

Schlussbericht zum Vorhaben

Thema:

EnOB: GreenFaBS – Einsatz von Grünfassaden zur Reduzierung des Kühlenergiebedarfs fassadenintegrierter dezentraler Gebäudetechnik (Schul- und Verwaltungsgebäude)

Zuwendungsempfänger:

Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm (Projektleitung), Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP)

Förderkennzeichen

03ET1636A, 03ET1636B

Laufzeit:

01.02.2019 – 31.07.2021

Monat der Erstellung:

Nürnberg, Februar 2022



(THN-AR)

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) über den Projektträger Jülich, Fachbereich Energieeffizienz in Gebäuden (ESN1)/Energieoptimierte Gebäude und Quartiere – dezentrale und solare Energieversorgung im Förderprogramm „7. Energieforschungsprogramm“ unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Schlussbericht zum Vorhaben

Thema:

EnOB: GreenFaBS – Einsatz von Grünfassaden zur Reduzierung des Kühlenergiebedarfs fassadenintegrierter dezentraler Gebäudetechnik (Schul- und Verwaltungsgebäude)

Zuwendungsempfänger:

**Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm
(Projektleitung), Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP)**

Förderkennzeichen

03ET1636A, 03ET1636B

Laufzeit:

01.02.2019 – 31.07.2021

Monat der Erstellung:

Nürnberg, Februar 2022

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) über den Projektträger Jülich, Fachbereich Energieeffizienz in Gebäuden (ESN1)/Energieoptimierte Gebäude und Quartiere – dezentrale und solare Energieversorgung im Förderprogramm „7. Energieforschungsprogramm“ unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Projektpartner*innen/ Bearbeiter*innen

Bearbeiter
Inhalt

Teilvorhaben 1: (THN)

Förderkennzeichen: 03ET1636A

- Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm
Fakultät Architektur (THN-AR)
Prof. Dr.-Ing. Roland Krippner (Projektleitung), M.A. Architekt Boris Bott
- Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik/ Institut für Energie und Gebäude –
ieg (THN-MB-VS/ieg)
Prof. Dr. Wolfram Stephan, Dipl.-Ing. (FH) Mario Franz
- NCT-AUT (Nuremberg Campus of Technology, Automatisierungstechnik) (THN-NCT)
Prof. Dr.-Ing. Ronald Schmidt-Vollus, M.Sc. Michael Dietz

Unterauftrag

- Bundesverband GebäudeGrün e. V. (BuGG), Berlin/Sarbrücken
Dr. Gunter Mann, Prof. Dr.-Ing. Nicole Pfoser, Sylvia van Meegen

Kooperation

- TROX GmbH, Neukirchen-Vluyn
Klaus-Dieter Wolf

Teilvorhaben 2: (IBP)

Förderkennzeichen: 03ET1636B

- Fraunhofer-Institut für Bauphysik/ Standort Holzkirchen/ Abteilung Energiesysteme
Dipl.-Ing. (FH) Herbert Sinnesbichler, Dipl.-Ing. Almuth Schade

Inhaltsverzeichnis		Bearbeiter
		Inhalt
I.	Kurzdarstellungen	5
1	Aufgabe	5
1.1	Gesamtziel des Vorhabens und zentrale Fragestellung	5
1.2	Bezug des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen	5
1.3	Wissenschaftliche und/oder technische Arbeitsziele des Vorhabens	6
2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde/ Planung und Ablauf des Vorhabens	7
3	Wissenschaftlicher und technischer Stand	9
3.1	Dezentrale Fassadenlüftung (DFL)	9
3.2	Fassadenbegrünung	9
3.3	Dezentrale Fassadenlüftung (DFL) und Fassadenbegrünung	11
3.4	Simulationsmodelle	12
4	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	13
II.	Eingehende Darstellung	14
1	Konzeptionelle Entwicklung von Lösungsstrategien, Aufbau Fassadenversuchsstand	14
1.1	Entwicklung Lösungsstrategien	14
1.1.1	Erarbeitung systematischer Lösungsprinzipien	14
1.1.2	Aufbau von Simulationsmodellen (TEG und CFD)	18
1.2	Realisierung Fassadenversuchsstand THN	25
1.2.1	Konzeption und Aufbau	25
1.2.2	Konzeption und Integration der Messtechnik	28
1.2.3	Nullversuch	28
1.2.4	Konzeption Bepflanzung und Bewässerung	30
1.2.5	Lüftungsgeräte	34
2	Experimentelle Studien I (THN)	36
2.1	Messungen am Fassadenversuchsstand THN	36
2.2	Simulationsberechnungen und Abgleich mit Messergebnissen	41
2.2.1	Validierung der thermisch-energetischen Gebäudesimulations- ergebnisse mit Messergebnissen	41
2.2.2	Thermisch-Energetische Simulationsberechnungen nach Validierung der Musterräume des Fassadenversuchsstands	42
2.2.3	Thermisch-Energetische Gebäudesimulationsbetrachtung Einzelbüro	46
2.2.4	Thermisch-Energetische Gebäudesimulationsbetrachtung Einzelbüro – Variationen und Optimierung	51
3	Experimentelle Studien II (IBP)	55
3.1	Allgemeines	55
3.2	Versuchsaufbau	55
3.2.1	Versuchsräume	55
3.2.2	Sonnenschutz	56
3.2.3	Dezentrale Fassadenlüftungsgeräte (DFL)	56
3.2.4	Begrünung	58
3.2.5	Bewässerung	58
3.2.6	Messtechnische Ausstattung des Versuchsaufbaus	58
3.2.7	Überprüfung der Zwillingsräume/ Nullmessung	58

3.3	Auswertung	61	Bearbeiter
3.3.1	Allgemeines	61	Inhalt
3.3.2	Auswertezeiträume	61	
3.3.3	Raumklima und Fassade	64	
3.3.4	Beleuchtungsstärke und Sonnenschutz	65	
3.3.5	Lüftungsgeräte	66	
4	Analyse und interdisziplinäre Bewertung des Leistungspotentials	68	
4.1	Ergebnisse „Experimentelle Studien I“ (THN)	68	
4.2	Ergebnisse „Experimentelle Studien II“ (IBP)	69	
4.3	Zusammenfassung der Ergebnisse	70	
5	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	72	
6	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	72	
7	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	72	
8	Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	73	
9	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses	73	
9.1	Erfolgte Veröffentlichungen	73	
9.2	Geplante Veröffentlichungen	74	
10	Anhang	75	
10.1	Literatur- und Internetverzeichnis	75	
10.2	Abbildungsverzeichnis	78	
10.3	Tabellenverzeichnis	78	
III.	Appendix	80	
A1	Konzeptionelle Entwicklung von Lösungsstrategien	80	
A1.1	Überwinterung der Begrünungssysteme (THN)	95	
A2	Experimentelle Studien I (THN)	98	
A3	Experimentelle Studien II (IBP)	113	
A3.1	Bewässerung	113	
A3.2	Überwinterung der Begrünungssysteme (IBP)	114	
A3.3	Messsensorik und Rechenkanäle	115	
A3.4	Zwillingsräume/ Nullmessungen	118	
A3.5	Beispieltage	122	
A4	GreenFaBS-Workshop mit externen Fachleuten, Teilnehmer	130	

I. Kurzdarstellungen

Kurzdarstellungen

1 Aufgabe

Aufgabe

1.1 Gesamtziel des Vorhabens und zentrale Fragestellung

Im Kontext nachhaltiger und energieeffizienter Gebäudekonzepte gewinnt die Gebäudehülle in den letzten zwei Jahrzehnten enorm an Bedeutung. Dies wird verstärkt durch das globale Anwachsen von Großstädten und der damit resultierenden zunehmenden Relevanz vertikaler Hüllflächen. Seit Beginn des 21. Jahrhunderts lebt mehr als die Hälfte der Weltbevölkerung in Städten. Höhere Flächenversiegelungen haben unmittelbar Einfluss auf das städtische Mikroklima und führen zu urbanen Hitzeinseln – dem Ansteigen der Temperaturen in Ballungsgebieten.

Kompakte, dezentrale Lüftungseinheiten werden seit dem letzten Jahrzehnt von Architekten und Planern verstärkt eingesetzt, um steigende Anforderungen an Raumluftqualität energetisch effizient zu gewährleisten.

In der Bundesrepublik Deutschland sind etwa 80 Prozent der Schul- und Verwaltungsbauten sanierungsbedürftig.¹ Vor allem in diesem Segment konnten sich bereits dezentrale Systeme etablieren, da auf komplizierte Medienführung innerhalb der Gebäude verzichtet werden kann. Es hat sich herausgestellt, dass nach einer Phase intensiver Forschung (2005 – 2010) die Entwicklung leistungsfähiger dezentraler Lüftungstechnik in den letzten Jahren stagniert.

Die begrenzte Kühlleistung der systemtechnischen Komponenten steht einer weiteren Technikminiaturisierung und einer wirtschaftlichen Nutzung regenerativer Energieressourcen im Wege. Gleichzeitig wächst seit Jahrzehnten in hochverdichteten Zentren die Nachfrage nach Grünfassaden zur Aufwertung des Stadtbildes.²

Aufgrund adiabatischer Kühlprozesse können Fassadenbegrünungen als natürliche Klimaanlagen in der Stadtplanung eingesetzt werden und dem Effekt der urbanen Hitzeinseln entgegenwirken.³ Dabei erfüllen sie eine Vielzahl weiterer Funktionen, wie natürliche Luftfiltration von Feinstaub, Aufnahme von Kohlenstoffdioxid, Schallreduzierung oder Verbesserung der winterlichen Dämmeigenschaften von Fassaden.⁴ Zudem können Temperaturen an Fassadenoberflächen reduziert werden.⁵

Die Arbeit untersucht daher die Möglichkeiten, mittels Grünfassaden den Kühlenergiebedarf fassadenintegrierter dezentraler Lüftungseinheiten von Schul- und Verwaltungsbauten zu reduzieren.

1.2 Bezug des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen

Zu den energie- und klimapolitischen Zielen der Bundesregierung zählt die Realisierung eines nahezu klimaneutralen Gebäudebestands in Deutschland bis zum Jahr 2050. Die Energieeffizienzstrategie Gebäude (ESG) legt einen Fahrplan zur Erreichung dieses Ziels vor. Kernpunkte der Strategie sind die Erhöhung der Energieeffizienz und die verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien im Gebäudesektor. Vor diesem Hintergrund wurde das beschriebene Forschungs- und Entwicklungsvorhaben konzipiert. In Bezug auf die Förderinitiative „Solares Bauen“ im Rahmen des 6. Energieforschungsprogramms werden vier Teilaspekte aus dem Themenfeld „Gebäudehülle“ adressiert, sowie der zweite und dritte Teilaspekt aus dem Themenfeld „Gebäudesystemtechnik“:

Gebäudehülle

- Aktive Gebäudehüllen: Fassadeintegrierte Lüftungssysteme hinsichtlich Dimensionierung, Luftführung und Betriebsweise optimieren
- Adaptive Gebäudehüllen: Auswirkungen unterschiedlicher Bepflanzungssysteme
- Fassadenlüftungssystemen mit hohem Vorfertigungsgrad in Kombination mit Begrünungssystemen und Adaption der Luftführung
- Dämmstoff: Bewertung von Begrünungssysteme hinsichtlich der Auswirkungen auf den sommerlichen und winterlichen Wärmeschutz

Gebäudesystemtechnik – innovative Komponenten

- Optimierung von Fassadenlüftungssystemen
- Betrieb und Verbesserung von Bewässerungssystemen für Bepflanzungen


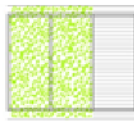
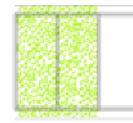

¹ vgl. Thiel, 2010, S. 14-16

² Vgl. Krippner, Januar/2020, S. 294 und Krippner, März/2021

³ vgl. Köhler, 2012, S. 109 ff.

⁴ vgl. Pfoser, 2013, S. 14 ff.

⁵ vgl. Scherzinger, 2012, o. S.

Variante	Referenzmodell	Modellvariante	Modelvariante	Modellvariante
		1	2	3
				
Flächenanteil Sonnenschutz [%]	100	33	0	33
Flächenanteil Grünfassade [%]	0	66	66	66
Reduktion Lufttemperatur [K]	–	2	2	0
Heizenergiebedarf RLT [kWh/a]	808	773	650	790
Kühlenergiebedarf RLT [kWh/a]	99	51	81	73
Max. Kühlleistung RLT [Watt]	563	405	505	484
Reduktion Kühlleistung RLT [%]	–	28	10	14
Reduktion Kühlenergiebedarf ¹ [%]	–	48	18	26
Reduktion CO ₂ -Emission ² [%]	–	8	19	4

 Kurzdarstellungen
 Aufgabe

Tab. 1 Übersicht Simulationsergebnisse (Dentel 2015)

1) Gegenüber dem Referenzmodell

 2) CO₂-Äquivalente: Strom 528 g/kWh, Gas 252 g/kWh

1.3 Wissenschaftliche und/oder technische Arbeitsziele des Vorhabens

Innovativ ist die Zusammenführung von zwei Fassadentechnologien (dezentrale Lüftung und Fassadenbegrünung), die im Bereich energieeffizienter Gebäudekonditionierung bisher getrennt eingesetzt werden.

In der Baupraxis benötigen fassadenintegrierte dezentrale Lüftungssysteme ganzjährig weniger Primärenergie als zentral kontrollierte Lüftungssysteme. Der Kühlenergiebedarf ist im direkten Vergleich jedoch erhöht.⁶ Als Gründe für den erhöhten Kühlenergiebedarf können die kompakte Bauweise und die erhöhten Temperaturen im Ansaugbereich der dezentralen Lüftungseinheiten angeführt werden.

Der Einsatz von begrünten Fassadenelementen könnte die Temperaturen im Ansaugbereich senken. Wie konventionelle Verschattungselemente können begrünte Fassadenelemente Temperaturen an Fassadenoberflächen durch Verschattung und Konvektion reduzieren. Zusätzlich treten adiabatische Kühlprozesse auf, die Lufttemperaturen weiter reduzieren.

Hinweise auf einen derartigen Ansatz finden sich in der Fachliteratur⁷, jedoch liegen bisher keine wissenschaftlichen Studien vor.

Zur Einschätzung von Erfolgsaussichten wurde im August 2015 von der Technischen Hochschule Nürnberg eine thermisch-energetische Gebäudesimulation, mittels der Computersoftware TRNSYS⁸, auf den vorliegenden Erkenntnissen durchgeführt. Die Simulationsergebnisse (Tab. 1) bestärken die Annahme, dass Fassadenbegrünungen den jährlichen Kühlenergiebedarf und die Kühlleistung von dezentralen Lüftungsgeräten erheblich reduzieren können.⁹ Das größte Einsparpotential, Reduktion des Kühlenergiebedarfs um 48 % und der Kühlleistung um 28 %, stellt sich demnach ein, wenn Fassadenbegrünung die Außenlufttemperatur um 2 K reduziert und die Systemkombination zusätzlich mit einem dynamischen Sonnenschutz ausgestattet wird. Jedoch auch die weit vorsichtigere Annahme, dass Fassadenbegrünungen ein Ansteigen der Temperaturen im Ansaugbereich der Zuluft

6 vgl. Hirn, 2009, S. 3

7 vgl. Pfoser, 2013, S. 128 -f.

8 TRNSYS, Solar Energy Laboratory, Univ. of Wisconsin, Madison USA

9 vgl. Krippner et al., November/2020, S. 192

verhindern (Lufttemperatur vor der Fassadenbegrünung gleich Lufttemperatur hinter der Fassadenbegrünung), stellt ein immer noch beträchtliches Einsparpotential von 26 % des jährlichen Kühlenergiebedarfs und 14 % der Kühlleistung in Aussicht.¹⁰ Daraus lassen sich CO₂-Einsparungen von 4 bis 19 % ableiten. Diese Abschätzungen aus der Vorstudie galt es im Projekt zu verifizieren.

Aufgrund der hohen Gestaltungsflexibilität von Fassadenbegrünungen und der Vielzahl von Einbaumöglichkeiten dezentraler Lüftungstechnik innerhalb der Fassade, lässt der kombinierte Ansatz ein hohes Einsatzpotential sowohl für Neubauprojekte als auch im Rahmen der energetischen Sanierung von Schul- und Verwaltungsgebäuden erwarten.¹¹ Eine erfolgreiche Kombination kann gleichermaßen den Absatz fassadenintegrierter dezentraler Lüftungstechnik merklich erhöhen und auch den Einsatz von Grünfassaden im urbanen Kontext deutlich erweitern.

Die geplanten Projektarbeiten setzen die Forschungsaktivitäten zum „Einsatz von Grünfassaden zur Effizienzsteigerung fassadenintegrierter dezentraler Gebäudetechnik“ am Nuremberg Campus of Technology (NCT) fort. Ziel ist die Untersuchung einer neuartigen Kombination aus dezentraler Lüftungstechnik und Fassadenbegrünung, die zusammen innerhalb der Fassade integriert werden.

Ausgang und Grundlage für den gebäudetechnischen Teil ist das abgeschlossene Initialprojekt „Fassadenintegrierte dezentrale Gebäudetechnik“, das den Stand der Wissenschaft und Technik des Arbeitsfeldes beschreibt. Im Mittelpunkt der Betrachtung stehen dezentrale Lüftungssysteme.¹²

Bei der Gestaltung spielt neben den Zielvorgaben der Energieoptimierung, die ästhetische Wirkung der Grünfassaden auf Menschen, sowohl im Innenraum als auch im näheren Gebäudeumfeld, eine sehr wichtige Rolle.¹³ Die Entwicklung von Lösungsstrategien wird von computerbasierten Simulationen begleitet. Im Frühjahr/Sommer 2020 und 2021 sind ausgewählte Lösungsprinzipien an einem Fassadenversuchsstand der Technischen Hochschule Nürnberg in Rednitzhembach unter praxisnahen Bedingungen getestet worden. Nach Evaluierung der experimentellen Studien I ist im Sommer 2020 ein optimierter Aufbau am VERU-Fassadenversuchsstand des Fraunhofer Instituts für Bauphysik in Holzkirchen erfolgt.

2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde/ Planung und Ablauf des Vorhabens

Eine große Herausforderung stellte im Frühjahr 2019 die Realisierung des Fassadenversuchsstands der Technischen Hochschule Nürnberg in Rednitzhembach dar. Es gab bei dessen Planung und Realisierung in allen Gewerken große Probleme Firmen zu finden, die überhaupt Angebote abgeben. Nach zeitaufwendiger Akquisition zeigte sich zudem, dass die wenigen Angebote oftmals viel zu teuer ausfielen, mit Abweichungen bei den Kosten bis zu Faktor 4. Dies führte auch zu deutlich verkleinerten Abmessungen des Versuchstandes.¹⁴

Gleichwohl gelang es im ersten halben Jahr die Planungen abzuschließen, allerdings wurde der Fassadenversuchsstand erst Ende August 2019 vor Ort in Rednitzhembach aufgestellt und Mitte Oktober 2019 in Betrieb genommen, mit der Folge, dass der Start mit den „Experimentelle Studien I“ erst im Frühjahr 2020 erfolgte.

Ein Großteil der „Experimentelle Studien I“, mit den geplanten Vermessungen der vier Begrünungssystemen in Rednitzhembach, konnte zwischen Juni und September 2020 weitgehend durchgeführt und abgeschlossen werden. Allerdings hatte sich gezeigt, dass die beiden semitransparenten Varianten 3 (und 4) trotz der schlechteren Performance in den Simulationsberechnungen gerade hinsichtlich der wichtigen Fassadenfunktionen Sonnenschutz und Tageslichtnutzung zusätzlich vielversprechende Potentiale aufweisen.

Bei Variante 4 (bodengebundenes System der Firma Jakob Rope Systems mit Kletterpflanze „Aristolochia Durior“) bestanden allerdings auch Probleme mit der Flächenwirkung. Die Simulationen berücksichtigten einen Ausgangsparameter für den Blattflächenindex (Fc- Wert) von 2 – 2,5. Dies entspricht einem vollständigen und dichten Bewuchs. Bis zum Ende der Messperiode stellte sich bei der Kletterpflanze lediglich in 1/3 der Fläche eine ausreichende Bedeckung ein. Daher waren zur Komplettierung der Messreihe erneute Messungen im Frühjahr 2021 (mit weiterer Wachstumsperiode und Chance auf ausreichende Deckung) erforderlich, da erst mit diesen Ergebnissen aufgrund einer breiteren und besseren Datenlage zur Analyse und interdisziplinären Bewertung der Versuchsanordnungen eine Einschätzung der Leistungspotentiale gegenüber den anderen Systemen wirklich bewertbar wird.

Ferner ermöglichte die Durchführung von weiteren Versuchen auch Anpassungen bei der Messtechnik (Einschraubtemperatursensoren für den Vor- und Rücklauf) am dezentralen

¹⁰ vgl. Dentel, 2015

¹¹ vgl. Krippner, März/2021

¹² vgl. Krippner et al., 2014

¹³ vgl. Krippner et al., November/2020, S. 192

¹⁴ vgl. Kapitel II. 1.2 Realisierung Fassadenversuchsstand THN, 1.2.1 Konzeption und Aufbau

Fassadenlüftungsgerät.

Kurzdarstellungen

Auch bei den Experimentellen Studien II (VERU Versuchsgebäude) gab es Verzögerungen. Die komplexe Parametrisierung der Dezentralen Fassadenlüftungsgeräte erfolgte in enger Zusammenarbeit mit dem Hersteller, trotzdem war diese sehr aufwändig und erforderte mehr Zeit als erwartet. Die vollständige Inbetriebnahme verschob sich dadurch bis in den August 2020.

Aufgabe

Bei den Messungen im späten Hochsommer und Herbst 2020 mit Variante 2 war die Bepflanzung zwar bereits üppig, allerdings erforderten die Messungen im Frühjahr bzw. Frühsommer 2021 die Ergänzung mit kleineren Pflanzen. Auch hier ermöglichten weitere Versuche im Jahr 2021 die Auswertung zusätzlicher Messtage unter sommerlichen Randbedingungen und anderer Regelungsstrategien.

Allerdings zeigte sich zum Ende der ersten Messperiode, dass zur Erreichung der Projektziele mehr Zeit notwendig ist, als ursprünglich beantragt und bewilligt. Daher wurde im Oktober 2020 eine Verlängerung der Laufzeit von 31. Januar 2021 bis zum 31. Juli 2021 beantragt.

Trotz der beschriebenen Verzögerungen konnten die im Antrag genannten Projektziele erreicht werden.

3 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Kurzdarstellungen

Stand Technik und
Wissenschaft

3.1 Dezentrale Fassadenlüftung (DFL)

In den letzten zwei Jahrzehnten entstanden eine Reihe von Forschungsaktivitäten und Systementwicklungen im Bereich „dezentraler Gebäudetechnik“.

2005 stellt das Forschungsprojekt „TEmotion“ der TU Dortmund in Zusammenarbeit mit der Fa. Wicona ein zweischaliges Fassadenmodul vor, das sämtliche Technik der Raumklimatisierung beinhaltet. Zudem verfügt das Modul über integrierte Photovoltaikmodule, deren erzeugter Strom ins öffentliche Netz eingespeist wird. Eine Marktrealisierung wurde nicht erreicht.¹

Bedeutsam in diesem Zusammenhang ist auch die „imodulFassade“ des Capricorn Hauses in Düsseldorf, die 2008 von den Architekten Gattermann und Schossig entwickelt wurde (Abb. 1). Für das Neubauprojekt wurde ein zweischaliges Fassadenmodul der Abmessung 2,70 x 3,45 m entwickelt, das ebenfalls die komplette Raumklimatisierung, sowie Funktionen der Tageslichtlenkung und des Sonnenschutzes beinhaltet. Bis heute ist der reduzierte Außenwandaufbau von insgesamt 26 cm richtungweisend. Innerhalb des Moduls befindet sich die 19,5 cm tiefe Technikbox mit Wärmerückgewinnungssystem (ca. 55–60 %) und ein 4-Leiter-Wasser-Luft-System, welches eine raumbezogene Klimatisierung (Heizen und Kühlen) ermöglicht.²

Neben ganzheitlichen Systemansätzen und firmenspezifischen Produkten für Nichtwohngebäude (Abb. 2), thematisieren in den jüngeren Jahren mehrere Forschungsprojekte Lösungen für Wohnungsbauten und nachträgliche Einbauvarianten im Rahmen von Bestandsanierungen.

Das Forschungsvorhaben „Prefab“ des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik verfolgt im Jahr 2012 einen „minimalinvasiven“ Ansatz für Sanierungsvorhaben im Bereich Wohnungsbau. Im vorgefertigten Fenstermodul befindet sich im unteren Blendrahmen eine herausnehmbare Technikbox, die der dezentralen Raumbelüftung dient. Sie beinhaltet Wärmetauscher, Filter und Ventilatoren. Prefab ist auf eine Anbindung an konventionelle Wärmeübertrager (Heizkörper) unterhalb des Fenstermoduls angewiesen. Weder Sekundärluftfunktionen, noch aktive Kühlkomponente werden berücksichtigt.³

Im Kontext der Entwicklung multifunktionaler Fassaden stellt das österreichische Forschungsprojekt „Multifunctional Plug & Play Facade (MPPF)“ (2008 – 2013) einen umfassenden Ansatz dar, die Integration solar- und haustechnischer Systemen in Vorhangfassaden für den Bereich Neubau und Sanierung technisch und wirtschaftlich zu optimieren.⁴ Zwar wurde bei dem „Prototypen II“ ein geschosshoher ‚Ventilator-Konvektor‘ integriert, den Schwerpunkt bei Erprobung und Vermessung der Fassadensysteme bildeten jedoch Kollektortechnik und Photovoltaik-Module.⁵

Insgesamt besteht im Bereich der dezentralen Gebäudetechnik weiterhin ein sehr hoher Forschungsbedarf. Es fehlen weitgehend dokumentierte Praxiserfahrungen der Nutzer und Kennzahlen der Verbrauchswerte.⁶ Zudem bleiben Fragen der ökonomischen und ökologischen Bewertung der Systeme offen. Die Forschungsaktivitäten der Firma Trox an einer PCM-Integration wurden aufgrund des zu hohen Kühlenergiebedarfs der Frischluftkonditionierung eingestellt.⁷

3.2 Fassadenbegrünung

Thermische Einflüsse von Fassadenbegrünungen auf die Umgebungstemperatur konnten bereits mehrfach nachgewiesen werden.

