensterschließkontakte 77

Abb. 57: Grüne Wand in Raum A.1.02 am 11.2.2015 79

Abb. 58: Grüne Wand in Raum B.2.01 am 11.2.2015 79

Abb. 59: Grüne Wand in Raum B.2.03 am 11.2.2015 80

Abb. 60: Entwicklung des pH-Wertes und der Leitfähigkeit in der Nährlösung während der Versuchslaufzeit vom 04.06.2014 bis 24.03.2015 81

Abb. 61: Wasserabgabe durch die Begrünungssysteme (aufsummiert über 1 Woche) in den Räumen A.1.02, B.2.01 und B.2.03 83

Abb. 62: Verlauf der Wasserabgabe (Σ 24 h) [g $Modul^{-1}$ d^{-1}] , Raumlufttemperatur (MW 24 h) [°C] und relativen Luftfeuchte (MW 24 h) [%] in Raum A.1.02 84

Abb. 63: Wasserabgabe durch das Begrünungssystem (aufsummiert über 24 h) in Raum A.1.02 an einem Sonntag bei niedriger relativer Luftfeuchte 86

Abb. 64: Wasserabgabe durch das Begrünungssystem (aufsummiert über 24 h) in Raum A.1.02 an einem Sonntag bei höherer relativer Luftfeuchte 86

Abb. 65: Wasserabgabe durch das Begrünungssystem (aufsummiert über 24 h) in Raum A.1.02 an einem Arbeitstag bei niedriger relativer Luftfeuchte 87

Abb. 66: Wasserabgabe durch das Begrünungssystem (aufsummiert über 24 h) in Raum A.1.02 an einem Arbeitstag bei höherer relativer Luftfeuchte.....87

Abb. 67: Korrelation zwischen der Wasserabgabe (Σ 24 h) [g Modul^{-1} d^{-1}] und der relativen Luftfeuchte (MW 24 h) [%] bzw. der Temperatur (MW 24 h) [°C] in Raum A.1.02.....89

Abb. 68: Typisches Tagesprofil A.1.02 mit Begrünungssystem 90

Abb. 69: Prozentuale Öffnungszeiten von Tür und Fenster während der Arbeitszeit (7:30 – 17:00 Uhr) über den gesamten Messzeitraum vom 09.06.2014 bis 27.03.2015 91

Abb. 70: Behaglichkeitsdiagramm A.1.02 mit Begrünungssystem für den Typtag Winter 92

Abb. 71: Behaglichkeitsdiagramm A.2.01 Referenzraum für den Typtag Winter.....92

Abb. 72: Behaglichkeitsdiagramm B.2.01 mit Begrünungssystem für den Typtag Winter 93

Abb. 73: Behaglichkeitsdiagramm B.2.03 mit Begrünungssystem für den Typtag Winter 93

Abb. 74: Behaglichkeitsdiagramm B.1.02 Referenzraum in Abhängigkeit des Wassergehalts der Außenluft für den Typtag Winter.....94

Abb. 75: Behaglichkeitsdiagramm B.2.01 mit Begrünungssystem für den Typtag Sommer ..94

Abb. 76: t-x-Diagramm zu Raum B.2.03 mit Begrünungssystem, Stundenmittelwerte der Raum- und Außenluft 95

Abb. 77: t-x-Diagramm zu Raum B.2.03 mit Begrünungssystem, kategorisiert nach der Außenlufttemperatur in 5 Kelvin Schritten.....96

Abb. 78: Vergleich der Wassergehalte in der Raumluft (MW über 24 h) im großen Büro mit Begrünung (A.1.02) und ohne Begrünung (A.2.01) im Zeitraum vom 09.06.2014 bis 12.03.2015 98

Abb. 79: t-x-Diagramm zu Raum A.1.02 mit Begrünungssystem und zu Referenzraum A.2.01 ohne Begrünungssystem kategorisiert nach der Außenlufttemperatur in 5-Kelvin-Schritten .99

Abb. 80: Vergleich der Wassergehalte in der Raumluft (MW über 24 h) in kleinen Büros mit Begrünung (B.2.01 und B.2.03) und ohne Begrünung (B.1.02) im Zeitraum vom 09.06.2014 bis 12.03.2015.....100

Abb. 81: t-x-Diagramm zu Raum B.2.03 mit Begrünungssystem im Vergleich zum Referenzraum B.1.02 101

Abb. 82: t-x-Diagramm zu Raum B.2.01 mit Begrünungssystem im Vergleich zum Referenzraum B.1.02 102

Abb. 83: t-x-Diagramm zu Raum B.2.01 mit Begrünungssystem im Vergleich zum Referenzraum B.1.02 bei geschlossener Tür.....103

Abb. 84: t-x-Diagramm zu Raum A.1.02 mit Begrünungssystem im Vergleich zum Referenzraum A.2.01 104

Abb. 85: Vergleich der Wassergehalte in der Raumluft im unbegrünten (A.2.01) und begrünten (A.1.02) Büro und Wasserabgabe (aufsummiert über 24 h) durch das Begrünungssystem in A.1.02 an einem Arbeitstag 106

Abb. 86: Vergleich der Wassergehalte in der Raumluft im unbegrünten (A.2.01) und begrünten (A.1.02) Büro und Wasserabgabe (aufsummiert über 24 h) durch das Begrünungssystem in A.1.02 an einem Urlaubstag 107

Abb. 87: t-x-Diagramm zu Raum A.1.02 mit Begrünungssystem im Vergleich zum Referenzraum A.2.01 außerhalb der Arbeitszeit 107

Abb. 88: t-x-Diagramm zu Raum B.2.01 mit Begrünungssystem im Vergleich zum Referenzraum B.1.02 außerhalb der Arbeitszeit 109

Abb. 89: t-x-Diagramm zu Raum B.2.01 mit Begrünungssystem im Vergleich zum Referenzraum B.1.02 außerhalb der Arbeitszeit an Wochenenden 110

Abb. 90: t-x-Diagramm zu Raum A.1.02 Vergleich mit Begrünungssystem zum Vorjahr ohne Begrünungssystem.....111

Abb. 91: t-x-Diagramm zu Raum B.2.03, Vergleich mit Begrünungssystem zum Vorjahr ohne Begrünungssystem.....112

Abb. 92: Typischer Tagesverlauf der elektrischen Leistungsaufnahme der Version 1 und 2 der Grünen Wand.....115

Abb. 93: Wasserabgabe ohne Begrünung bei Bewässerung nach Anbieterempfehlung (Summe vom 18.10.13 8:00 Uhr bis 19.10.13 7:50 Uhr) [hellere Säulenteile: 8:00-19:50 Uhr, dunklere Säulenteile: 20:00-7:50 Uhr] 144

Abb. 94: Wasserabgabe ohne Begrünung bei Bewässerung nach Anbieterempfehlung (aufsummierte Werte vom 18.10.13 8:00 bis 19:50 Uhr) in Relation zur relativen Luftfeuchte 145

Abb. 95: Datenlogger Almemo 2890-9 der Fa. Ahlborn [24].....145

Abb. 96: Temperatur- und Feuchtesensor FHAD 46-2 der Fa. Ahlborn [24] 146

Abb. 97: CO_2-Sensor FYAD 00 CO2B10 der Fa. Ahlborn [24].....147

Abb. 98: Quantum-Messkopf FLA 623 PS der Fa. Ahlborn [24].....147

Abb. 99: Präsenzmelder WRF04I der Fa. Thermokon mit Erfassungsbereich [25] 148

Abb. 100: Datenbankarchitektur Medview² 149

Abb. 101: Screenshot der Medview^2-Oberfläche 150

Abb. 102: Wasserabgabe durch das Begrünungssystem (aufsummiert über 24 h) in Raum B.2.01 an einem Sonntag bei niedriger relativer Luftfeuchte.....151

Abb. 103: Wasserabgabe durch das Begrünungssystem (aufsummiert über 24 h) in Raum B.2.01 an einem Sonntag bei höherer relativer Luftfeuchte 151

Abb. 104: Wasserabgabe durch das Begrünungssystem (aufsummiert über 24 h) in Raum B.2.01 an einem Arbeitstag bei niedriger relativer Luftfeuchte 152

Abb. 105: Wasserabgabe durch das Begrünungssystem (aufsummiert über 24 h) in Raum B.2.01 an einem Arbeitstag bei höherer relativer Luftfeuchte.....152

Abb. 106: Wasserabgabe durch das Begrünungssystem (aufsummiert über 24 h) in Raum B.2.03 an einem Sonntag bei niedriger relativer Luftfeuchte.....153

Abb. 107: Wasserabgabe durch das Begrünungssystem (aufsummiert über 24 h) in Raum B.2.03 an einem Sonntag bei höherer relativer Luftfeuchte 153

Abb. 108: Wasserabgabe durch das Begrünungssystem (aufsummiert über 24 h) in Raum B.2.03 an einem Arbeitstag bei niedriger relativer Luftfeuchte 154

Abb. 109: Wasserabgabe durch das Begrünungssystem (aufsummiert über 24 h) in Raum B.2.03 an einem Arbeitstag bei höherer relativer Luftfeuchte.....154

Abb. 110: Prozentuale Öffnungszeiten von Tür und Fenster während der Arbeitszeit im Winter.....155

Abb. 111: Prozentuale Öffnungszeiten von Tür und Fenster während der Arbeitszeit im Übergang 155

Abb. 112: Prozentuale Öffnungszeiten von Tür und Fenster während der Arbeitszeit im Sommer.....156

Abb. 113: Behaglichkeitsdiagramm A.1.02 mit Begrünungssystem für den Typtag Sommer 156

Abb. 114: Behaglichkeitsdiagramm A.2.01 Typtag Sommer 157

Abb. 115: Behaglichkeitsdiagramm B.1.02 für den Typtag Sommer 157

Abb. 116: Behaglichkeitsdiagramm B.2.01 mit Begrünungssystem für den Typtag Sommer 157

Abb. 117: Behaglichkeitsdiagramm B.2.03 mit Begrünungssystem für den Typtag Sommer 158

Abb. 118: Behaglichkeitsdiagramm A.1.02 mit Begrünungssystem für den Typtag Übergang 158

Abb. 119: Behaglichkeitsdiagramm A.2.01 für den Typtag Übergang 158

Abb. 120: Behaglichkeitsdiagramm B.2.01 mit Begrünungssystem für den Typtag Übergang 159

Abb. 121: Behaglichkeitsdiagramm B.1.02 für den Typtag Übergang 159

Abb. 122: Behaglichkeitsdiagramm B.2.03 mit Begrünungssystem für den Typtag Übergang 159

Abb. 123: Behaglichkeitsdiagramm A.1.02 mit Begrünungssystem für den Typtag Sommer 160

Abb. 124: Behaglichkeitsdiagramm A.2.01 für den Typtag Sommer 160

Abb. 125: Behaglichkeitsdiagramm A.1.02 mit Begrünungssystem für den Typtag Übergang 161

Abb. 126: Behaglichkeitsdiagramm A.2.01 für den Typtag Übergang 161

Abb. 127: Behaglichkeitsdiagramm A.1.02 mit Begrünungssystem für den Typtag Winter .161

Abb. 128: Behaglichkeitsdiagramm A.2.01 für den Typtag Winter 162

Abb. 129: Behaglichkeitsdiagramm A.1.02 mit Begrünungssystem für den Typtag Sommer 162

Abb. 130: Behaglichkeitsdiagramm A.2.01 für den Typtag Sommer 163

Abb. 131: Behaglichkeitsdiagramm A.1.02 mit Begrünungssystem für den Typtag Übergang 163

Abb. 132: Behaglichkeitsdiagramm A.2.01 für den Typtag Übergang 163

Abb. 133: Behaglichkeitsdiagramm A.1.02 mit Begrünungssystem für den Typtag Winter .164

Abb. 134: Behaglichkeitsdiagramm A.2.01 für den Typtag Winter 164

Abb. 135: t-x-Diagramm zu Raum A.1.02 mit Begrünungssystem, Stundenmittelwerte während der Arbeitszeit.....165

Abb. 136: t-x-Diagramm zu Raum A.2.01 ohne Begrünungssystem, Stundenmittelwerte während der Arbeitszeit.....165

Abb. 137: t-x-Diagramm zu Raum B.1.02 ohne Begrünungssystem, Stundenmittelwerte während der Arbeitszeit.....166

Abb. 138: t-x-Diagramm zu Raum B.2.01 mit Begrünungssystem, Stundenmittelwerte während der Arbeitszeit.....166

Abb. 139: t-x-Diagramm zu Raum A.1.02 mit Begrünungssystem kategorisiert nach der Außenlufttemperatur in 5 Kelvin Schritten.....167

Abb. 140: t-x-Diagramm zu Raum A.2.01 kategorisiert nach der Außenlufttemperatur in 5 Kelvin Schritten 167

Abb. 141: t-x-Diagramm Raum B.1.02 kategorisiert nach der Außenlufttemperatur in 5 Kelvin Schritten.....168

Abb. 142: t-x-Diagramm zu Raum B.2.01 mit Begrünungssystem kategorisiert nach der Außenlufttemperatur in 5 Kelvin Schritten.....168

Abb. 143: Vergleich der Wassergehalte in der Raumluft (MW über 24 h) im großen Büro mit Begrünung (A.1.02) und ohne Begrünung (A.2.01) im Zeitraum vom 16.12.2014 bis 12.03.2015 169

Abb. 144: Vergleich der Wassergehalte in der Raumluft (MW über 24 h) in kleinen Büros mit Begrünung (B.2.01 und B.2.03) und ohne Begrünung (B.1.02) im Zeitraum vom 16.12.2014 bis 12.03.2015.....169

Abb. 145: Vergleich der Wassergehalte in der Raumluft im unbegrünten (B.1.02) und begrünten (B.2.01) Büro und Wasserabgabe (aufsummiert über 24 h) durch das Begrünungssystem in B.2.01 an einem Arbeitstag 170

Abb. 146: Vergleich der Wassergehalte in der Raumluft im unbegrünten (B.1.02) und begrünten (B.2.01) Büro und Wasserabgabe (aufsummiert über 24 h) durch das Begrünungssystem in B.2.01 an einem Sonntag 170

Abb. 147: Vergleich der Wassergehalte in der Raumluft im unbegrünten (B.1.02) und begrünten (B.2.03) Büro und Wasserabgabe (aufsummiert über 24 h) durch das Begrünungssystem in B.2.03 an einem Arbeitstag 171

Abb. 148: Vergleich der Wassergehalte in der Raumluft im unbegrünten (B.1.02) und begrünten (B.2.03) Büro und Wasserabgabe (aufsummiert über 24 h) durch das Begrünungssystem in B.2.03 an einem Sonntag 171

Abb. 149: t-x-Diagramm zu Raum B.2.03 mit Begrünungssystem im Vergleich zum Referenzraum B.1.02 außerhalb der Arbeitszeit.....172

Abb. 150: t-x-Diagramm zu Raum B.2.03 mit Begrünungssystem im Vergleich zum Referenzraum B.1.02 außerhalb der Arbeitszeit an Wochenenden 172

Abb. 151: t-x-Diagramm zu Raum B.2.03 mit Begrünungssystem im Vergleich zum Referenzraum B.1.02 außerhalb der Arbeitszeit an Wochentagen 173

Abb. 152: t-x-Diagramm zu Raum A.1.02 mit Begrünungssystem im Vergleich zum Referenzraum A.2.01 außerhalb der Arbeitszeit an Wochenenden 173

Abb. 153: t-x-Diagramm zu Raum A.1.02 mit Begrünungssystem im Vergleich zum Referenzraum A.2.01 außerhalb der Arbeitszeit an Wochentagen 174

Abb. 154: t-x-Diagramm zu Raum B.2.01 mit Begrünungssystem im Vergleich zum Referenzraum B.1.02 außerhalb der Arbeitszeit an Wochentagen 174

Abb. 155: t-x-Diagramm zu Raum B.2.01 mit Begrünungssystem im Vergleich zum Referenzraum B.1.02 außerhalb der Arbeitszeit mit geschlossener Tür 175

Abb. 156: Screenshot der Software zum Aufprägen eines Stadt- und / oder Höheneffekts für ein Testreferenzjahr [21].....176

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Vorgehensweise und Zeitplan (Stand April 2015) 10

Tab. 2: Versuch 1 – Ermittlung der Wasserabgabe der Substrate 11

Tab. 3: Versuch 2 – Ermittlung der Verdunstungsleistung des Begrünungssystems unter kontrollierten Bedingungen 12

Tab. 4: Versuch 3 - Ermittlung der Anpassungsfähigkeit des Begrünungssystems an sich verändernde Klimabedingungen 14

Tab. 5: Versuch 4 – Ermittlung der Leistungsfähigkeit des Begrünungssystems mit Pflanzen 15

Tab. 6: Auswahl der Substrate für Versuch 1 17

Tab. 7: Moving Wall 18

Tab. 8: Vertiko 19

Tab. 9: Wonderwall 20

Tab. 10: Wallflore Flex 21

Tab. 11: Vertical Green 22

Tab. 12: Grüne Wand 23

Tab. 13: Bewässerungsdauer und -häufigkeit in den Versuchen ohne und mit Bepflanzung 24

Tab. 14: Korrelationen zwischen Wasserabgabe und rel. Luftfeuchte, Wassergehalt, Temperatur bzw. Einstrahlung (PAR) für den Zeitraum ohne Pflanzen 29

Tab. 15: Korrelationen zwischen Wasserabgabe und rel. Luftfeuchte, Wassergehalt, Temperatur bzw. Einstrahlung (PAR) für den Zeitraum mit Pflanzen getrennt nach 18°C, 21°C und 25°C Heiztemperatur 35

Tab. 16: Korrelationen zwischen Wasserabgabe und rel. Luftfeuchte, Wassergehalt der Raumluft, Temperatur bzw. Einstrahlung (PAR) für den Zeitraum mit Pflanzen 41

Tab. 17: Vergleich und Bewertung möglicher Mustergebäude 48

Tab. 18: Energetische Bauteileigenschaften der Gebäudehülle am Finanzamt Freising und Anforderungen der EnEV 2009 [2] 50

Tab. 19: Energetische Bauteileigenschaften der Gebäudehülle des ZAE Bayern für BA2 und BA3 und Anforderungen EnEV 2009 [2] 52

Tab. 20: Beschreibung der Wetterstationen in Garching und Freising [11] [12] 60

Tab. 21: Vergleich der klimatischen Verhältnisse der Standorte Garching und Freising 60

Tab. 22: Auslegung der erforderlichen Begrünungsfläche für die Büroräume 72

Tab. 23: Zeitliche Vorgehensweise zur Vermessung der Büroräume 73

Tab. 24: Bewässerungszyklen ab 25.09.14 75

Tab. 25: Analyse des Wassers und der Nährlösungen 81

Tab. 26: Mittlerer, täglicher Wasserverbrauch ermittelt aus den Wassernachfüllmengen und Summe der im Versuchszeitraum gegebenen Wassermenge 82

Tab. 27: Korrelationen zwischen Wasserabgabe und rel. Luftfeuchte, Wassergehalt bzw. Temperatur.....88

Tab. 28: Minimal-, Maximal- und Mittelwerte der Wassergehalte in der Raumluft in den begrünten und unbegrünten Büros (09.06.14 - 12-03.2015) sowie Luftvolumen des Raumes 100

Tab. 29: Tage mit den 10 höchsten Differenzen im Wassergehalt zwischen dem begrünten und dem unbegrünten Büro und in den normierten relative Luftfeuchten (Versuchszeitraum 09.06.2014 bis 12.03.2015 105

Tab. 30: Klimadaten Garching 113

Tab. 31: Eingangsdaten aus den Fragebögen (siehe Anhang) 113

Tab. 32: Wasserabgabe pro Person gemäß VDI 2078 [22] 113

Tab. 33: Leistungsaufnahme Begrünungssystem 115

Tab. 34: Verdunstungsenergie Begrünungssystem 116

Tab. 35: Eintrag von Feuchtigkeit als Wasserdampf in Wohnungen (nach [23]) 118

Tab. 36: Technische Daten Basisstation Typ WS-BU mit GPRS Modul für automatischen Datenversand 141

Tab. 37: Technische Daten Funkmodul WS-DLTc mit integriertem digitalen Temperaturfühler und rel. Feuchtesensor 141

Tab. 38: Technische Daten Funkmodul WS-DLCc mit integriertem digitalen Temperaturfühler, rel. Feuchtesensor und CO_2 Sensor 142

Tab. 39: Technische Daten Funkmodul WS-DLXm mit analogen Eingang 0-1 Vdc und SKP 215 Quanten-Sensor 143

Tab. 40: Technische Daten Quantensensor SKP215 144

Tab. 41: Technische Daten zum Datenlogger Almemo 2890-9 [5] 146

Tab. 42: Technische Daten zum Temperatur- und Feuchtesensor FHAD 46-2 [5].....146

Tab. 43: Technische Daten zum CO2-Sensor FYAD 00 CO2B10 [5].....147

Tab. 44: Technische Daten zum Quantum-Messkopf FLA 623 PS [5] 148

Tab. 45: Technische Daten Präsenzmelder WRF04I [8] 149

Literaturverzeichnis

[1] L. Köhler, K. F. und R. Röber, „Pflanzen als effiziente Luftbefeuchter," *Deutscher Gartenbau,* Bd. 29, pp. 40-42, 2004.

[2] Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung e.V., Richtlinien für die Planung, Ausführung und Pflege von Innenraumbegrünungen, Bonn, 2011.

[3] Deutsches Institut für Normung e.V., DIN EN 15251:2012 Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäu-den - Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik, Berlin: Beuth Verlag, 2012.

[4] W. Pistohl, Handbuch der Gebäudetechnik: Heizung, Lüftung, Beleuchtung, Energiesparen, 7. neu bearbeitete und erweiterte Auflage Hrsg., Bd. 2, Köln: Werner Verlag, 2009.

[5] L. Taiz und E. Zeiger, Plant Physiology, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2007, p. Kap. 4.

[6] B. C. Wolverton, R. C. McDonald und E. Watkins, „Foliage plants for removing indoor air pollutants from energy-efficient homes," *Economic Botany,* Bd. 38(2), pp. 224-228, 1984.

[7] V. I. Lohr und C. H. Pearson-Mims, „Particulate matter accumulation on horizontal surfaces in interiors: Influence of foliage plants," *Atmospheric Environment,* Bd. 30, pp. 2565-2568, 1996.

[8] M. Monreal, „Schallminderung durch Pflanzen in der Innenraumbegrünung," in *Kongressband Tagung der Deutschen Gartenbauwissenschaftlichen Gesellschaft*, Berlin, 1998.

[9] R. Raanaas, K. H. Eversen, D. Rich, G. Sjøstrøm und G. Patil, „Benefits of indoor plants on attention caapcity in an office setting," *Journal of Environmental Psychology,* Bd. 31, pp. 99-105, 2011.

[10] G. Patil und T. Bringslimark, „Nytte av planter i innemiljøet - hva sier forskningen?," 2008. [Online]. Available: nordic-green.info/Nordic_Green_-_Forskning.htm. [Zugriff am 25 Juni 2014].

[11] T. Fjeld, „The effect of interior planting on health and discomfort among workers and school children," *HortTechnology,* Bd. 10(1), pp. 46-52, 2000.

[12] K. Dijkstra, M. E. Pietrse und A. Pryn, „Stress-reducing effects of indoor plants in the built healthcare environment: The mediating role of percieved attractiveness," *Preventive Medicine,* Bd. 47, pp. 279-283, 2008.

[13] Staatliches Bauamt Freising, [Online]. Available: http://www.stbafs.bayern.de. [Zugriff am 21.03.2014].

[14] Meteorologisches Instiut München, [Online]. Available: http://www.meteo.physik.uni-muenchen.de/dokuwiki/doku.php?id=wetter:garching:neu. [Zugriff am 11.12.2013].

[15] Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, [Online]. Available: http://www.lfl-design3.bayern.de/agm/. [Zugriff am 11.12.2013].

[16] Agrarmeteorologie Bayern, [Online]. Available: http://www.am.rlp.de/Internet/AM/inetcntrBY.nsf/cuhome.xsp?src=5G43F1PU72&p1=23HW94WP59&p3=3N01H14Z37. [Zugriff am 25.03.2014].

[17] Stöcker, Taschenbuch der Physik, Frankfurt am Main: Harri Deutsch, 2010.

[18] Landesamt für Digitalisierung Breitband und Vermessung, „GeoportalBayern," [Online]. Available: http://geoportal.bayern.de/geoportalbayern. [Zugriff am 27 05 2014].

[19] Verein deutscher Ingenieure, „VDI 6022 Raumlufttechnik, Raumluftqualität Luftbefeuchtung über dezentrale Geräte Planung, Bau, Betrieb, Instandhaltung," 12 2013.

[20] Raumordnung, Bundesamt für Bauwesen und Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH; Deutscher Wetterdienst (DWD), Handbuch Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse, Offenbach, 2014.

[21] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, „Info Portal Energieeinsparung," [Online]. Available: www.bbsr-energieeinsparung.de. [Zugriff am 07 05 2015].

[22] Verein deutscher Ingenieure, „VDI 2078 Berechnung der Kühllast klimatisierter Räume (VDI-Kühllastregeln)," 07 1996.

[23] M. Dönch, Lüftungsanlagen, Bd. Handbuch Haustechnische Planung, E. Ruhrgas AG und L. Verbundnetz Gas AG, Hrsg., Stuttgart und Zürich: Karl Krämer Verlag, 2000, pp. 228-243.

[24] Ahlborn, [Online]. Available: http://www.ahlborn.de/Almemo.html. [Zugriff am 26.11.2013].

[25] Thermokon, [Online]. Available: http://www.thermokon.de/DE/helligkeit--bewegung/wrf04i--aufputzbewegungsmelder.html. [Zugriff am 18.03.2014].

[26] Omega, [Online]. Available: http://www.omega.de/pptst/OM-SQ2020.html. [Zugriff am 26.11.2013].

[27] WiSensys, [Online]. Available: http://www.wisensys.com. [Zugriff am 26.11.2013].

[28] Verein Deutscher Ingenieure, VDI-Wärmeatlas : Berechnungsblätter für den Wärmeübergang., Düsseldorf, 1994.

[29] Agrarmeteorologie Bayern, [Online]. Available: http://www.am.rlp.de/Internet/AM/NotesBAM.nsf/bamweb/89952241408487f9c12573920045299b?OpenDocument&TableRow=3.7#3.. [Zugriff am 15.04.2014].

[30] „Materialsgate," [Online]. Available: http://www.materialsgate.de/de/mnews/7353/Wie+ein+transparenter+Kokon+PLEXIGLAS%C2%AE+Fassade+f%C3%BCr+M%C3%BCnchner+Wetterturm.html. [Zugriff am 15.04.2014].

[31] S+S Regeltechnik, [Online]. Available: http://www.spluss.eu/4-helligkeitssensor/15-helligkeitssensor-daemmerungsfuehler/58-raumhelligkeitsfuehler-aufputz/de. [Zugriff am 26.11.2013].

[32] „EnEV-Online,“ [Online]. Available: http://www.enev-online.org/enev_2009_volltext/enev_2009_anlage_03_anforderungen_aenderung_aussenbauteile.htm. [Zugriff am 08.04.2014].

Anhang

Tab. 36: Technische Daten Basisstation Typ WS-BU mit GPRS Modul für automatischen Datenversand

Function	Base station
Operating temp. range	0°C - +60°C
Power	8V – 30V DC
Radio standard	ETS 300 220
Frequency	868 – 870MHz (915MHz US)
Range	1000m free line-of-sight
Housing	IP40. Other classes upon request.
Color	Green
Dimensions	130(w) x 180(h) x 60(d) mm
Communication	RS232 @ 115.200 kbps
Network size	100 sensors
Antenna	External antenna
Configuration	Through SensorGraph on PC
Regulatory	R&TTE, CE
Data destination	Programmable internet address
GPRS link	Programmable APN, username, password
Memory	For 200.000 measurement values
Data usage(typical) (sensors sample every 200sec)	1 sensor: 2 MB / month 10 sensors: 6 MB / month 20 sensors: 10 MB / month

Tab. 37: Technische Daten Funkmodul WS-DLTc mit integriertem digitalen Temperaturfühler und rel. Feuchtesensor

Function	Sensor
Type	Humidity, temperature
Sensor type	Internal, digital
Measurement range	10% to 95%RH non-condensing -20°C to +80°C
Measurement accuracy	±1,8%RH from 10% to 90%RH; ±4%RH otherwise ±0,3°C @ 25°C, ±0,5°C from 0°C to +50°C, ±1,2°C from -20°C to +80°C
Measurement resolution	0.1%RH, 0.1°C
Long term stability	Drift < 0.5%RH per year
Measurement interval (M)	From 1 second up, programmable from PC. default 20 seconds.
Samples per transmission (T)	From 1 to 5 samples, default 1.
Alarm threshold for base station alarms	Min/Max for temperature Min/Max for humidity
Operating limits	-20°C to +80°C
Power	1 AA 3.6V Lithium battery
Battery life	3 years with **default** settings for M and T 5 years with M=60 seconds and T=default samples.
Memory	10.000 measurements
Radio standard	ETS 300 220
Frequency	868 – 870MHz (915MHz US)
Range	1000m free line-of-sight
Housing	IP65
Color	WiSensys® Blue
Dimensions	60(w) x 80(h) x 23(d) mm, excl. wall mount
Configuration	Through WiSensys® PC software SensorGraph
Regulatory	R&TTE, CE

Tab. 38: Technische Daten Funkmodul WS-DLCc mit integriertem digitalen Temperaturfühler, rel. Feuchtesensor und CO_2 Sensor

Function	Sensor	
Type	CO_2, humidity , temperature	
Sensor type	Internal, digital	
Measurement range		
CO_2	0 ppm to 20.000 ppm	
Humidity	10% to 95% non-condensing	
Temperature	-20°C to +80°C (see operating limits)	
Measurement accuracy		
CO_2	±40ppm + 3% of reading @ 22°C	
Humidity	±1,8%RH from 10% to 90%RH; ±4%RH otherwise	
Temperature	±0.3°C @ 25°C, ±0,5°C from 0°C to +50°C, ±1,2°C from -20°C to +80°C	
Measurement resolution		
CO_2	1ppm	
Humidity	0.1%RH	
Temperature	0.1°C	
Measurement interval (M)	From 1 second up, programmable from PC. Maximum 200 seconds, default 20 seconds.	
Samples per Transmission (T)	From 1 to 3 samples, default 1.	
Alarm thresholds for base station alarm	Min/max temperature values Min/Max humidity values Min/Max CO_2 values	
Operating limits	0°C to +50°C	
Power	8 – 24VDC	
	41 mA @12 VDC (average); 135 mA@12VDC (peak)	
Memory	10.000 measurements	
Radio standard	ETS 300 220	
Frequency	868 – 870MHz (915MHz US)	
Range	1000m free line-of-sight	
Housing	IP00	
Color	WiSensys® Green	
Dimensions	96(w) x 134(h) x 52.5(d) mm, excl. wall mount	
Configuration	Through WiSensys® PC software Sensor-Graph	
Regulatory	R&TTE, CE	

Tab. 39: Technische Daten Funkmodul WS-DLXm mit analogen Eingang 0-1 Vdc und SKP 215 Quanten-Sensor

Function	Sensor	
Type	Analog input, 1 channel	
Sensor type	External	
Measurement range (Selectable via SensorGraph during installation)	1) 0 – 75 mV 2) 0 – 150 mV 3) 0 – 300 mV 4) 0 – 600 mV 5) 0 – 1000 mV	
Measurement accuracy	+/- 0,1% of range +/- 1 resolution step	
Measurement resolution (Refers to the measurement range)	1) 0 – 75 mV ; 5 µV 2) 0 – 150 mV ; 5 µV 3) 0 – 300 mV ; 10 µV 4) 0 – 600 mV ; 20 µV 5) 0 – 1000 mV); 40 µV;	
Input impedance	100K Ohm	
Overload protection	30 V	
Measurement interval (M)	From 1 second up, programmable from PC. default 20 seconds.	
Samples per transmission (T)	From 1 to 10 samples, default 1.	
Alarm thresholds for base station alarm	Minimum and maximum trip values	
Operating limits	-20°C to +80°C	
Power		
battery	1 AA 3.6V Lithium battery	
Externally powered	8 -24 V DC adapter for connection to the grid	
Battery life[1]	3 years with default settings for M and T 5 years with M=60 seconds and T=default	
Memory	10.000 measurements	
Radio standard	ETS 300 220	
Frequency	868 – 870MHz (915MHz US)	
Range	1000m with free line-of-sight	
Housing	IP65	
Color	WiSensys® Blue/Green	
Dimensions		
battery	60(w) x 80(h) x 26(d) mm, excl. wall mount	
Externally powered	95(w) x 130(h) x 45(d) mm, excl. wall mount	
Configuration	Through WiSensys® PC software SensorGraph	
Regulatory	R&TTE, CE (EMC and Low voltage directive)	

Tab. 40: Technische Daten Quantensensor SKP215

Kosinus Korrektur:	ja	
Gehäuse:	Dupont "Delrin"	
Detektor:	Si- Photozelle	
Temperatur:	-35..+75°C	
Luftfeuchte:	0..100%	
Abmessungen:	D: 33mm, H:40mm	
Kabel:	2-adrig, Schirm	
Gewicht:	130g (inkl. 3m Kabel)	
Ausgang:	1mV/100mmol/m2/s	

Abb. 93: Wasserabgabe ohne Begrünung bei Bewässerung nach Anbieterempfehlung (Summe vom 18.10.13 8:00 Uhr bis 19.10.13 7:50 Uhr) [hellere Säulenteile: 8:00-19:50 Uhr, dunklere Säulenteile: 20:00-7:50 Uhr]

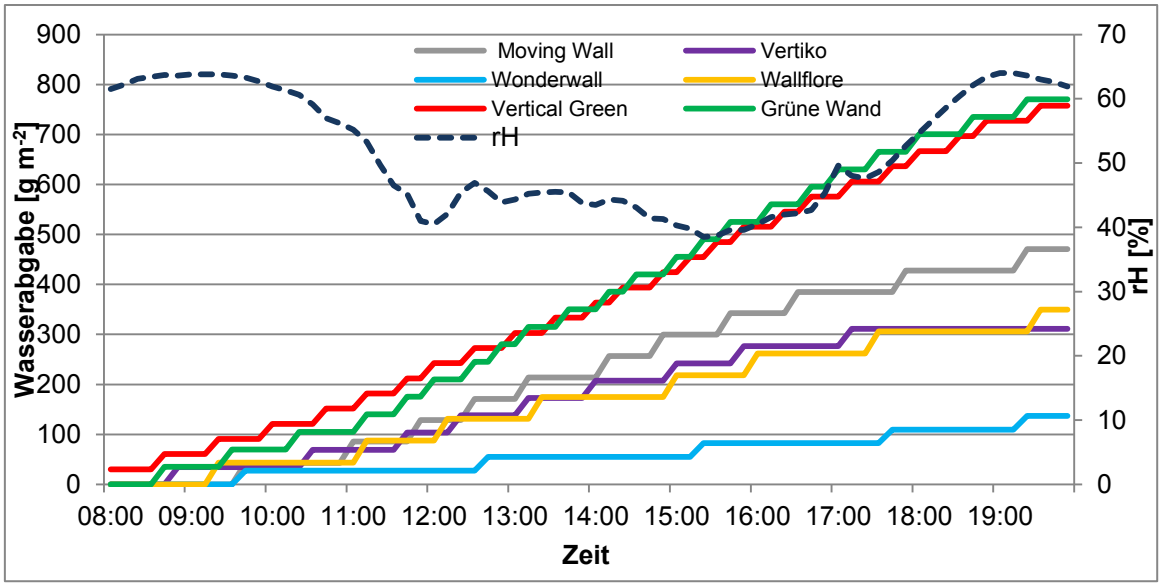


Abb. 94: Wasserabgabe ohne Begrünung bei Bewässerung nach Anbieterempfehlung (aufsummierte Werte vom 18.10.13 8:00 bis 19:50 Uhr) in Relation zur relativen Luftfeuchte

Messgeräte:

Datenlogger Almemo 2890-9

Der verwendete Datenlogger Almemo 2890-9 wurde ohne Anzeigedisplay ausgeführt. Abb. 95 zeigt die Montage sowie eine Ansicht der Steckplätze.

Abb. 95: Datenlogger Almemo 2890-9 der Fa. Ahlborn [24]

Insgesamt sind 9 Messeingänge vorhanden. Die wichtigsten technischen Daten sind in Tab. 41 zusammengefasst.

Tab. 41: Technische Daten zum Datenlogger Almemo 2890-9 [5]

Präzisionsklasse:	AA, siehe Seite 01.05
Messrate:	100, 50, 10 und 2,5 Messungen/s
Messeingänge	9 ALMEMO® Eingangsbuchsen
Galv. Trennung für analoge Fühler	mit Halbleiterrelais (50V) zusätzliche galv. Trennung zwischen Messeingängen und Versorgung (Gerätemasse)
Zusätzliche Kanäle:	4 Funktionskanäle, geräteintern
Fühlerspannungsvers.:	Akku: 9 oder 12V, max. 0,5A Netzadapter: 12 V, max. 0,3 mA
Ausgänge:	2 ALMEMO® Buchsen für alle Ausgangsmodule (Analog-, Daten-, Trigger-, Relaiskabel, Speicher, etc.

Speicher:	EEPROM für 100000 Messw.
Uhrzeit und Datum:	Echtzeituhr gepuffert mit Lithiumbat.
Spannungsversorgung:	
Akkupack:	6 NiMH-Akkus 1600mA 2,5 h Schnellladeschaltung intern
Netzadapter:	ZB1112NA7 230V AC auf 12V DC, 1A galv. getrennt
DC-Adapterkabel	galv. getr. ZB2590-UK, 10..30V, 1A
Stromverbrauch ohne Ein- und Ausgangsmodule:	
Aktivmodus:	ca. 37mA
mit Beleuchtung:	ca. 45..100mA
Sleepmodus:	ca. 0.05 mA
Gehäuse:	L204 x B109 x H44 mm, ABS (max. 70°C), 550g

Luftdruck, Temperatur- und Feuchtesensoren

Als kombinierter Temperatur- und Feuchtesensor kam das Modell FHAD 46-2 zum Einsatz (s. Abb. 96). Es ist in Kunststoff und mit geschlitzter Sensorkappe ausgeführt.

Abb. 96: Temperatur- und Feuchtesensor FHAD 46-2 der Fa. Ahlborn [24]

Neben der Raumlufttemperatur und der Luftfeuchte wurde auch der Luftdruck gemessen. Tab. 42 fasst die technischen Daten der Sensoren zusammen.

Tab. 42: Technische Daten zum Temperatur- und Feuchtesensor FHAD 46-2 [5]

Einsatzbereich:	-20...+60 °C / 5...98 % r.F
Mechanische Ausführung	
Sensorkappe	Ø 8 mm, Länge 36 mm
Steckverbindung	Ø ca. 9 mm, IP40
Feuchte	
Messbereich:	0...100 % r.F.
Sensor:	CMOSens® Technologie
Genauigkeit:	±1,8 % r.F. im Bereich 10...90 % r.F. bei Nenntemperatur
Hysterese:	typ. ±1 % r.F.
Nenntemperatur:	25 °C
Sensorbetriebsdruck:	atmosphärischer Druck
Ansprechzeit T63:	typ. 8 s bei 25°C, 1 m/s ohne Filter

Temperatur	
Sensor:	CMOSens® Technologie
Genauigkeit:	±0,3 K bei 25°C, ±0,4 K bei 10...40°C ±1,3 K bei -20...80°C
Reproduzierbarkeit:	typ. ±0,1 K
Ansprechzeit T_{63}:	typ. 20 s ohne Filter
ALMEMO® Anschlusskabel:	
PVC, Länge siehe unter Ausführungen, mit ALMEMO® D6-Stecker.	
Digitaler Luftdrucksensor (eingebaut im ALMEMO® D6-Stecker)	
Messbereich:	700 … 1100 mbar
Genauigkeit:	± 2,5 mbar (bei 0 bis 65 °C)
ALMEMO® D6-Stecker:	
Refreshrate:	2 Sek. für alle 4 Kanäle
Versorgungsspannung:	6 … 13 V DC
Stromverbrauch:	12 mA

CO_2-Sensor

Abb. 97 zeigt den CO_2-Sensor FYAD 00 CO2B10, der neben der CO_2-Konzentration ebenfalls zusätzlich den Luftdruck misst.

Abb. 97: CO_2-Sensor FYAD 00 CO2B10 der Fa. Ahlborn [24]

Die technischen Daten des Sensors sind in Tab. 43 aufgelistet.

Tab. 43: Technische Daten zum CO2-Sensor FYAD 00 CO2B10 [5]

Digitaler Kohlendioxid-Sensor (inkl. AD-Wandler)	
Messprinzip:	nicht-dispersive Infrarot-Technologie (NDIR)
Sensor:	2-Strahl Infrarotmesszelle
Messbereich:	0...10 000 ppm
Genauigkeit:	±(100 ppm +5 % vom Messwert)
Nennbedingungen:	25°C, 1013 mbar
Temperaturabhängigkeit:	typ. 2 ppm CO_2 / K im Bereich 0...50 °C
Ansprechzeit:	< 195 s
Einsatzbereich:	-40...60°C, 0...95 % r.F. (nicht kondensierend)
Messintervall:	gleitender Mittelwert 165 s (= 11 Momentanwerte 15 s)
Filterkappe:	PTFE Durchmesser ca. 18 mm Länge ca. 41 mm

Sensoranschluss:	Steckeranschluss
Handgriff:	mit Buchse, einbaute Elektronik
Abmessungen:	Durchmesser 20 mm Gesamtlänge inkl. Sensor 245 mm
ALMEMO® Anschlusskabel:	fest angeschlossenes Kabel 1,5 m mit ALMEMO® D6-Stecker
Digitaler Luftdrucksensor (eingebaut im Handgriff)	
Messbereich:	700 … 1100 mbar
Genauigkeit:	± 2,5 mbar (bei 0 bis 65 °C)
ALMEMO® D6-Stecker:	
Refreshrate:	1 Sek. für alle 4 Kanäle
Versorgungsspannung:	6 … 13 V DC
Stromverbrauch:	25 mA

Strahlungsintensität

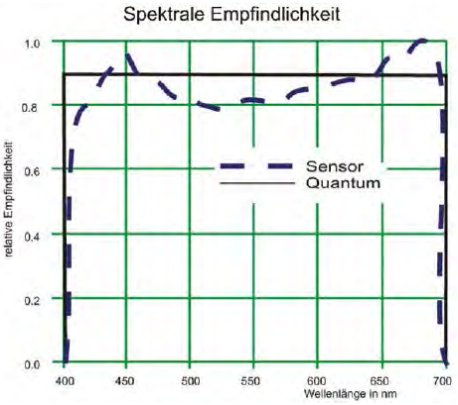
Zur Messung der Einstrahlung wurde der Quantum-Messkopf FLA 623 PS verwendet (s. Abb. 98). Der Messbereich umfasst das sichtbare Licht, das bei der Photosynthese vom Chlorophyll der Pflanzen absorbiert wird. Damit eignet er sich insbesondere, um die Bedingungen für Pflanzenwachstum zu bestimmen. Die gemessene Strahlungsintensität wird in [µmol/m²s] ausgegeben.

Abb. 98: Quantum-Messkopf FLA 623 PS der Fa. Ahlborn [24]

Die technischen Daten des Strahlungs-Messkopfes sind in Tab. 44 zusammengefasst.

Tab. 44: Technische Daten zum Quantum-Messkopf FLA 623 PS [5]

Messbereich:	0 bis ca. 3000 µmol/m²s
spektrale Empfindlichkeit:	380 nm bis 720 nm Maximum bei 420 und 700 nm
Diffusor:	PTFE
cos-Korrektur:	Fehler f2 < 3 %
Linearität:	< 1 %
absoluter Fehler:	< 10 % (< 5 % für FLA623VL)
V-Lambda Anpassung:	< 3 % (nur für FLA623VL)
Nenntemperatur:	22°C ±2 K
Arbeitstemperatur:	-20°C bis +60°C
Signalausgang:	0 bis 2 V
Einschaltzeit:	< 1 s
Energieversorgung:	über ALMEMO® Stecker (5 bis 15 V DC)
Elektrischer Anschluß:	Einbaustecker, seitlich
Anschluß-Kabel:	PVC-Kabel, steckbar, mit ALMEMO® Stecker
Gehäuse:	Aluminium, schwarz eloxiert
Befestigung:	2 Schrauben M2 in der Bodenplatte
Abmessungen:	Durchmesser 33 mm, Höhe ca. 29 mm
Gewicht:	ca. 50 g (ohne Kabel)



Präsenzmelder

Ein Präsenzmelder ist im Programm der Fa. Ahlborn nicht verfügbar und wurde deshalb von einem alternativen Hersteller bezogen. Zum Einsatz kam das Modell WRF04I der Firma Thermokon Sensortechnik (s. Abb. 99).

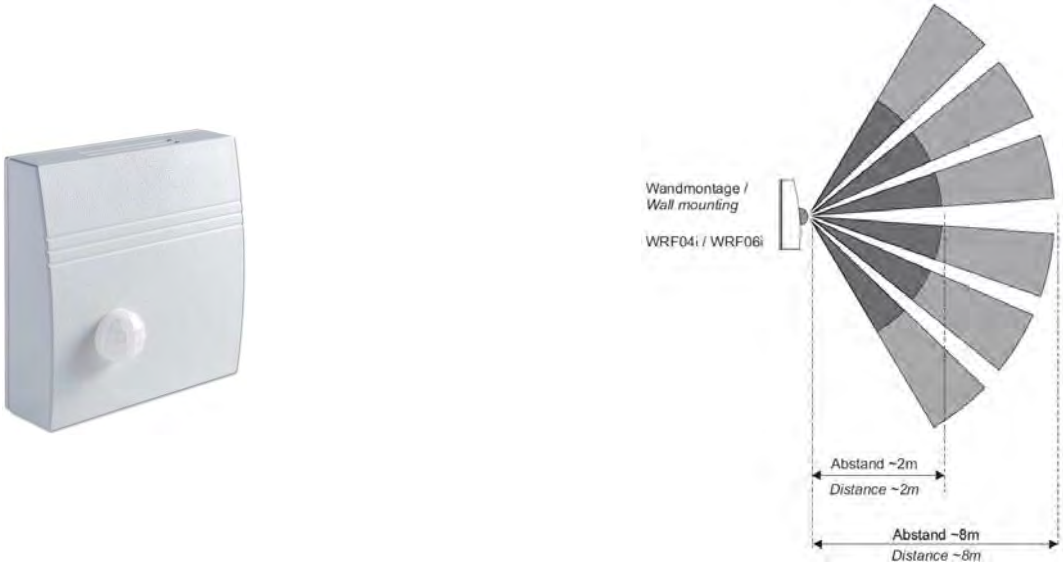


Abb. 99: Präsenzmelder WRF04I der Fa. Thermokon mit Erfassungsbereich [25]

Der Präsenzmelder wurde über einen Adapterstecker (Optokoppler) der Fa. Ahlborn mit dem Datenlogger verdrahtet. Ein zusätzliches Netzgerät sorgte für die Spannungsversorgung.

In Tab. 45 sind die technischen Daten des Präsenzmelders dargestellt.