Rudi Baumanns einschlägige Arbeiten zu „Begrünter Architektur“⁸ leisten einen ersten zusammengefassten wissenschaftlichen Beitrag zu den Möglichkeiten von bodengebundener Bauwerksbegrünung. Städtebauliche, architektonische und bautechnische Grundlagen der Gebäudebegrünung werden systematisch beschrieben.

Anhand spezieller Messreihen gelingen Baumann Nachweise der „Manipulation des gebäudenahen Mikroklimas“. In mehreren Versuchen kann eine Reduzierung der Oberflächentemperatur im Sommer von bis zu 30° Grad an begrünten Fassaden im Vergleich zu nicht begrünten Fassadenflächen nachgewiesen werden. Maximale Lufttemperaturunterschiede innerhalb der thermischen Pufferzone, zwischen Bauwerk und vorgesetzter Bauwerksbegrü-

1 vgl. Müller, 2005

2 vgl. update:BAU (Hrsg.), 2007, S.16–19

3 vgl. Krause, 2013

4 <http://www.mppf.at> <15.01.2021>

5 vgl. u. a. Grobbauer/Mach, 2015, S. 220–243

6 vgl. Mahler et al., 2008

7 vgl. Mayer, 2014

8 vgl. Baumann, 1980



Abb. 1 Düsseldorf, Medienhafen/ Capricornhaus (2008); Gatermann + Schossig, Köln (THN-AR)



Abb. 2 München, Bürogebäude/ Laimer Würfel (2007); plan2 Architekten, München (TROX 3/2019)

Kurzdarstellungen
 Stand Technik und
 Wissenschaft

nung, liegen im Sommer um bis zu 4,30 °C niedriger als die Außenlufttemperatur.⁹ (Abb. 5+6)

Im Auftrag der Berliner Senatsverwaltung für Stadtentwicklung konnte das Forschungsprojekt „Stadtökologische Modellvorhaben“ an einem fassadenbegrüntem Gebäude in Berlin Adlershof (Abb. 3) eine durchschnittliche tägliche Verdunstungsrate von 10 bis 15 l/m² Küberfläche einer etwa 20 m hohen Kletterpflanze nachweisen.¹⁰

Das interdisziplinäre Forschungsvorhaben „Gebäude Begrünung Energie. Potenziale und Wechselwirkungen“ der Forschungsinitiative ZukunftBAU erläutert 2013 im Abschlussbericht energetische, klimatische und gestalterische Wechselwirkungen von Bauwerksbegrünung.¹¹ Auf Rückfrage bei den Autoren wird ein Forschungsvorhaben zu Fassadenbegrünung und kontrollierter Lüftung als wichtig eingestuft, da es bisher keine belastbaren Angaben in diesem Arbeitsfeld gibt.

Das österreichische Forschungsprojekt „GrünStadtKlima“ konnte 2011 anhand des Wärmedurchflusses an einem fassadenbegrüntem Gebäude in Wien eine Reduzierung temperaturbedingter Spitzenwerte nachweisen.¹² Unter der wissenschaftlichen Leitung der Hochschule Geisenheim wurde zwischen Mai 2013 und Juni 2014 eine Machbarkeitsstudie von wandgebundenen Systemen im Palmengarten in Frankfurt am Main durchgeführt. Auf vier unterschiedlichen Flächen von 12 m² (4 m Breite, 3 m Höhe) mit mindestens 15 verschiedenen Pflanzensorten, wurden vier unterschiedliche wandgebundene Begrünungssysteme von verschiedenen Herstellern ein Jahr lang beobachtet und wissenschaftlich dokumentiert. Ein Fremdbewuchs auf den Versuchsflächen war, wie ein Schädlings- oder Krankheitsbefall der Pflanzen, insgesamt gering. Wöchentlich betrug der Pflegeaufwand der Pflanzen je Versuchsfläche etwa 10 Minuten. Der Wartungsaufwand der Bewässerungsanlage beanspruchte, mit Ausnahme von einem System, durchschnittlich zwischen 4 und 19 Minuten pro Monat. Im Durchschnitt benötigte ein Quadratmeter Fläche des wandgebundenen Fassadensystems 0,17 m³ Wasser für die Bewässerung der Pflanzen. Die Material- und Herstellungskosten der fertigen Fassadenbegrünung wurden von den Herstellern von 500 bis 1.000 Euro pro m² angegeben.¹³

In der Dissertation „Fassade und Pflanze – Potentiale einer neuen Fassadengestaltung“ setzt sich Nicole Pfoser von der TU Darmstadt umfangreich mit Potentialen und Wechselwirkungen von Grünfassaden im urbanen Raum auseinander. Anknüpfend an die Einschätzungen zu „Kontrollierte(r) Lüftung und Gebäudebegrünung“¹⁴ wird mit Bezug zu Fassaden ein großes energetisches Potenzial von Begrünungen im Sommerfall z. B. bei Natursteinfassaden („Temperaturdifferenzen 2-10 K“) genannt. Mit Verweis auf das Projekt der sanierten Bestandsfassade beim Gebäude der Zentrale „Magistratsabteilung 48“ in Wien (2010) hat sich gezeigt, dass die 850 m² große Pflanzenfassade „an heißen Sommertagen die Kühlleistung von 45 Klimageräten mit je 3000 W bei 8-stündiger Betrieb substituiert.“¹⁵ (Abb. 4)

Im Rahmen des Pilotprojekts „INPS Green Façade“ wurde eine wandgebundene Begrünung an der Südwand eines Bürogebäudes in Genua vermessen.¹⁶ Die Ergebnisse bestätigen ebenfalls die enorme Kühlleistung vertikaler Begrünungssysteme im Sommerfall „mit einer

9 Baumann, 1983, S. 31

10 vgl. Reichmann, 2010, S. 35ff.

11 vgl. Pfoser et al., 2013

12 vgl. Preiss et al., 2013, S. 7f.

13 vgl. 7. FBB Symposium, 2014

14 vgl. Pfoser, 2016, S. 128f.

15 vgl. Pfoser, 2016, S. 84

16 vgl. Perini/Bazzocchi, 2017, S. 113–122



Abb. 3 Berlin, Institut für Physik der HU (2003); Augustin und Frank, Berlin (THN-AR)



Abb. 4 Wien, Zentrale "Magistratsabteilung 48" (2010); MA48 mit Tech Metall und Grünwand, Wien (THN-AR)

Kurzdarstellungen
 Stand Technik und
 Wissenschaft

Lufttemperaturdifferenz von bis zu 10 K¹⁷, die zur Reduzierung des Energiebedarf für die Klimatisierung genutzt werden kann.

Um den Einfluss der Pflanzen auf die angesaugte Lufttemperatur zu testen, wurden in zwei Außenwandbohrungen eine Art Kompaktlüfter für den Wohnungsbau¹⁷ eingesetzt; ein Gerät direkt in der Begrünung und das Referenzgerät unabhängig davon. Die Ergebnisse zeigen für die Monate Mai bis September eine durchschnittliche Verringerung der Lufttemperaturdifferenz durch die Begrünung von 4,4 K und ebenfalls eine deutliche Reduktion der Stunden im Monat, in denen die Raumlufttemperatur über 26 °C ansteigt.¹⁸

Die Untersuchungen mit wandgebundenen System unter mediterranem Klima bestätigen die Ergebnisse von Rudi Baumann mit Kletterpflanzen aus Kassel von Anfang der 1980er Jahre.¹⁹ Für die im Rahmen des GreenFaBS-Projektes durchgeführten Simulationen²⁰ erscheinen durch die Erkenntnisse aus „INPS Green Façade“ weitere Einsparungseffekte möglich. Die Autor*innen stellen abschließend heraus, dass gerade angesichts der komplexen Schnittstelle Dezentrale Lüftungstechnik und Fassadenbegrünung zusätzliche Forschungsarbeiten erforderlich sind.

Im Forschungsprojekt „Klima-Forschungs-Station (KFS)“ der Bayerischen Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau in Veitshöchheim (Projektlaufzeit 2017-2020) wurde der Einfluss von wandgebundener Fassadenbegrünung auf das Mikroklima untersucht. Aufgezeichnet sind für eine West- und Südausrichtung die Temperatur und die Luftfeuchtigkeit in Abhängigkeit zum Abstand zwischen thermischer Hülle und der Rückseite des Begrünungssystems. Dabei wurde ein messbarer Einfluss der Fassadebegrünung auf das Mikroklima festgestellt. Während die Lufttemperatur deutlich gesenkt wird, erhöht sich die Luftfeuchtigkeit (12 % höher als die Außenluftreferenz). „Die wärmsten Temperaturen wurden vor der Begrünung erzielt, am kühlfsten war es in der Begrünung“ (Im Mittelwert ~1,2; 0,5; 0,85 K). Eine Vergrößerung des Zwischenspalts führte tendenziell zu niedrigeren Temperaturen. Dabei kommt der Ausrichtung sowie dem Begrünungssystem eine eher untergeordnete Rolle zu.²¹

Das im August 2021 gestartete Projekt „U-green – Bauphysikalische Bewertung von Fassaden- und Dachbegrünungen (bis Juli 2024) beschäftigt sich mit der „Entwicklung standardisierter Messverfahren und Kenngrößenerfassung zur Berücksichtigung von Bauwerksbegrünungen in der energetischen Auslegung von Gebäuden“. Dabei sollen durch noch zu „entwickelnden Messverfahren ... genaue, reproduzierbare und vergleichbare Charakterisierungen von Gebäudebegrünungssystemen“ ermöglicht werden. Als Ergebnis ist u. a. avisiert, die „Wärmedämmwirkung und Verdunstungskühlleistung von Begrünungskomponenten und -systemen zuverlässig vorherzusagen“. Damit läuft im Nachgang der Bearbeitungszeit vom „GreenFaBS“ ein Projekt, das ebenfalls mittels Messreihen und Simulationen an Kennwerten und digitalen Modellen zu Fassadenbegrünungen forschet.²²

3.3 Dezentrale Fassadenlüftung (DFL) und Fassadenbegrünung

Bezüglich der Zusammenführung der beiden Fassadentechnologien, die im Bereich energieeffizienter Gebäudekonditionierung bisher getrennt eingesetzt werden, finden sich wie

¹⁷ vgl. Herzog et al., 2016, 324f.

¹⁸ vgl. Perini/Bazzocchi, 2017, S. 121 (Table 2)

¹⁹ vgl. Baumann, 1983, S. 31

²⁰ vgl. Dentel, 2015, Tab 1. S. 6

²¹ vgl. Eppel/ Bohl, 2020, S. 50ff.

²² <https://www.zae-bayern.de/forschung/eob> <10.01.2022>

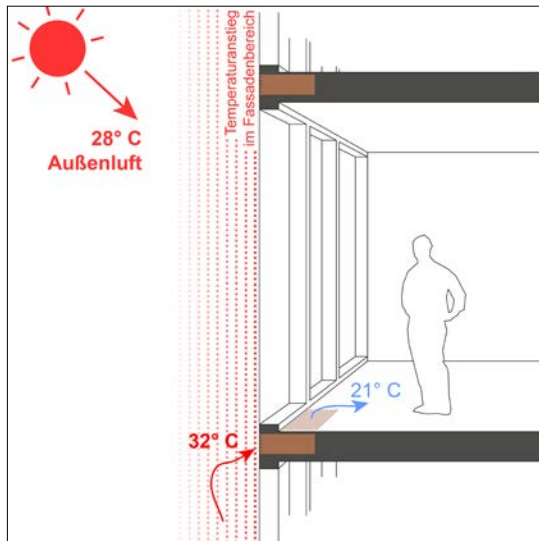


Abb. 5 Vergleich der Temperaturentwicklung an Fassadenoberflächen
 Referenz: Erhöhte Außentemperatur [$\Delta T + 4K$; angenommener Wert nach Baumann, 1983, S. 31] in Fassadengrenzschicht (THN-AR)

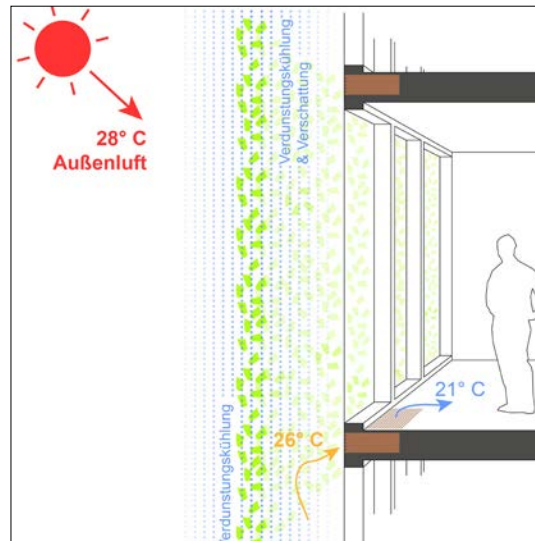


Abb. 6 Grünfassade: Reduzierung der Außentemperatur [$\Delta T - 2K$; etwa halbiertes Wert nach Baumann, 1983, S. 31] innerhalb der Fassadengrenzschicht durch Verschattung, Konvektion, Verdunstungskühlung (THN-AR)

Kurzdarstellungen
 Stand Technik und
 Wissenschaft

genannt zwar Hinweise in der Fachliteratur²³, da jedoch bisher zu diesem Ansatz keine wissenschaftlichen Studien vorliegen, sollen in Rahmen des „GreenFaBS“-Projekts belastbare Ergebnisse zu der Schnittstelle erarbeitet werden. (Abb. 5+6)

Bei der Kombination von „kontrollierter Lüftung und Gebäudebegrünung“ wird im Bereich des Daches empfohlen, die Zuluft „in der Regel 60 cm über Dach anzusaugen“²⁴. Diese Empfehlung wird zunächst auf den Fassadenbereich übertragen, das heißt die Ansaugung der Zuluft soll hinter der Bepflanzung erfolgen. Dieser Fassadenraum kann, wenn nicht bereits vorhanden, unter anderem als Wartungsgang sowohl für Fassade, Lüftungssystem als auch Pflanzenpflege genutzt werden.

Die Gestaltung der Zuluftführung ist wesentlicher Bestandteil des AP „Entwicklung von Lösungsstrategien“ und wird in Abhängigkeit des Begrünungssystems betrachtet.

Bei licht- und luftdurchlässigen Begrünungssystemen (Kletterpflanzen) ist davon auszugehen, dass eine effiziente Zuluftführung aus dem Raum vor der thermischen Gebäudehülle und hinter der Begrünung erfolgen kann.

Licht- und luftundurchlässige Systeme (z. B. Verticalgreendesign (VGD), Vertiko) ist der „Entnahmeort der Zuluft“ im Rahmen des Forschungsvorhabens hinsichtlich der Eignung nachfolgender Prinzipien zu klären, Ansaugung:

- direkt über der Pflanzenoberfläche
- in mittlerer Tiefe der Bepflanzung
- über im Wurzelbereich installierten Zuluftkanal

Um die, durch pflanzliche Verdunstungskühlung, reduzierten Lufttemperaturen effizient zu nutzen, erscheint eine „Entnahme der Zuluft“ innerhalb der Begrünungselemente sinnvoll.

Denkbar ist auch, ein Element zur Umlenkung der Zuluft am oberen oder unteren Rand der Begrünungselemente zu installieren. Somit könnte Frischluft in unmittelbarer Nähe der Pflanzen „angesaugt“ werden – also vor der wandgebundenen Begrünung. Im Vergleich dazu, soll auch eine Zuluftführung im verschatteten Bereich hinter den opaken Begrünungselementen betrachtet werden.

3.4 Simulationsmodelle

Durch bestehende Berechnungsmodelle ist es möglich, das Kühlpotential (Verschattungswirkung sowie Verdunstungskühlung durch das Blattwerk/ Substrat) von verschiedenen Begrünungssystemen abzuschätzen.²⁵ Um dieses Potential in Kombination mit dezentraler

²³ vgl. Pfoser et al., 2013, S. 128f.

²⁴ vgl. Pfoser et al., 2013, S. 128

²⁵ vgl. Jones, 2014; Monteith et al., 2013

Fassadenlüftungstechnik beurteilen zu können, müssen die bestehenden Modelle in den entsprechenden Simulationsumgebungen (thermisch-energetische Gebäudesimulation, Raumströmungssimulation) umgesetzt, angepasst und erweitert werden.

Kurzdarstellungen
Stand Technik und
Wissenschaft

4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Mit der Fa. TROX GmbH, Neukirchen-Vluyn, einem führenden Unternehmen im Bereich dezentraler Lüftungstechnik und Schullüftung, wurde von den beiden Kooperationspartnern eine Verpflichtungserklärung (April 2021) abgeschlossen.

Ziel war eine frühzeitige Einbindung der systemtechnischen Expertise des Unternehmens über den Bezug der dezentralen Fassaden Lüftungsgeräte (DFL) hinaus. Ein Mitarbeiter begleitete als Experte die Projektarbeiten bei der Inbetriebnahme der DFL-Geräte, der Durchführung der Experimentellen Studien I und II sowie bei der abschließenden Einschätzung und Bewertung der Ergebnisse.

II. Eingehende Darstellung

Eingehende Darstellung

1 Konzeptionelle Entwicklung von Lösungsstrategien, Aufbau Fassadenversuchsstand

Lösungsstrategien

1.1 Entwicklung Lösungsstrategien

1.1.1 Erarbeitung systematischer Lösungsprinzipien

Dezentrale Fassaden Lüftung (DFL)

Moderne Gebäude zeichnen sich durch eine luftdichte Hülle aus, gleichzeitig ist jedoch ein Mindestaußenluftwechsel erforderlich.¹ Dies kann zum Beispiel kontrolliert mit dezentraler Fassadenlüftung (DFL) erreicht werden. Die Außenluftzufuhr erfolgt dabei direkt über spezielle Öffnungen in der Fassade bzw. Außenwand mit einem nachgeschalteten Technikmodul.

Die Fassadenlüftungssysteme sind in der Lage einen Raum kontrolliert mit geregelter oder begrenztem Außenluftstrom zu be- und entlüften, die angesaugte Außenluft wird gefiltert und je nach Bedarf thermisch behandelt. Die Geräte sparen Platz und lassen sich so aus architektonischer Sicht oft ideal in das Raum- und sogar Gebäudekonzept mit einbeziehen und bieten aufgrund der verschiedenen Systeme einen breiten Anwendungsbereich hinsichtlich des Neubaus und auch der Sanierung des Altbaubestands.

Bei der Neuplanung von Schul- und Verwaltungsgebäuden kann mit dem Einsatz von DFL häufig auf eine Abhängung mit Unterdecke verzichtet werden. Damit lässt sich die thermische Speichermasse der Massivdecken aktivieren, was sich auf die Raumkonditionierung und das Innenraumklima positiv auswirkt.²

Durch den modularen Aufbau und die kompakte Ausführung eignen sich Systeme der dezentralen Lüftungstechnik auch besonders für die energetische Sanierung. Die Geräte sind einbaufertig lieferbar, sodass bauseits neben dem Einbauort nur mehr die Außen- und Fortluftöffnungen sowie bei Bedarf die Versorgungsleitungen für Heizen und Kühlen vorzusehen sind.

Je nach Einbausituation unterscheidet sich der Aufbau der zum Einsatz kommenden Lüftungsgeräte. Es werden systemspezifische Varianten für den Einbau im Bereich von Boden (Unterflurgeräte) und Decke, sowie der Brüstungszone und geschosshoch im Fassadenfeld angeboten. (Abb. 7). In der Regel erfolgt für größere Projekte eine projektbezogene Anpassung der Geräte auf die besonderen Anforderungen des Bauvorhabens durch Sonderlösungen.³

Das DFL-Gerät mit Technikmodul und Außen- sowie Fortluftöffnungen kann in verschiedenen Fassadenbereichen angeordnet sein:⁴

- Decken(stirnseiten)-/ Fußbodenaufbau (horizontaler Aufbau)
- Brüstungen (horizontaler Aufbau)
- Fassadenfläche (vertikaler Aufbau)

Da die Nutzungsart der Gebäude sich maßgeblich auf die Fassadenkonstruktion auswirkt und sich daraus die Bauart der Geräte ergibt, lassen sich Bauarten in bestimmten Gebäudetypologien besonders häufig antreffen:⁵

- Brüstungen (horizontaler Aufbau) in Gewerbe und Bürobauten
- Decken(stirnseiten)geräte, Brüstungen (vertikaler Aufbau) in Schulgebäuden und Kita
- Unterflurgeräte in Bürogebäude mit bodentiefer Verglasung

Für die Experimentellen Studien I bietet die Anordnung der Fassadenöffnungen im Bereich der Brüstung (horizontaler Aufbau) (Abb. 8+9) Vorteile:

- direkte Leitungsführungen
- leichte Zugänglichkeit
- gute Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Schul- und Verwaltungsgebäude

Bei der Kombination von „kontrollierter Lüftung und Gebäudebegrünung“ wird im Bereich des Daches empfohlen, die Zuluft „in der Regel 60 cm über Dach anzusaugen“.⁶ Diese Richtlinie auf Fassaden zu übertragen ist bedingt sinnvoll, da als Berechnungsgrundlage maximal anzunehmende Schneehöhen angesetzt werden, welche in der vertikalen Ebene so nicht zu erwarten sind.

1 vgl. EnEV 2021 §6 Abs. 1,2

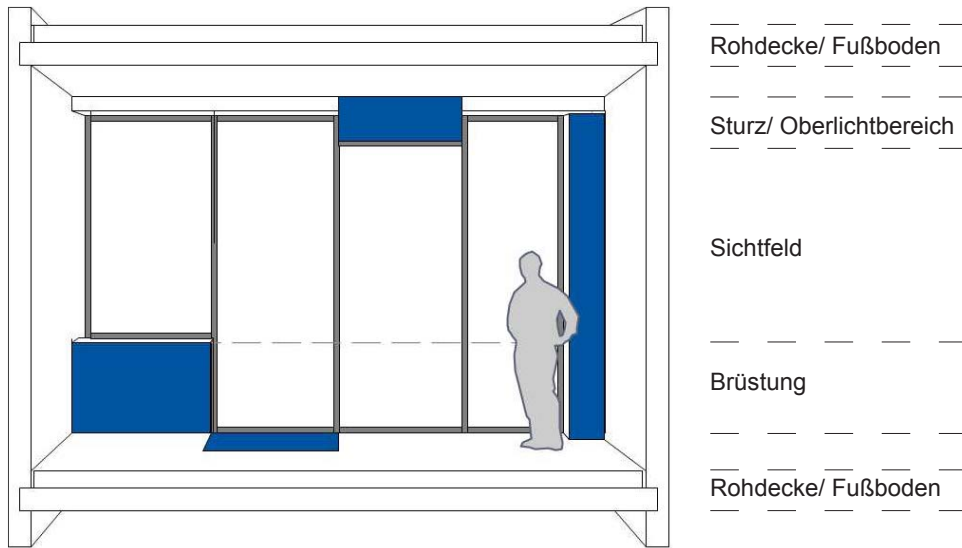
2 vgl. Herzog et al., 3/2020, S. 325

3 vgl. Wolf, 21.01.2021

4 vgl. Herzog et al., 2020, S. 325f.

5 vgl. Herzog et al., 2020, S. 326

6 vgl. Pfoser et al., 2013, S. 128



Eingehende Darstellung
Lösungsstrategien

Abb. 7 Einbausituationen für DFL-Geräte mit Bezug zur vertikalen Zonierung von Fassaden (THN-AR)

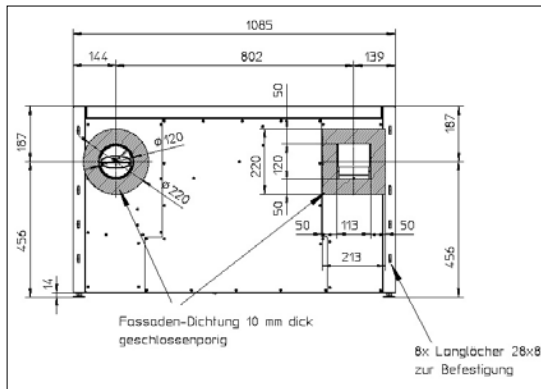


Abb. 8 Konstruktionsmaße Lüftungsgerät Fassadenseite (TROX)

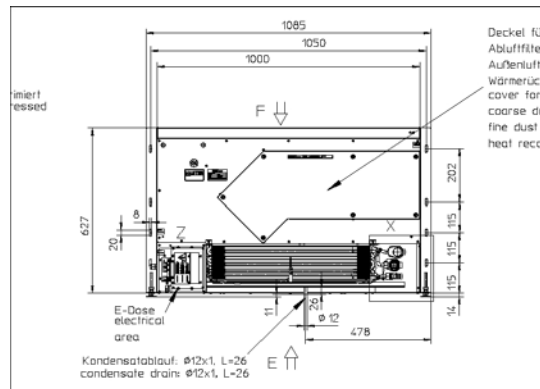


Abb. 9 Konstruktionsmaße Lüftungsgerät Raumseite (TROX)

Ein Kleintierschutzgitter reicht an den Frischlufteinlässen aus. Auf ein zusätzliches Insekten-schutzgitter (Maschenweite 1 – 2 mm) sollte grundsätzlich verzichtet werden. Diese sind zu feinmaschig und dadurch schnell verunreinigt. Insekten werden im Gehäuseinneren durch den Filter abgefangen.