Tab. 45: Technische Daten Präsenzmelder WRF04I [8]

Messelement:	PIR „passive infrared principle"	Leistungsaufnahme:	0,5W / 1,1VA
Erfassungsbereich[1]:	Kegelförmig, Öffnungswinkel 100°, Reichweite 10m, 80 Zonen. Bei einer Einbauhöhe von 2,8m ergibt sich ein kreisförmiger Erfassungsbereich mit ca. 3,2m Radius, aufgeteilt in 80 Zonen. (Formel: Durchmesser D = Einbauhöhe H x 2,3)	Ausgang:	Potentialfreier Relaiskontakt (Schließer), max. Belastung 24V/1A, mit fester Nachlaufzeit von ca. 8 Sekunden.
		Gehäuse	WRF04I: ABS, Farbe weiß ähnlich RAL9010 WRF06I: Abdeckung mit Tragring der Schalterprogramm Hersteller Gira, Jung RDI: Deckeneinbauring Metall, Farbe weiß
Betriebsspannung:	15-24V= / 24V~ (±10%)		
Klemmen:	Klemmleiste max. 1,5mm²		
Umgebungstemp:	-20...+50°C, max. 85%rF nicht kond.	Gewicht:	WRF04I: ca. 85g; WRF06I: ca. 50g; RDI: ca. 55g
Schutzart:	IP20 gemäß EN 60529		

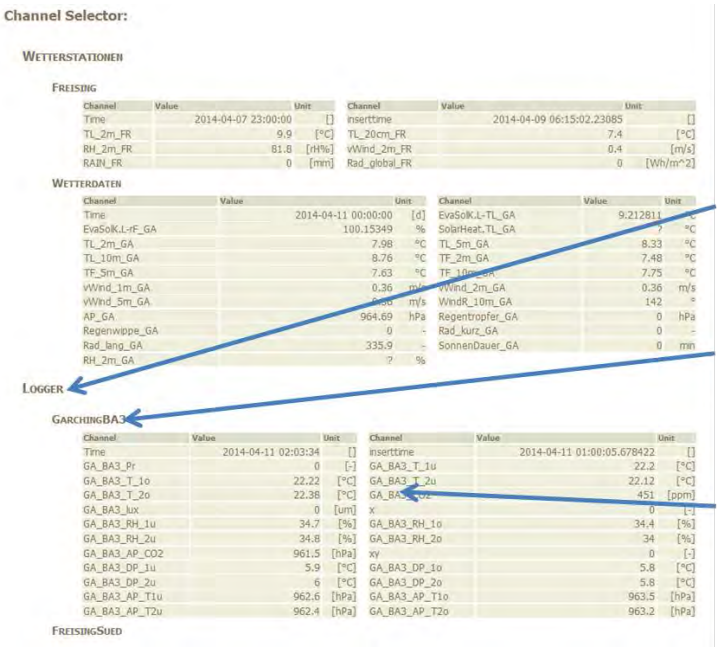


Abb. 100: Datenbankarchitektur Medview²

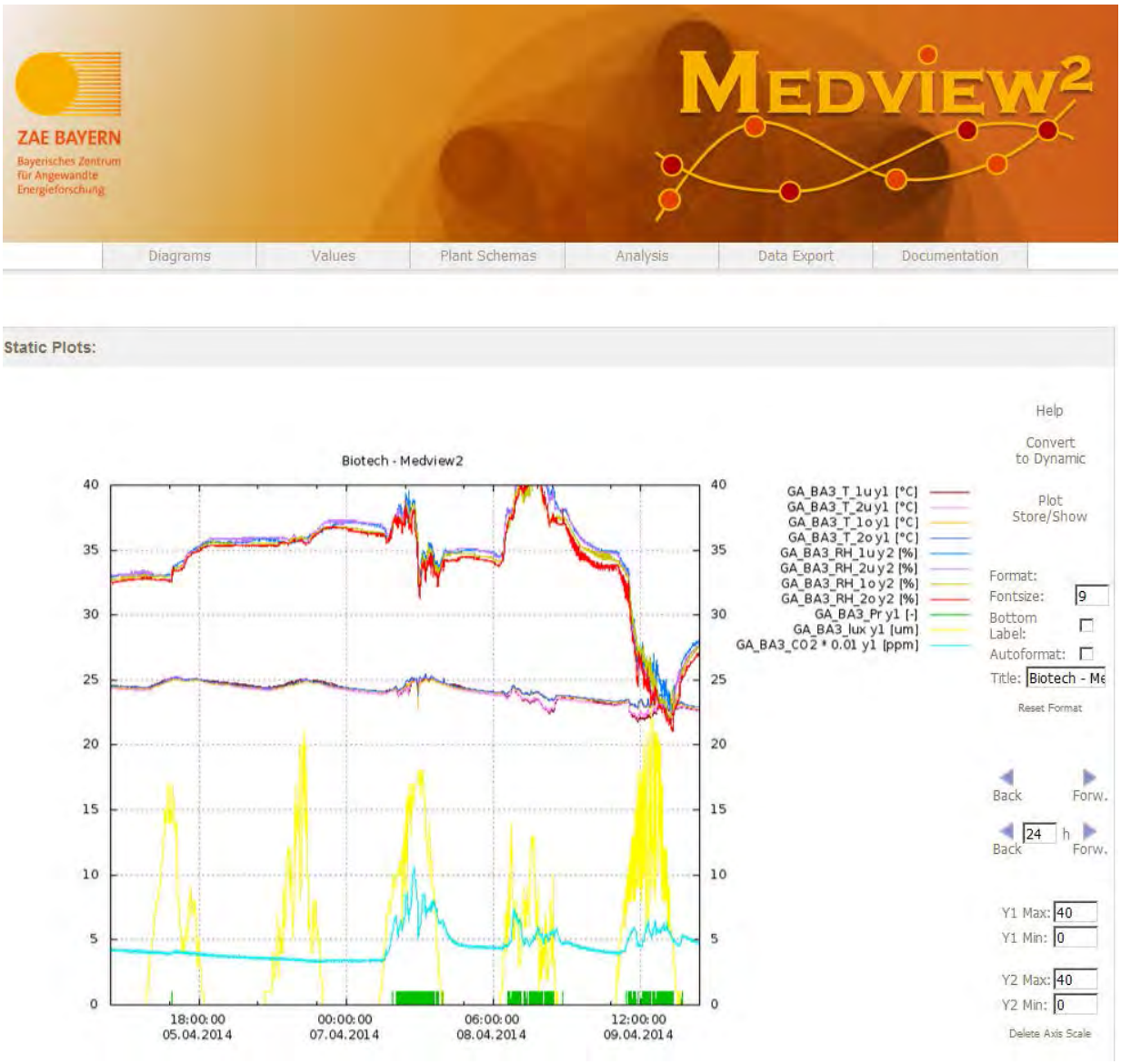


Abb. 101: Screenshot der Medview^2-Oberfläche

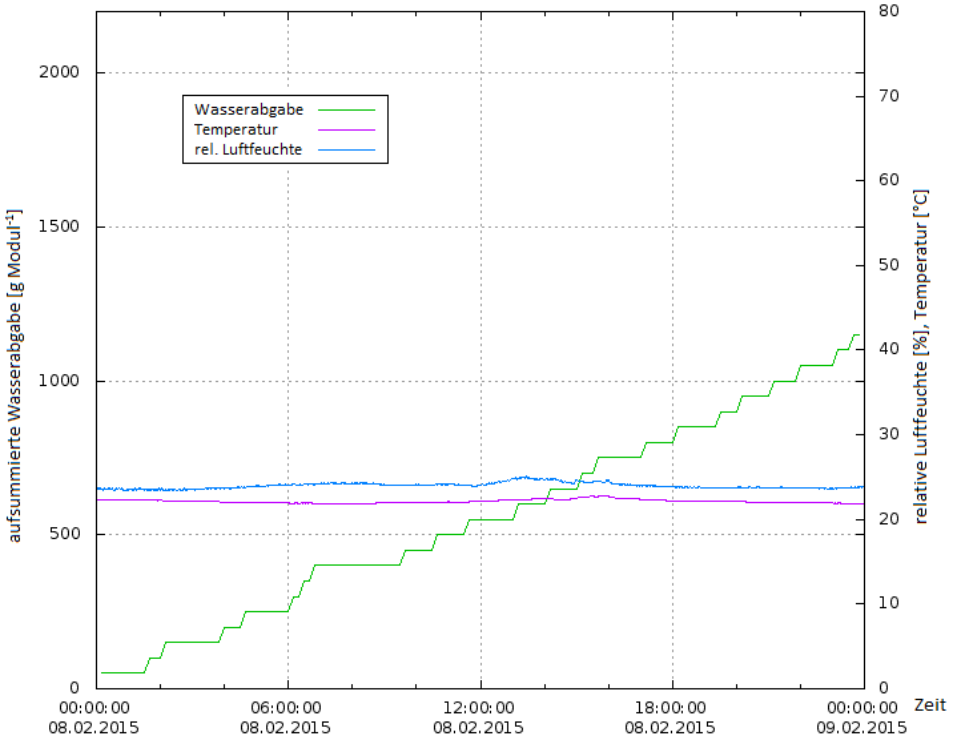


Abb. 102: Wasserabgabe durch das Begrünungssystem (aufsummiert über 24 h) in Raum B.2.01 an einem Sonntag bei niedriger relativer Luftfeuchte

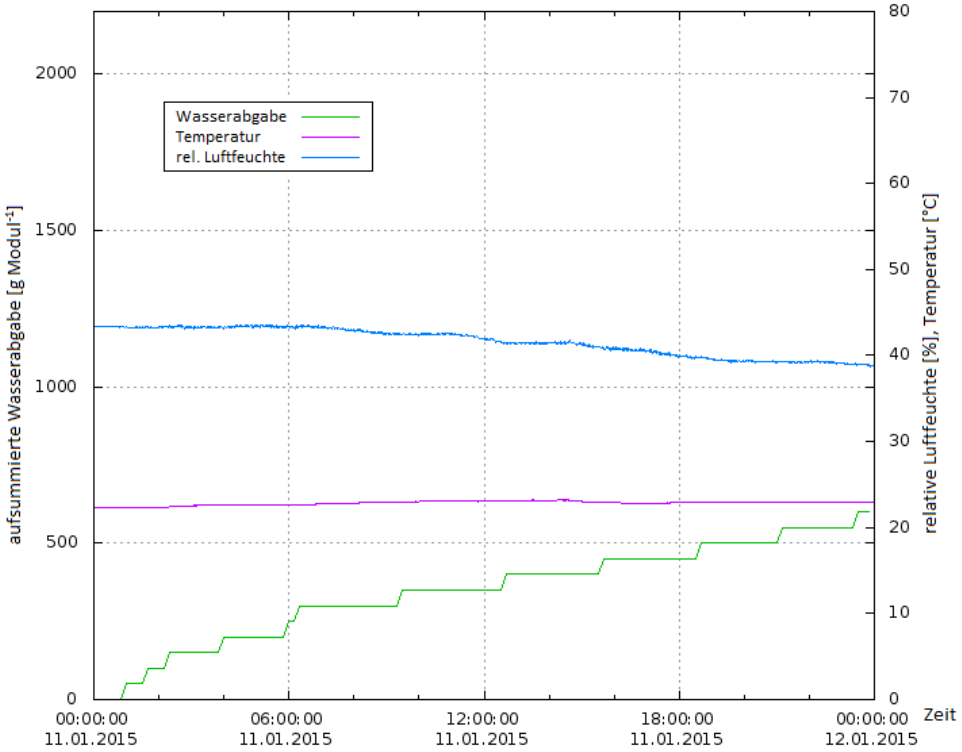


Abb. 103: Wasserabgabe durch das Begrünungssystem (aufsummiert über 24 h) in Raum B.2.01 an einem Sonntag bei höherer relativer Luftfeuchte

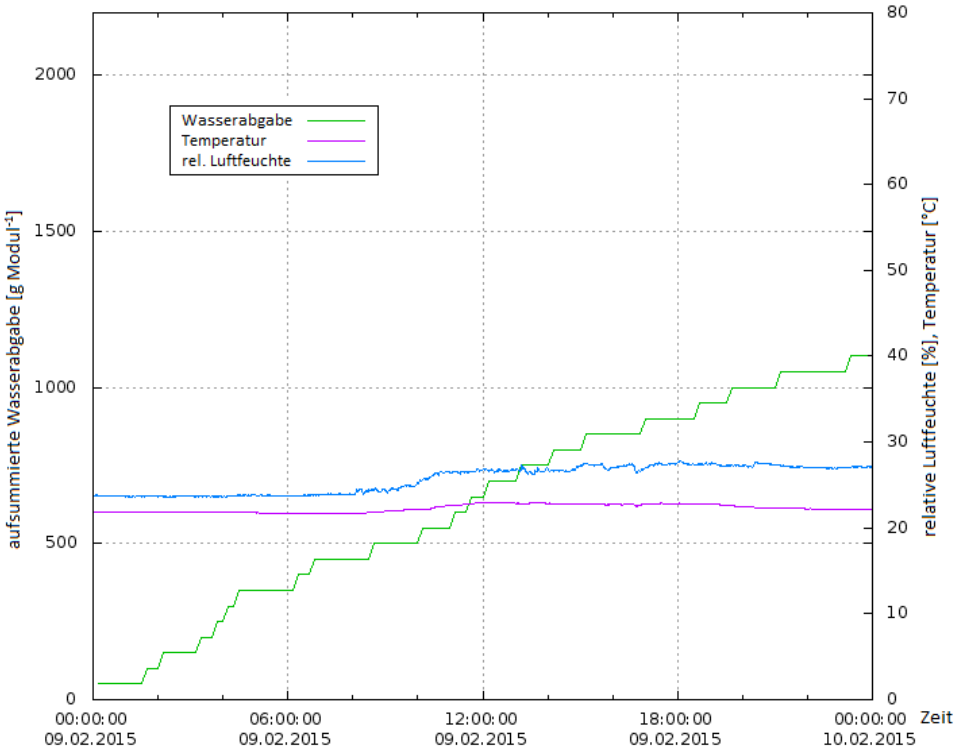


Abb. 104: Wasserabgabe durch das Begrünungssystem (aufsummiert über 24 h) in Raum B.2.01 an einem Arbeitstag bei niedriger relativer Luftfeuchte

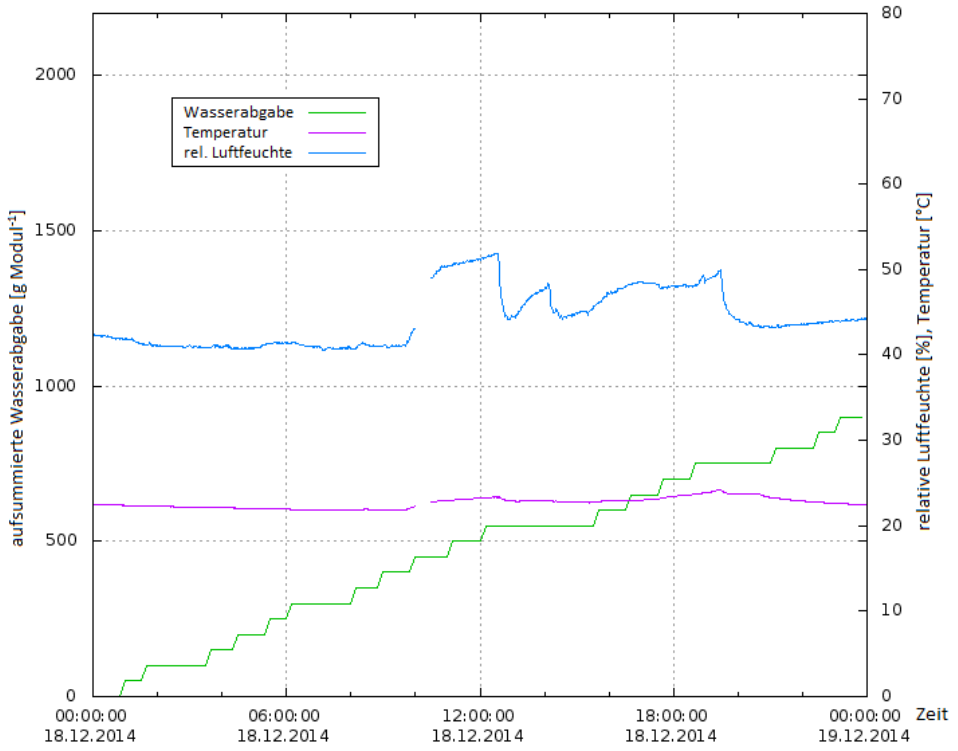


Abb. 105: Wasserabgabe durch das Begrünungssystem (aufsummiert über 24 h) in Raum B.2.01 an einem Arbeitstag bei höherer relativer Luftfeuchte

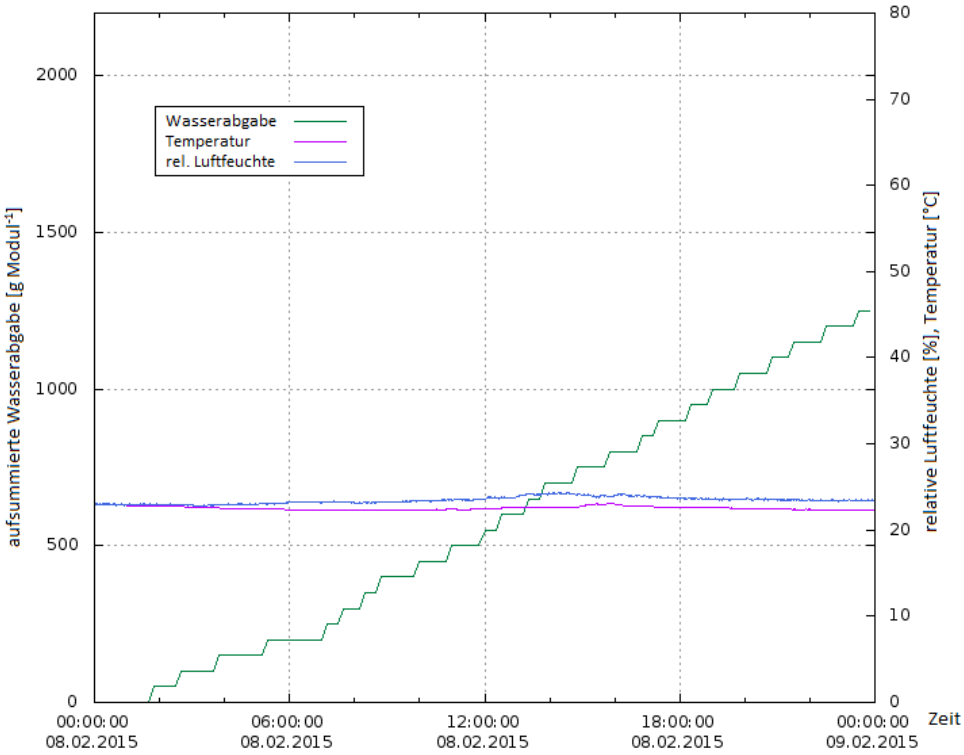


Abb. 106: Wasserabgabe durch das Begrünungssystem (aufsummiert über 24 h) in Raum B.2.03 an einem Sonntag bei niedriger relativer Luftfeuchte

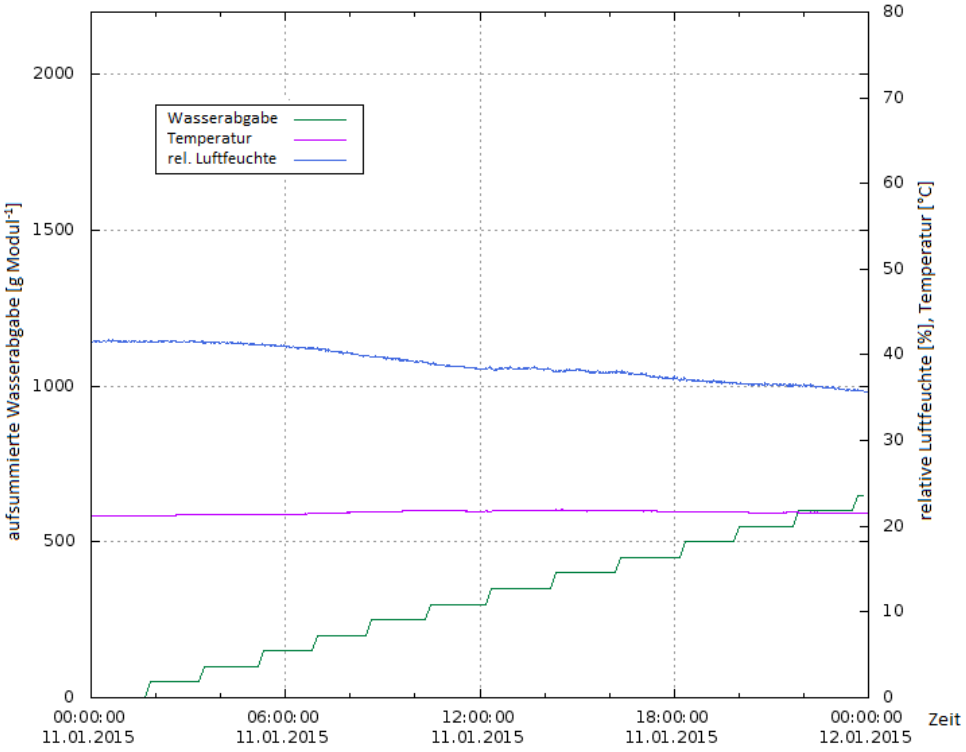


Abb. 107: Wasserabgabe durch das Begrünungssystem (aufsummiert über 24 h) in Raum B.2.03 an einem Sonntag bei höherer relativer Luftfeuchte

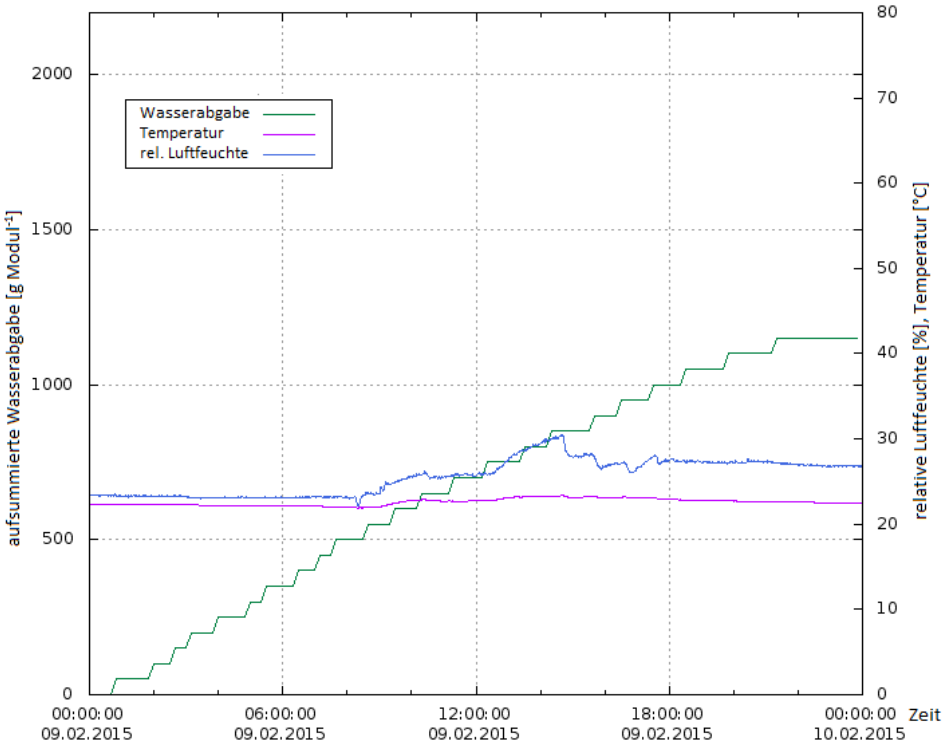


Abb. 108: Wasserabgabe durch das Begrünungssystem (aufsummiert über 24 h) in Raum B.2.03 an einem Arbeitstag bei niedriger relativer Luftfeuchte

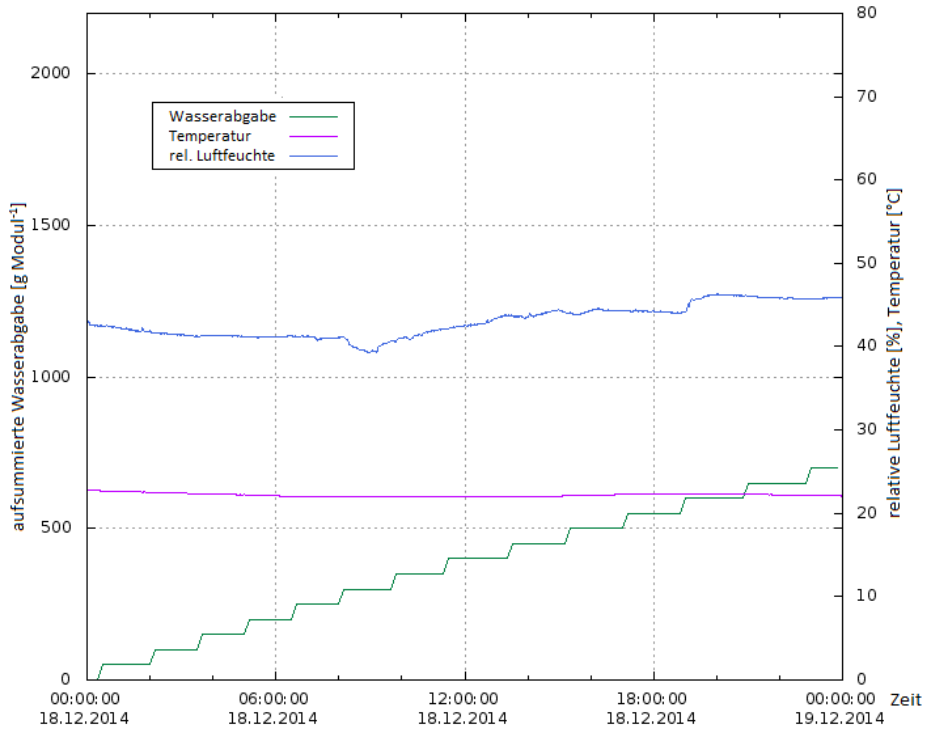


Abb. 109: Wasserabgabe durch das Begrünungssystem (aufsummiert über 24 h) in Raum B.2.03 an einem Arbeitstag bei höherer relativer Luftfeuchte

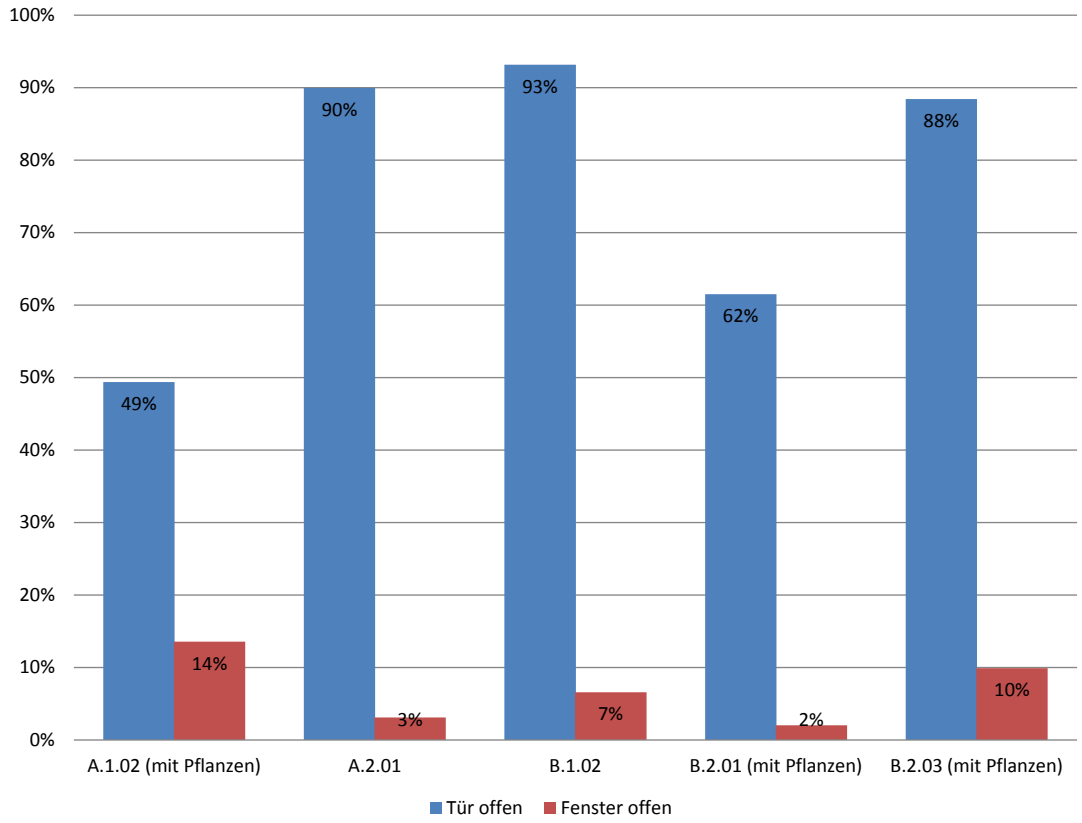


Abb. 110: Prozentuale Öffnungszeiten von Tür und Fenster während der Arbeitszeit im Winter

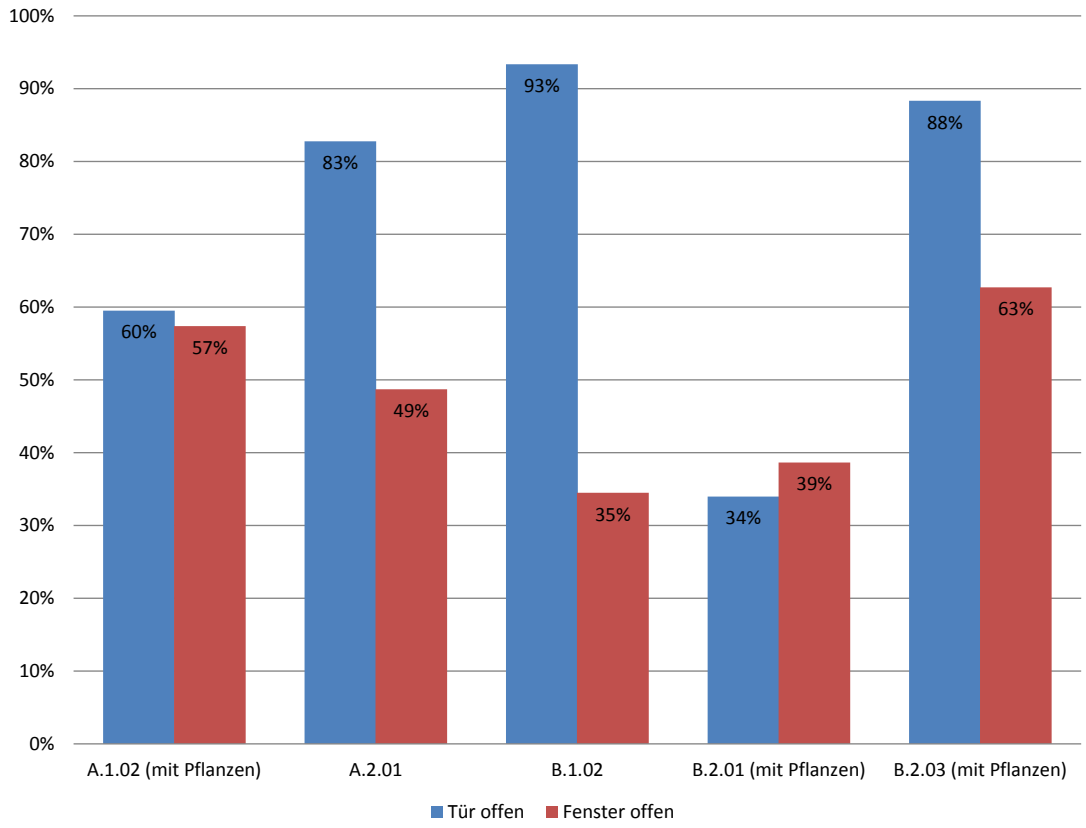


Abb. 111: Prozentuale Öffnungszeiten von Tür und Fenster während der Arbeitszeit im Übergang

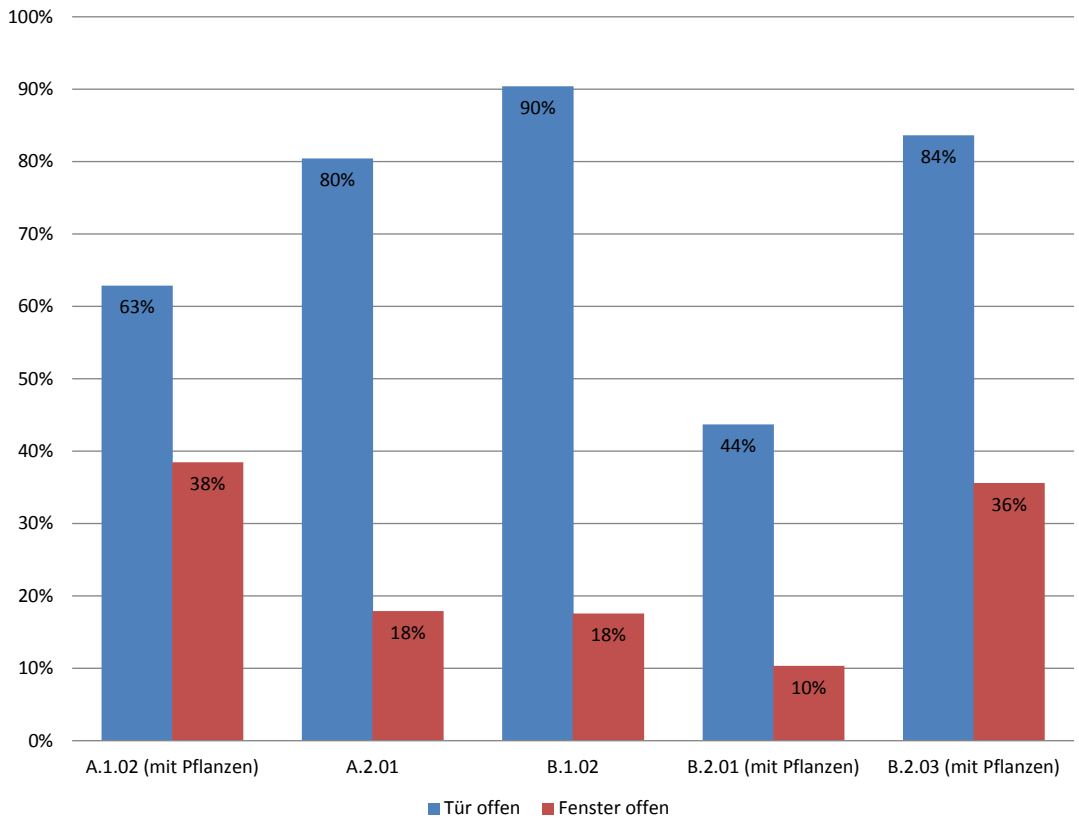


Abb. 112: Prozentuale Öffnungszeiten von Tür und Fenster während der Arbeitszeit im Sommer

Behaglichkeitsdiagramme in Abhängigkeit des Wassergehaltes der Außenluft (Abb. 113 bis Abb. 122):

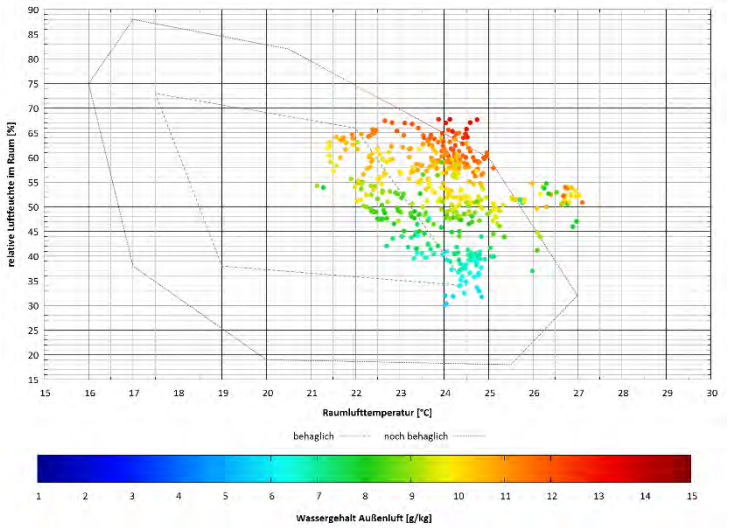


Abb. 113: Behaglichkeitsdiagramm A.1.02 mit Begrünungssystem für den Typtag Sommer

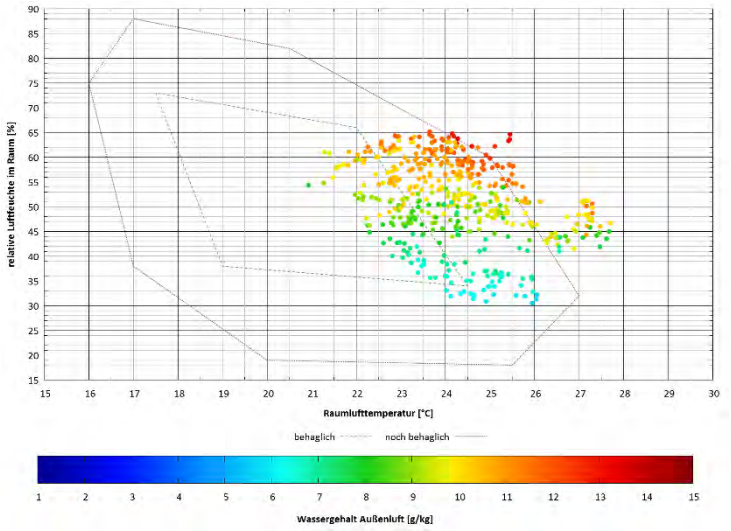


Abb. 114: Behaglichkeitsdiagramm A.2.01 Typtag Sommer

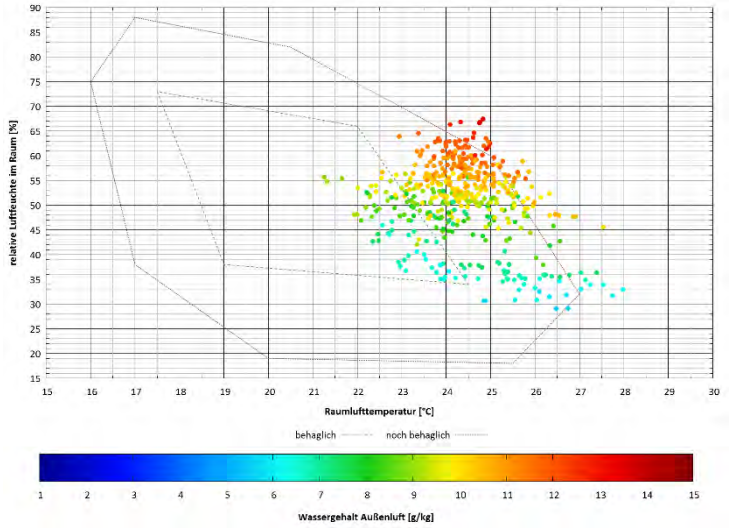


Abb. 115: Behaglichkeitsdiagramm B.1.02 für den Typtag Sommer

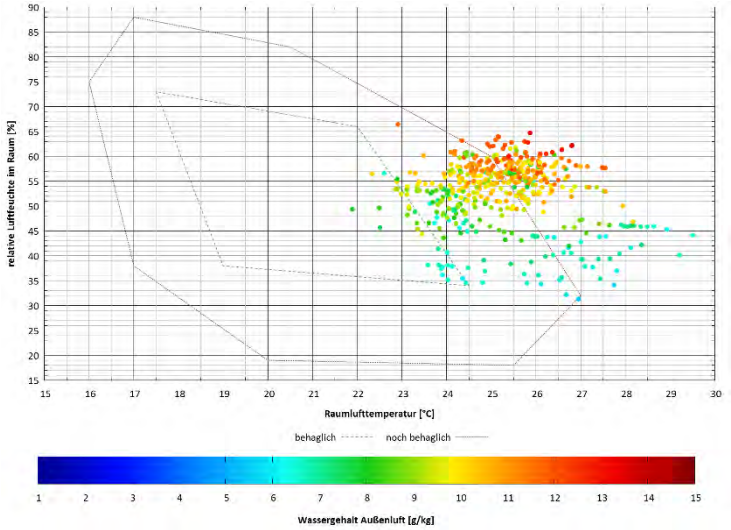


Abb. 116: Behaglichkeitsdiagramm B.2.01 mit Begrünungssystem für den Typtag Sommer

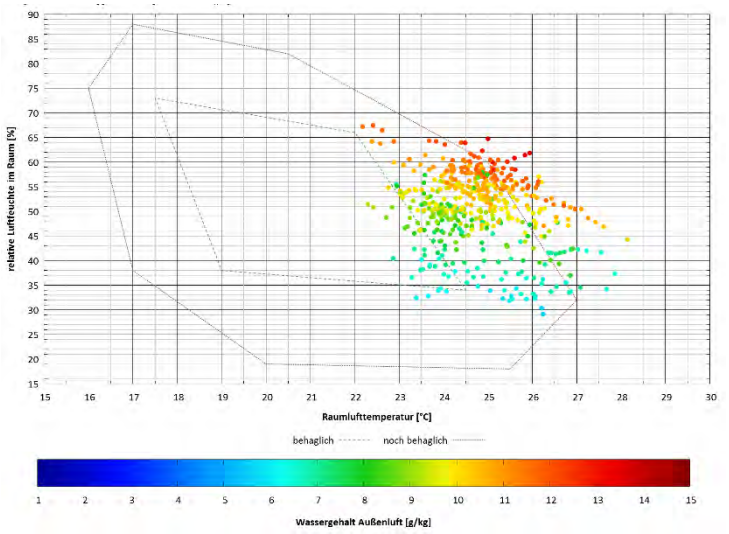


Abb. 117: Behaglichkeitsdiagramm B.2.03 mit Begrünungssystem für den Typtag Sommer

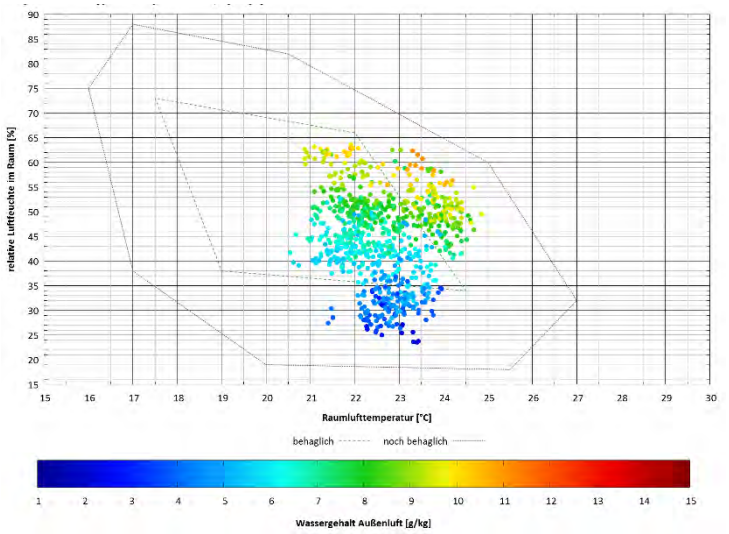


Abb. 118: Behaglichkeitsdiagramm A.1.02 mit Begrünungssystem für den Typtag Übergang

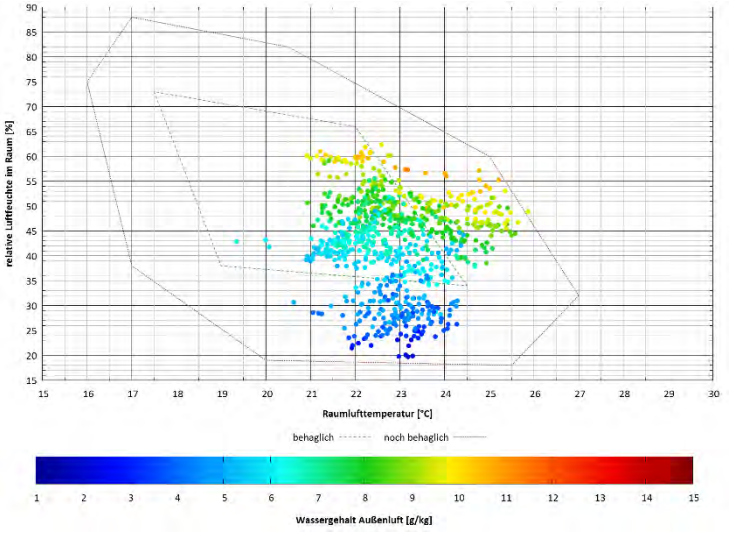


Abb. 119: Behaglichkeitsdiagramm A.2.01 für den Typtag Übergang

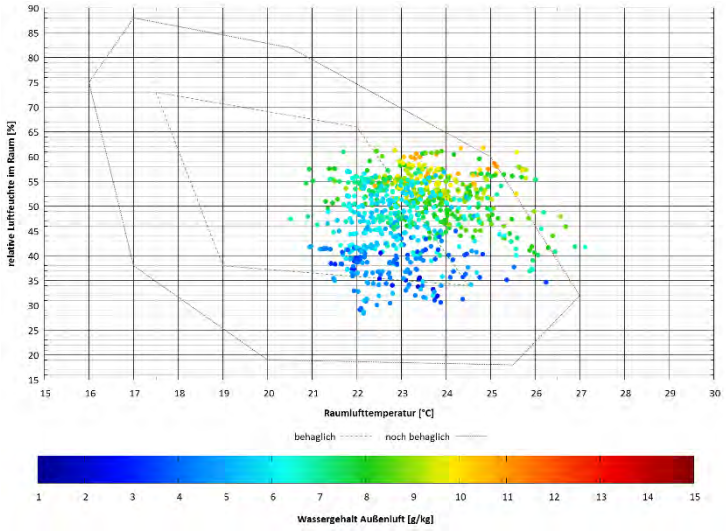


Abb. 120: Behaglichkeitsdiagramm B.2.01 mit Begrünungssystem für den Typtag Übergang