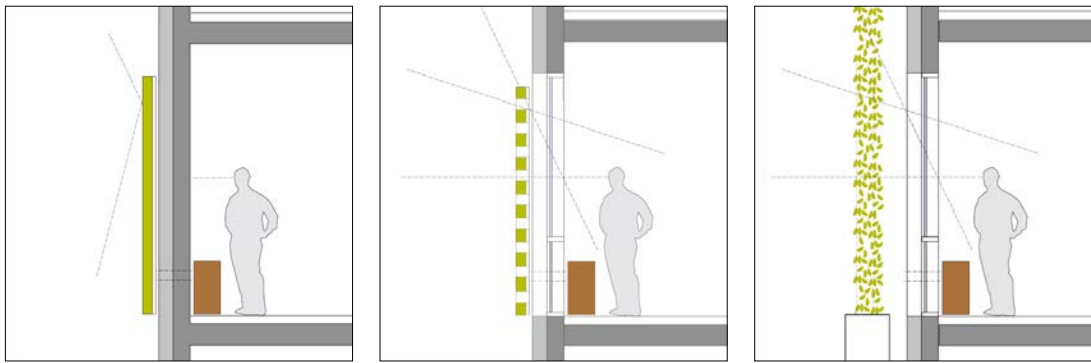
Grünfassaden

Angesichts der Diskussionen um Ökologie und Nachhaltigkeit im Bauwesen gewinnt ein Thema (wieder) an Aktualität: Begrünung von Dach und Fassade. Kaum ein größerer Wettbewerbsbeitrag spart die Bepflanzung aus, zieren Renderings Dachlandschaften als (Nutz-) Gärten und Fassaden bisweilen gar als vertikale Wälder.

Während das Gründach über Jahrzehnte erprobt und etabliert ist, gilt die Fassadenbegrünung immer noch als eher neues Arbeitsfeld. Begrünte Gebäudeoberflächen eröffnen insbesondere in verdichteten Innenstadtbereichen vielfältige ökologische Vorteile. Neben der Verbesserung des (Mikro-)Klimas (unter anderem Wasser-/Feuchtespeicher, Staubfilter, Lärminderung) und als Rückzugsort für Biodiversität gelten Pflanzen als wichtige Faktoren für ein naturfreundliches und behagliches Wohn- und Arbeitsumfeld. Doch trotz allgemeinem Zuspruch und gewisser Trendhaftigkeit, Pflanzenarten lassen sich nicht so einfach beliebig unter verschiedenen klimatischen Standortbedingungen und baulichen Expositionen (baukünstlerisch) einsetzen. Gleichwohl ist die Bandbreite an botanischen und technischen Lösungen groß, reicht von punktuellen Bepflanzungen mit Selbstklimmern oder Rankern bis zu vollflächigen Begrünungen mit Textil-Substrat auf speziellem Trägermaterial oder modularen Systemen, wie gereimte und gestapelte Pflanztöpfe beziehungsweise geschoßhohe Wandelemente.⁷

Projekte wie das Gebäude der Magistratsabteilung 48 (2013) in Wien (Abb. 4) zeigen, dass durch Verdunstung des zugeführten Wassers im Sommer eine hohe Kühlleistung erzielt

7 vgl. Krippner, 2013, S. 8



Eingehende Darstellung
Lösungsstrategien

Abb. 10 Licht- und luftundurchlässige Fassadenbegrünung vor opaker Wand (THN-AR)

Abb. 11 Licht- und luftdurchlässige Fassadenbegrünung; links Mischsystem mit Pflanztöpfen bzw. -rinnen, rechts Kletterpflanzen mit Rankhilfe vor transparenten Öffnungen (THN-AR)

werden kann, mit der Folge einer reduzierten Anzahl von Klimageräten und deutlich abgesenkter Oberflächentemperaturen an der Fassade. Diese hervorragende Eigenschaft von Fassadenbegrünungen ermöglicht sommerlicher Überhitzung spürbar entgegenzuwirken. Aber die direkte Kühlleistung ist vor allem auch interessant für die Kombination mit dezentraler Lüftungstechnik.

Sollen diese Kühlprozesse gezielt zur Reduktion von sommerlich heißer Außenluft als Vorkonditionierung der Frischluft von DFL-Geräten verwendet werden, müssen, um ein nachhaltiges Begrünungsergebnis zu erzielen, bereits während der Planungsphase grundsätzliche Systementscheidungen getroffen sowie Einbauprinzipien berücksichtigt werden. Dabei kann auf verschiedene Fassadenbegrünungstypologien zurückgegriffen werden:⁸

- bodengebundene Begrünung, u. a.
 - Pflanzen mit Kletterhilfen/Spalieren
- wandgebundene Begrünung, mit verschiedenen Systemen, wie
 - Pflanzen in horizontalen Vegetationsflächen /u. a. Pflanzgefäße an Tragkonstruktionen
 - Pflanzen in senkrechten Vegetationsflächen/z. B. sogenannte "Vertikale Gärten".

Ein Hauptunterscheidungskriterium bei Fassadenbegrünungen ist die Permeabilität. (Abb. 10+11) So kann auch bei wandgebundenen Systemen die (Unter-)Konstruktion durchlässig für Licht und/oder Luft konstruiert sein. Dies ist insbesondere im Bereich von transparenten und transluzenten Fassadenflächen von Bedeutung.

Bei den Mischsystemen (Abb. 11, links) werden die Pflanzen zum Beispiel in ausgedämmten Trögen in modularen Kleingerüsten mittels Isokörben an der tragenden Wand vor der thermischen Hülle befestigt oder in einer zusätzlichen Tragkonstruktion der Fassade vorgestellt. An Kletterhilfen (Abb. 11, rechts) aus rostfreiem Stahl kann sich die Pflanze linear und flächig ausbreiten. Mehrjährige Kletterpflanzen benötigen jedoch viel Zeit, um eine Fassadenfläche vollständig zu begrünen. Aus diesem Grund sollte eine Ausschreibung frühzeitig erfolgen, um die Pflanzen vorkultivieren zu können.⁹

Fassadenbegrünungen zählen zu den vorgehängt hinterlüfteten Fassaden und deren Einsatz orientiert sich nach der DIN 18516-1 2010-06: Außenwandbekleidungen, hinterlüftet – Teil 1: Anforderungen, Prüfgrundsätze. Die wandgebundenen Systeme werden additiv an der tragenden Wand mit einer Unterkonstruktion befestigt. Vorab zu überprüfende bautechnische Anforderungen sind statische Sicherheit, wärmetechnische Bewertung, Wasserversorgung, Elektrik, Wartungsarbeiten, Brandschutz, Trennung zwischen der wasserführenden Fassadeebene und der Baukonstruktion.¹⁰

Trotz aller Vorteile zögern Kommunen und private Bauherren häufig bei der Umsetzung insbesondere von wandgebundener Fassadenbegrünung. Neben hohen Erstinvestitionen entstehen regelmäßig erhebliche Folgekosten für Pflege und Wartung. Diese resultieren vor allem aus Planungsfehlern sowie einer schweren Zugänglichkeit oberhalb der Erdgeschosszone, weshalb auf kostenintensive Hilfsmittel wie Hubsteiger zurückgegriffen werden muss. Daher ist für häufige Pflege und Wartungsarbeiten auf eine gute Zugänglichkeit zu achten.

Für die verschiedenen Systeme stehen eine Vielzahl an Pflanzen zur Verfügung. Diese stellen jeweils unterschiedliche Anforderungen an Substrat, Belichtung und Bewässerung. Vor allem müssen Pflanzen und Unterkonstruktion genau aufeinander abgestimmt sein.

⁸ vgl. Pfoser, 2013, S. 55 und Herzog et al., 3/2020, S. 338, Pfoser, 2017, S. 68ff.

⁹ vgl. Kaltenbach, 2008, S. 145

¹⁰ vgl. Köhler, 2012, S. 128

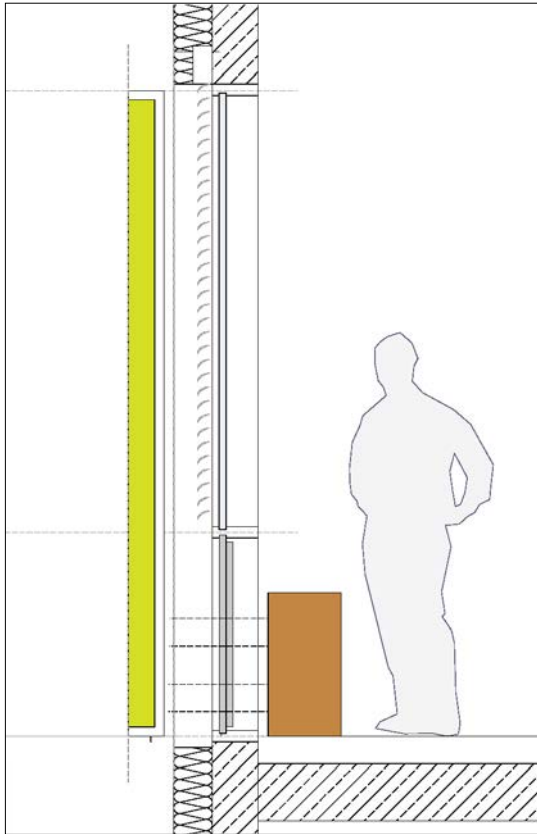


Abb. 12 Fassadeversuchsstand – Entnahmeorte der Zuluft (THN-AR)

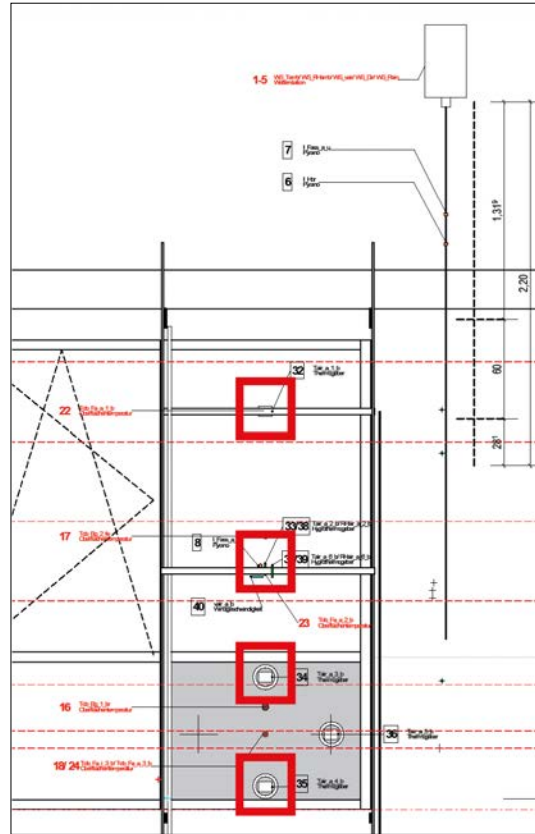


Abb. 13 Fassadeversuchsstand – Messpunkte für alternative Entnahmeorte (THN-AR)

Eingehende Darstellung
 Lösungsstrategien

Kombination aus DFL und Fassadenbegrünung

Für die Kombination von Fassadenbegrünung und dezentraler, fassadenintegrierter Lüftungssysteme (DFL) wurden mit Bezug zu den Experimentellen Studien I am Fassadeversuchsstand (THN) Lösungsprinzipien systematisch erarbeitet. Anhand der vier verschiedenen Begrünungssysteme der beteiligten Firmenpartner (Vertiko GmbH, Verticalgreendesign GmbH, Kramer Gartenbau, Jakob Rope Systems) sind verschiedene geometrische und konstruktive Ansätze zwei- und dreidimensional entwickelt sowie auch in einfachen Arbeitsmodellen überprüft worden.

Um eine mögliche Effizienzsteigerung der dezentralen Lüftungstechnik durch die Fassadenbegrünung genauer untersuchen zu können, wurden zwei Anordnungspositionen für die Ansaugung der Frischluft im Brüstungsbereich definiert (Abb. 12). Weitere potentielle Stellen zur Frischluftentnahme werden durch zusätzliche Messpunkte betrachtet. (Abb. 13).

Ein entscheidender Einflussfaktor ist die Lagebeziehung zwischen der Zuluftöffnung und der vorgelagerten Fassadenbegrünung. Es wird erwartet, dass die Lufttemperatur im Zentrum der Fassadenbegrünung durch adiabatische Kühlprozesse am niedrigsten ist. Entsprechend wird die Außenluftansaugung der DFL im Raum definiert.

Das Lüftungsgerät steht jeweils mittig im Fassadenfeld. Die Lage der Zu- und Abluftöffnung ist durch die Aussparungen am Gerät vorgegeben. Diese befinden sich jeweils am oberen äußeren Rand der Längsseite der DFL. Von dort stellen Luftkanäle eine direkte lineare Verbindung nach Außen her. Im begrüneten Fall soll von der kühleren Luft im Zentrum der Fassadenbegrünung angesaugt werden.

Aus diesem Grund wird über Luftkanäle und Formteile die horizontale Lage der Zuluftöffnung in die Achsenfeldmitte verschoben. So wird über einen längeren Kontakt der Außenluft mit der Fassadenbegrünung eine stärkere Vorkonditionierung der Luft gegenüber dem Randbereich erwartet.

Um systematisch zu untersuchen, in welcher Höhe eine optimale Vorkonditionierung der Zuluft erfolgt, werden in der vertikalen Achse vor der Fassade Messpunkte angeordnet. Zudem sind an der Brüstungs- ober- und unterkante Zuluftöffnungen vorgesehen. Durch den Einsatz von Absperrklappen ist es möglich zwischen den beiden Ansaugöffnungen zu wechseln.

Es wird erwartet, dass je kürzer die Distanz zwischen Ansaugöffnung und Fassadenbegrünung ist, desto größer sind die möglichen Effekte aus den adiabatischen Kühleffekten der Begrünungssysteme. Daher gilt es das Spaltmaß (Abstand zwischen Fassadenbegrünung

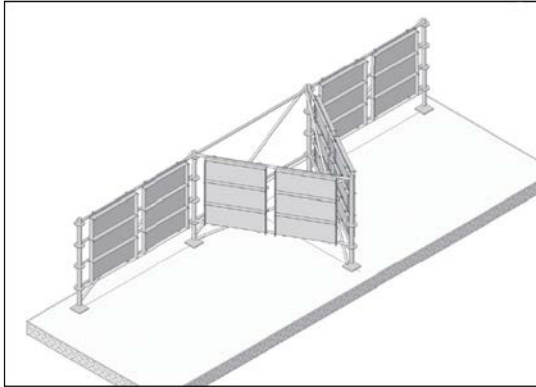


Abb. 14 Lagergerüst Isometrie
(THN-AR)



Abb. 15 ... mit Variante 1 – Vertiko GmbH, Buchenbach (08/2021) (THN-AR)

Eingehende Darstellung
Lösungsstrategien

und thermischer Hülle der Fassade) auf ein konstruktives Minimum zu reduzieren. Die bestimmende Größe hierfür ist der Platzbedarf für die notwendige Messtechnik sowie deren Unterkonstruktion.

Eine erste Vorauswahl für möglichst praxisnahe Modellvarianten, die am Fassadenversuchsstand untersucht werden sollen, wurde so gestaltet, dass ein relativ einfacher Wechsel der verschiedenen wand- und bodengebundenen Begrünungssysteme möglich ist. Dazu wurde eine Art Gerüstkonstruktion entwickelt, die über Abstandshalter an Boden- und Dachkonstruktion des Fassadenversuchsstands befestigt wird. Dieser Ansatz ermöglicht über einen eher kleinformatigen modularen Aufbau einen Umbau ohne größere Hebezeuge. Zusätzlich wird eine freistehende Konstruktion vorgehalten, um die Begrünungssysteme vor Ort fachgerecht lagern zu können (Abb. 14+15).

Die Planung und konstruktive Ausarbeitung der Lösungsprinzipien erfolgte auch unter Berücksichtigung der ästhetischen Wirkung von Grünfassaden auf das nähere Gebäudeumfeld und auf potentielle Nutzer im Gebäudeinnern. Gerade bei licht- und luftdurchlässigen Begrünungssystemen sind die Pflanzen auch raumseitig wirksam. Durch eine zusätzliche Ebene aus Pflanzen direkt vor den transparenten Flächen der Fassade entsteht ein stetiges Spiel von Licht und Schatten, was eine deutlich veränderte Wahrnehmung für den Nutzer bedeutet. Durch das Verschieben der Vegetation in die Vertikale entstehen neue Perspektiven: „Vor oder gar von unten betrachtet enthüllen sich die Pflanzen völlig. Senkrecht gesetzt hebt ein Dialog mit dem Menschen von gleich zu gleich an.“¹¹

Allgemein werden Pflanzen als Verschattung positiv bewertet. „Der Blick ins Grüne beruhigt und fördert das allgemeine Wohlbefinden.“¹² Umfragen haben ergeben, dass die Aufenthaltsqualität unter schattenspendenden Pflanzen als angenehmer bewertet wird als unter synthetischen Systemen.¹³

1.1.2 Aufbau von Simulationsmodellen (TEG und CFD)

Zur Beurteilung des Kühl- und Verschattungspotentials von verschiedenen Fassadenbegrünungssystemen in Kombination mit dezentraler Fassadenlüftung (DFL) sind detaillierte Modelle in der thermisch-energetischen Gebäudesimulationsumgebung TRNSYS¹⁴ und der numerischen Strömungssimulationsumgebung ANSYS/ FLUENT¹⁵ erstellt worden.

Thermisch-Energetisches Gebäudesimulationsmodell (TEG)

In einem ersten Schritt wurden in der thermisch-energetischen Gebäudesimulationsumgebung TRNSYS detaillierte Berechnungsmodelle erstellt:

- Modell zur Beurteilung der Verschattungswirkung (Abminderungsfaktor)
- Modell zur Bestimmung und Beurteilung der Blatt- und Substratoberflächentemperatur und des sich einstellenden Verdunstungskühlungspotentials der Begrünungssysteme
- Modell zur Ermittlung der Ansaugtemperatur (Grenzschichttemperatur) der dezentralen Fassadenlüftung
- Modell der dezentralen Fassadenlüftung inklusive Regelung und Steuerung

¹¹ Blanc et al., 2009, S. 87

¹² Köhler et al., 2012, S. 16

¹³ Vgl. Köhler et al., 2012, S. 16

¹⁴ TRNSYS, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison USA

¹⁵ ANSYS/ FLUENT, ANSYS Corporation, Canonsburg, Pennsylvania USA

- 3D-Gebäudemodell inklusive Bauphysik, interne Wärmegewinne

Eingehende Darstellung

Ziel dieser Simulationsberechnungen ist die Beurteilung und Bewertung der Größen:

Lösungsstrategien

- Grenzschichttemperatur im Ansaugbereich (Ansaugtemperatur) der DFL
- Energiebedarf und CO₂-Emissionen der DFL (Kühl- und elektrischer Hilfsenergiebedarf)
- thermische Behaglichkeit (empfundene Raumtemperatur, Überschreitungshäufigkeiten, Übertemperaturgradstunden)

Das Kühl- und Verschattungspotential wird in Abhängigkeit der geometrischen, biophysikalischen sowie spektralen Eigenschaften der Pflanzen und des Substrats/ Erdreichs (z. B. Wassersättigungsgrad) und des Umgebungsklimas beurteilt. Mit den Berechnungsmodellen soll der Einfluss der Begrünungssysteme auf die energetischen Kennwerte und die thermische Behaglichkeit untersucht werden.

Neben den resultierenden Temperaturen (z. B. Ansaugtemperatur der dezentralen Fassadenlüftung) wird zur Beurteilung der Verschattungswirkung der Abminderungsfaktor F_c der Solarstrahlung berechnet. Auch wird die Verdunstungskühlung durch das Blattwerk bzw. das Substrat berücksichtigt und über die jeweiligen Anteile prozentual gewichtet. Diese Größen werden in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur und den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten an der Fassadenoberfläche sowie von der Lufttemperatur im Spalt zwischen Begrünungssystem und Fassade bestimmt. Dadurch stellen sich gegenüber unverschatteten Fassaden geringere Fassadenoberflächentemperaturen ein. Diese reduzierten Oberflächentemperaturen haben wiederum Einfluss auf die Ansaugtemperaturen und damit den Kühlenergiebedarf der dezentralen Fassadenlüftung.

Abminderungsfaktor F_c

Zur Bestimmung des Verschattungspotentials von bodengebundenen Systemen und Mischsystemen wird ein Abminderungsfaktor in Abhängigkeit des sogenannten Blattflächenindex (engl.: LAI – leaf area index) und der Sonnenhöhe berücksichtigt.

Der Blattflächenindex ist ein dimensionsloser Wert, der das Verhältnis von Gesamt-Blattfläche zu der durch das Blattwerk bedeckten Wandfläche beschreibt. Je größer der LAI, desto größer ist die Verschattungswirkung auf die Fassade. Dieser Wert wird für die jeweiligen Systeme im Zuge der Messungen direkt vor Ort am Fassadenversuchsstand bestimmt. Für wandgebundene Systeme wird von einer vollständigen Verschattungswirkung ($F_c = 0$) aufgrund des konstruktiven Aufbaus der Begrünungssysteme ausgegangen.

Nachfolgende Gleichung beschreibt für bodengebundene Systeme den Abminderungsfaktor (F_c -Wert) nach Jones¹⁶:

$$F_c = e^{\left(\frac{1}{2 \cdot \sin \beta} \cdot LAI\right)} \quad [1]$$

Dabei ist:

F_c	Abminderungsfaktor aufgrund Begrünungssystems, dimensionslos
β	Sonnenhöhenwinkel in °
LAI	Blattflächenindex in m ² /m ²

Für das Mischsystem Kramer wird diese Gleichung dahingehend angepasst, dass eine Vollverschattung durch die Pflanzkästen ($F_c = 0$) berücksichtigt wird:

$$F_c = x_{Fläche} \cdot e^{\left(\frac{1}{2 \cdot \sin \beta} \cdot LAI\right)} + (1 - x_{Fläche}) \cdot 0 \quad [2]$$

Dabei ist:

F_c	Abminderungsfaktor aufgrund Begrünungssystems, dimensionslos
β	Sonnenhöhenwinkel in °
LAI	Blattflächenindex in m ² /m ²
$x_{Fläche}$	Verhältnis von Blattfläche zur Gesamtfläche (Für das System Kramer ergibt sich ein Wert von 0,55. Dies bedeutet, dass das Begrünungssystem zu 55 % aus Blattfläche und zu 45 % aus Substratfläche, in diesem Fall aus Pflanzkästen besteht)

Verdunstungskühlung durch die Begrünungssysteme

Die Verdunstungskühlung durch das Blattwerk bzw. das Substrat wird durch die Blattoberflächen- bzw. Substratoberflächentemperatur bestimmt. Das Modell zur Berechnung der

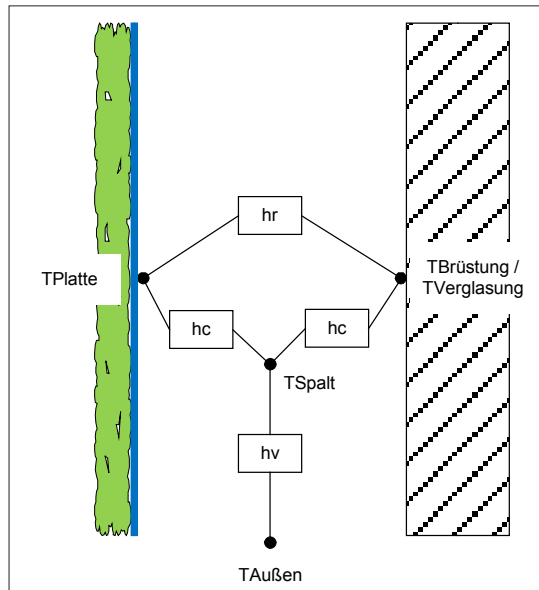


Abb. 16 Widerstandsnetzwerk für wandgebundene Systeme (THN-ieg)

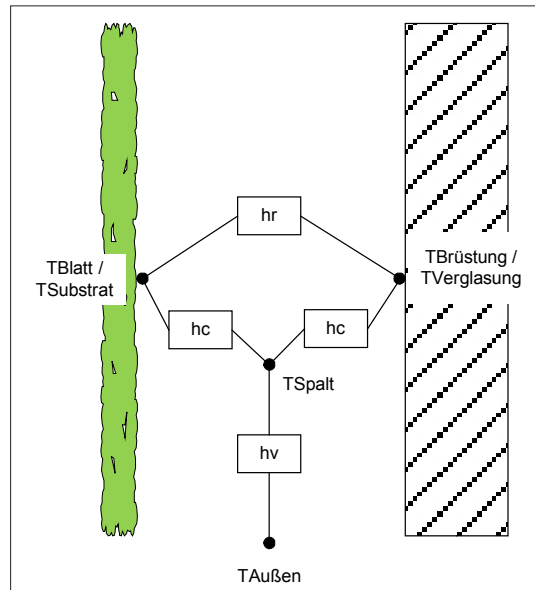


Abb. 17 Widerstandsnetzwerk für Mischsysteme und bodengebundene Systeme (THN-ieg)

Eingehende Darstellung
Lösungsstrategien

Blattoberflächentemperaturen nach Monteith¹⁷ wird hierbei zur Bestimmung der Substratoberflächentemperatur erweitert.