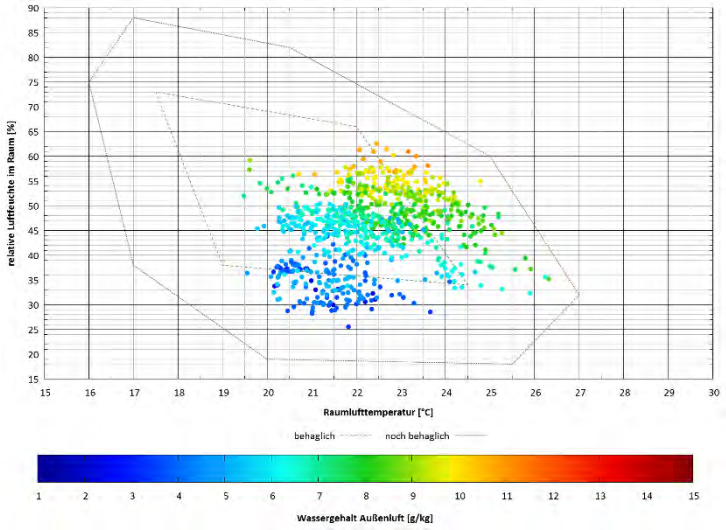


Abb. 121: Behaglichkeitsdiagramm B.1.02 für den Typtag Übergang

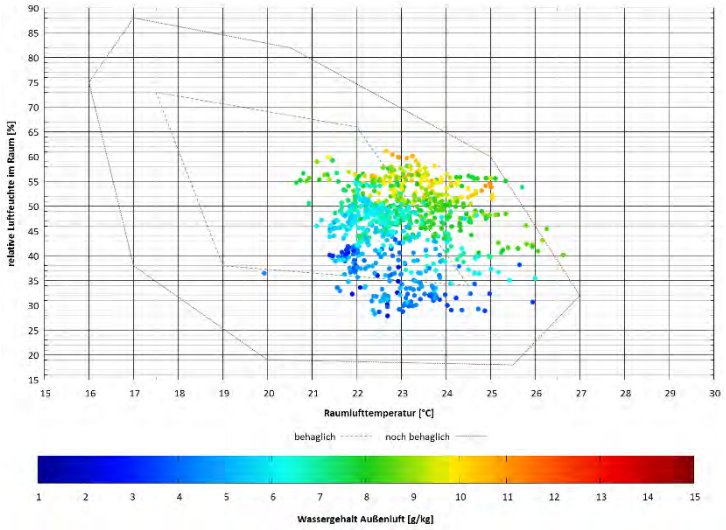


Abb. 122: Behaglichkeitsdiagramm B.2.03 mit Begrünungssystem für den Typtag Übergang

Behaglichkeitsdiagramme der großen Büros in Abhängigkeit der relativen Luftfeucht der Außenluft (Abb. 123 bis Abb. 128):

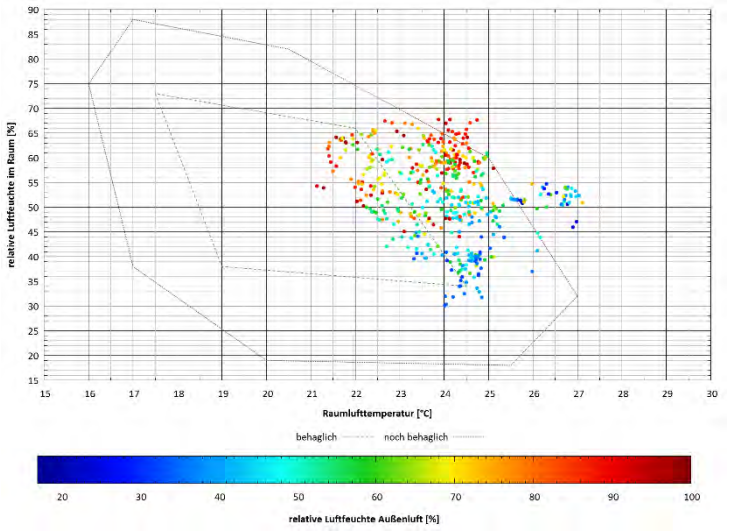


Abb. 123: Behaglichkeitsdiagramm A.1.02 mit Begrünungssystem für den Typtag Sommer

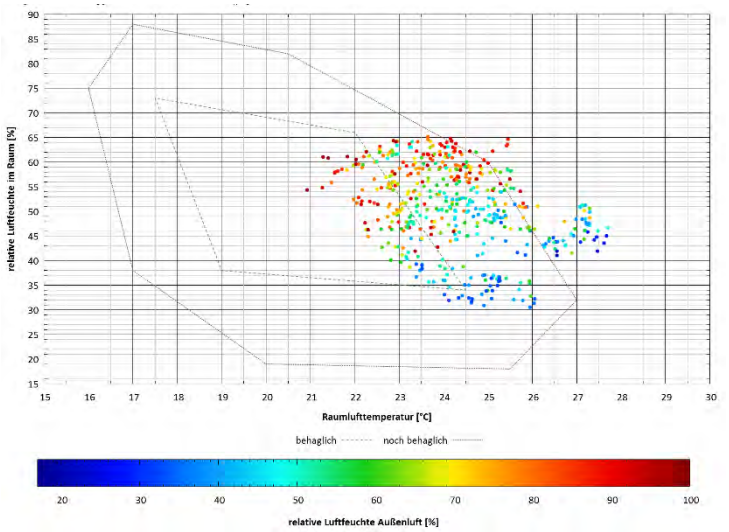


Abb. 124: Behaglichkeitsdiagramm A.2.01 für den Typtag Sommer

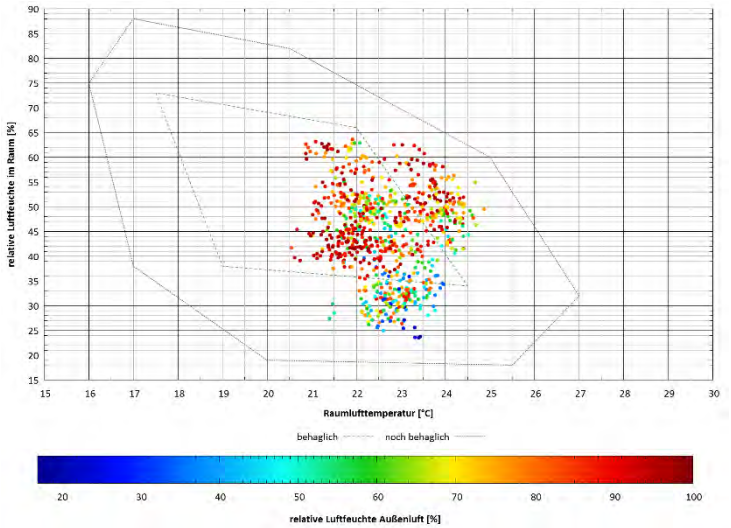


Abb. 125: Behaglichkeitsdiagramm A.1.02 mit Begrünungssystem für den Typtag Übergang

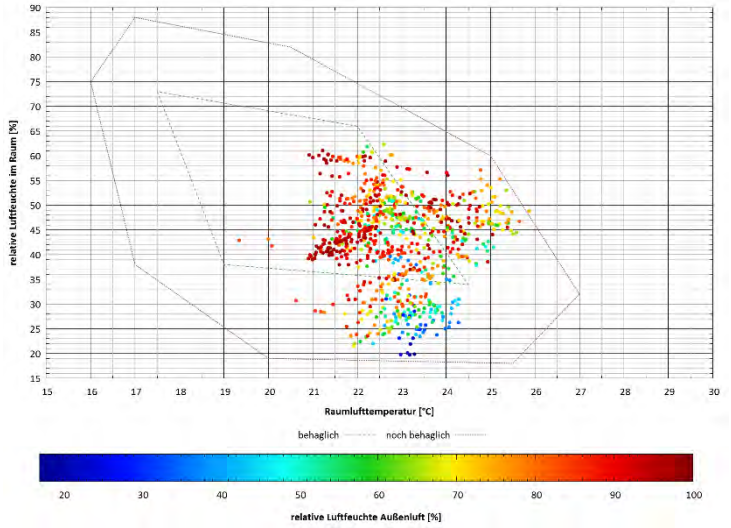


Abb. 126: Behaglichkeitsdiagramm A.2.01 für den Typtag Übergang

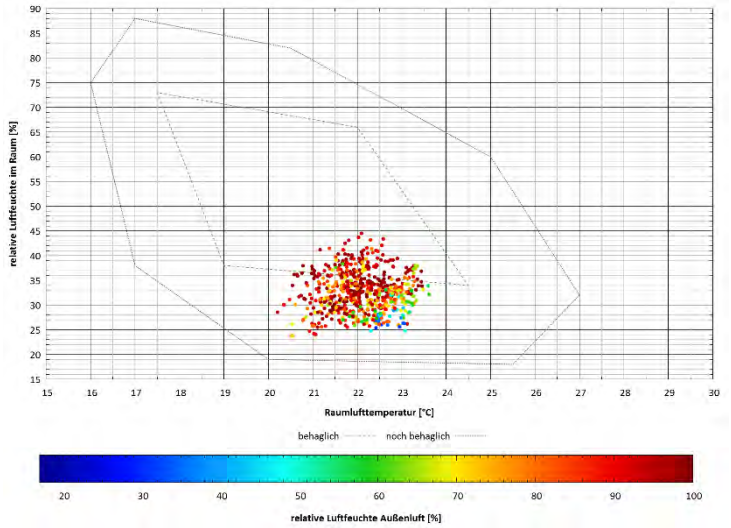


Abb. 127: Behaglichkeitsdiagramm A.1.02 mit Begrünungssystem für den Typtag Winter

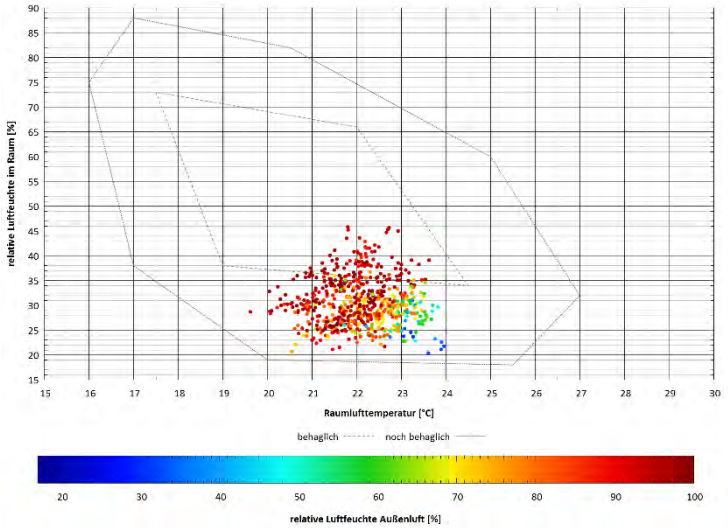


Abb. 128: Behaglichkeitsdiagramm A.2.01 für den Typtag Winter

Behaglichkeitsdiagramme der großen Büros in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur (Abb. 129 bis Abb. 134):

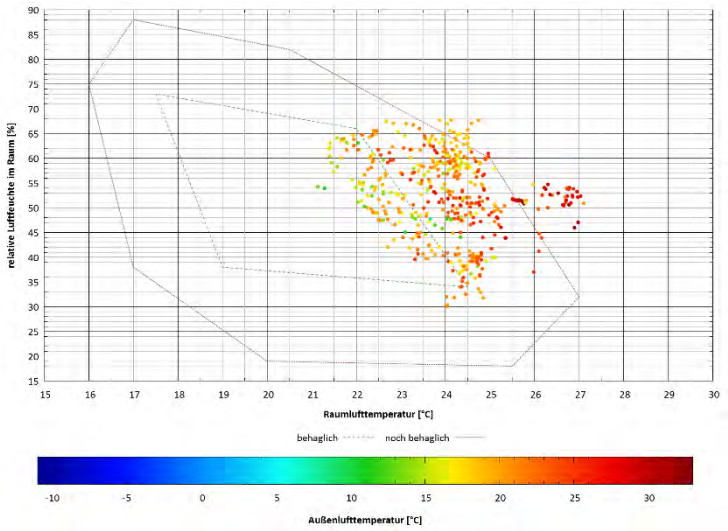


Abb. 129: Behaglichkeitsdiagramm A.1.02 mit Begrünungssystem für den Typtag Sommer

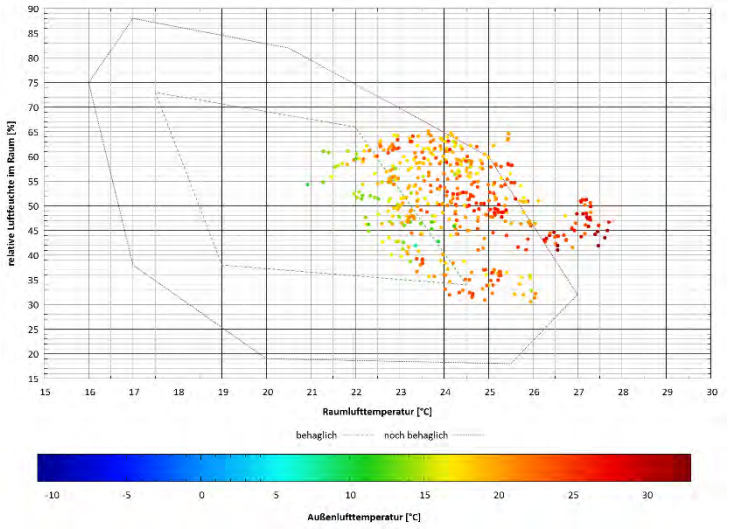


Abb. 130: Behaglichkeitsdiagramm A.2.01 für den Typtag Sommer

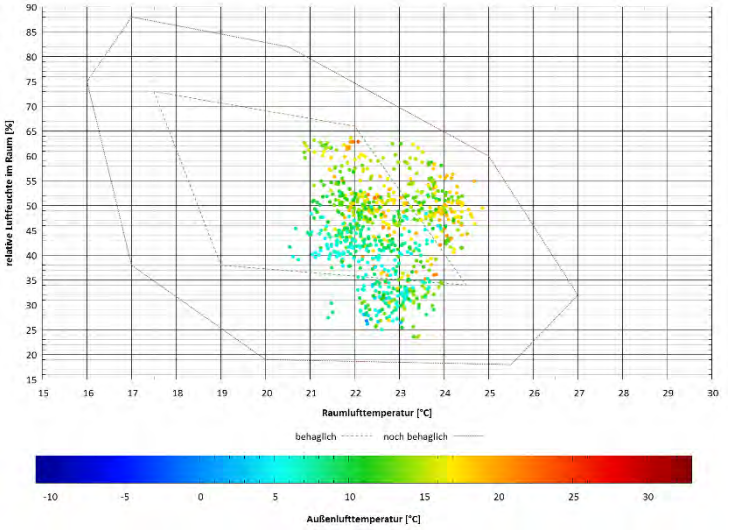


Abb. 131: Behaglichkeitsdiagramm A.1.02 mit Begrünungssystem für den Typtag Übergang

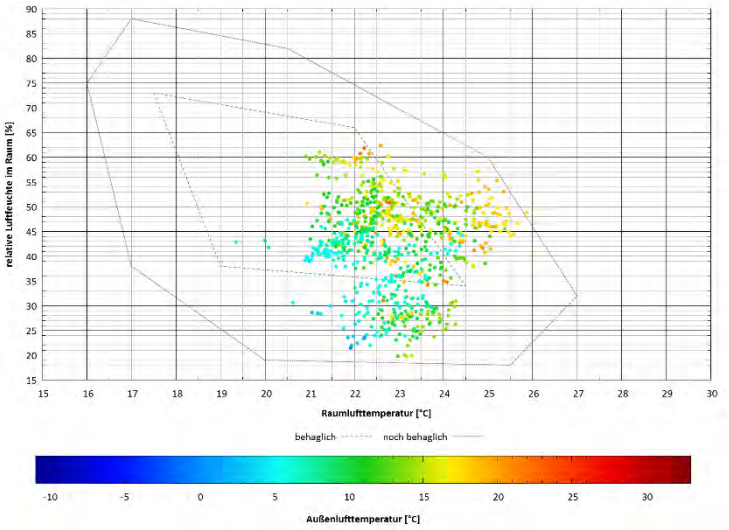


Abb. 132: Behaglichkeitsdiagramm A.2.01 für den Typtag Übergang

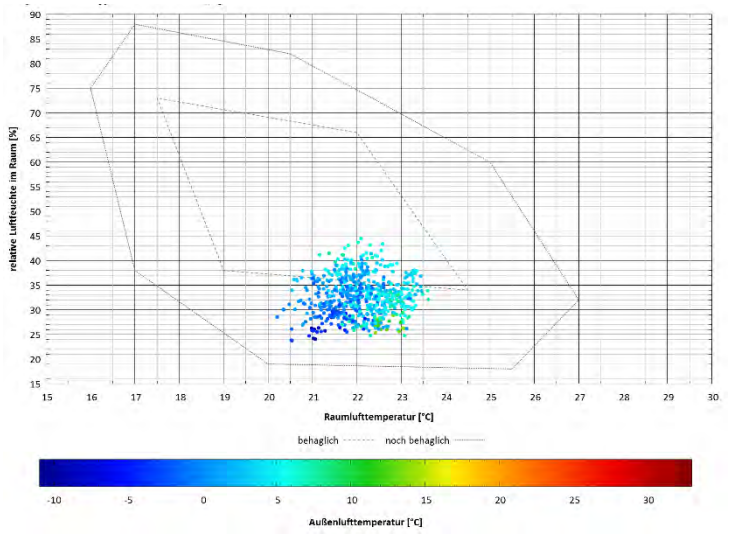


Abb. 133: Behaglichkeitsdiagramm A.1.02 mit Begrünungssystem für den Typtag Winter

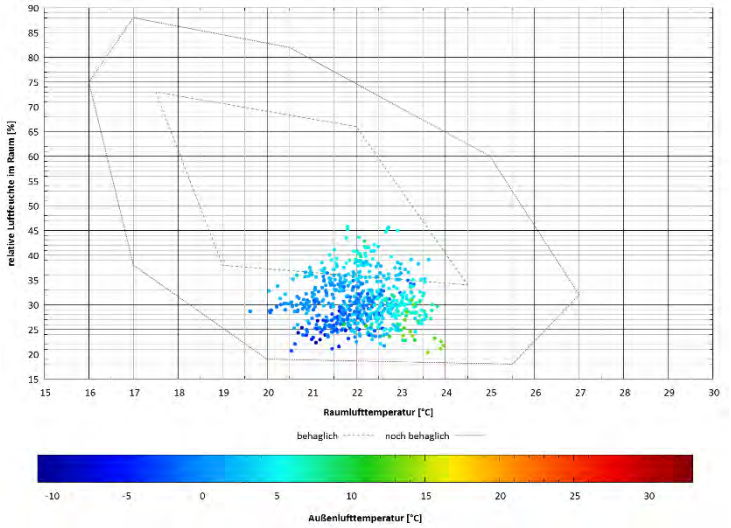


Abb. 134: Behaglichkeitsdiagramm A.2.01 für den Typtag Winter

t-x-Diagramme:

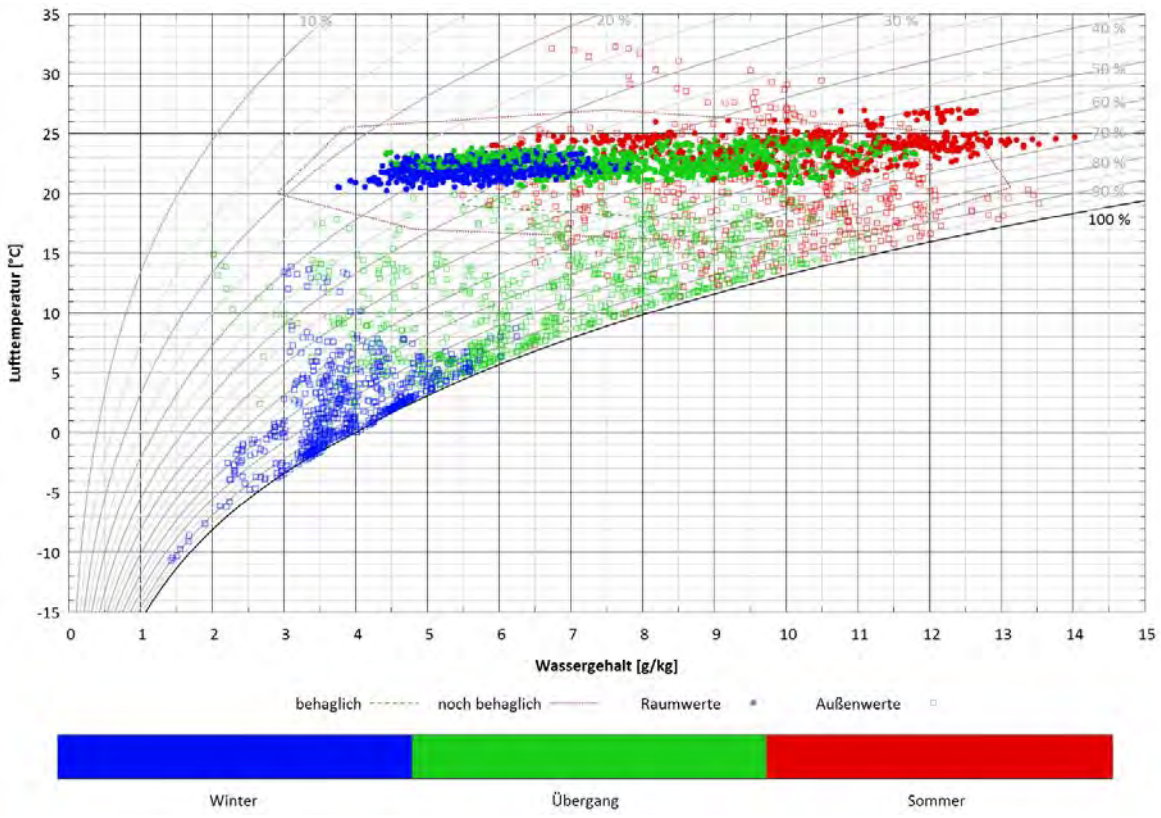


Abb. 135: t-x-Diagramm zu Raum A.1.02 mit Begrünungssystem, Stundenmittelwerte während der Arbeitszeit

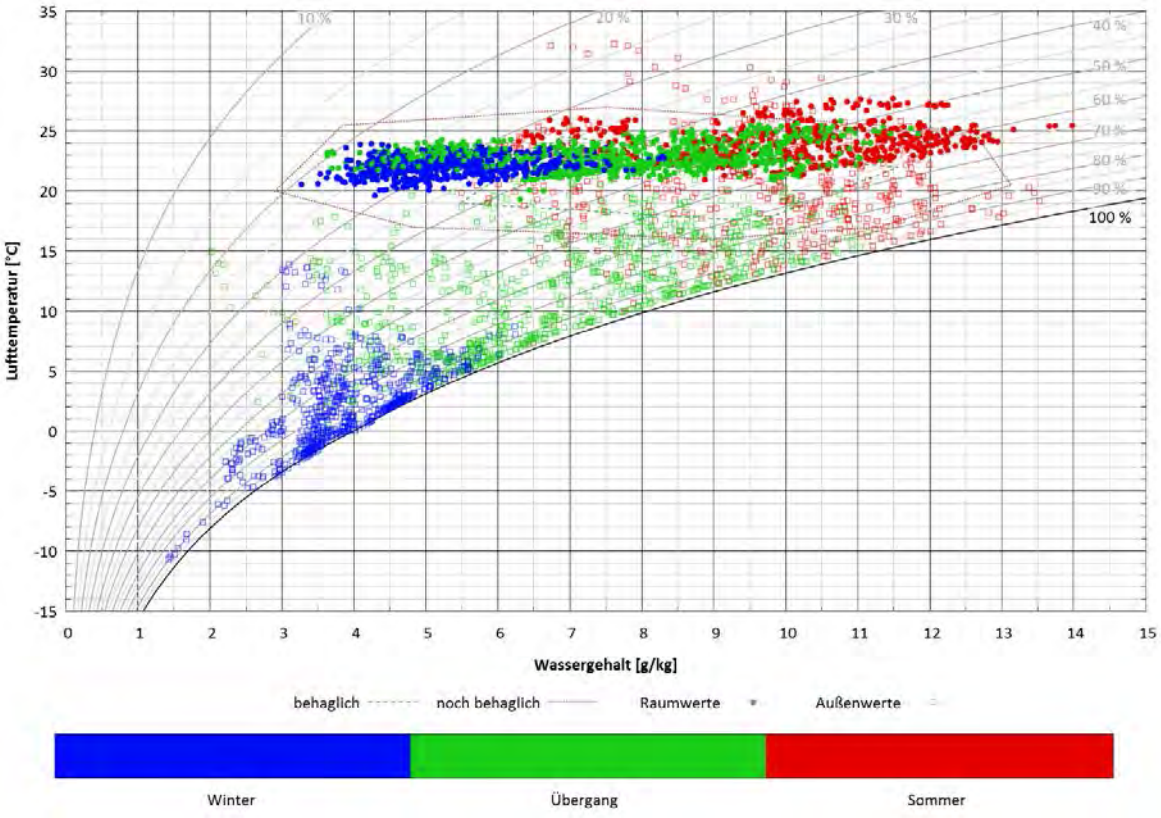


Abb. 136: t-x-Diagramm zu Raum A.2.01 ohne Begrünungssystem, Stundenmittelwerte während der Arbeitszeit

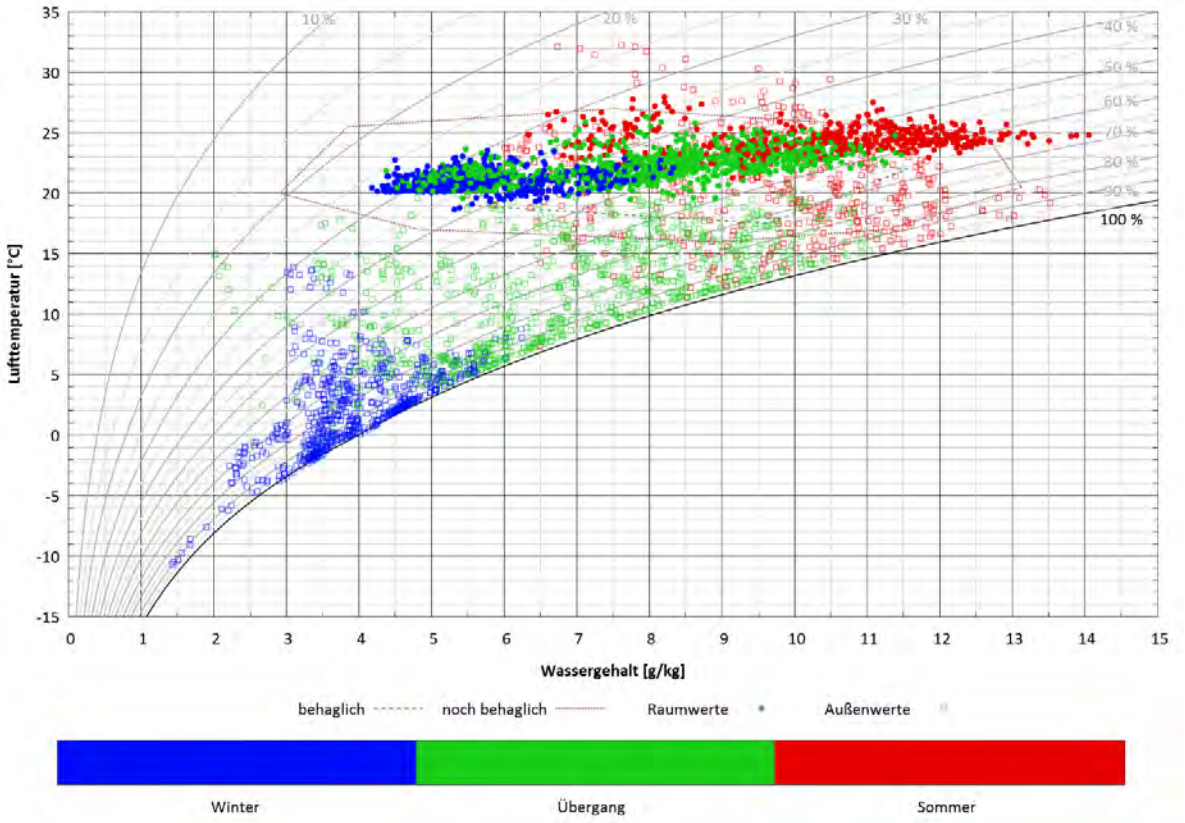


Abb. 137: t-x-Diagramm zu Raum B.1.02 ohne Begrünungssystem, Stundenmittelwerte während der Arbeitszeit

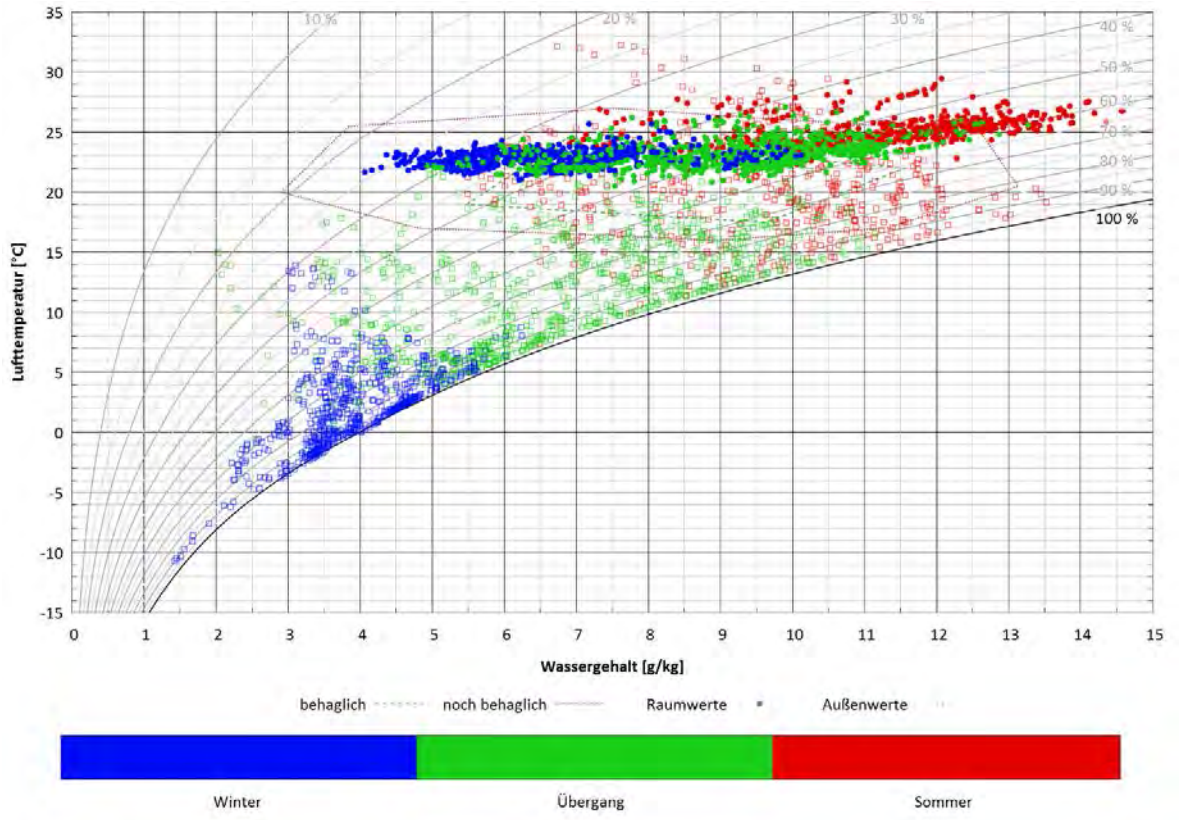


Abb. 138: t-x-Diagramm zu Raum B.2.01 mit Begrünungssystem, Stundenmittelwerte während der Arbeitszeit

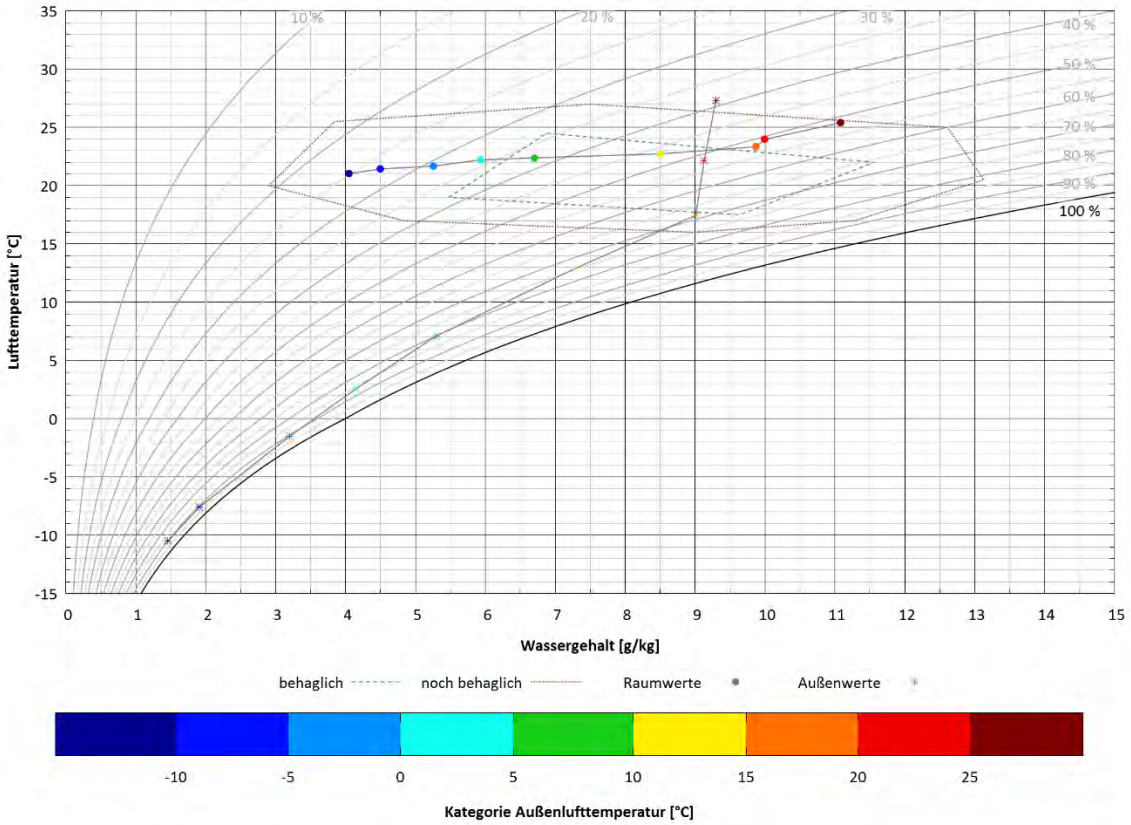


Abb. 139: t-x-Diagramm zu Raum A.1.02 mit Begrünungssystem kategorisiert nach der Außenlufttemperatur in 5 Kelvin Schritten

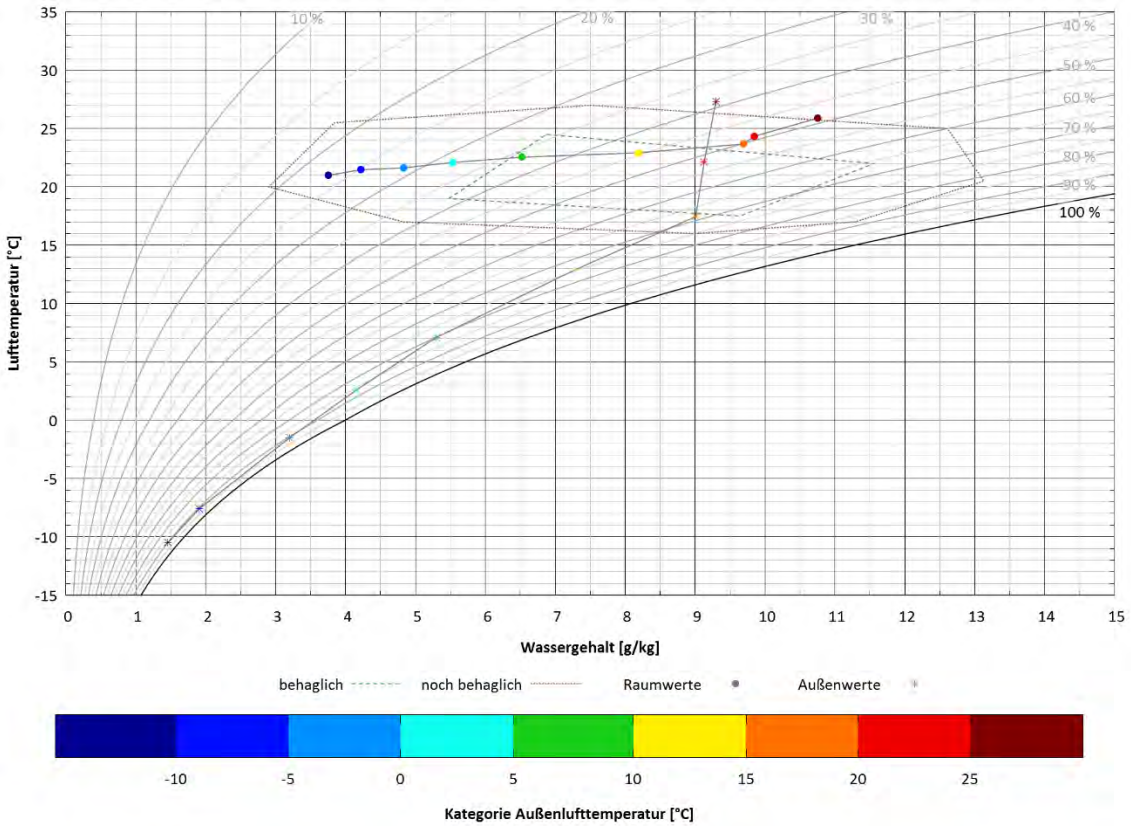


Abb. 140: t-x-Diagramm zu Raum A.2.01 kategorisiert nach der Außenlufttemperatur in 5 Kelvin Schritten

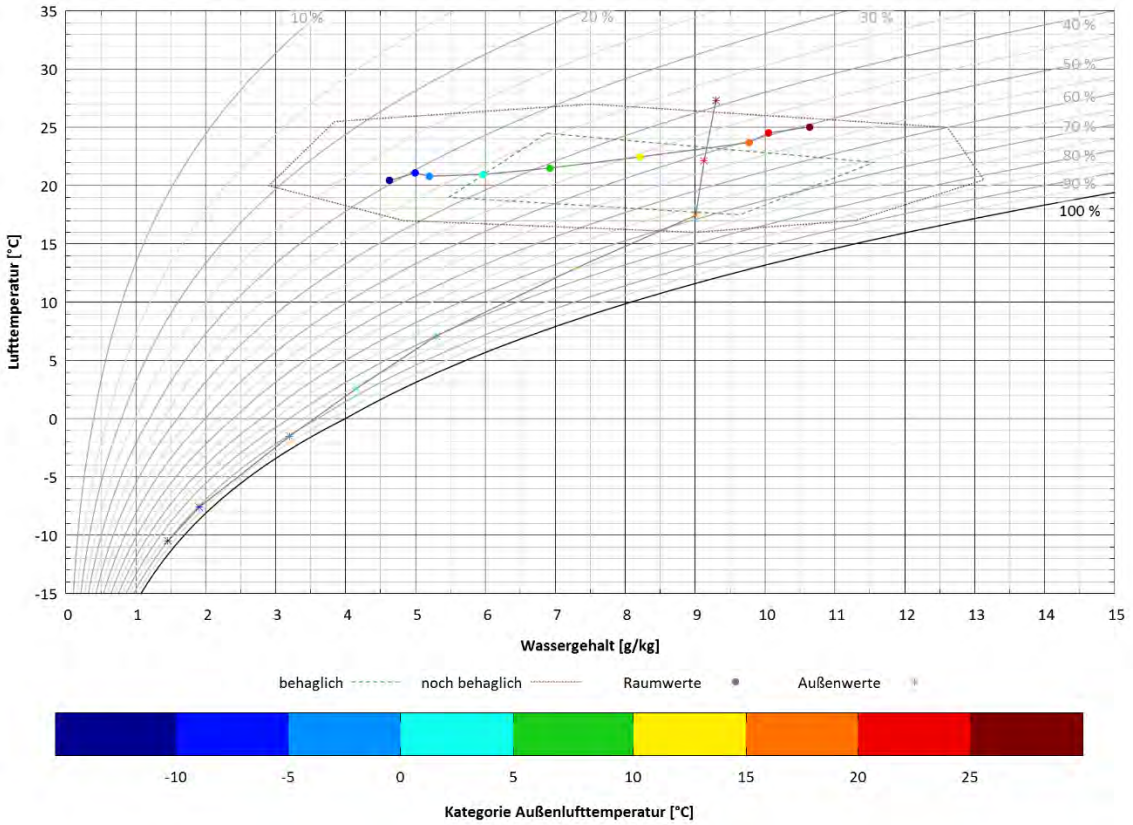


Abb. 141: t-x-Diagramm Raum B.1.02 kategorisiert nach der Außenlufttemperatur in 5 Kelvin Schritten

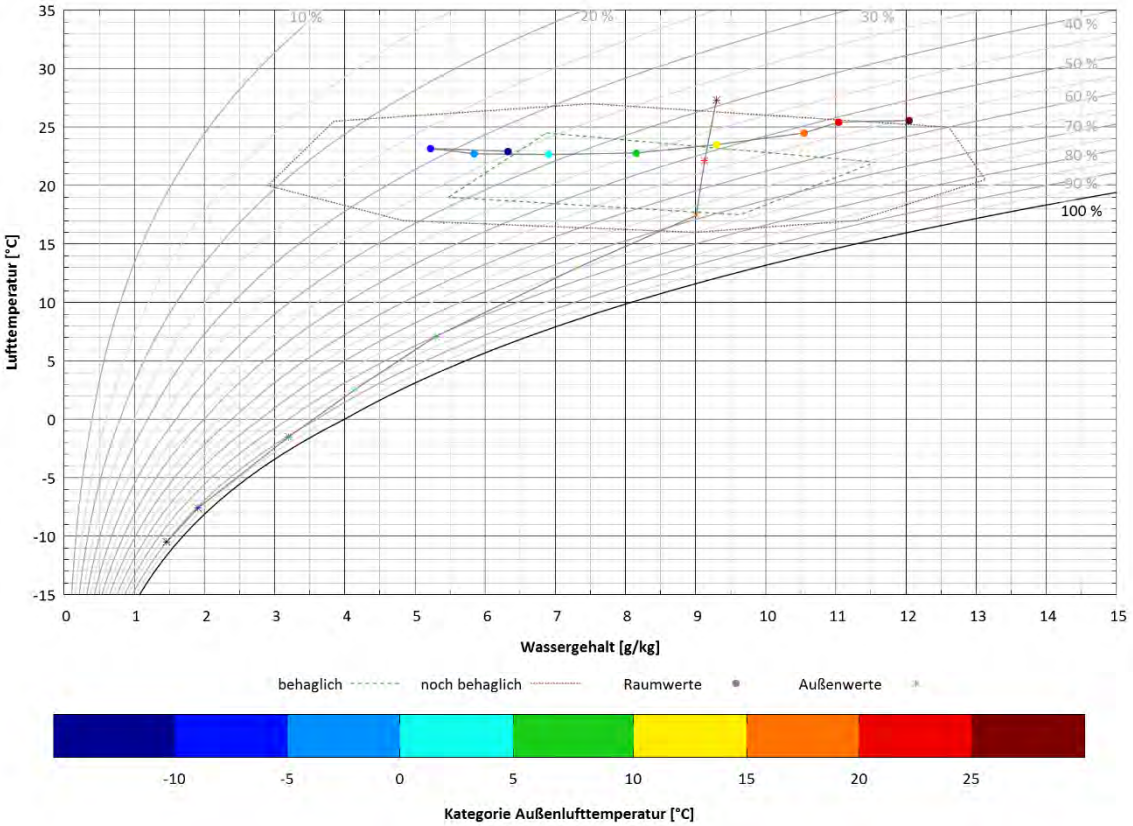


Abb. 142: t-x-Diagramm zu Raum B.2.01 mit Begrünungssystem kategorisiert nach der Außenlufttemperatur in 5 Kelvin Schritten

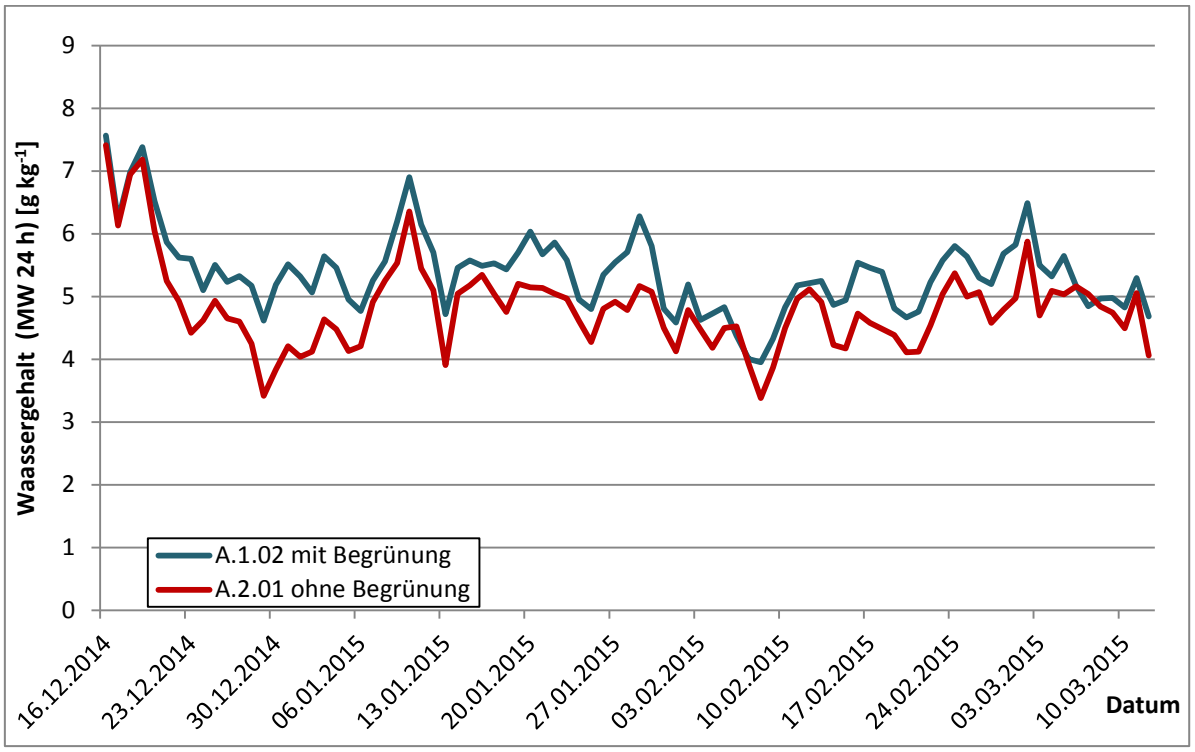


Abb. 143: Vergleich der Wassergehalte in der Raumluft (MW über 24 h) im großen Büro mit Begrünung (A.1.02) und ohne Begrünung (A.2.01) im Zeitraum vom 16.12.2014 bis 12.03.2015