Da die wandgebundenen Systeme Vertiko und Verticalgreendesign (VGD) sowie das Mischsystem Kramer aus mehreren verschiedenen Pflanzenarten bestehen, handelt es sich bei den in den Modellen berücksichtigten Parametern für den Blattdurchmesser, den Albedo, die Emissivität sowie den Oberflächenwiderstand um Durchschnittswerte. (Tab. A1 im Appendix)

Die jeweiligen Blattdurchmesser, der Blattflächenindex für die Systeme Kramer und Jakob, sowie der Abstand zur Fassade und das Verhältnis von Blattfläche zu Gesamfläche, wurden vor Ort bzw. aus den Planungsunterlagen bestimmt. Der Albedo, der Oberflächenwiderstand sowie die Emissivität sind weitestgehend der Literatur entnommen.¹⁸

Bei fehlenden Daten sind hierzu sinnvolle Annahmen getroffen worden. Der Albedo für das Erdreich bzw. das Substrat wird in den Betrachtungen mit 1,0 angesetzt, da die Blätter das Substrat zu 100 % verschatten. Außerdem werden beim System Vertiko die Pflanzen wurzelnackt, d. h. ohne Substrat bzw. Erdreich, in ausgeschnittene Taschen eines Geotextils gesteckt. Die Berechnungsschritte sind bei diesem System identisch, lediglich die Emissivität wird an das Geotextil angepasst.

Integriert ist weiterhin ein Modell zur Ermittlung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten an der Fassadenoberfläche in Abhängigkeit des jeweiligen Begrünungssystems. Dieses Modell basiert auf der Richtlinie VDI 6007-2:2012-03 für hinterlüftete Fassaden. Hierbei werden bei den Systemen Kramer und Jakob die jeweiligen horizontalen Ein- und Ausströmflächen, welche sich in Abhängigkeit der Blattflächenindexe bestimmen lassen, berücksichtigt.

Bei den wandgebundenen Systemen Vertiko und VGD wird insbesondere der Einfluss der zur Fassade angeordneten Rückwand auf die Spalttemperatur und damit auf die Ansaugtemperaturen der dezentralen Fassadenlüftung berücksichtigt.

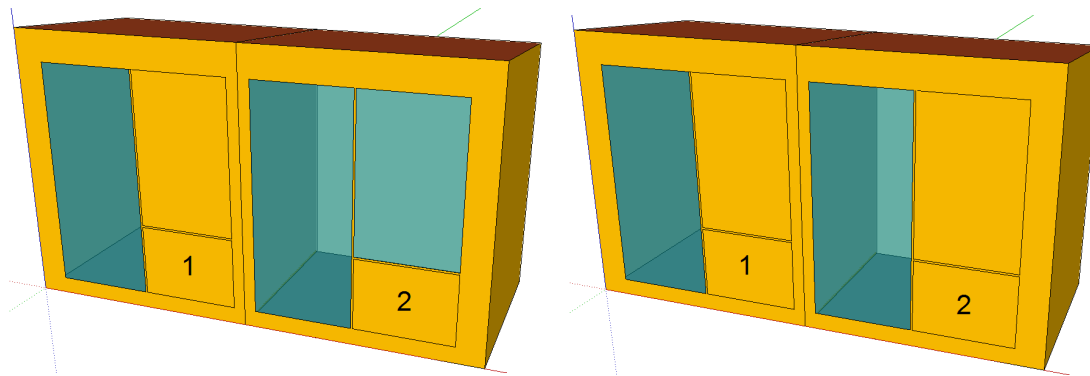
Für das Mischsystem Kramer und das bodengebundene System Jakob werden die Abkühlung der durch das Blattwerk strömenden Luft und die sich daraus resultierenden Spalttemperaturen mit Hilfe eines Wärmetauscher-Modells (ϵ -NTU-Modell) errechnet.¹⁹ Einfluss nehmen hierbei die Geometrie (z. B. Schichtdicke des Blattwerks), die biophysikalischen Eigenschaften der Pflanzen und die klimatischen Bedingungen.

Die resultierenden Widerstandsnetzwerke zur Bestimmung der Oberflächen- ($T_{\text{Verglasung}}$, $T_{\text{Brüstung}}$) und Spalttemperaturen (Abb. 16+17) berücksichtigen hierzu die konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten (h_c), der Wärmeaustauschkoeffizient aufgrund Durchlüftung (h_v) und der Strahlungswärmeübergangskoeffizient zwischen der Oberfläche des Begrünungssystems und der Fassade (h_r).

¹⁷ vgl. Monteith et al., 2013

¹⁸ vgl. Wolter, 2015; Fisher Garland et al., 2009; Shrewsbury et al., 2004; Sajbidorova et al., 2019; Santamouris et al., 2018; Miranda et al., 2013

¹⁹ vgl. Yazdanseta et al., 2017



Eingehende Darstellung
Lösungsstrategien

Abb. 18 TEG-3D-Simulationsmodell des Fassadenversuchsstands in Rednitzhembach – links: Modell für Systeme Verticalgreendesign (VGD), Vertiko, Kramer, rechts: Modell für System Jakob (THN-ieg)

Luftvolumenstrom [m³/h]	0	60	90	120	150
Wirkleistung P _{e,i} [W]	14	21	25	32	37

Tab. 2 Gemessene Wirkleistung (mit einem Leistungsmultimeter) der dezentralen Fassadenlüftung bei verschiedenen Luftvolumenströmen (THN-ieg)

Grenzschichttemperatur im Ansaugbereich der dezentralen Fassadenlüftung

Zur Bestimmung der Grenzschichttemperatur im Ansaugbereich der dezentralen Fassadenlüftung ist ein Modell in Anlehnung an Pfafferoth berücksichtigt.²⁰ Dabei setzt sich die Ansaugtemperatur aus der Gewichtung von Spalttemperatur und der Oberflächentemperatur der Außenfassade im Ansaugbereich zusammen:

$$T_{grenz} = T_{bruestung} \cdot (1 - x_{grenz}) + T_{spalt} \cdot x_{grenz} \quad [3]$$

Dabei ist:

- T_{grenz} Ansaugtemperatur im Grenzschichtbereich in °C
- $T_{bruestung}$ Brüstungsoberflächentemperatur in °C
- T_{spalt} Lufttemperatur im Spalt zwischen Begrünung und Brüstung
- x_{grenz} Faktor zur Bestimmung der Ansaugtemperatur im Ansaugbereich

Für den Referenzfall ohne Begrünungssystem ist die Spalttemperatur in der oben aufgeführten Gleichung mit der Außenlufttemperatur gleichzusetzen. Der Faktor zur Bestimmung der Ansaugtemperatur im Ansaugbereich (x_{grenz}) wird in einem weiteren Schritt mit Hilfe der numerischen Strömungssimulation bestimmt.

3D-Raummodell

Ein detailliertes 3D-Raummodell des Fassadenversuchsstands inklusive der bauphysikalischen Randbedingungen und internen Wärmelasten ist vorhanden (Abb. 18). Die jeweils linke Zone in den beiden Abbildungen bildet den Referenzfall (ohne Fassadenbegrünung) ab. Hier wird vor dem Fenster oberhalb des Brüstungsbereichs (1) eine opake Abdeckung vorgesehen; dies entspricht einem Fensterflächenanteil von 34,1 %.

Die rechte Zone beschreibt den Musterraum mit installiertem Begrünungssystem; es ist hierbei keine Abdeckung vor dem Fenster oberhalb des Brüstungsbereichs (2) für die Systeme Verticalgreendesign (VGD), Vertiko und Kramer vorgesehen; dies bedeutet einen Fensterflächenanteil von 57,3 %. Vor den geschosshohen Fensterflächen ist jeweils ein außenliegender Raffstore, welcher in Abhängigkeit der solaren Einstrahlung auf die Fassade und der Windgeschwindigkeit gesteuert wird, angedacht.²¹

²⁰ vgl. Pfafferoth et al., 2011, S. 157

²¹ Die in den Simulationsberechnungen berücksichtigten Randbedingungen hinsichtlich der allgemeinen und der bauphysikalischen Simulationsparameter für den Fassadenversuchsstand sind in Tab. A2 im Appendix dargestellt.

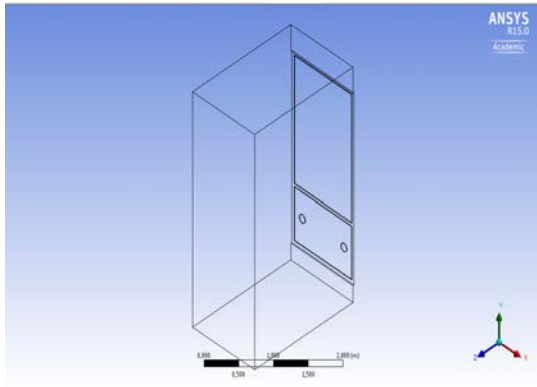


Abb. 19 CFD-3D-Simulationsmodell Referenzfall (THN-ieg)

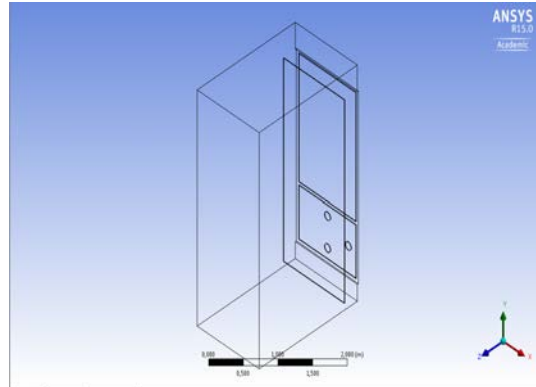


Abb. 20 CFD-3D-Simulationsmodell System Vertiko und Verticalgreendesign (THN-ieg)

Eingehende Darstellung
Lösungsstrategien

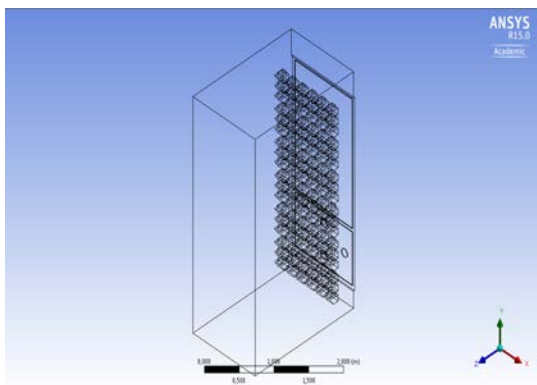


Abb. 21 CFD-3D-Simulationsmodell System Kramer (THN-ieg)

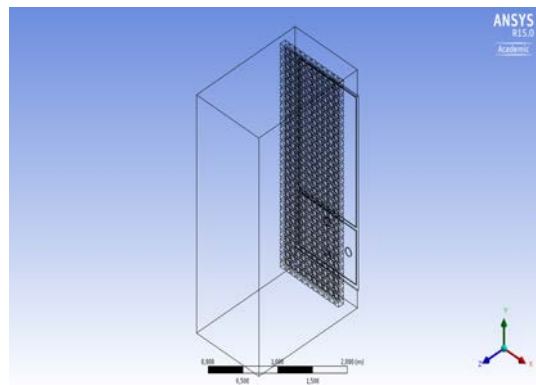


Abb. 22 CFD-3D-Simulationsmodell System Jakob (THN-ieg)

Modell der dezentralen Fassadenlüftung

Es wird ebenso eine detailgetreue Modellierung der dezentralen Fassadenlüftung zur Beurteilung des Einflusses der Dimensionierung und Betriebsweise der Lüftung sowie der Kühlregister in der TRNSYS Simulationsumgebung umgesetzt. (Tab. A3 im Appendix) Das wärmetechnische Verhalten des Kühlregisters ist dabei mit Hilfe eines ϵ -NTU-Modells abgebildet. Variable Einflussgrößen sind:

- Kaltwassereintrittstemperatur
- Kaltwassermassenstrom
- Lufteintrittstemperatur
- Lufteintrittsvolumenstrom

An der dezentralen Fassadenlüftung wurde mit einem Leistungsmultimeter (Fa. Gossen Metrawatt, Typ Metrahit Energy) die Wirkleistung Pel in Abhängigkeit des Luftvolumenstroms gemessen. Diese Werte dienen weiterhin zur Bestimmung des Hilfsenergiebedarfs der dezentralen Fassadenlüftung. (Tab. 2)

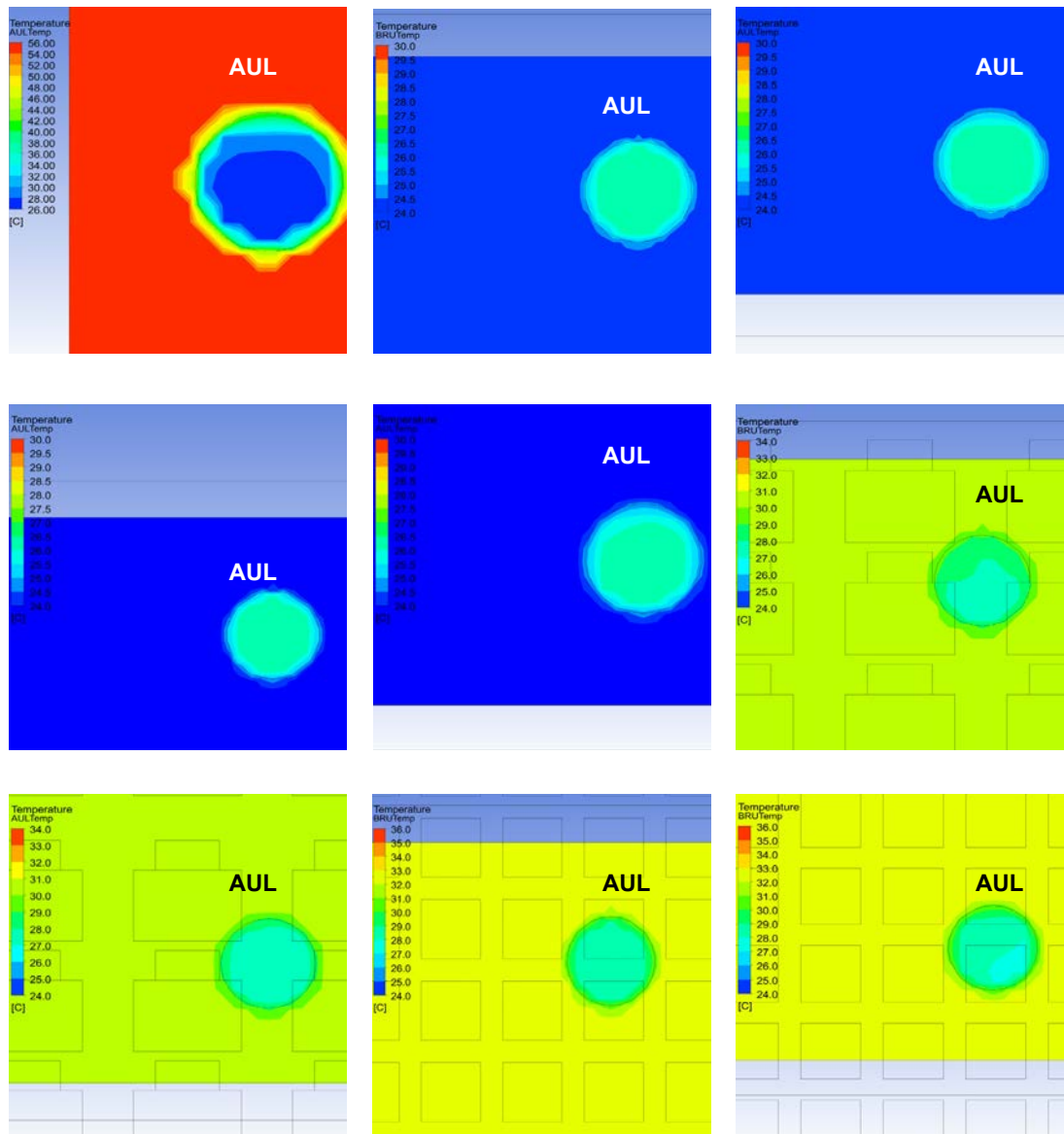
Kühllastberechnung nach VDI 2078:2015-06

Für den Musterraum des Fassadenversuchsstands in Rednitzhembach ergibt sich nach VDI 2078:2015-06 bei einer 100 % konvektiven Wärmeabfuhr für einen Raumtemperatursollwert von 24 °C eine Kühllast von 327 W (58,2 W/m²) und für einen Raumtemperatursollwert von 26 °C eine Kühllast von 296 W (52,7 W/m²). Es zeigt sich, dass die Raumkühlleistung der dezentralen Fassadenlüftung geringer als die Kühllast ist. (Tab. A3 im Appendix)

Numerisches Strömungssimulationsmodell (CFD)

Für den Referenzfall und die vier Begrünungssysteme werden detaillierte 3D-Modelle für den Brüstungsbereich und den darüber befindlichen Fassadenabschnitt in der Simulationsumgebung ANSYS/ FLUENT erstellt, vernetzt, simuliert und ausgewertet.

Ziel ist es, das Strömungsverhalten in der Fassadengrenzschicht im Ansaugbereich der dezentralen Fassadenlüftung zu bewerten. Weiterhin sollen eventuell auftretende Fehlströmungen in Form von Kurzschlüssen zwischen Außenluftansaugung und Fortluftausbringung



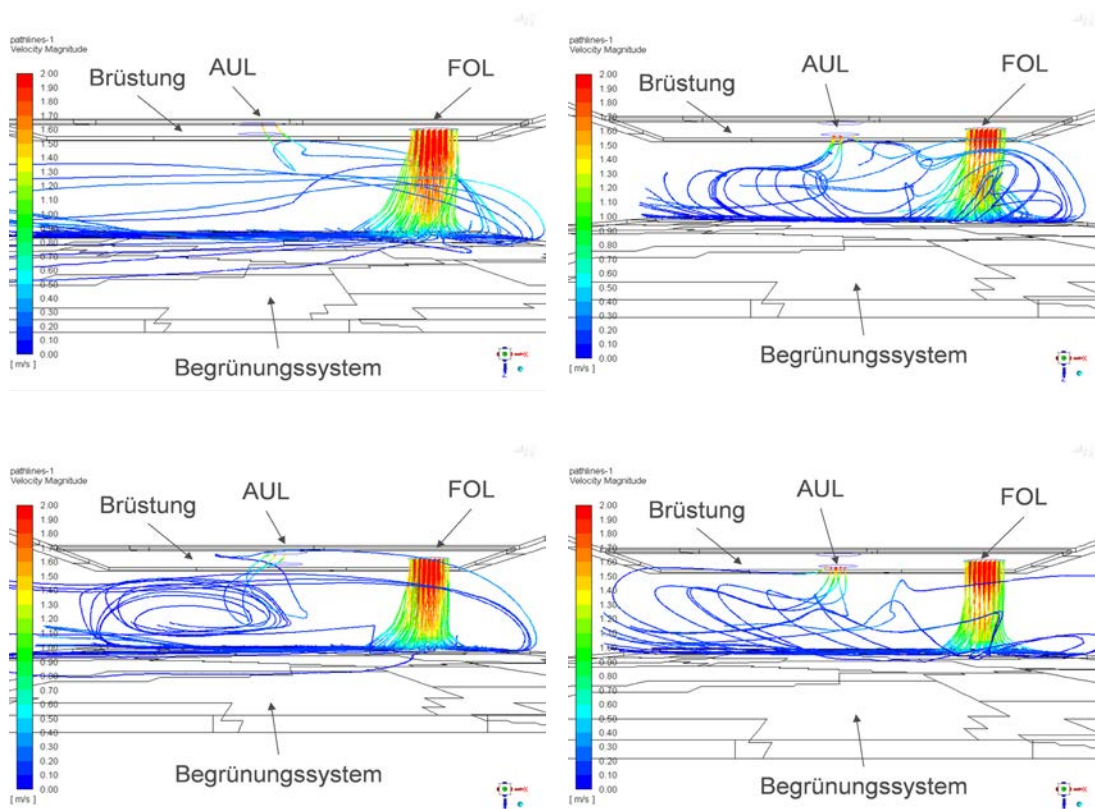
Eingehende Darstellung
Lösungsstrategien

Abb. 23 – 31 Grenzschichttemperaturen für die untersuchten Systeme im Ansaugbereich (AUL) des Wetterschutzgitters der dezentralen Fassadenlüftung. Weiterhin sind die Oberflächentemperaturen der Brüstung im Bereich der Außenluftansaugung zu erkennen (alle THN-ieg) Ansaugtemperaturen

- Abb. 23 Referenzfall (oben links)
- Abb. 24 Vertiko, Ansaugung oben (oben mitte)
- Abb. 25 Vertiko, Ansaugung unten (oben rechts)
- Abb. 26 VGD, Ansaugung oben (mitte links)
- Abb. 27 VGD, Ansaugung unten (mitte mitte)
- Abb. 28 Kramer, Ansaugung oben (mitte rechts)
- Abb. 29 Kramer, Ansaugung unten (unten links)
- Abb. 30 Jakob, Ansaugung oben (unten mitte)
- Abb. 31 Jakob, Ansaugung unten (unten rechts)

	Referenzfall	Vertiko	VGD	Kramer	Jakob
$X_{grenz} [-]$	0,96	0,70	0,72	0,75	0,80

Tab. 3 Faktor zur Bestimmung der Ansaugtemperatur (THN-ieg)



Eingehende Darstellung
Lösungsstrategien

Abb. 32 – 35 Draufsicht des Spalts zwischen Fassade und den wandgebundenen Begrünungssystemen Vertiko und Verticalgreendesign (VGD) mit der Außenluftansaugung (AUL) und Fortluftausbringung (FOL). Es sind die Strömungslinien der Luftpartikel, eingefärbt nach ihrer Geschwindigkeit, ausgehend von der Fortluftausbringung für beide Systeme jeweils für die Ansaugung im oberen und unteren Brüstungsbereich, dargestellt. Als Strömungslinien werden Strömungswege bezeichnet, die die Fluidteilchen beim Strömen nehmen.

- Abb. 32 Vertiko, Ansaugung oben (THN-ieg) (oben links)
- Abb. 33 Vertiko, Ansaugung unten (THN-ieg) (oben rechts)
- Abb. 34 VGD, Ansaugung oben (THN-ieg) (unten links)
- Abb. 35 VGD, Ansaugung unten (THN-ieg) (oben rechts)

bei den wandgebundenen Systemen erfasst werden. Dabei werden verschiedene Ansaugorte, im oberen bzw. unteren Brüstungsbereich untersucht.

3D-Simulationsmodell

Bei den in den 3D-Simulationsmodellen untersuchten Referenzfall und vier Begrünungssystemen (vgl. Kapitel 1.2.4) werden geometrische Vereinfachungen bezüglich der Abbildung des Blattwerks zur besseren Vernetzbarkeit des Berechnungsgitters getroffen. Dies betrifft vor allem das Mischsystem Kramer sowie das bodengebundene System Jakob. (Abb. 21+22)

Die Systeme Vertiko und Verticalgreendesign (VGD) unterscheiden sich nur hinsichtlich des Aufbaus ihrer Rückwand und damit ihrer Wärmeleitfähigkeit (Vertiko: Aluminium-Verbundplatte mit Vlies – 29 mm entspricht 3,1 W/m²K/ Verticalgreendesign (VGD): Aluminiumplatte mit Vlies – 2 mm entspricht 5,0 W/m²K). (Abb. 20)

Grenzschichttemperaturen im Ansaugbereich

Neben den ermittelten Temperaturen im Ansaugbereich für den Referenzfall sowie für die einzelnen Begrünungssysteme werden auch die entsprechenden Brüstungsoberflächentemperaturen und die Lufttemperaturen im Spalt zwischen Begrünungssystem und Fassade bzw. die Außenlufttemperatur für den Referenzfall erfasst. Unterschieden wird eine Ansaugung im oberen und unteren Abschnitt der Brüstung. Es resultieren mittlere Ansaugtemperaturen der untersuchten Begrünungssysteme in einem Bereich von 25,6 °C (Vertiko – Ansaugung unten) bis 29,2 °C (Jakob – Ansaugung oben). Die Ansaugtemperatur für den Referenzfall ergibt sich im Mittel zu 33,0 °C. (Tab. A4 im Appendix)

Die Ergebnisse (Abb. 23–31) zeigen, dass die Brüstungsoberflächentemperatur nur auf den äußeren Rand der Ansaugung einen direkten Einfluss hat. Im Referenzfall ist hierbei



Abb. 36 Freifläche Technikum, Vogelperspektive Süd, 2020 (<https://www.google.de/maps> bearbeitet von THN-AR)

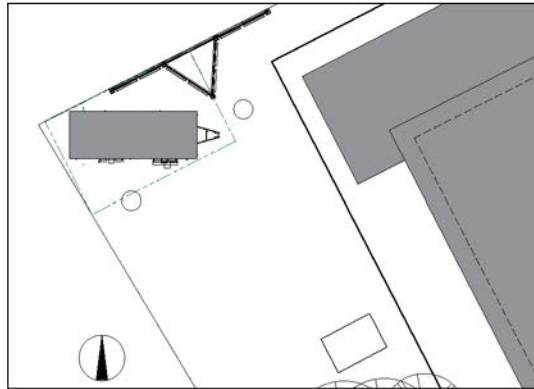


Abb. 37 Lageplan 1: 500 (THN-AR)

Eingehende Darstellung
Lösungsstrategien

der Einfluss auf die Ansaugtemperatur am geringsten (Abb. 23) und für das System Vertiko, gefolgt von den Systemen Verticalgreendesign (VGD), Kramer und für das bodengebundene System Jakob am größten. (Abb. 24+31)

Je luftdurchlässiger das jeweilige System (Kramer, Jakob), desto kleiner ist der Einfluss der Brüstungsoberflächentemperatur auf die Ansaugtemperatur. Auch der Ansaugquerschnitt der Außenluftansaugung spielt hierbei eine Rolle, je größer dieser bei relativ hohen Ansauggeschwindigkeiten ist, desto geringer ist der Einfluss der Oberflächentemperatur. Hingegen führt eine Ansaugung über einen Spalt (kleiner Querschnitt) bei gleichzeitig relativ geringen Luftgeschwindigkeiten zu einem stärkeren Einfluss der Brüstungsoberflächentemperatur. Die am Fassadenversuchsstand in Rednitzhembach verbauten handelsüblichen Wetterschutzgitter haben folglich, mit ihren relativ hohen Luftgeschwindigkeiten im Ansaugbereich, einen geringen Einfluss der Brüstungsoberflächentemperatur.