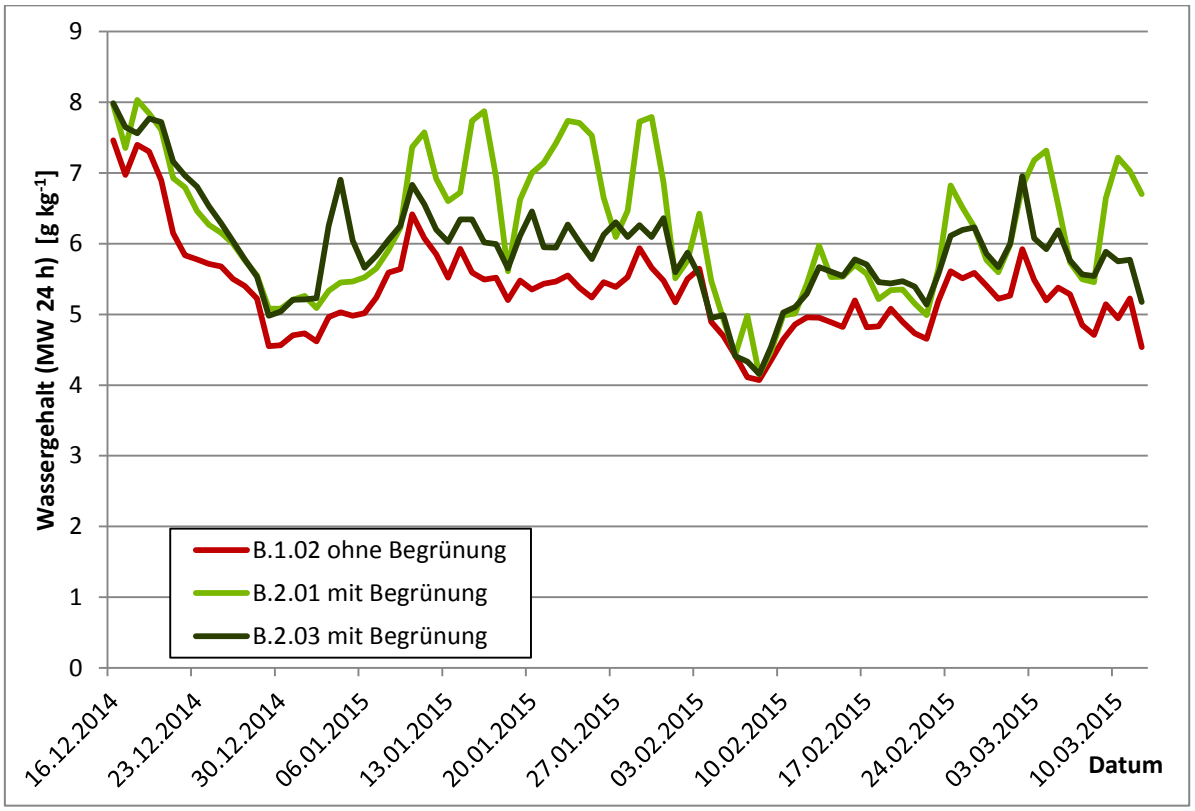


Abb. 144: Vergleich der Wassergehalte in der Raumluft (MW über 24 h) in kleinen Büros mit Begrünung (B.2.01 und B.2.03) und ohne Begrünung (B.1.02) im Zeitraum vom 16.12.2014 bis 12.03.2015

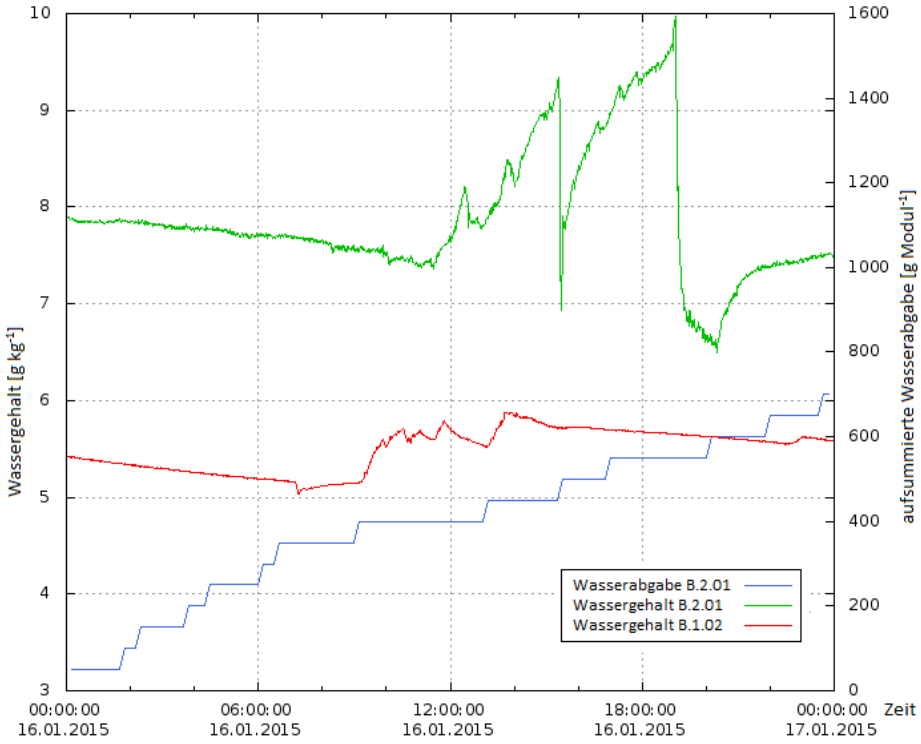


Abb. 145: Vergleich der Wassergehalte in der Raumluft im unbegrünten (B.1.02) und begrünten (B.2.01) Büro und Wasserabgabe (aufsummiert über 24 h) durch das Begrünungssystem in B.2.01 an einem Arbeitstag

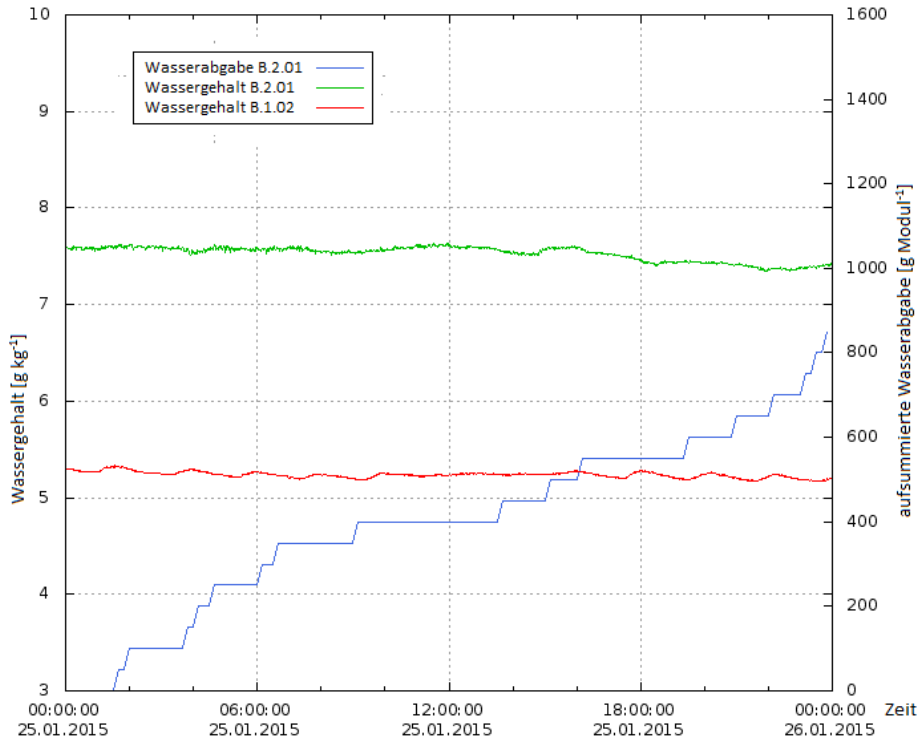


Abb. 146: Vergleich der Wassergehalte in der Raumluft im unbegrünten (B.1.02) und begrünten (B.2.01) Büro und Wasserabgabe (aufsummiert über 24 h) durch das Begrünungssystem in B.2.01 an einem Sonntag

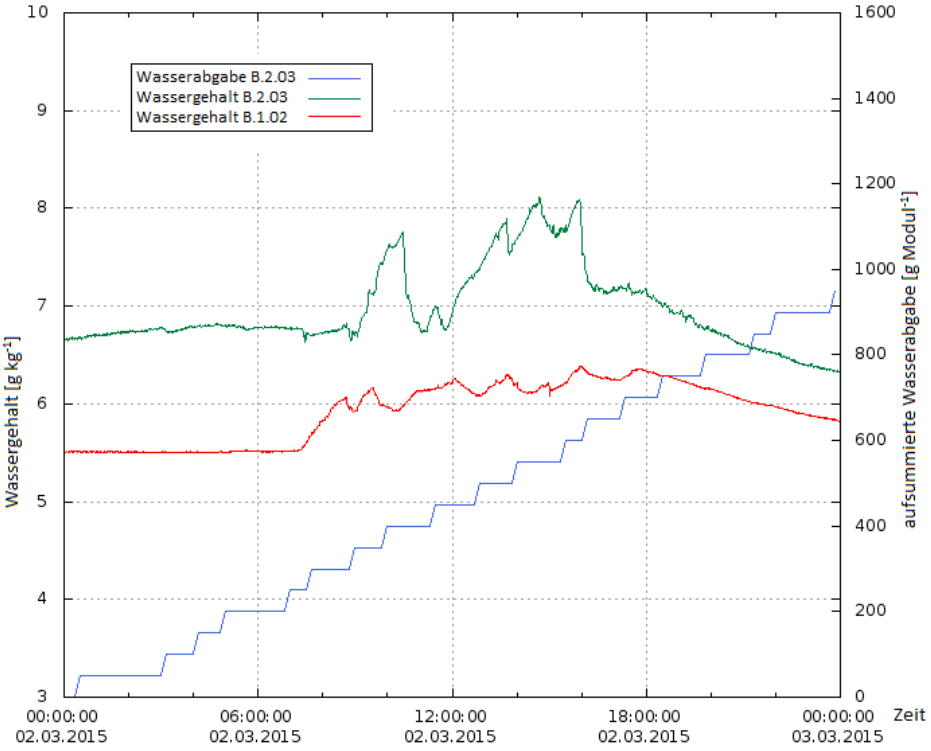


Abb. 147: Vergleich der Wassergehalte in der Raumluft im unbegrünten (B.1.02) und begrünten (B.2.03) Büro und Wasserabgabe (aufsummiert über 24 h) durch das Begrünungssystem in B.2.03 an einem Arbeitstag

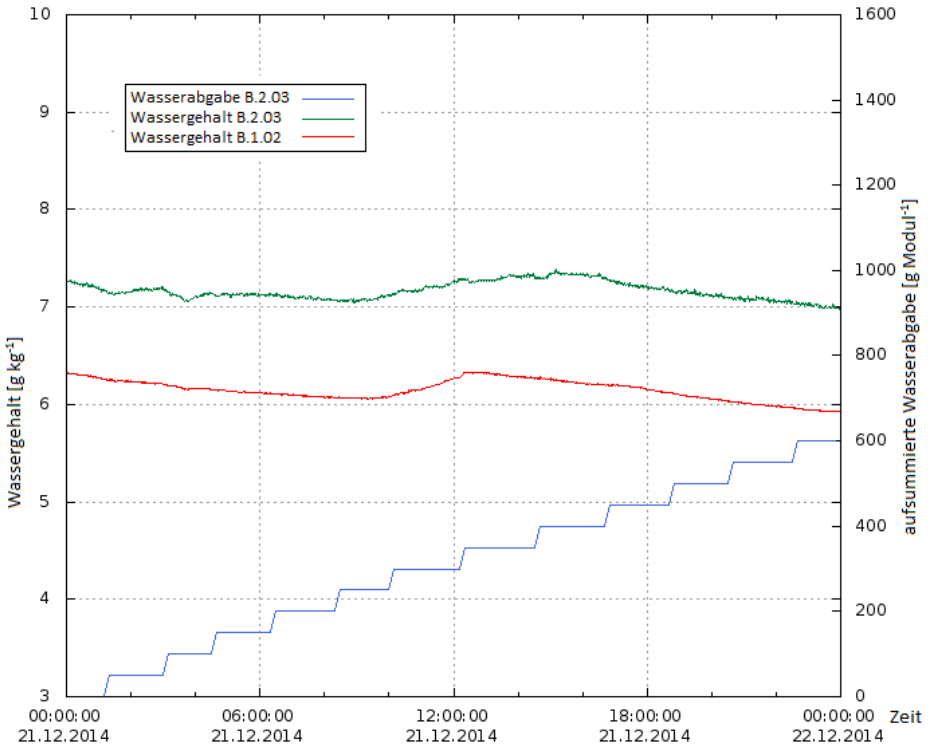


Abb. 148: Vergleich der Wassergehalte in der Raumluft im unbegrünten (B.1.02) und begrünten (B.2.03) Büro und Wasserabgabe (aufsummiert über 24 h) durch das Begrünungssystem in B.2.03 an einem Sonntag

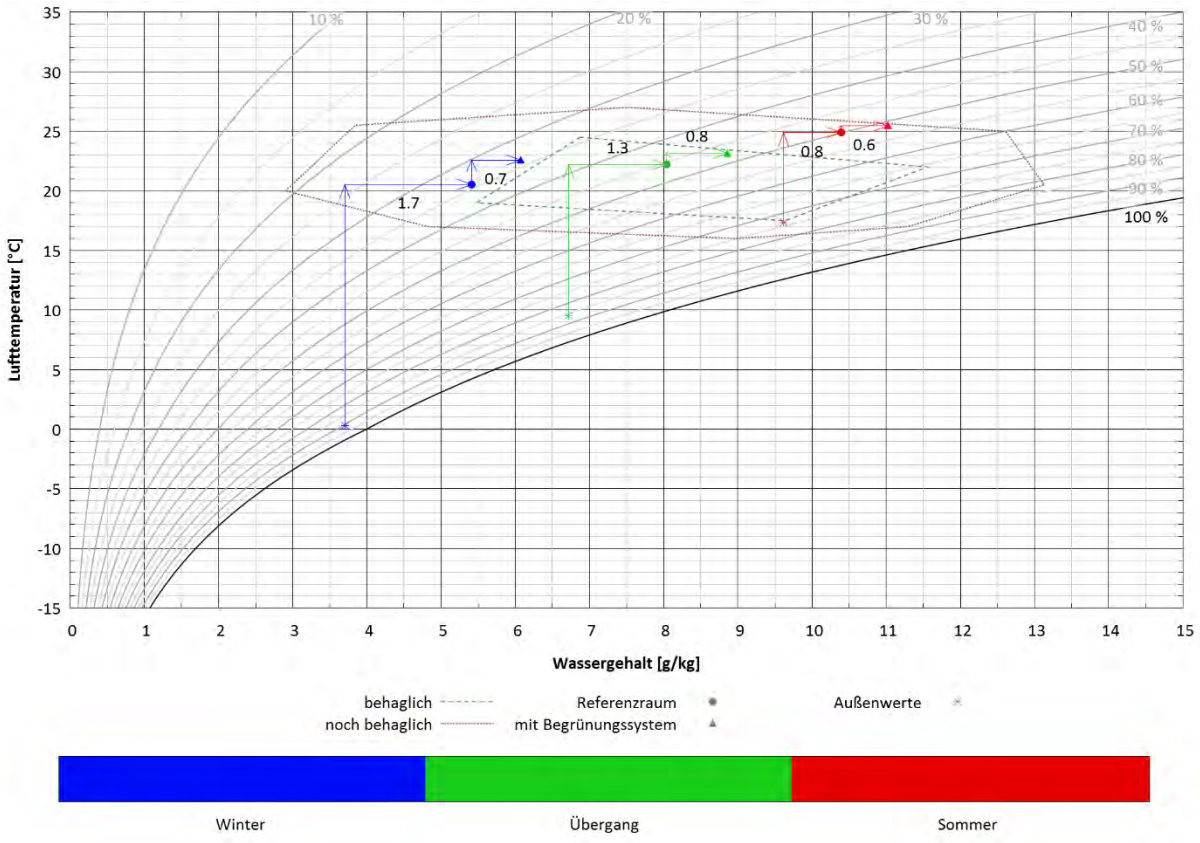


Abb. 149: t-x-Diagramm zu Raum B.2.03 mit Begrünungssystem im Vergleich zum Referenzraum B.1.02 außerhalb der Arbeitszeit

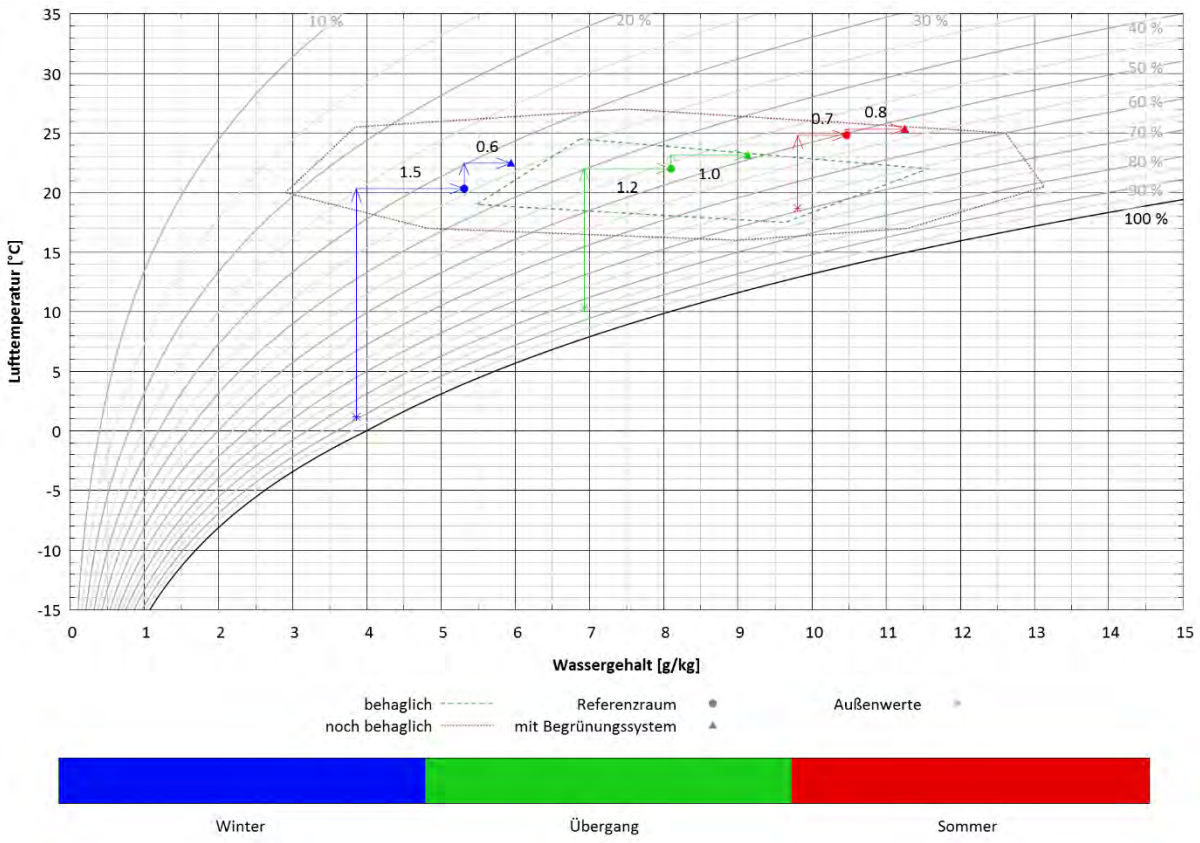


Abb. 150: t-x-Diagramm zu Raum B.2.03 mit Begrünungssystem im Vergleich zum Referenzraum B.1.02 außerhalb der Arbeitszeit an Wochenenden

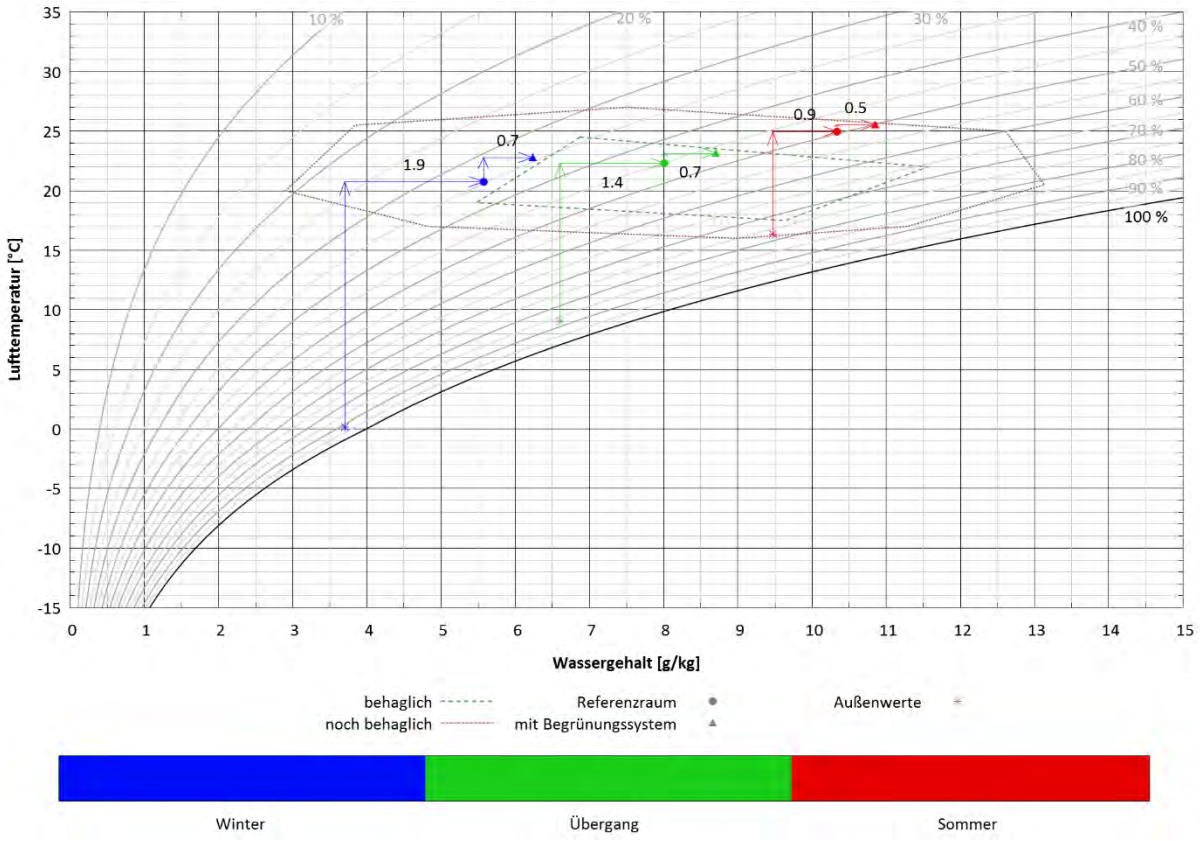


Abb. 151: t-x-Diagramm zu Raum B.2.03 mit Begrünungssystem im Vergleich zum Referenzraum B.1.02 außerhalb der Arbeitszeit an Wochentagen

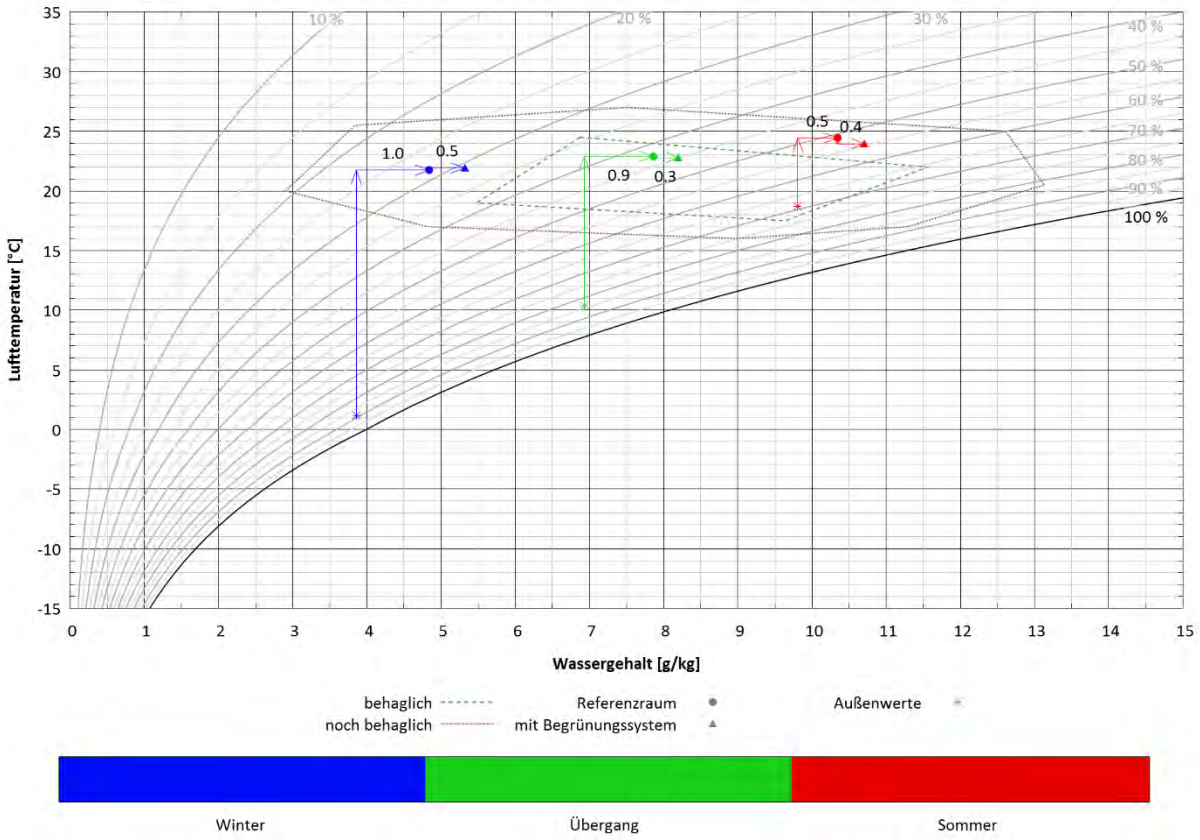


Abb. 152: t-x-Diagramm zu Raum A.1.02 mit Begrünungssystem im Vergleich zum Referenzraum A.2.01 außerhalb der Arbeitszeit an Wochenenden

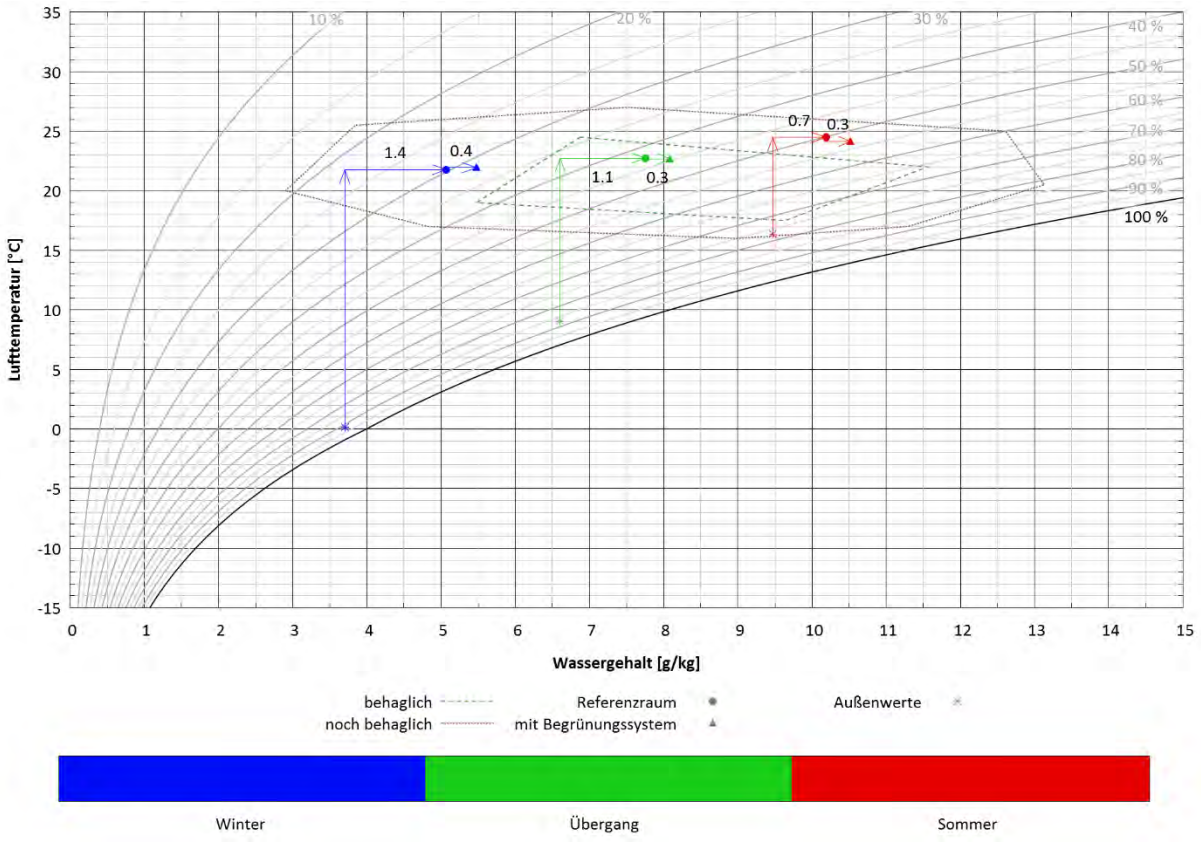


Abb. 153: t-x-Diagramm zu Raum A.1.02 mit Begrünungssystem im Vergleich zum Referenzraum A.2.01 außerhalb der Arbeitszeit an Wochentagen

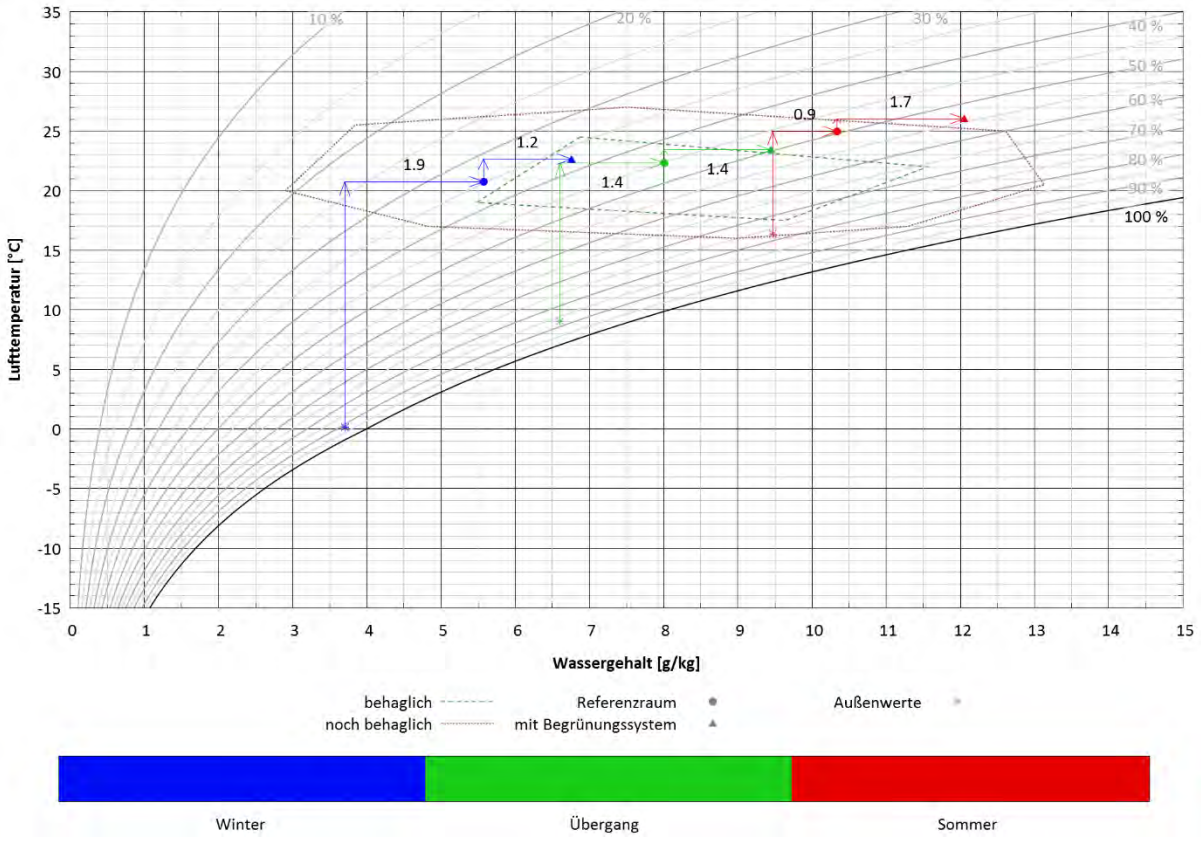


Abb. 154: t-x-Diagramm zu Raum B.2.01 mit Begrünungssystem im Vergleich zum Referenzraum B.1.02 außerhalb der Arbeitszeit an Wochentagen

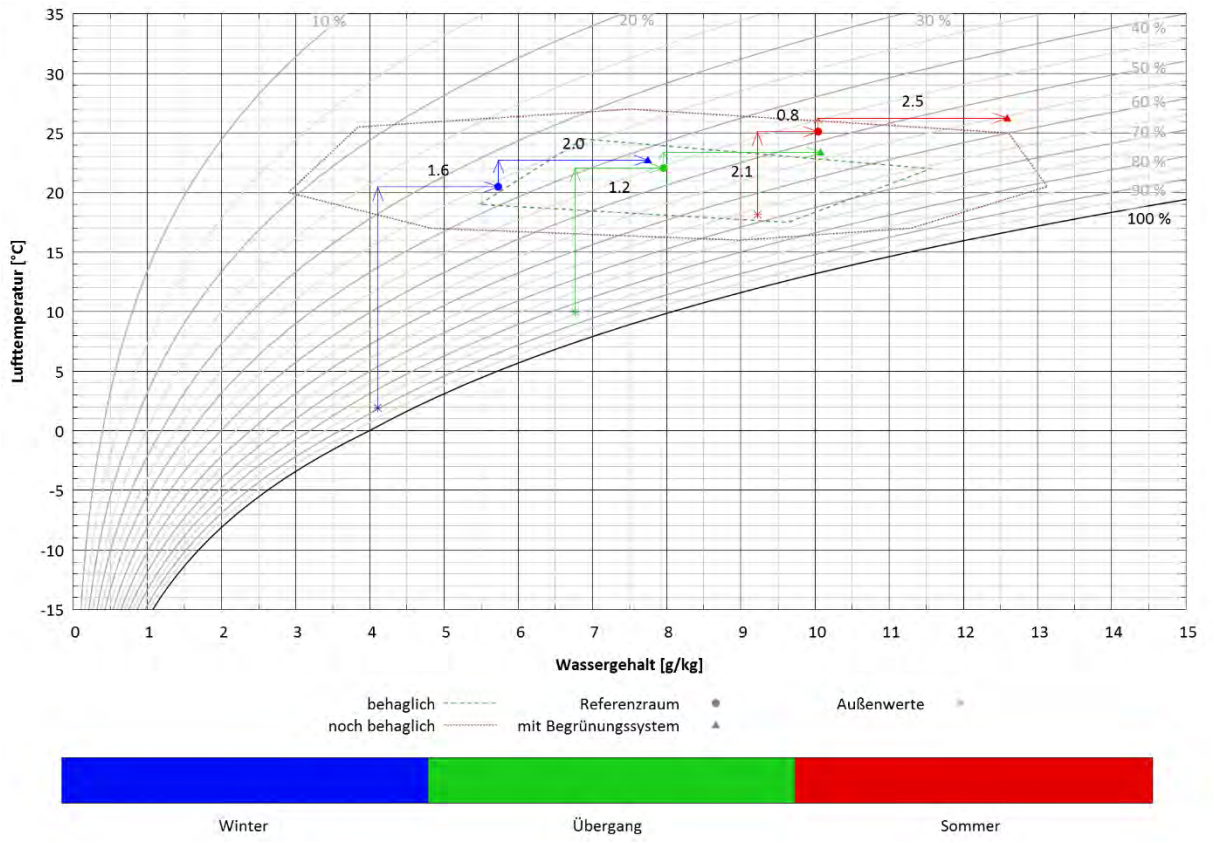


Abb. 155: t-x-Diagramm zu Raum B.2.01 mit Begrünungssystem im Vergleich zum Referenzraum B.1.02 außerhalb der Arbeitszeit mit geschlossener Tür

Sonstige Berechnungen:

Der Wassergehalt wird nach folgender Formel berechnet:

$$x = \frac{p_{\mathrm{Dampf}}}{p_{\mathrm{gesamt}} - p_{\mathrm{Dampf}}} \frac{M[\mathrm{H_2O}]}{M[\mathrm{Luft}]} \quad \left[\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{kg}}\right]$$

x	*kg/kg*	*Wassergehalt*
$M[\ldots]$	*kg/mol*	*Molare Masse*
p_{gesamt}	*Pa*	*Absoluter Druck*
p_{Dampf}	*Pa*	*partialer Druck des Wasserdampfes*

Der partiale Dampfdruck des Wasserdampfes wird aus der relativen Luftfeuchte und dem Sättigungsdampfdruck berechnet:

$$\varphi = \frac{p_{\mathrm{Dampf}}}{p_{\mathrm{Dampf,satt}}(T)}$$

φ	*%*	*relative Luftfeuchte*
$p_{Dampf,satt}(T)$	*Pa*	*Sättigungsdampfdruck in Abhängigkeit der Temperatur T (tabelliert)*

Um die Wassergehalte bei verschiedenen Luftdrücken in einem t-x-Diagramm darstellen zu können, werden diese mit folgender Formel umgerechnet:

$$x_2 = \frac{a}{\frac{p_{gesamt,2}}{p_{gesamt,1}}\left(\frac{a}{x_1}+1\right)-1};\ \text{mit}\ a = \frac{M[\mathrm{H_2O}]}{M[\text{Luft}]}$$

$x_1(p_{gesamt,1})$	*kg/kg*	*Wassergehalt bei Druck 1*
$x_2(p_{gesamt,2})$	*kg/kg*	*Wassergehalt bei Druck 2*

Die Dichte der Luft kann über die Zustandsgleichung des idealen Gases berechnet werden (zulässig für Drücke bis 5 bar) [25]:

$$\rho(p,T) = \frac{m}{V} = \frac{n}{V}M[\text{Luft}] = \frac{p}{RT}M[\text{Luft}]$$

V	*m^3*	*Volumen*
T	*K*	*Absolute Temperatur*
R	*J/(mol K)*	*Universelle Gaskonstante*

Alternativ können tabellierte Werte für die Dichte von Luft verwendet werden (1,2928 kg/m³ bei Standardbedingungen).

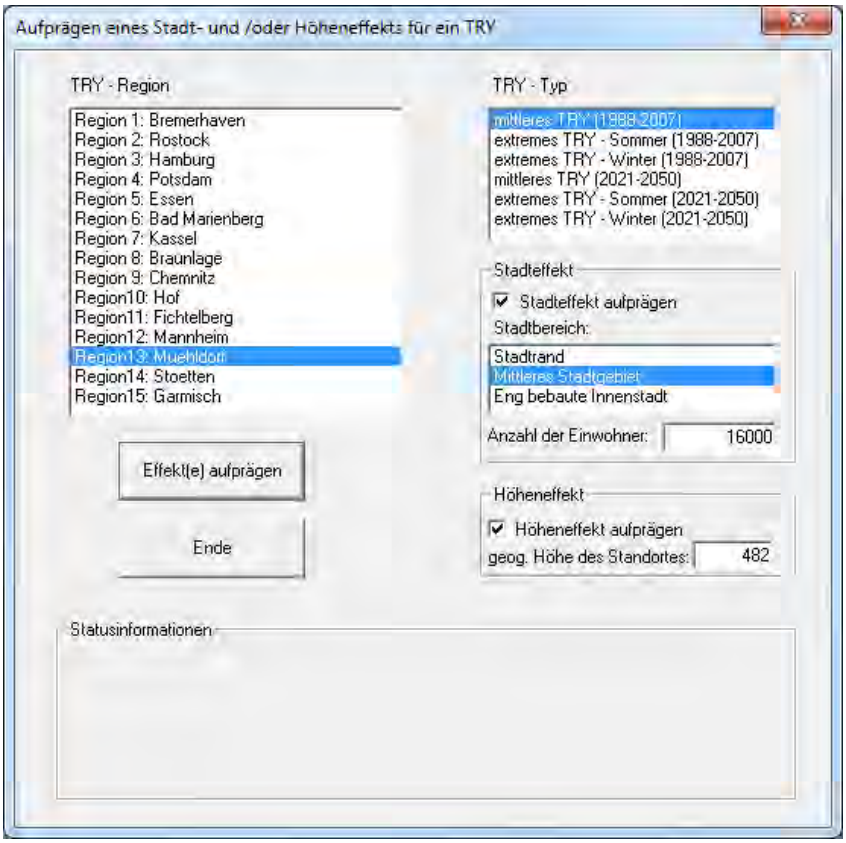


Abb. 156: Screenshot der Software zum Aufprägen eines Stadt- und / oder Höheneffekts für ein Testreferenzjahr [21]

Fragebogen des Projektpartners Häring Radtke und Partner:

HÄRING RADTKE PARTNER
INGENIEURBÜRO FÜR BIOLOGISCHE GEBÄUDEKLIMATISIERUNG

Egerlandstraße 16
D-97209 Veitshöchheim
tel 0931/93375
fax 0931/91366
mr.radtke@t-online.de
www.primaklimapflanzen.de
www.gruenewand.info

Fragebogen zur Raumklimatisierung

für jeweils einen Raum (ggf. kopieren Sie den Fragebogen)
Bitte legen Sie einen (Möblierungs-)Plan des Objektes bei.

1. Raumgröße: Länge: _____ cm Breite: _____cm oder Fläche _____m²

Höhe: _____ cm oder Kubatur: _____m³

eventuell Abteilung angeben und bitte im Plan eintragen:

Raumbezeichnung: _____

2. Mitarbeiter: Anzahl der ständigen Mitarbeiter im Raum: _____Personen

Gibt es Allergiker, Asthmatiker oder ähnliche gesundheitliche Beschwerden der Belegschaft? _____

_____

3. Besucher Gibt es Besucher, wenn ja, wie viele/Tag? _____

4. Fenster: Anzahl der Fenster des Raumes? _____

Wie sind die Fenster orientiert (alle an einer Wandseite usw.)? _____

_____

Sind die Fenster zu öffnen (kippen, ganz öffnen) und wie oft wird das von der Belegschaft gemacht?_____

Sind die Fenster von außen oder innen zu schattieren, wenn ja, mit Rollos, Vorhängen usw.? _____

Aus welchem Glas besteht das Fenster (Sonnenschutzglas; Wärmeschutzglas usw.):

_____

5. Beleuchtung: Ist eine abgehängte Decke vorhanden?_____

Welche Beleuchtung ist vorhanden (Neonröhren, Halogen-, E-Spar- oder Pflanzenleuchten usw.)?_____

_____

6. Lüftung: Gibt es eine Klima- oder Lüftungsanlage, wenn ja gibt es Informationen über Luftwechselzahl (also Luftaustauschmenge pro Zeiteinheit)? Hier bitte so viele Details wie möglich angeben!_____

_____

Wie viel Frischluft wird im Winter pro Luftwechseleinheit zugespeist? ggf. in %

_____

Wird die RLT-Anlage nachts abgeschaltet oder heruntergefahren? Von _____Uhr bis _____Uhr mit _____% Leistung.

Wie viele Türen gibt es und dienen diese als Lüftung (stehen die Türen ständig oder oft offen)?_____

7. Heizung: Welches Heizsystem wird verwandt (Radiatoren, Fußboden- oder Strahlungsheizung)?

_____

Raumtemperatur im: Sommer: _____°C im Winter: _____°C
Welche Raumtemperatur wird gewünscht? _____°C

8. Luftfeuchte: Wie hoch ist die relative Luftfeuchtigkeit im Winter? _____%
Welche relative Luftfeuchtigkeit wird im Winter gewünscht? _____%
Ist eine Luftbefeuchtungsanlage vorhanden (und auch in Betrieb ?); wird diese regelmäßig gewartet und ist sie hygienisch einwandfrei? _____

_____

9. Boden/Wand: Welcher Bodenbelag z.B. Teppichboden, Steinzeug, Parkett ist vorhanden ?

_____

Welches Wandmaterial (Fliesen, offener Verputz, Tapeten etc.) ist vorhanden ?

_____

10. Möblierung: Welches Mobiliar ist vorhanden? _____
Aus welchem Material (z.B. Spanplatten (Alter), Vollholz etc.)

_____

11. Raumhygiene: Wie wird der Raum gereinigt? _____
Welches Filtersystem hat der Staubsauger (Feinstaub, Hepa)?_____

12. Technik:

Wie viele PCs sind im Raum? _____

Wie viele Bildschirme? (Monitore, Flachbildschirme)? _____

Gibt es Laserdrucker? _____ Anzahl: _____

Gibt es Kopiergeräte? _____ Anzahl: _____

Gibt es Laserfaxgeräte? _____ Anzahl: _____

Gibt es einen Wasseranschluss und freie Steckdosenplätze im Raum?

_____

13. Raumstruktur Welche räumlichen Struktur-Schwerpunkte sind unbedingt für die innerbetrieblichen Abläufe erforderlich? (Bitte in einen Übersichtsplan einzeichnen!)

_____

_____

14. Befindlichkeit Gibt es häufig Erkältungskrankheiten im Büro?_____

Wie ist das individuelle Raumgefühl der Mitarbeiter: Schwitzen, Frieren, Unruhe, trockener Mund, brennende Augen u.ä.. Bitte ggf. auf dem Lageplan mit den Kürzeln S - F - U - TM - BA - u.ä. einzeichnen.

_____

_____

Wir bitten Sie den obigen Fragekatalog so genau wie möglich, auch mit Ihren Mitarbeitern auszuarbeiten. Jedoch müssen nicht alle Fragen beantwortet werden, soweit unsererseits Rückfragen bestehen, werden wir uns an Sie wenden

Die Daten werden nur für interne Zwecke verwendet. Eine Weitergabe an Dritte erfolgt nur nach ausdrücklicher Zustimmung des Auftraggebers. Die Richtigkeit der Daten wird vorausgesetzt. Eine Überprüfung auf ihre Richtigkeit durch den Auftragnehmer erfolgt nicht. Daher kann eine Gewähr, für die Richtigkeit der Ergebnisse, nur auf Grundlage der vorliegenden Kundendaten gegeben werden.

PS: Wussten Sie, dass durch eine geeignete Innenraumbegrünung der Krankenstand der Belegschaft um bis zu 1,4 Tage pro Arbeitnehmer im Jahr reduziert werden kann?

HÄRING RADTKE PARTNER
Geschäftsführer
Dipl.-Ing. FH Gartenbau Bernhard Häring
Dipl.-Biologe. Manfred Radtke

Amtsgericht
Würzburg PR 27
Ustd-Nr. DE236971103

Bankverbindung
Raiffeisenbank Thüngersheim eG
BLZ 790 692 71 Kto 38687
IBAN DE15790692710000038687
SWIFT GENODEF1THH

HÄRING RADTKE PARTNER

INGENIEURBÜRO FÜR BIOLOGISCHE GEBÄUDEKLIMATISIERUNG

Bitte Rücksenden an:

HÄRING RADTKE PARTNER
Ingenieurbüro für biologische
Raumklimatisierung
Egerlandstr. 16

97209 Veitshöchheim

Tel. 0931 / 93375
Fax 0931 / 91366

Hiermit beauftragt der u. g. Absender das IB Häring Radtke Partner eine Bedarfsberechnung für ein biotechnisches Luftbefeuchtungssystem für den im Fragebogen beschriebenen Raum zu erstellen. Sollte vorab ein Angebot benötigt werden, bitten wir darum, uns dies hier gleich mitzuteilen.

___ Nur Angebot vorab.

Datum	Auftraggeber	Firmenstempel