Daraus lassen sich nun zur Bestimmung der Ansaugtemperaturen die Gewichtungsfaktoren X_{grenz} der Lufttemperatur im Spalt (bzw. Lufttemperatur im Referenzfall) und der Brüstungsoberflächentemperaturen ableiten. Diese Gewichtungsfaktoren werden wiederum für die Jahressimulationsberechnungen in der thermisch-energetischen Gebäudesimulation zur Bestimmung der Ansaugtemperaturen benötigt. Je näher sich dieser Wert bei 1 befindet, desto geringer ist der Einfluss der Brüstungsoberflächentemperatur. (Tab. 3)

Strömungsverhalten in der Fassadengrenzschicht im Ansaugbereich

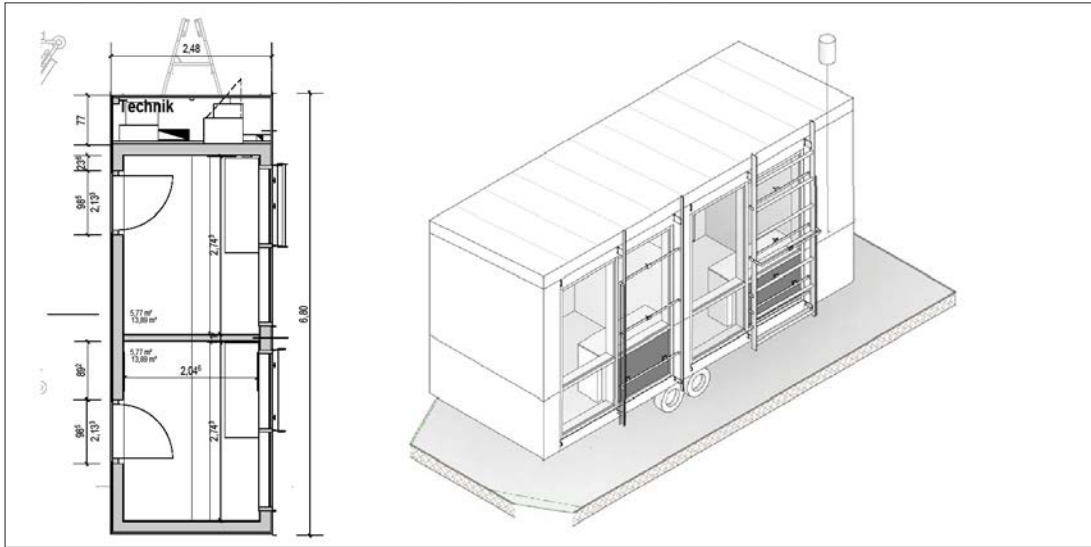
Beim Strömungsverhalten ist erkennbar, dass es bei den beiden Begrünungssystemen Vertiko und Verticalgreendesign (VGD) bereits in der niedrigsten Ventilatorstufe (Luftvolumenstrom: $60 \text{ m}^3/\text{h}$) zu Fehlströmungen, d. h. Kurzschlüssen zwischen der Außenluftansaugung und der Fortluftausbringung kommen kann. Diese Kurzschlüsse können zu einer Verschlechterung der Außenluftversorgung in den angeschlossenen Räumen bei wandgebundenen Systemen führen. (Abb. 32–35) Durch den Einsatz von Abström- bzw. Lenkblechen können derartige Kurzschlüsse unterbunden werden. (Abb. 77)

1.2 Realisierung Fassadenversuchsstand THN

Der Fassadenversuchsstand in Rednitzhembach war als Holzrahmenbau geplant, mit einer Bekleidung der opaken Teile der vorgehängten hinterlüfteten Fassade aus Faserzementplatten, und sollte baukonstruktiv die Anforderungen der aktuell gültigen Energieeinsparverordnung (EnEV) erfüllen. Hinsichtlich der Gründung musste eine mögliche Rückbaubarkeit berücksichtigt werden. Zwei Messräume (Referenz- und Testraum, $17,28 \text{ m}^2$, lichte Raumhöhe $2,70 \text{ m}$) sollten auf der nach Süden ausgerichteten Seite Öffnungsflächen als Pfosten-Riegel-Fassade erhalten; thermisch getrennt galt es einen Technikbereich von mindestens $1,50 \text{ m}^2$ einzuplanen. Für die Aufnahme der Fassadenbegrünungssysteme war vor dem Testraum eine Unterkonstruktion vorzusehen, die eine Last von insgesamt ca. 300 kg an vier Punkten aufnehmen kann.

1.2.1 Konzeption und Aufbau

Der Standort des Versuchstandes ist eine Freifläche auf dem Gelände des Technikums Rednitzhembach²² (Abb. 36+37). Verschattungsstudien zeigen die Eignung des Grundstück



Eingehende Darstellung
Lösungsstrategien

Abb. 38 Fassadenversuchsstand – Grundriss und Isometrie (THN-AR)

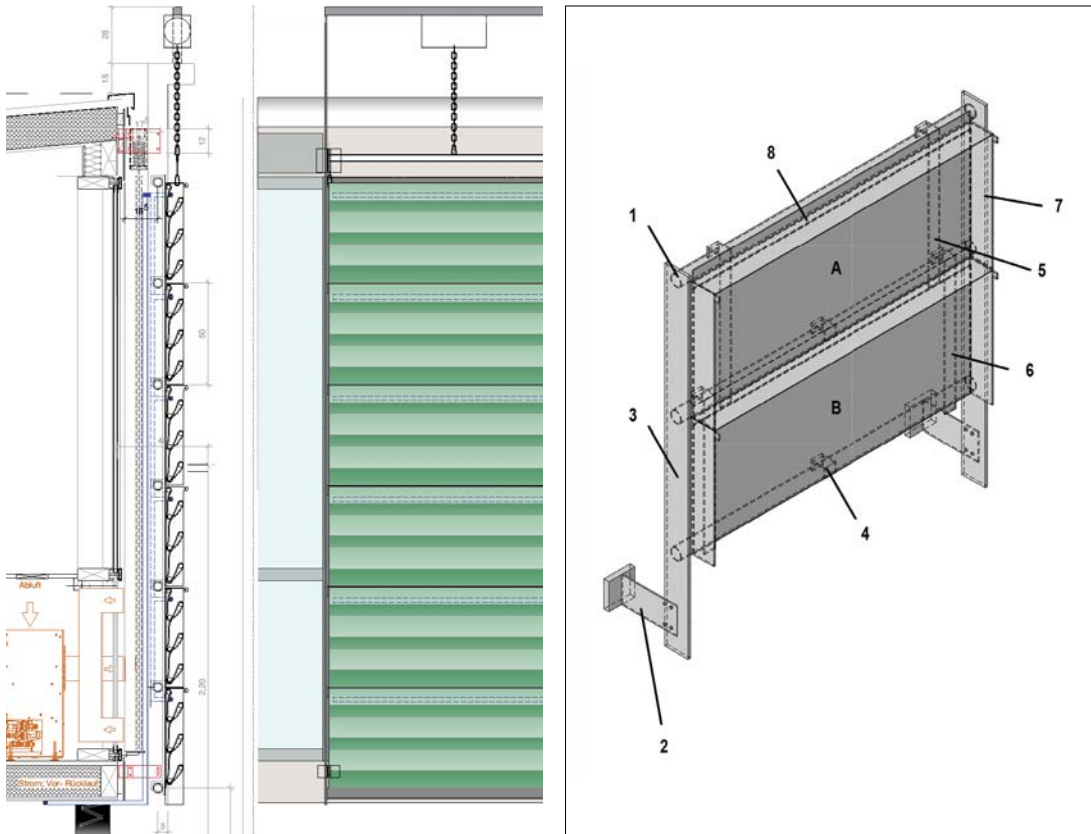


Abb. 39 Fassadenversuchsstand – Fassadenaufbau (THN-AR)

Abb. 40 Gerüstkonstruktion (THN-AR)

- 1) Rundrohr d = 48,3 mm
- 2) Fassadenschwert
- 3) Flachstahl
- 4) mittlerer Haken
- 5) Hakenposition A
- 6) Hakenposition B
- 7,8) umlaufendes Stahlblech 3 mm



Eingehende Darstellung
Lösungsstrategien

Abb. 41 Rednitzhembach, Technikum/ Fassadenversuchsstand – Referenzbüro mit Dezentraler Fassadenlüftung (DFL) (links) und Aufbau mit Fassadenbegrünung „Variante 2“ (Verticalgreendesign (VGD)) und DFL (rechts, 05/2020) (THN-AR)

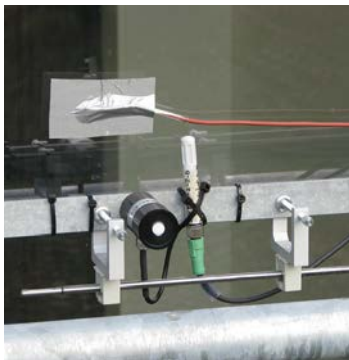


Abb. 42 Oberflächentemperatur, Hygrothermogeber, Pyranometer Luftgeschwindigkeit (THN-AR)

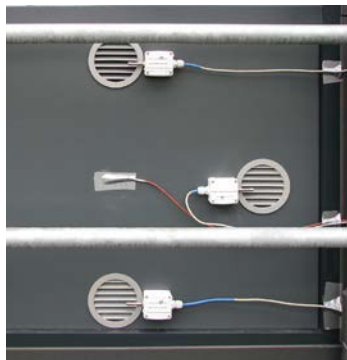


Abb. 43 Lufttemperatur, Oberflächentemperatur (THN-AR)



Abb. 44 Kühllastsimulator (THN-AR)

zur Durchführung der Experimentellen Studien I. Lediglich gegen Ende der Messperiode (31. Oktober), in der Zeit zwischen Sonnenaufgang und 12:00 Uhr, kommt es zur Verschattung des Grundstücks durch bestehende Bäume im Osten.

Aufgrund der örtlichen Gegebenheiten mussten die Abmessungen des Versuchstandes verkleinert werden. Gegenüber den ursprünglichen Testboxen (5,40 x 4,20 x 3,35 m [L x B x H]) basiert der gewählte Aufbau auf einem mobilen Modulhaus/„Tiny House“ (6,80 x 2,48 x 4,00 m [L x B x H]) der Fa. Schreinerei Knörle aus Rheinau, mit zwei identischen (Büro-)Räumen (2,74 x 1,94 x 2,83 m [L x B x H]) (Abb. 38–41):

- Referenzfall mit DFL
- Aufbau mit Fassadenbegrünung und DFL

Der Wärmedurchgangskoeffizient der Bauelemente (Wände, Decken, Fassade) wurde entsprechend der EnEV 2016 ausgelegt. Die Pfosten-Riegel-Konstruktion der Öffnungsbereiche orientiert sich an der Fassade der Zwillingräume des VERU-Versuchsstands (Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP) in Holzkirchen. Deren Abmessungen betragen 2,48 m Breite und 2,98 m Höhe. Die Fassade ist in vier Teile geteilt. Sie besteht aus zwei Festverglasungen, einem opaken Element, in Form eines Sandwichpaneels, im rechten unteren Bereich, sowie einem Fenster im linken oberen Bereich.

Die Dimensionierung der Stahlunterkonstruktion ist konstruktiv gewählt. Hierbei spielen ästhetische Gesichtspunkte eine wichtige Rolle. Die Module werden durch den vertikalen Bandstahl optisch von der übrigen Konstruktion getrennt. Die bewusst eingesetzten Schat-

tenfugen zwischen den Modulen sowie dem Bandstahl unterstützen diesen Effekt und sorgen zusätzlich für eine leichteres Erscheinungsbild. Außerdem können über den Fugengebiet auch die notwendigen Toleranzen aufgenommen werden.

Eingehende Darstellung

Der äußere Rahmen aus Flachstahl misst 100 x 10 mm. Die runden Querstreben sind 48 mm stark und in einem Achsabstand von aufgereiht 50 cm. Es können bis zu 6 Module gleichzeitig eingehängt werden.

Lösungsstrategien

1.2.2 Konzeption und Integration der Messtechnik

Um die Potentiale der Reduzierung des Kühlenergiebedarfs fassadenintegrierter dezentraler Gebäudetechnik bestimmen zu können, war es erforderlich, am Fassadenversuchsstand verschiedenste Meßtechnik grundlegend zu installieren.

Die Witterungsbedingungen werden durch eine Wetterstation erfasst (Abb. A7 im Appendix) Um den Einfluss der Fassadenbegrünung auf das Mikroklima zu verifizieren, sind im Außenbereich sowie Innenraum des Fassadenversuchsstands in Rednitzhembach zahlreiche Messstellen installiert. (Tab. A5 im Appendix).

Fassade im Außenbereich:

- solare Einstrahlung
- Temperaturfühler, Luftgeschwindigkeit, Pyranometer (Abb. A10 im Appendix)
- Luftfeuchte, Oberflächentemperaturfühler (Abb. 43)

Innenbereich der Versuchsräume:

- Temperatur und Luftfeuchte
- Globethermometer (Strahlungsfühler) (Abb. A14 im Appendix)

Hierbei werden die Sensoren zur Messung der Lufttemperaturen bei Bedarf mit einem Strahlungsschutz versehen.

Ebenso werden über die Modbus-Schnittstelle die Ausgabewerte der dezentralen Fassadenlüftung der Firma Trox, wie beispielsweise Zuluft-, Ansaug- und Raumlufttemperatur sowie die Luftvolumenströme aufgezeichnet (Tab. A7 und Abb. A13 im Appendix).

Weiterhin werden für beide Musterräume die raumseitigen (luftseitigen) und wasserseitigen Kühlleistungen (Abb. A15 im Appendix) und damit der Kühlenergiebedarf der dezentralen Fassadenlüftung erfasst, um Rückschlüsse auf das Kühlpotential zu schließen. Die Gleichungen A1 und A2 zur Bestimmung der raum- und luftseitigen Kühlleistungen befinden sich im Appendix. Die raumseitige Kühlenergie entspricht hierbei der Energiemenge, die dem Raum über die Zuluft zugeführt wird. Dabei kann diese auch einen passiven Anteil enthalten, welcher bei Ansaugtemperaturen unterhalb der Raumtemperatur gegeben ist. Die wasserseitige Kühlenergie beschreibt die dem Kühlregister auf der Wasserseite zugeführte Leistung.

Die analogen Daten aus den Sensoren werden innerhalb der Messumformer zu digitalen Signalen umgewandelt. Zusammengeführt im Schaltschrank übernimmt der Industriecomputer Beckhoff CX5140-0155²³ die Weiterverarbeitung. Nach einer Mittelwertbildung über 5 Minuten werden die Messwerte tageweise in einer EXCEL Datei abgespeichert. Alle Steuerprogramme mit Ausnahme der Verknüpfungssteuerungen für die Raffstores wurden in ST (Strukturierter Text) nach IEC61131²⁴ geschrieben.

Für die Verknüpfungssteuerungen der Raffstores werden FBS (Funktionsbausteinsprache), nach IEC61131 verwendet. Das Steuerprogramm besteht aus drei periodischen Tasks mit Unterprogrammen, die teilweise als Routines und teilweise als FBS implementiert sind.

Das automatisierte Öffnungs- und Schließverhalten (Abb. A17 im Appendix) der Raffstores basiert auf der Observierung von zwei Steuerungsgrößen, solare Einstrahlung auf die Fassade Pyranometer und Windgeschwindigkeit Wetterstation.

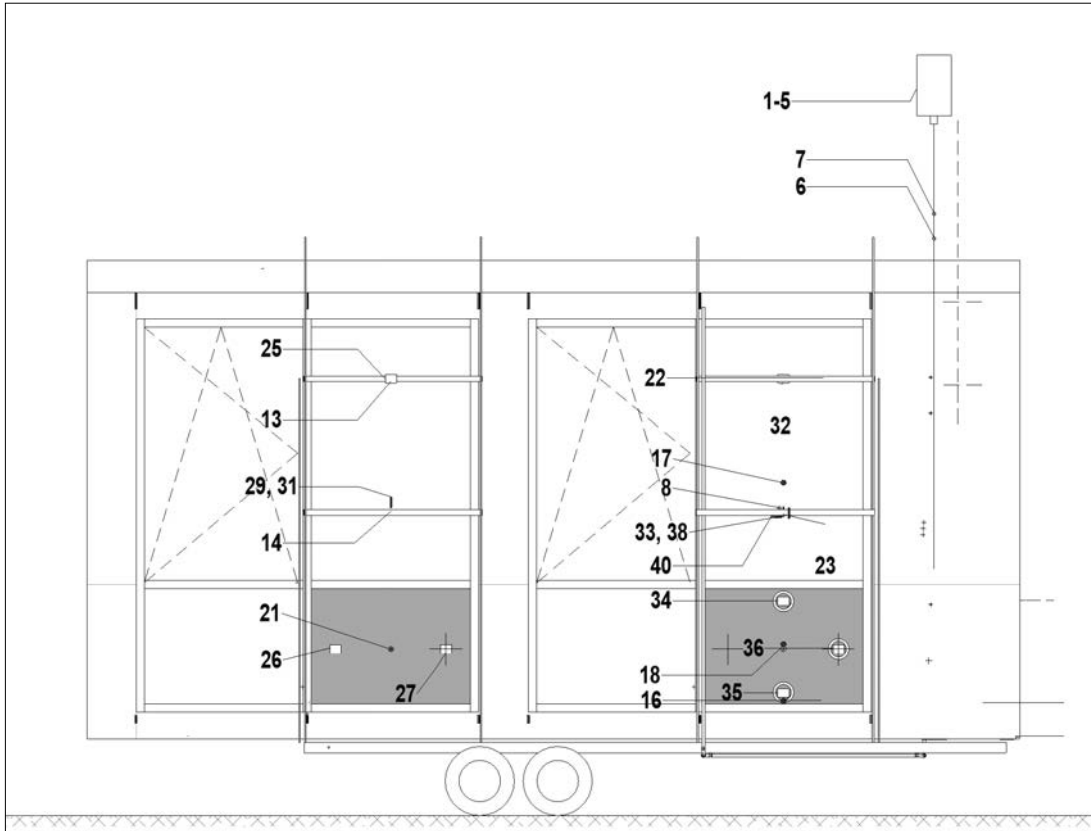
Der Kühllastsimulator (Abb. 44) prägt beiden Musterräumen eine interne Wärmelast auf. Diese wird mit einer 100 W Glühbirne erzeugt, die Wärmeabgabe erfolgt hierbei zu 50 % konvektiv und zu 50 % über Strahlung und wird über eine Zeitschaltuhr gesteuert.

1.2.3 Nullversuch

Zu Beginn der Messreihen erfolgte im Mai 2020 eine erste Messung (0-Messung) am Fassadenversuchsstand in Rednitzhembach. Mit dieser 0-Messung wurde der fehlerfreie Betrieb der Messtechnik und der dezentralen Fassadenlüftung, insbesondere deren Regelung und Steuerung nachgewiesen. Weiterhin sollten etwaige Unterschiede im thermischen und energetischen Verhalten der beiden Versuchsräume zueinander beurteilt werden. Hierbei ist der bewegliche außenliegende Sonnenschutz für beide Musterräume deaktiviert und es werden keine Begrünungssysteme vor der Fassade vorgesehen.

²³ Windows 10 basierender PC

²⁴ Objektorientierte Programmierung für Speicherprogrammierbarer Steuerungen



Eingehende Darstellung
Lösungsstrategien

Abb. 45 Fassadenversuchsstand – Lage Sensoren Referenzfall/ begrünt Ansicht (THN-AR)
(Legende vgl. Tab. A5 und A6 im Appendix)

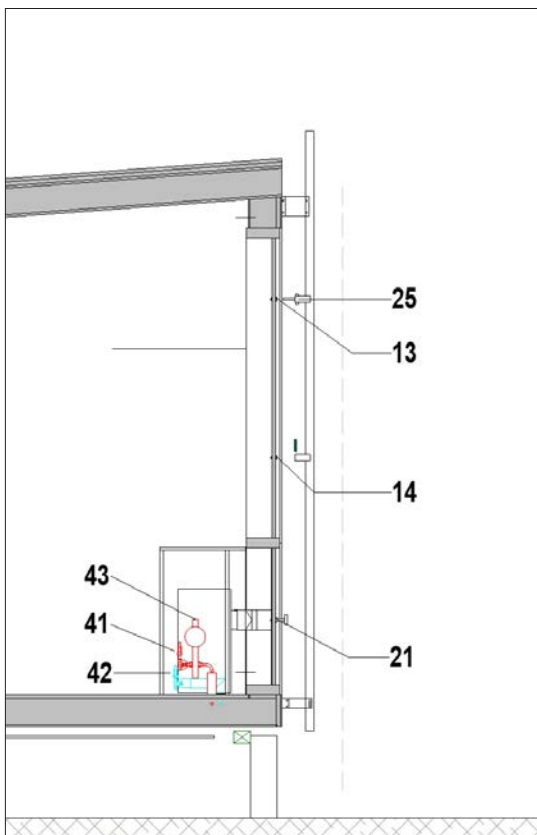


Abb. 46 Fassadenversuchsstand – Lage Sensoren Referenzfall. Vertikalschnitt (o. M.) (THN-AR) (Legende vgl. Tab. A5 und A6 im Appendix)

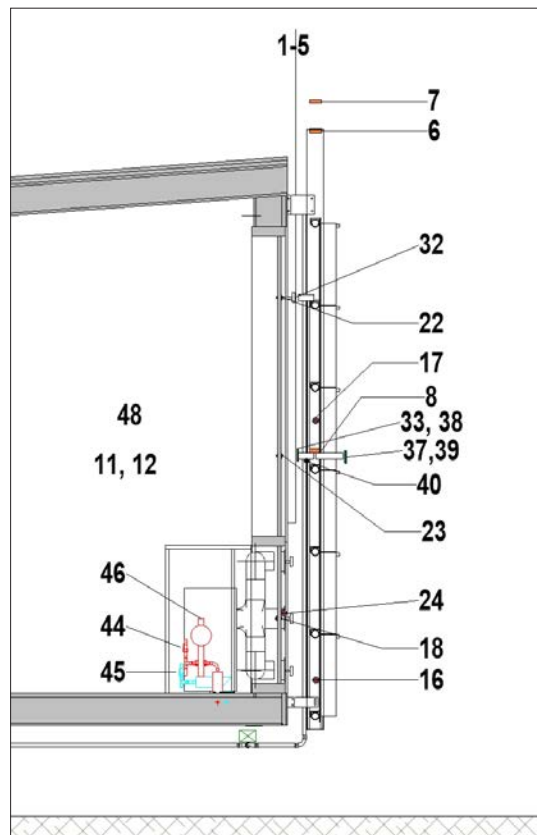


Abb. 47 Fassadenversuchsstand – Lage Sensoren begrünt. Vertikalschnitt (o. M.) (THN-AR) (Legende vgl. Tab. A5 und A6 im Appendix)



Eingehende Darstellung
 Lösungsstrategien

Abb. 48 Rednitzhembach, Technikum/ Fassadenversuchsstand, Technikraum – Bewässerungsanlage rechts (THN-AR)

Die Messung ergab, dass die Messtechnik ohne Einschränkungen fehlerfrei funktioniert. Die Regelparameter für das Schließ- und Öffnungsverhalten der Heiz- und Kühlventile der dezentralen Fassadenlüftung mussten jedoch angepasst werden. Da die Ventile aufgrund der fehlenden Speichermasse des Fassadenversuchsstands sowie der hohen und schnell wirkenden solaren Wärmelasten zu träge reagierten. Hierzu wurden die entsprechenden Parameter in der Hersteller-Software neu konfiguriert. Es zeigten sich bei den Messungen geringfügige Unterschiede zwischen den beiden Musterräumen. Trotz guter Dämmung der Trennwand bewirkt der am begrünten Raum angeschlossene Technikraum durch die Abwärme des Kryostats und des Messtechnik-Schaltschranks einen annähernd konstanten Wärmeeintrag. Wohingegen der Referenzraum über die Außenwand mit gleicher Dämmung einen variablen Wärmeeintrag durch die Außenlufttemperatur und die solare Einstrahlung auf die Fassade aufweist.

An Tagen mit geringer solarer Einstrahlung zeigt sich, dass der begrünte Raum um durchschnittlich +0,4 K wärmer als der Referenzraum ist. An Tagen mit hoher solarer Einstrahlung ist zunächst morgens der begrünte Raum wärmer, im Laufe des Tages verringert sich dieser Unterschied bis die Raumtemperatur im begrünten Raum der Raumtemperatur im Referenzraum entspricht. Über den gesamten Tag gesehen gleichen sich beide Effekte wieder aus.

Als weitere Einflussgrößen auf die Raumtemperaturen und das Verhalten der dezentralen Fassadenlüftung wird die unterschiedliche Lage der Raumbediengeräte, der Befestigungssysteme sowohl für die Messtechnik als auch für die Begrünungssysteme identifiziert. Die Auswirkungen dieser Parameter sind jedoch vernachlässigbar und haben einen geringen Einfluss auf die Ergebnisse.

Die in den Messreihen berücksichtigten wesentlichen Parameter und Einstellungen der dezentralen Fassadenlüftung wurden mit Hilfe der Einzelraumregelungssoftware FSL-CONTROL II²⁵ für dezentrale Lüftungsgeräte parametrisiert. (Tab. A8 im Appendix) Da ein aktives Beheizen der Räume mit Hilfe der dezentralen Fassadenlüftung nicht möglich ist, wird der Raumtemperatursollwert für den Heizfall möglichst gering gewählt, in diesem Fall beträgt dieser 10 °C.

1.2.4 Konzeption Bepflanzung und Bewässerung

Aus wirtschaftlichen Aspekten sowie räumlichen Beschränkungen beim Fassadenversuchsstand ist zur Bewässerung aller Begrünungssysteme nur die Technik der Firma Vertiko ausgeführt. Über ein Steuersystem der Firma Hunter können drei Bewässerungskreise durch Magnetventile separat geöffnet werden. Die gesamte Technik zur Steuerung der Bewässerung wird in einem witterungsgeschützten Schaltschrank untergebracht. Eine Fernüberwachung erfolgt über Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); so können die Beregnungszeiten im Bedarfsfall angepasst und Störungen frühzeitig erkannt werden.

Der Vorlaufbehälter hat ein Fassungsvermögen von ca. 80 l. Während der Übergangszeit (Frühjahr und Herbst) wurden die Bewässerungszyklen um einen Zyklus pro Tag verringert. Pflanzenschäden durch Überwässerung sind selten, da überschüssiges Wasser abtropfen



Abb. 49 Fassadenversuchsstand – Variante 1: Vertiko GmbH, Buchenbach mit Pflanzplan (THN-AR)
 (Pflanzliste vgl. Tab. A10 im Appendix)

kann. Eine zu geringe Wassermenge führt hingegen schnell zu Ausfällen der Vegetation. Eine Wasseruhr ist der Bewässerungsanlage vorgeschaltet. Diese ermittelt den aufsummierten Wasserverbrauch aller angeschlossenen Systeme gerundet auf ganze Liter. Der Wasserverbrauch unterscheidet sich je nach Begrünungssystem. Daher wurden die Systeme einzeln angeschlossen und entsprechend der Vorgabe der Hersteller bewässert und die dabei verbrauchte Menge an Gießwasser aufgezeichnet (Tab. A9 im Appendix).

Im Gegensatz zur Baupraxis befindet sich die Bewässerungsanlage (Abb. 48) in einem nicht frostfreien Bereich; daher muss diese während der Wintermonate stillgelegt werden. Die Begrünungssysteme müssen somit während dieser Projektzeiten regelmäßig manuell bewässert werden. Um während der Übergangszeiten mit Frostgefahr dennoch bewässern zu können, ist eine Gießhilfe entwickelt worden, welche eine effiziente manuelle Bewässerung ermöglicht (Abb. A19 im Appendix).

Zielsetzung war zunächst ein einheitliches Pflanzprogramm für eine nach Süden ausgerichtete Fassadenfläche, mit dem Fokus auf maximaler Verdunstungsleistung. Allerdings gab es seitens der beteiligten Firmen keine Erfahrungen über Pflanzen, welche eine erhöhte Verdunstungsleistung aufweisen. Somit variieren, auch durch die Unterschiede in Unterkonstruktion, Bewässerungsart, Pflanzdichte und Substrataufbau, die jeweiligen Begrünungssysteme. Die primären Faktoren für die Auswahl der Pflanzen sind:

- Eignung für eine Ausrichtung nach Süden
- Erfüllung der Lebensbereichskriterien, wie klimatischen Anforderungen für den Raum Mittelfranken und Geselligkeit
- Positive Erfahrungen in Kombination mit dem jeweiligen Begrünungssystem

Es werden insgesamt vier verschiedene Fassadenbegrünungen (wand- und bodengebundene Begrünung, Misch-/Regalsystem) (Abb. 49-52), für die Projektarbeiten herangezogen.

Variante 1 – Vertiko GmbH, Buchenbach flächiges, wandgebundenes Begrünungssystem (Abb. 49)

Die Living Wall Outdoor (LWO) besteht aus einem „pflanzentragenden Geotextil an einer systemeigenen, hinterlüfteten, ganzflächigen und verrottungsfreien Trägerplatte mit Unterkonstruktion“²⁶. Durch Einschnitte in die obersten Textilschichten entstehen Taschen,



Eingehende Darstellung
 Lösungsstrategien

Abb. 52 Fassadenversuchsstand – Variante 4: Jakob Rope Systems, Ostfildern mit Pflanzplan (THN-AR) (Pflanzliste vgl. Tab. A13 im Appendix)

in welche Substrat eingefüllt wird und anschließend die Pflanzen wurzelnackt eingesetzt werden. Seitlich gesetzte Metallklammern fixieren die Pflanzen. „Wandgebundene Flächensysteme bieten Lösungen für teil- oder ganzflächige homogene Fassaden-Vollbegrünungen, wo ein Boden- bzw. Bodenwasseranschluss nicht verfügbar ist. Flächensysteme sind nicht partiell austauschbar. Die Bauweise ist auf allen Massivwänden anwendbar.“²⁷

Jeweils an der Oberkante der Module hinter dem Geotextil ist verdeckt ein perforiertes PE-Rohr verlegt. Die Anzahl und die Größe der Perforation zur Bewässerung beruht auf Erfahrungswerten und wird durch die Mitarbeiter vorgenommen. Durch einen relativ hohen Druck (> 3 bar) im Leitungssystem verteilt sich das Wasser gleichmäßig.

*Variante 2 – Verticalgreendesign (VGD) GmbH, Berlin
 modulares, wandgebundenes Begrünungssystem (Abb. 50)*

Ein Flachrahmen aus Aluminium bildet die Unterkonstruktion und die Systemgrenze zur Hinterlüftung. Dieser Rahmen wird mit einem Vlies belegt, welches zum einen der Wasserverteilung dient, zum anderen entstehen durch dessen Verlegeweise Rinnen, die den Wurzelraum für die Pflanzen bilden. So können diese samt Substrat eingesetzt werden. Analog zu flächigen wandgebundenen Systemen können modulare wandgebundene Systeme auf allen tragenden Außenwänden montiert werden. Durch die Teilung in kleinere Einheiten ergeben sich Vorteile in der Handhabung vor sowie nach der Montage. Allerdings führt dies auch zwangsläufig zu einer aufwendigeren Unterkonstruktion und erhöhten Planungsaufwand.

Entlang der Oberkante der Pflanzmodule ist zur Bewässerung auf ganzer Länge ein Perlschlauch im Textil eingelegt. Dieser besteht aus offenporigem Kunststoff. Je höher der Wasserdruck im System ist, desto mehr Wasser durchdringt dessen Oberfläche. Innerhalb des Moduls verteilt sich das Wasser durch Schwerkraft und die Kapillarität des Geotextils bis zu den Wurzelballen der Pflanzen.

*Variante 3 – Kramer Gartenbau, München
 Mischsystem, horizontale Wuchsebene (Abb. 51)*

Beim Regalsystem der Firma Kramer werden die Pflanzen in kleine Behältnisse mit integrierter Drainageschicht eingesetzt. Diese Töpfe besitzen rückseitig Haken, die das Einhängen an einem Gitterrost ermöglichen. „Regalsysteme sind vielfältig anwendbar, vor Wandflächen ebenso wie vor Verglasungen oder als Freiraum-Abschluss für eine erhöhte Privatheit

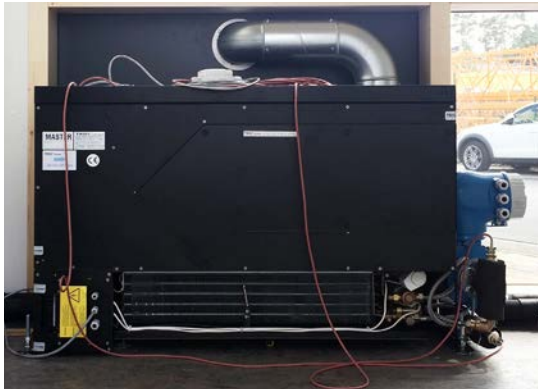


Abb. 53 Dezentrales Lüftungsgerät/ Raumseite (THN-AR)

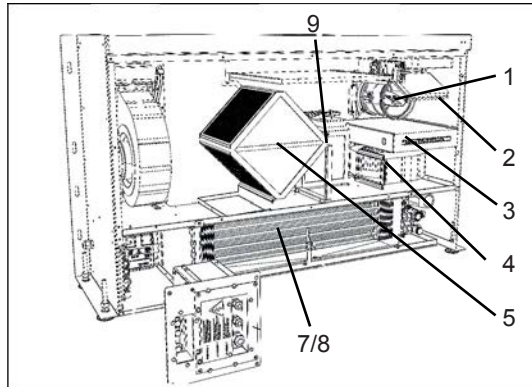


Abb. 54 Komponenten Technikbox (TROX bearbeitet THN-AR; Zahlen vgl. Abb. 55)

Eingehende Darstellung
 Lösungsstrategien

(Loggien, Dachterrassen).²⁸ Über ein 9 mm starkes PE-Rohr wird das Gießwasser linear im Modul verteilt. Oberhalb der einzelnen Töpfe sind selbsthaltende Emittter mit integriertem Druckausgleich eingebracht.

Variante 4 – Jakob GmbH, Ostfildern Bodengebundene Begrünung mit Kletterpflanzen (Abb. 52)

Die Unterkonstruktion für eine Begrünung mit Kletterpflanzen wird in Trog und Kletterhilfe unterschieden. Die Kletterhilfe besteht aus einer biegesteifen Rahmenkonstruktion, die das Seilspannsystem der Firma Jakob aufnimmt. Der Trog besteht aus verzinktem Stahlblech, auf dessen Innenseite eine Dämmschicht aufgebracht ist, welche die Wurzeln vor übermäßiger Belastung durch äußere thermische Einflüsse schützt. Darin sind drei Kletterpflanzen (*Aristolochia durior*) eingesetzt. Einsatzbereiche für Kletterpflanzen sind „alle üblichen Fassadenbauweisen einschließlich Glasflächen, energieaktiven Flächen und Gebäudefreiflächen wie Terrassen, Loggien und Balkone.“²⁹

Eine vollständige Deckung mit Kletterpflanzen innerhalb von einem Jahr zu erreichen stellt eine Herausforderung dar. Daher werden vorkultivierte Pflanzen angeboten; allerdings sind diese mit einer Höhe von 1 – 1,60 m noch relativ klein und weisen einen geringen Deckungsgrad auf.

Trotz eines milden Winters 2019/2020 trieben die Kletterpflanzen der Gattung *Ipomea* im nachfolgenden Frühjahr nicht wieder aus (Abb. Axx im Appendix). Ersatzpflanzen konnten bei einer lokalen Baumschule bestellt werden. Nach Rücksprache mit dem Bundesverband GebäudeGrün e. V. (BuGG) und der Fa. Vertiko erfolgte mit Verweis auf positive Erfahrungen in verschiedenen Forschungsprojekten die Nachpflanzung mit der Gattung *Aristolochia durior*.

In der Wachstumsperiode ab Frühjahr – Herbst 2020 konnten indessen nur geringe Flächenwirkung und wenig Höhenzuwachs festgestellt werden (<10 cm). Grund hierfür war vermutlich ein Pflanzschock, der auftreten kann, wenn die Pflanzen einem Standortwechsel unterzogen werden. Im Frühjahr 2021 musste daher mit vorkultivierten Pflanzen in einer Höhe von 2 – 2,5 m erneut neugepflanzt werden

1.2.5 Lüftungsgeräte

Das verwendete Lüftungsgerät (TROX FSL-B-ZAB_SEK) ist ein Produkt der Firma Trox. (Abb. 53-55) Es zeichnet sich durch eine kompakte Bauweise aus und ist für den Einsatz hinter opaken Brüstungselementen konzipiert.

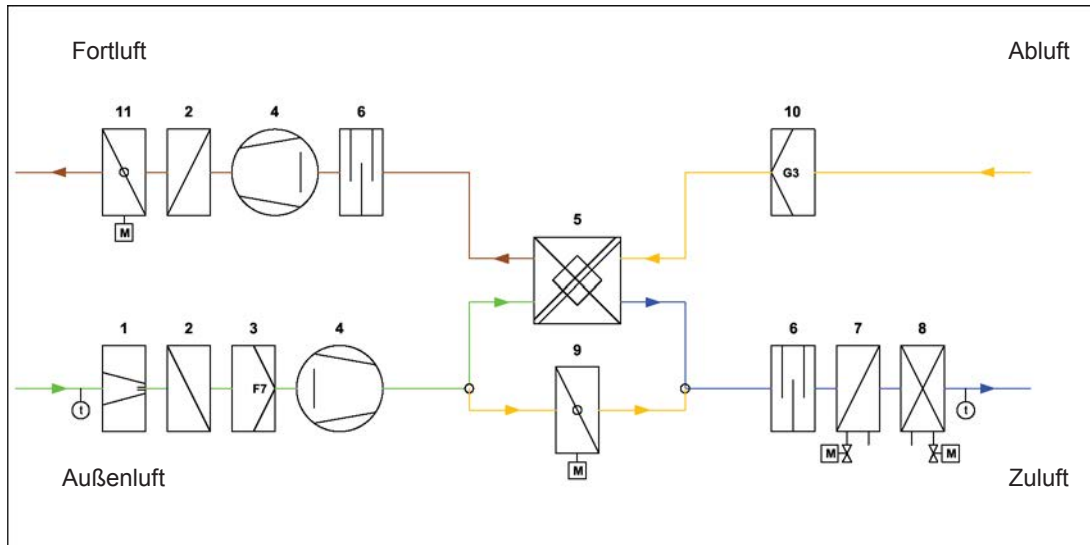
Bei einer Büronutzung ist nach DIN V 18599-10 für eine hohe Raumluftqualität ein notwendiger Außenvolumenstrom von 40 m³/h und Person für ein Einzel- oder Gruppenbüro bzw. 60 m³/h und Person für ein Großraumbüro erforderlich. Bei dem Gerät wird auf niedrigster Stufe ein Luftwechsel von 60 m³/h erreicht.

Nach Herstellerangaben ergibt sich eine Gesamtkühlleistung von 410 W unter folgenden Bedingungen:

- Wassermassenstrom: 200 l/h
- Vorlauftemperatur: 16 °C
- Rücklauftemperatur: 17,8 °C

²⁸ Pfoser et al., 2013, S. 46

²⁹ Pfoser et al., 2013, S. 44



Eingehende Darstellung
 Lösungsstrategien

Abb. 55 Dezentrales Lüftungsgerät/ Funktionsschemata (THN-ieg)

Aufbau und Funktion: Der Zuluftventilator (4) saugt im Primärluftbetrieb die Außenluft durch den Volumenstrombegrenzer (1), die Rückschlagklappe (2) und den Feinstaubfilter F7 (3) an, je nach Stellung der motorisierten Bypassklappe wird der Luftstrom (9) durch den rekuperativen Wärmerückgewinner (5) oder in energetisch sinnvollen oder durch den Geräteschutz bedingten Betriebsituationen durch den Bypass daran vorbei geleitet. Bei Bedarf wird die Luft im Wärmeüberträger gekühlt bzw. erhitzt. Danach strömt die Luft durch Schalldämpfer (6), Luftherhitzer (7) und Luftkühler (8) quellartig in den Innenraum.

- Raumkühlleistung von 240 W bei folgenden Bedingungen:
 - Luftvolumenstrom 120 m³/h,
 - Zulufttemperatur: 18 °C
 - Raumlufttemperatur: 24 °C (vgl. Tab A3 im Apendix)

Eine Volltemperierung der Räume allein über die Außenluftgeräte ist in der Regel nicht vorgesehen. Am Markt sind Sekundärluftgeräte zur schnelleren Konditionierung der Raumlufttemperatur verfügbar. Diese sind in ihren Abmessungen zumeist baugleich mit den entsprechenden Außenluftgeräte, gewährleisten aber eine schnellere Konditionierung, da anstelle der Frischluft die bereits vorgekühlte Raumluft aufgenommen wird.

Es bietet sich an beide Bauweisen miteinander zu kombinieren, da so nur die hygienisch notwendige Mindestaußenluftmenge dem Raum zugeführt wird.³⁰

Ein Raum des Fassadenversuchsstands in Rednitzhembach entspricht mit 5,61 m² (16,5 m³) den Nutzungsanforderungen für ein Einzelbüro. Die Betriebszeiten wurden im Hinblick auf die Messungen auf das Wochenende (Samstag, Sonntag) erweitert, da die an diesen Tagen gewonnenen Werte für Wochentage repräsentativ gewertet werden können.

2 Experimentelle Studien I (THN)

Eingehende Darstellung

2.1 Messungen am Fassadenversuchsstand THN

Experimentelle Studien II

Im Anschluss an die Null-Messung wurden die einzelnen Begrünungssysteme (Abb. 49–52) am Fassadenversuchsstand in Rednitzhembach wie folgt vermessen und ausgewertet. Hierbei wird für den begrünten Raum jeweils im oberen sowie unteren Brüstungsbereich Außenluft für die dezentrale Fassadenlüftung angesaugt: (Abb. 55)

- System der Firma Verticalgreendesign (VGD), Ansaugung im oberen Brüstungsbereich (Messzeitraum: 27.05.2020 bis 02.06.2020, Bezeichnung in Abbildungen: VGD-o)
- System der Firma Verticalgreendesign (VGD), Ansaugung im unteren Brüstungsbereich (Messzeitraum: 08.06.2020 bis 14.06.2020, Bezeichnung in Abbildungen: VGD-u)
- System der Firma Vertiko, Ansaugung im oberen Brüstungsbereich (Messzeitraum: 17.06.2020 bis 23.06.2020, Bezeichnung in Abbildungen: Vertiko-o)
- System der Firma Vertiko, Ansaugung im unteren Brüstungsbereich (Messzeitraum: 25.06.2020 bis 01.07.2020, Bezeichnung in Abbildungen: Vertiko-u)¹
- System der Firma Kramer, Ansaugung im oberen Brüstungsbereich (Messzeitraum: 03.07.2020 bis 09.07.2020, Bezeichnung in Abbildungen: Kramer-o)
- System der Firma Kramer, Ansaugung im unteren Brüstungsbereich (Messzeitraum: 14.07.2020 bis 20.07.2020, Bezeichnung in Abbildungen: Kramer-u)
- System der Firma Kramer, Ansaugung im oberen Brüstungsbereich mit angepasstem Referenzfall (Messzeitraum: 22.07.2020 bis 28.07.2020, Bezeichnung in Abbildungen: Kramer-v2-o)
- System der Firma Jakob, Ansaugung im oberen Brüstungsbereich (Messzeitraum: 29.06.2021 bis 05.07.2021, Bezeichnung in Abbildungen: Jakob-u)
- System der Firma Jakob, Ansaugung im unteren Brüstungsbereich (Messzeitraum: 07.07.2021 bis 13.07.2021, Bezeichnung in Abbildungen: Jakob-o)

Die wöchentliche solare Einstrahlung auf die Südfassade liefert Werte zwischen 12,7 kWh/(m² Woche) und 23,2 kWh/(m² Woche). Die wöchentlichen mittleren Außentemperatur für die jeweiligen vermessen Systeme bewegen sich in einem Bereich von 16,6 °C bis 22,3 °C. (Abb. 57)

Um die Leistungspotentiale der unterschiedlichen Systeme bewerten zu können, werden die Ansaugtemperaturen, die erforderlichen Kühlenergiemengen (wasserseitig, raumseitig) und Hilfsenergiemengen der dezentralen Fassadenlüftung bewertet. Weiterhin wird die thermische Behaglichkeit in Form von Überschreitungsstunden bzw. Übertemperaturgradstunden bezogen auf die empfundene Raumtemperatur während der Nutzungszeit näher betrachtet. Ebenso werden die sich einstellenden absoluten Raumlufffeuchten in den beiden Musterräumen begutachtet. Dies geschieht sowohl im Vergleich zum unbegrünten Referenzraum als auch im Vergleich der Begrünungssysteme untereinander.

Die raumseitige Kühlenergie entspricht hierbei der Energiemenge, die dem Raum über die Zuluft zugeführt wird. Dabei kann diese auch einen passiven Anteil enthalten, der bei Ansaugtemperaturen unterhalb der Raumsolltemperatur gegeben ist. Die wasserseitige Kühlenergie beschreibt die dem Kühlregister auf der Wasserseite zugeführte Leistung.

1 Witterungsbedingter Stromausfall während der Messreihe, keine Messergebnisse für den 28.06.2020 und 29.06.2020 vorhanden.

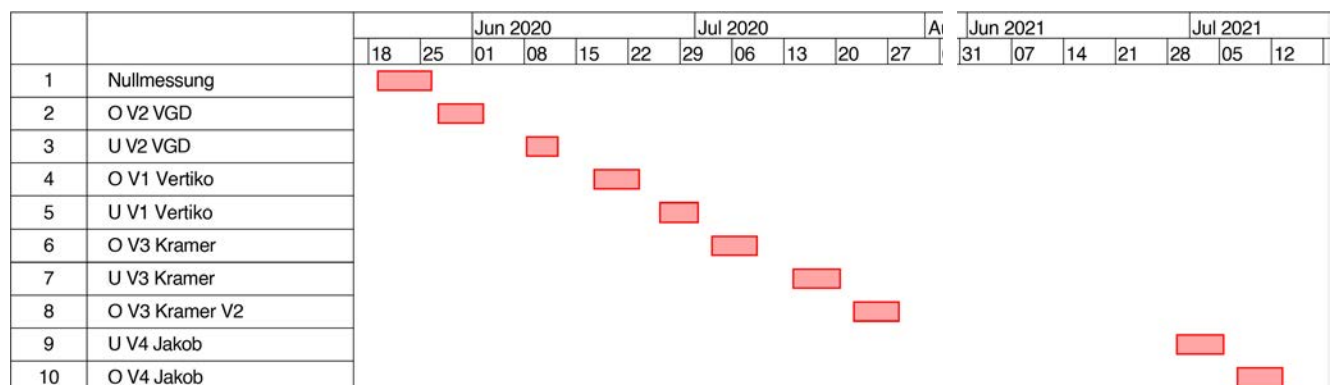
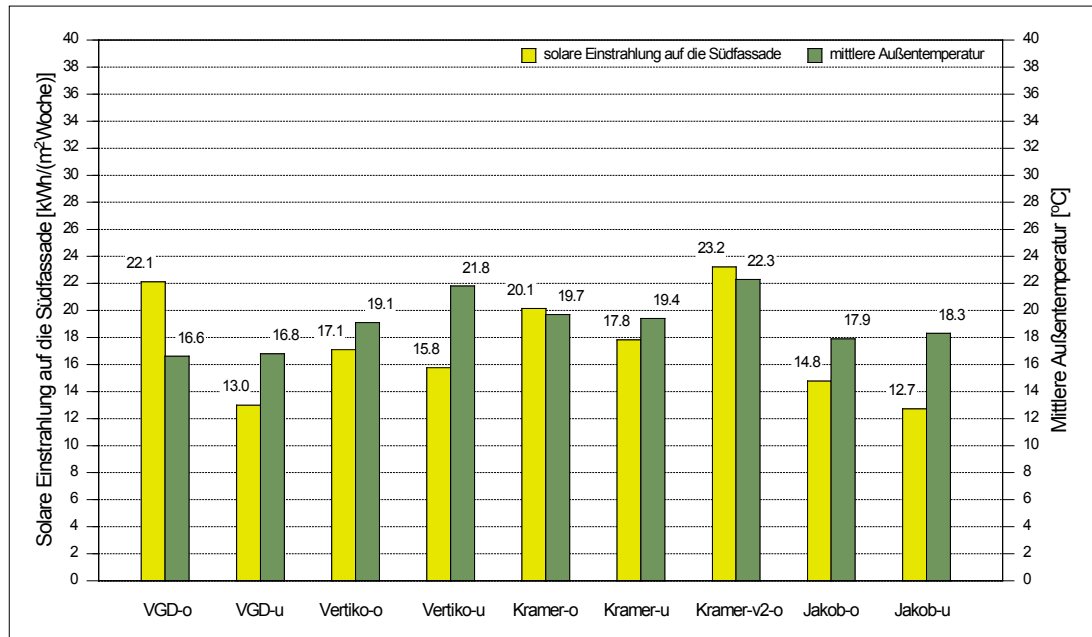


Abb. 56 Messzeiträume Mai bis Juli 2020 und Juli 2021 (THN-AR)



Eingehende Darstellung
Experimentelle Studien II

Abb. 57 Summe der solaren Einstrahlung auf die Südfassade und mittlere Außentemperatur während der einzelnen Messreihen – Ergebnisse Messung Fassadenversuchsstand (THN-ieg)

	VGD oben	VGD unten	Vertiko oben	Vertiko unten	Kramer oben	Kramer unten	Kramer oben/v2	Jakob oben	Jakob unten
Maximum [K]	+2,0	+2,4	+1,5	+2,1	+2,6	+3,8	+3,5	+1,2	+2,5
Mittelwert [K]	-0,2	-0,5	-0,3	±0	+0,5	+0,5	+0,9	-0,4	-0,2

Tab. 4 Differenz Ansaugtemperatur zwischen Referenzfall und Begrünungssystem – Ergebnisse der während der einzelnen Messreihen gemessenen Maximal- und Mittelwertdifferenzen am Fassadenversuchsstand Rednitzhembach (THN-ieg)

Um den Kühlenergieverbrauch der jeweiligen Systeme, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten bei verschiedenen klimatischen Bedingungen vermessen wurden, untereinander besser vergleichen zu können, werden die Daten einer Witterungsbereinigung (Außentemperatur, Kühlgradstunden) unterzogen. Hierzu wird während der jeweiligen Messreihe der Durchschnitt der wärmsten Tage, bei aktiver Kühlung der dezentralen Fassadenlüftungsgeräte, betrachtet.

Für die Vermessung des Systems der Firma Kramer (Kramer-o, Kramer-u) ist für den Referenzraum als Sonnenschutzsystem für das Fenster über dem opaken Brüstungsbereich ein beweglicher Raffstore vorgesehen (Abb. A27 im Appendix). Zur besseren Vergleichbarkeit mit den blickdichten wandgebundenen Systemen, wurde im Messzeitraum vom 22.07.2020 bis 28.07.2020 für den Referenzraum anstelle des Raffstores eine Abdeckung in Form einer HPL-Platte, wie bei den beiden wandgebundenen Systemen Vertiko und Verticalgreendesign (VGD), vorgesehen (Kramer-v2-o, Abb. A28 im Appendix).

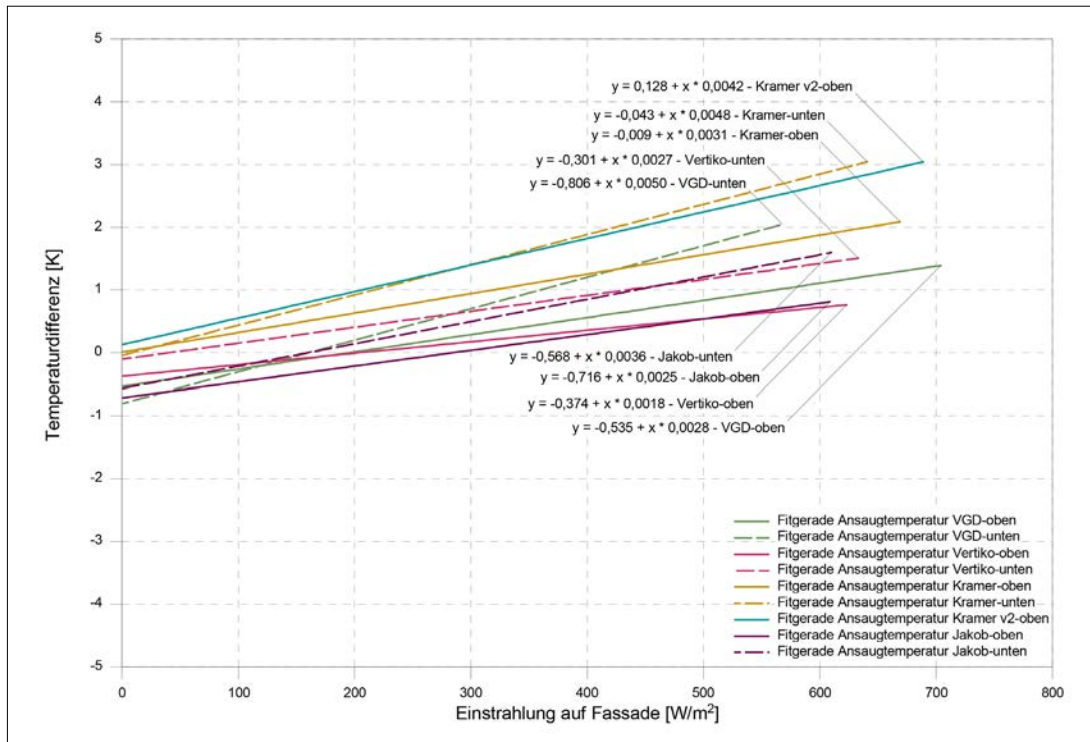
Zur besseren Vergleichbarkeit wird für das bodengebundene System der Firma Jakob sowohl vor dem Fenster oberhalb des opaken Brüstungsbereichs im Referenzraum als auch beim begrünten Fall eine HPL-Platte installiert.

Ansaugtemperaturen im Grenzschichtbereich der dezentralen Fassadenlüftung

Durch die Begrünungssysteme wird eine Absenkung der Ansaugtemperaturen gegenüber dem Referenzfall erreicht. (Tab. 4)

Weiterhin werden die Differenzen der Ansaugtemperaturen zwischen dem Referenzfall und den Begrünungssystemen in Abhängigkeit von der solaren Einstrahlung auf die Fassade bzw. in Abhängigkeit von der Außentemperatur in sich ergebenden Fünf-Minuten-Werte mittels Ausgleichsgeraden gebildet. (Abb. 58+59)

Positive Werte bedeuten hierbei eine Reduktion der Ansaugtemperatur für den begrünten Fall gegenüber dem unbegrünten Fall. Je positiver die Temperaturdifferenzen sind, desto geringer sind die Ansaugtemperaturen hinter dem Begrünungssystem gegenüber dem Re-



Eingehende Darstellung
Experimentelle Studien I

Abb. 58 Differenz der Ansaugtemperatur zwischen unbegrünt und begrünt in Abhängigkeit der solaren Einstrahlung auf die Fassade (Fitgerade) – Ergebnisse Messung Fassadenversuchsstand Rednitzhembach (THN-ieg)

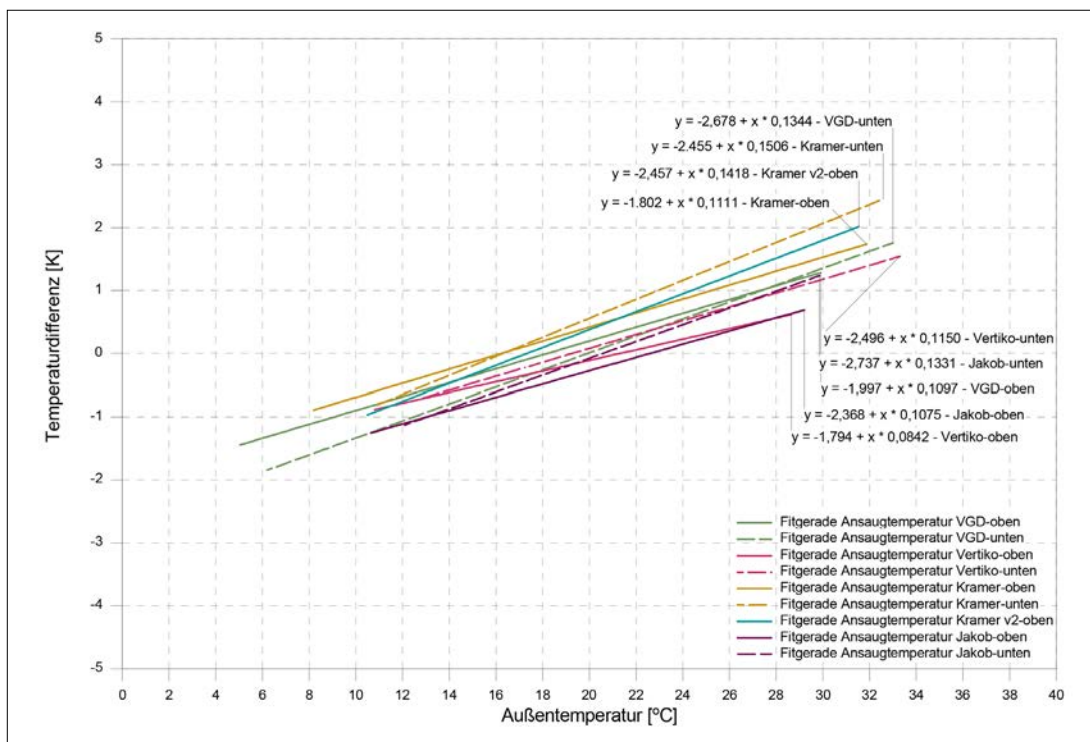


Abb. 59 Differenz der Ansaugtemperatur zwischen unbegrünt und begrünt in Abhängigkeit der Außentemperatur (Fitgerade) – Ergebnisse Messung Fassadenversuchsstand Rednitzhembach (THN-ieg)

	VGD oben	VGD unten	Vertiko oben	Vertiko unten	Kramer oben	Kramer unten	Kramer oben/v2	Jakob oben	Jakob unten
Wassermenge [l/d]	26,25	26,25	11,25	15,00	31,50	31,50	31,50	30,00	30,00

Eingehende Darstellung
 Experimentelle Studien I

Tab. 5 Bewässerungsmengen der einzelnen Begrünungssysteme (THN-ieg)

ferenzfall. Zunächst zeigt sich, dass durch sämtliche Begrünungssysteme ein Absenken der Ansaugtemperaturen gegenüber dem Referenzfall im Kühlfall erzielbar ist. Hierbei bewirkt eine Ansaugung im unteren Brüstungsbereich etwas niedrigere Ansaugtemperaturen und dementsprechend geringere Kühlenergieverbräuche gegenüber einer Ansaugung im oberen Brüstungsbereich.

Weiterhin ist feststellbar, dass die Ansaugtemperaturdifferenz sowohl von der solaren Einstrahlung als auch von der Außentemperatur abhängig ist. Je größer die solare Einstrahlung und die Außentemperaturen, desto größer ist der Kühleffekt der jeweiligen Begrünungssysteme. Bei geringer solaren Einstrahlung und geringen Außentemperaturen, z. B. morgens oder an kühlen Tagen, kann die angesaugte Luft hinter den Begrünungssystemen auch wärmer sein. Durch die unterschiedliche Verteilung der einzelnen Messwerte aufgrund der unterschiedlichen Abhängigkeiten (solare Einstrahlung, Außentemperatur) ergeben sich in beiden Fällen unterschiedliche Maximalwerte der Temperaturdifferenzen.

Die Ergebnisse (Tab. 4 sowie Abb. 58+59) zeigen, dass das System Kramer den besten Maximum-Wert (+3,8 K) aufweist. Auch die Systeme Verticalgreendesign (VGD) und Jakob (Ansaugung im unteren Brüstungsbereich) erreichen mit einer maximalen Ansaugtemperaturdifferenz von +2,5 K ein gutes Ergebnis. Hingegen ergeben die Systeme Vertiko (Ansaugung im oberen Brüstungsbereich) und Jakob (Ansaugung im oberen Brüstungsbereich) im Vergleich die geringste Reduzierung (+1,2 K bis +1,5 K) der Ansaugtemperaturen.

Die Ansaugtemperaturen sind auch von der Bewässerungsmenge abhängig. Ein wesentlicher Faktor zur Reduzierung der Ansaugtemperatur ist der Feuchtegehalt des Substrats bzw. des Erdreichs oder wie im Fall des Systems Vertiko des Geotextils. Diesem Umstand kommt eine besondere Bedeutung zu, da die Bewässerungsmenge der einzelnen Systeme teils stark variiert. (Tab. 5)

Energiebilanzen

Alle untersuchten Systeme weisen eine Reduzierung des wasserseitigen und raumseitigen Kühlenergieverbrauchs gegenüber dem Referenzfall auf (18,5 % bis 37,6 %; Abb. 60 und Tab. A14 im Appendix). So liefert das System Kramer das größte Einsparpotential (33,4 % bis 37,6 %). Durch eine Ansaugung im unteren Brüstungsbereich ergeben sich etwas geringere Kühlenergieverbrauchswerte und dementsprechend ein größeres Einsparpotential im Vergleich zur Ansaugung im oberen Brüstungsbereich. Für die relative Einsparung des Hilfsenergieverbrauchs ergeben sich Werte zwischen 0,7 % (VGD, Ansaugung oben und unten) und 5,1 % (Kramer v2, Ansaugung oben). (Abb. 61) Diese Werte zeigen eine starke Abhängigkeit von den äußeren Witterungsbedingungen. Je höher die durchschnittlichen Außentemperaturen, desto höher die Einsparung (Abb. 57).

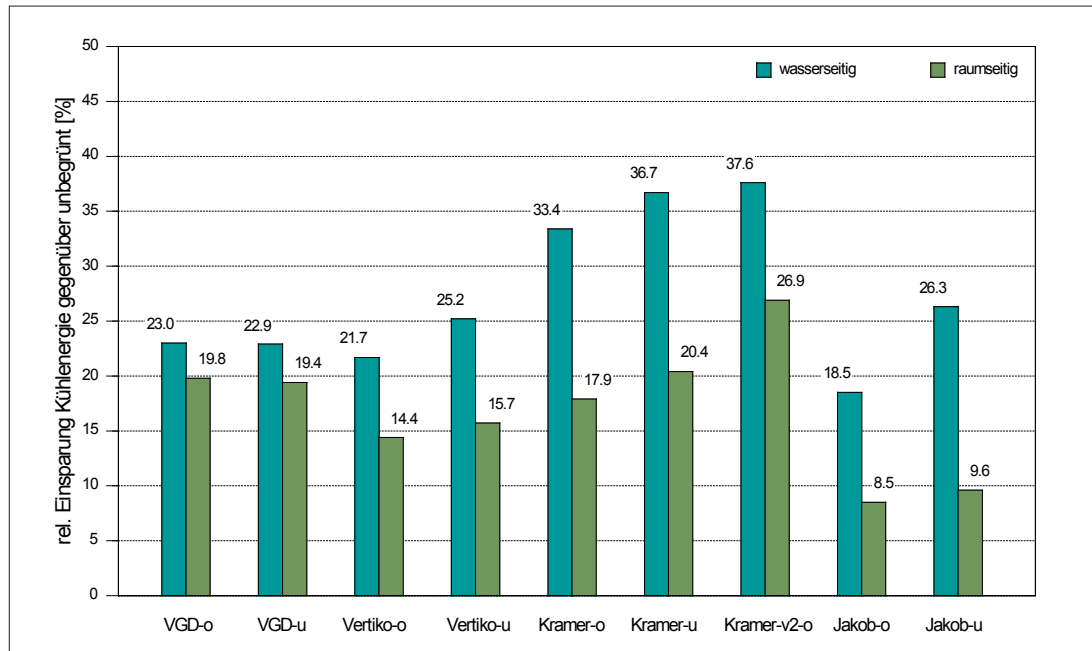
Die Ergebnisse zeigen eine Abhängigkeit von den klimatischen Bedingungen (Außenlufttemperaturen) während der jeweiligen Messreihen. Zur besseren Beurteilung und Vergleichbarkeit der einzelnen Systeme untereinander werden deshalb die wasserseitigen Kühlenergieverbräuche für den Durchschnitt der wärmsten Tage, an dem eine aktive Kühlung durch die dezentralen Fassadenlüftungsgeräte vorliegt, einer Witterungsbereinigung unterzogen.

Hierzu werden die Werte der einzelnen Tage unter Berücksichtigung der Kühlgradstunden und einem Sommer-Referenztag nach VDI 2078:1996-07, jeweils bezogen auf eine Außentemperatur von 24 °C, mit nachstehender Gleichung gewichtet (Abb. 60) und anschließend gemittelt:

$$Q_{c,w,ber} = \frac{Q_{c,w,unber}}{KGS} \cdot KGS_{Ref} \quad [4]$$

Dabei ist:

$Q_{c,w,ber}$	bereinigter wasserseitiger Kühlenergieverbrauch in kWh/d
$Q_{c,w,unber}$	unbereinigter wasserseitiger Kühlenergieverbrauch in kWh/d
KGS	Kühlgradstunden bezogen auf Raumtemperatur von 24 °C in Kh/d
KGS_{Ref}	Kühlgradstunden bezogen auf Raumtemperatur von 24 °C für Normtag nach VDI 2078:1996-07 in Kh/d (Tagesmitteltemperatur 24,6 °C, maximale Außentemperatur 32 °C)



Eingehende Darstellung
Experimentelle Studien I

Abb. 60 Relative Einsparung der Begrünungssysteme an Kühlenergie (wasserseitig, raumseitig) gegenüber dem Referenzfall während der jeweiligen Messreihe – Ergebnisse Messung Fassadenversuchsstand Rednitzhembach (THN-ieg)

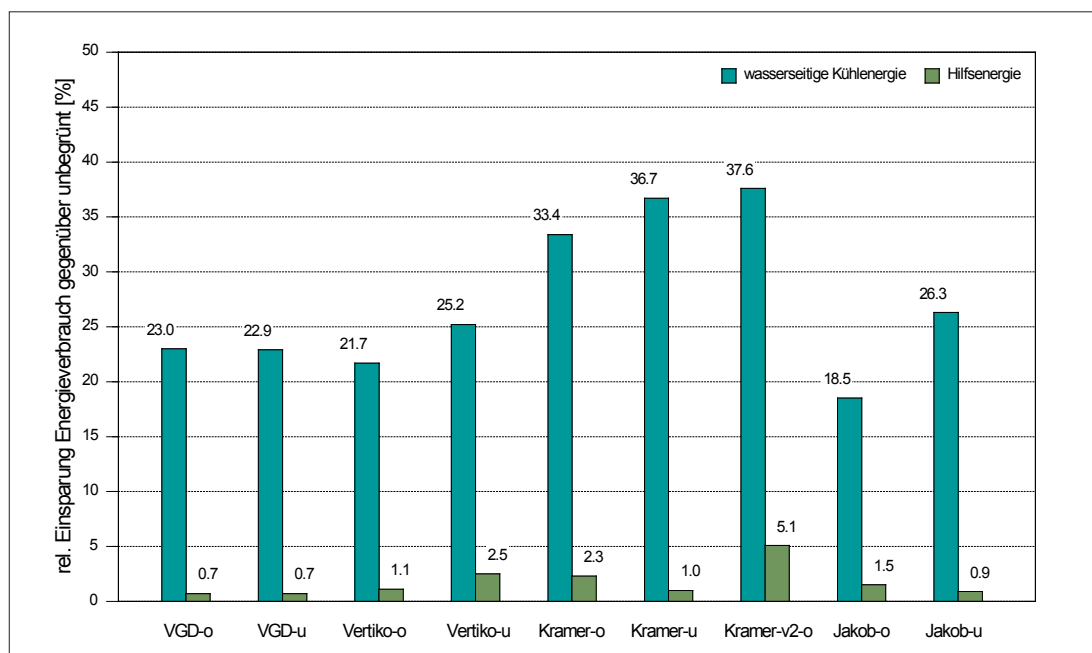
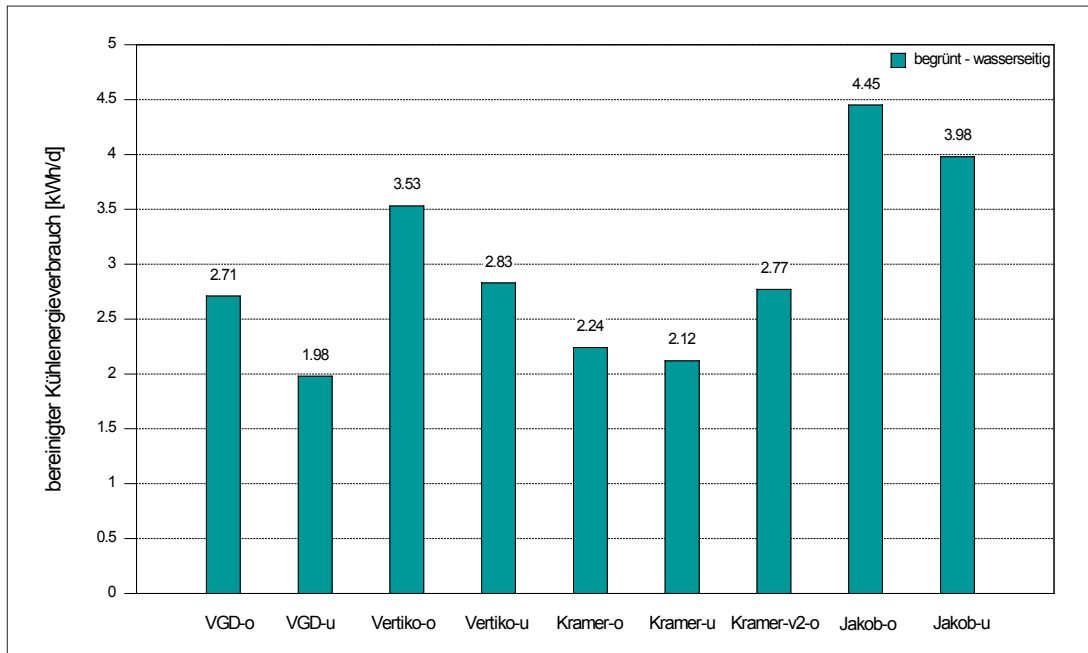


Abb. 61 Relative Einsparung der Begrünungssysteme an Kühlenergie (wasserseitig) und Hilfsenergie gegenüber dem Referenzfall während der jeweiligen Messreihe – Ergebnisse Messung Fassadenversuchsstand Rednitzhembach (THN-ieg)

Das System Verticalgreendesign (VGD) mit einer Ansaugung im unteren Brüstungsbereich zeigt nun den geringsten Kühlenergieverbrauch (1,98 kWh/d), gefolgt vom System Kramer, ebenfalls mit einer Ansaugung im unteren Brüstungsbereich (2,12 kWh/d). Das System Verticalgreendesign (VGD) mit einer Ansaugung im oberen Brüstungsbereich liefert hierbei ähnliche Werte (2,71 kWh/d) wie die beiden anderen Kramer Varianten mit einer Ansaugung im oberen Brüstungsbereich (Kramer-o: 2,34 kWh/d, Kramer-v2-o: 2,77 kWh/d).

Für das System Vertiko resultieren Werte von 2,83 kWh/d (Ansaugung unten) bzw. 3,53 kWh/d (Ansaugung oben). Der größte bereinigte Kühlenergieverbrauch stellt sich mit 3,98 kWh/d (Ansaugung unten) bzw. 4,45 kWh/d (Ansaugung oben) für das bodengebundene System Jakob ein.



Eingehende Darstellung

Experimentelle Studien I

Abb. 62 Witterungsbereinigter wasserseitiger Kühlenergieverbrauch für den Durchschnitt der wärmsten Tage der Woche mit aktiver Kühlung für die untersuchten Varianten – Ergebnisse Messung Fassadenversuchsstand Rednitzhembach (THN-ieg)

Empfundene Raumtemperaturen

Maßgeblich für den Raumkomfort ist die empfundene Raumtemperatur während der Nutzungszeit. Betrachtet man die Überschreitungsstunden, die Übertemperaturgradstunden und die sich daraus ergebende durchschnittliche Temperaturüberschreitung, so sind die Raumtemperaturen für die untersuchten Systeme ähnlich. Jedoch ist eine durchschnittliche Überschreitung des Grenzwerts von 26 °C in einem Bereich von +0,2 K bis +1,0 K in beiden Musterräumen (mit/ ohne Begrünung) am späten Nachmittag feststellbar (Tab. A15 sowie Abb. A29 und A30 im Appendix).

Absolute Raumlufffeuchte

Nach DIN EN 16798-1:2021-04 wird empfohlen, dass die absolute Raumlufffeuchte während der Nutzungszeit in Innenräumen auf 12 g/kg begrenzt werden soll. „Nimmt die Luftfeuchte größere Werte an, so wird die Schwülegrenze überschritten. Man empfindet das Raumklima dann als unbehaglich feucht.“² Bei der absoluten Raumlufffeuchte (Minimum, Mittel, Maximum) in den beiden Musterräumen zeigt sich während der jeweiligen Messreihen, dass es trotz der Begrünungssysteme zu keiner wesentlichen Erhöhung der absoluten Raumlufffeuchte im Raum gegenüber dem Referenzraum kommt. (Tab. A16 im Appendix)

2.2 Simulationsberechnungen und Abgleich mit Messergebnissen

2.2.1 Validierung der thermisch-energetischen Gebäudesimulationsergebnisse mit Messergebnissen

Die thermisch-energetischen Simulationsberechnungen werden im Zuge der Validierung mit den vor Ort gemessenen Wetterdaten im jeweiligen Messzeitraum für die untersuchten Begrünungssysteme durchgeführt. Dabei werden die Simulationsmodelle anhand der Messergebnisse adaptiert. Hierzu werden einzelne Parameter der Begrünungssysteme, des Fassadenversuchsstands sowie der dezentralen Fassadenlüftung, gegenüber den vor Beginn der Messreihen erstellten Modellen angepasst:

- Begrünungssysteme:
 - Geometrie, Abmessungen
 - Berücksichtigung tatsächlich bzw. neu installierter Pflanzenarten
 - Parameter der Pflanzen und des Substrats (Blattdurchmesser, Blattflächenindex, Albedo, Oberflächenwiderstand der Blätter, Emissivität etc.)
 - Gewichtung der Spalt-, bzw. Außentemperaturen und Brüstungsoberflächentempera-

turen zur Bestimmung der Ansaugtemperatur (nach Betrachtung in der numerischen Strömungssimulation)

Eingehende Darstellung

- Fassadenversuchsstand in Rednitzhembach:

Experimentelle Studien I

- Geometrie, Abmessungen
- Bauphysik (Absorptions-, Emissionsgrade der thermischen Gebäudehülle etc.)
- Berücksichtigung zusätzlicher interner Wärmegewinne (DFL, Technikraum)

- Dezentrale Fassadenlüftung:

- Betriebsweise
- Regelung, Steuerung

Es werden die simulierten Kühlleistungen (wasserseitig, raumseitig), die dazugehörigen Kühlenergiemengen sowie die empfundenen Raumtemperaturen mit den gemessenen Werten verglichen und mit Hilfe von Kennzahlen zur Beurteilung der Anpassungsgüte bewertet. Dies sind:

- Bestimmtheitsmaß/ Determinationskoeffizient – R^2
- Quadratische Mittelwertabweichung/ Mittelwertfehler – RMSE (root-mean-square deviation; vgl. Formel A2 im Appendix)
- Normierte quadratische Mittelwertabweichung/ Mittelwertfehler – NRMSE (normalized root-mean-square deviation; vgl. Formel A3 im Appendix)

Folgende Begrünungssysteme werden im Zuge der Validierung betrachtet und bewertet:

- System der Firma Verticalgreendesign (VGD), Ansaugung im oberen Brüstungsbereich (Messzeitraum: 27.05.2020 bis 02.06.2020)
- System der Firma Vertiko, Ansaugung im oberen Brüstungsbereich (Messzeitraum: 17.06.2020 bis 23.06.2020)
- System der Firma Kramer, Ansaugung im oberen Brüstungsbereich mit angepasstem Referenzfall (Messzeitraum: 22.07.2020 bis 28.07.2020)
- System der Firma Jakob, Ansaugung im oberen Brüstungsbereich (Messzeitraum: 29.06.2021 bis 05.07.2021)

Das Bestimmtheitsmaß R^2 , die quadratische Mittelwertabweichung RMSE und die normierte quadratische Mittelwertabweichung NRMSE sind für den Referenzfall und die vier Begrünungssysteme in Tab. A17 im Appendix dargestellt. Betrachtet werden hierbei die zeitlichen Verläufe der empfundenen Raumtemperatur und der wasserseitigen sowie raumseitigen Kühlleistungen.

Für die empfundenen Raumtemperaturen liegt der RMSE zwischen 0,5 K und 0,9 K und der NRMSE zwischen 4,1 % und 7,9 %. Bei der wasserseitigen Kühlleistung beläuft sich der RMSE auf Werte zwischen 26 W und 40 W und der NRMSE auf Werte zwischen 6,2 % und 15,2 %. Hinsichtlich der raumseitigen Kühlleistung stellen sich für den RMSE Werte zwischen 22 W und 30 W und für den NRMSE Werte zwischen 5,4 % und 9,1 %.

Es wird durchgängig ein hohes Bestimmtheitsmaß (R^2) erreicht, Werte größer 70 % bescheinigen eine hohe Anpassungsgüte.

Beim für den jeweiligen Zeitraum simulierten und gemessenen wasserseitigen Kühlenergiebedarfswerte zeigen sich geringe relative Abweichungen im Bereich zwischen -0,2 % und +6,6 %. (Tab. A18 im Appendix) Und bei den dazugehörigen simulierten und gemessenen raumseitigen Kühlenergiemengen liegen die relativen Abweichungen in einem akzeptablen Bereich von -5,4 % bis +9,0 %. (Tab. A19 im Appendix)

Aufgrund der hohen Anpassungsgüte ist es mit den vorliegenden Simulationsmodellen nun möglich, weiterführende Betrachtungen für Räume mit anderen Nutzungsverhalten (z. B. Büroräume), mit Variationen an den Parametern der Begrünungssysteme oder der dezentralen Fassadenlüftung durchzuführen.

2.2.2 Thermisch-Energetische Simulationsberechnungen nach Validierung der Musterräume des Fassadenversuchsstands

Die einzelnen Begrünungssysteme werden mit den in Folge der Validierung angepassten Parametern im Zuge der thermisch-energetischen Gebäudesimulation in einem weiteren Schritt für eine komplette Sommerperiode von Anfang Mai bis Ende September für den Fassadenversuchsstand in Rednitzhembach bewertet. Für die Wetterdaten wird ein ortsgenaueres Normal-Testreferenzjahr (TRY 2017) des Deutschen Wetterdienstes (DWD)³ verwendet. (Abb. A31 im Appendix)

System	$\Delta T_{\text{Grenz,max}}$ [K]	$\Delta T_{\text{Grenz,mean}}$ [K]	$Q_{\text{verd,max}}$ [W/m ²]	$Q_{\text{verd,mean}}$ [W/m ²]	Fc-Wert [-]
Vertiko	2,6	0,4	284,4	57,5	0
VGD	3,7	0,9	356,8	67,5	0
Kramer	3,5	0,9	326,2	62,7	0 - 0,02
Jakob	0,7	0,1	191,4	35,5	0 - 0,22

Eingehende Darstellung
Experimentelle Studien I

Tab. 6 Ergebnisse der thermisch-energetischen Gebäudesimulation (Fassadenversuchsstand Rednitzhembach). Ermittelte maximale sowie mittlere Temperaturdifferenz in der Grenzschicht der Fassade (entspricht der Luftansaugtemperatur der dezentralen Fassadenlüftung) zwischen dem Referenzraum und dem Raum mit Begrünungssystemen und maximale und mittlere spezifische Verdunstungskühlungsleistung sowie errechnete Abminderungsfaktoren der solaren Einstrahlung (Fc-Wert) der Begrünungssysteme (THN-ieg)

$\Delta T_{\text{Grenz,max}}$ maximale Grenzschichttemperaturdifferenz – unbegrünte/ begrünte Fassade
 $\Delta T_{\text{Grenz,mean}}$ mittlere Grenzschichttemperaturdifferenz – unbegrünte/ begrünte Fassade
 $Q_{\text{verd,max}}$ maximale Verdunstungsleistung Begrünungssystem
 $Q_{\text{verd,mean}}$ mittlere Verdunstungsleistung Begrünungssystem
 Fc-Wert Abminderungsfaktor

Ziel der thermisch-energetischen Simulationsberechnung ist die Beurteilung der nachstehenden Größen:

- Grenzschichttemperatur im Ansaugbereich der dezentralen Fassadenlüftung
- Energiebedarf und CO₂-Emissionen der dezentralen Fassadenlüftung (Kühlenergiebedarf, elektrischer Hilfsenergiebedarf)
- empfundene Raumtemperatur, Überschreitungshäufigkeiten und Übertemperaturgradstunden

Grenzschichttemperatur im Ansaugbereich der dezentralen Fassadenlüftung, Verdunstungskühlung und Verschattungswirkung Begrünungssystem

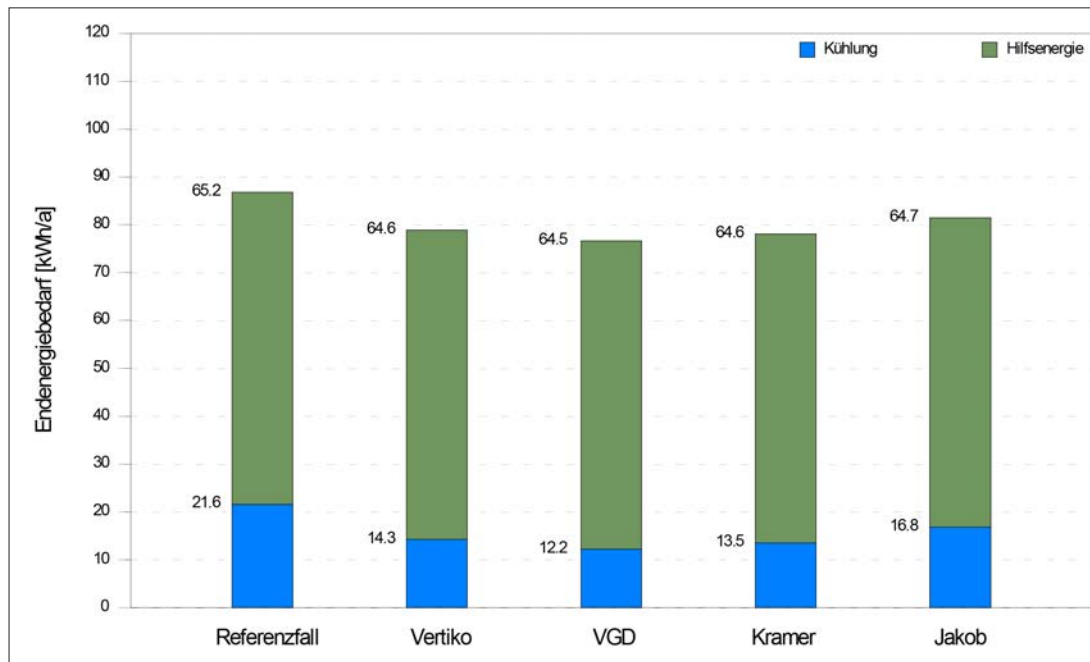
Alle Begrünungssysteme zeigen analog den Messergebnissen gegenüber dem Referenzfall eine deutliche Reduzierung der Grenzschichttemperatur und damit der Ansaugtemperatur der dezentralen Fassadenlüftung. Man erkennt, dass das wandgebundene System der Firma Verticalgreendesign (VGD) die größte Grenzschichttemperaturdifferenz gegenüber dem Referenzfall erreicht, sowohl im Mittel als auch hinsichtlich des Maximalwerts. Während über dem gesamten Betrachtungszeitraum im Mittel eine Absenkung von bis zu 0,9 K erwartet werden kann, sinken insbesondere die Spitzenwerte um bis zu 3,7 K. Für das System Kramer lassen sich eine mittlere Temperaturdifferenz von 0,9 K und eine maximale Differenz von 3,5 K erzielen. (Tab. 6)

Die geringste Absenkung resultiert für das System Jakob (Mittel: 0,1 K, Maximum: 0,7 K). Das ist auf das nicht vorhandene Kühlpotential des Substrats bei diesem System zurückzuführen. Dies spiegelt sich auch in der deutlich geringeren Verdunstungskühlung wieder. Im Vergleich zum System Verticalgreendesign (VGD) stellt sich eine Reduzierung um bis zu 46 % im Maximum und bis zu 47 % im Mittel.

Die Temperaturdifferenzen sowie die erzielbare Verdunstungskühlung sind wesentlich von den Eigenschaften (Oberflächenwiderstand der Blätter, Blattdurchmesser etc.) der verwendeten Pflanzensorten in den jeweiligen Systemen abhängig. Dabei hat auch der Wassersättigungsgrad des Substrats/ Erdreichs einen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse. In den Simulationsberechnungen wird von einem vollständig gesättigten Erdreich ausgegangen.

Weiterhin hat die Verschattungswirkung der Begrünungssysteme einen Einfluss auf die Ansaugtemperaturen. Die wandgebundenen Systeme zeigen – durch den opaken Aufbau der Module – eine vollständige Verschattung (Fc = 0). Aufgrund des dichten Bewuchses mit einer Stärke der Blattschicht von etwa 450 mm ergibt sich für das System Kramer je nach Sonnenhöhe ein Abminderungsfaktor von 0 bis 0,02 und entspricht dabei annähernd dem Wert einer Vollverschattung. Für das bodengebundene System Jakob stellt sich ein Abminderungsfaktor von 0 bis 0,22 ein, was in etwa einem außenliegenden Raffstore mit einer Lamellenstellung von 45° entspricht. (Tab. 6)

Die simulierte Grenzschichttemperatur (Ansaugtemperatur) im Referenzfall und beispielhaft für das wandgebundene System der Firma Verticalgreendesign (VGD) für eine typische Sommerwoche zeigt Abbildung A32 im Appendix. Die Temperaturdifferenz ist blau hinterlegt.



Eingehende Darstellung
 Experimentelle Studien I

Abb. 63 Endenergiebedarf des Fassadenlüftungssystems. Referenzfall und in Kombination mit den untersuchten Begrünungssystemen – Ergebnisse Simulation Fassadenversuchsstand Rednitzhembach (THN-ieg)

Weiterhin werden die spezifische Verdunstungskühlung, der Abminderungsfaktor des Begrünungssystems sowie die Außentemperatur dargestellt.

Endenergiebedarf Kühlung, Hilfsenergiebedarf der dezentralen Fassadenlüftung

Die Ergebnisse zeigen, dass alle Begrünungssysteme zu einer Reduzierung des Kühlenergiebedarfs gegenüber ihren Referenzfällen führen. Betrachtet man den Energiebedarf der dezentralen Fassadenlüftung genauer, zeigt sich, dass das wandgebundene System der Firma Verticalgreendesign (VGD) gegenüber dem Referenzfall (Einsparpotential für Kühlenergie: 43,0 %, Hilfsenergie: 1,0 %, Gesamtenergie: 11,4 %) und unter allen untersuchten Begrünungssystemen den niedrigsten Endenergiebedarf für die untersuchte Sommerperiode von Mai bis September aufweist.

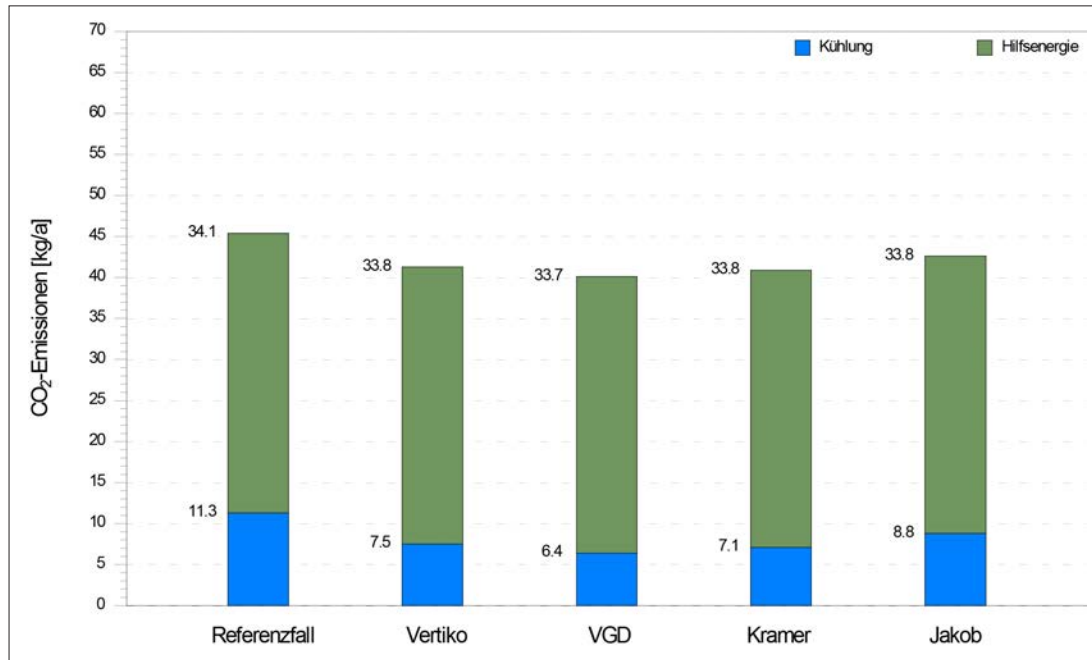
Alle Begrünungssysteme haben einen nahezu identischen Strombedarf für die Hilfsenergie (Abb. 63 und detailliert Tab. A20 im Appendix) und weisen gegenüber dem Referenzfall lediglich eine Einsparung um bis zu 1,0 % auf. Das Einsparpotential des Hilfsenergiebedarfs zeigt gegenüber den Messungen teilweise einen wesentlich geringeren Einfluss. Wie man zudem erkennen kann, ist der Hilfsenergiebedarf im Vergleich zum Endenergiebedarf für Kühlung deutlich größer und macht somit den Großteil des gesamten Endenergiebedarfs aus. Die Ursache hierfür liegt unter anderem in den langen Laufzeiten der dezentralen Fassadenlüftung und deren relativ hohem Strombedarfswerten.

Im Gegensatz zu den Messungen stellt sich bei den Simulationsbetrachtungen das System Verticalgreendesign (VGD) nun als das etwas bessere System dar. Aber auch die Systeme Kramer (Einsparpotential für Kühlenergie: 37,3 %, Hilfsenergie: 0,9 %, Gesamtenergie: 9,9 %) und Vertiko (Einsparpotential für Kühlenergie: 33,7 %, Hilfsenergie: 0,9 %, Gesamtenergie: 9,1 %) zeigen ein großes Einsparpotential.

Die im Vergleich etwas schlechteren Ergebnisse beim System Vertiko resultieren auf der ungünstigeren Brüstungs- und Spalttemperatur aufgrund der Trägerplatte mit einer schlechteren Wärmeleitung (gegenüber VGD), dem anstelle des Substrats verwendeten Geotextils, den ungünstigeren Eigenschaften der Pflanzen sowie des geringeren Bewuchses.

Das System Kramer schneidet aufgrund des höheren Oberflächenwiderstands der Pflanzen und der etwas geringeren Verschattungswirkung etwas schlechter ab als das System Verticalgreendesign (VGD). Positiv wirkt sich bei diesem System der starke Bewuchs mit Pflanzen aus, was zu einer annähernden Vollverschattung der dahinterliegenden Fassade führt. Auch ist bei diesem System der Einfluss der Brüstungsoberflächentemperatur auf die Ansaugtemperatur geringer als bei den wandgebundenen Systemen.

Der höchste Kühlenergiebedarf stellt sich mit 16,8 kWh/a für das System Jakob ein, dies bedeutet das geringste Einsparpotential aller untersuchten Begrünungssysteme mit 22,6 %. Die Ursache für das geringere Einsparpotential liegt hier zum einen in der Semitransparenz



Eingehende Darstellung
Experimentelle Studien I

Abb. 64 CO₂-Emissionen des Fassadenlüftungssystems. Referenzfall und in Kombination mit den untersuchten Begrünungssysteme – Ergebnisse Simulation Fassadenversuchsstand Rednitzheimbach (THN-ieg)

System	T _{op,max} [°C]		U-Std > 26 °C [h]		U-Std > 26 °C [%] 1)		Gh > 26 °C [Kh]	
	u	b	u	b	u	b	u	b
Vertiko	26,7	25,8	8	0	0,5	0	2,2	0
VGD	26,7	25,7	8	0	0,5	0	2,2	0
Kramer	26,7	25,8	8	0	0,5	0	2,2	0
Jakob	26,7	25,8	8	0	0,5	0	2,2	0

Tab. 7 Empfundene Raumtemperaturen und Überschreitungen während der Nutzungszeit (Betrachtungszeitraum: Mai bis September) – Ergebnisse Simulation Fassadenversuchsstand Rednitzheimbach (THN-ieg)

- 1) Gesamtnutzungsdauer: 1.530 h
- T_{op,max} maximale empfundene Raumtemperatur
- U-Std Überschreitungsstunden
- Gh Übertemperaturgradstunden
- u unbegrünt (Referenzfall)
- b begrünt

des Systems und zum anderen im fehlenden Kühlpotential des nicht vorhandenen feuchten Substrats bzw. Erdreichs im Ansaugbereich der dezentralen Fassadenlüftung. Das System Verticalgreendesign (VGD) zeigt die besten Ergebnisse aufgrund der insgesamt gesehenen positiveren Eigenschaften (Bepflanzung, Konstruktion etc.).

CO₂-Emissionen Kühlung, Hilfsenergiebedarf der dezentralen Fassadenlüftung

Die Einsparungen hinsichtlich der CO₂-Emissionen verhalten sich analog den Einsparungen des End- bzw. Hilfsenergiebedarfs (Abb. 64 und Tab. A21 im Appendix). Das CO₂-Äquivalent für Strom zur Bestimmung der CO₂-Emissionen beträgt nach Angaben des Umweltbundesamtes 0,523 kg/kWh_{End}.⁴

4 vgl. Umweltbundesamt, 2018, S. 9

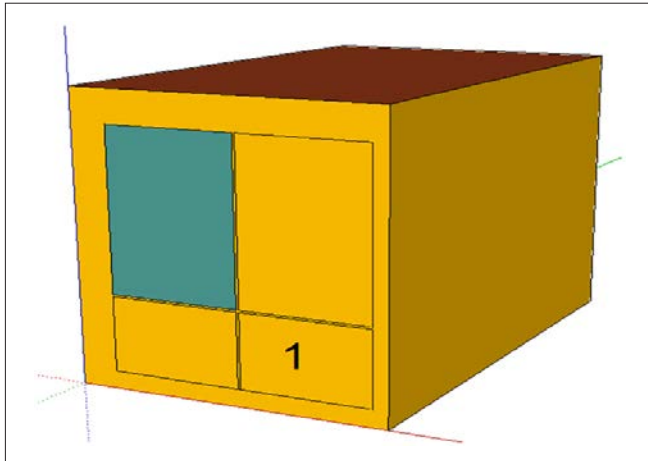


Abb. 65 TEG-3D-Simulationsmodell für Einzelbüro (THN-ieg)

Eingehende Darstellung

Experimentelle Studien I

Empfundene Raumtemperaturen

Wie man den Ergebnissen entnehmen kann, ist es möglich den angestrebten Raumtemperatursollwert von 26 °C einzuhalten. Hierbei resultieren für den begrünten Raum etwas geringere empfundene Raumtemperaturen und dementsprechend geringere Überschreitungs- und Übertemperaturgradstunden gegenüber dem Referenzfall.

Im Vergleich zu den Messungen stellen sich insgesamt etwas niedrigere empfundene Raumtemperaturwerte ein. Dies liegt auch an den im Vergleich zu den Messungen etwas geringeren Außentemperaturen des Wetterdatensatzes. Die maximalen empfundenen Raumtemperaturen und die dazugehörigen Überschreitungsstunden sowie Übertemperaturgradstunden größer 26 °C während der Nutzungszeit von Montag bis Sonntag (von 7.00 Uhr bis 17.00 Uhr; Gesamtnutzungszeit: 1.530 h) für die untersuchten Begrünungssysteme sind in Tab. 7 aufgeführt.

2.2.3 Thermisch-Energetische Gebäudesimulationsbetrachtung Einzelbüro

Randbedingungen

Um den Einfluss der Begrünungssysteme auf übliche Raumnutzungsarten zu untersuchen, wird das thermisch-energetische Simulationsmodell zu einem Einzelbüro mit Südausrichtung erweitert und mit Hilfe des ortsgenauen Normal-Testreferenzjahres für den Standort Rednitzhembach (TRY 2017) für eine Kühlperiode von Anfang Mai bis Ende September simuliert.

Bei dem in der thermisch-energetischen Gebäudesimulation berücksichtigten 3D-Zonenmodell werden das jeweilige Begrünungssystem und die Ansaugung für die dezentrale Fassadenlüftung vor der rechten Hälfte der Fassade vorgesehen (1). Vor dem Fenster auf der linken Raumhälfte wird ein außenliegender Raffstore angeordnet, welcher in Abhängigkeit der solaren Einstrahlung auf die Fassade gesteuert wird. (Abb. 65)

Es werden unter anderem die Belegungs- sowie Betriebszeiten, die interne Wärmelasten, die Geometrie und bauphysikalischen Randbedingungen gegenüber dem Fassadenversuchsstand angepasst (Tab. A22 im Appendix).

Der Raum besitzt nun eine in etwa doppelt so große Raumfläche (11,7 m²) und dementsprechend ein größeres Raumvolumen (34,5 m³). Das Einzelbüro beinhaltet gegenüber dem Fassadenversuchsstand in Rednitzhembach nur noch ein kleineres Fenster in der Außenfassade. Die bauphysikalischen Randbedingungen (U-Wert, g-Wert, Fc-Wert, Steuerung Sonnenschutz) bleiben gegenüber dem Fassadenversuchsstand unverändert. Lediglich der Wandaufbau im Brüstungsbereich besitzt nun den gleichen U-Wert wie der Rest der Außenwand (0,23 W/(m² K)). Am Fassadenversuchsstand ist dieser mit 1,16 W/(m² K) im Vergleich schlechter. Der Fensterflächenanteil beträgt 23,2 % (Fassadenversuchsstand: 34,1 % bzw. 57,3 %).

Die jeweiligen Nutzungsprofile für die internen Wärmelasten und die dezentrale Fassadenlüftung werden nach DIN V 18599-10:2018-09⁵ und SIA 2024:2015 verwendet. Abbildung A33 und A34 im Appendix geben die wöchentlichen Nutzungsprofile für Personen und Arbeitshilfen (Computer etc.) nach SIA 2024:2015 wieder.

System	$\Delta T_{\text{Grenz,max}}$ [K]	$\Delta T_{\text{Grenz,mean}}$ [K]	$Q_{\text{verd,max}}$ [W/m ²]	$Q_{\text{verd,mean}}$ [W/m ²]	Fc-Wert [-]
Vertiko	3,6	1,0	285,9	57,7	0
VGD	4,5	1,3	357,5	67,6	0
Kramer	3,6	1,0	326,2	62,7	0 - 0,02
Jakob	0,9	0,2	191,3	35,5	0 - 0,05

Eingehende Darstellung
 Experimentelle Studien I

Tab. 8 Grenzschnitttemperatur, Verdunstungskühlung, Abminderungsfaktor (Betrachtungszeitraum: Mai bis September) – Ergebnisse Simulation Einzelbüro (THN-ieg)
 Dargestellt ist die mit der thermisch-energetischen Gebäudesimulation ermittelte maximale sowie mittlere Temperaturdifferenz in der Grenzschnitt der Fassade (entspricht der Luftansaugtemperatur der dezentralen Fassadenlüftung) zwischen dem Referenzraum und dem Raum mit Begrünungssystemen für das Einzelbüro, desweiteren die maximalen und mittleren spezifischen Verdunstungskühlungsleistung sowie die errechneten Abminderungsfaktoren der solaren Einstrahlung (Fc-Wert) der Begrünungssysteme.

Das Einzelbüro weist nun eine geringfügig höhere interne Wärmelast gegenüber dem Fassadenversuchsstand in Rednitzhembach auf (Fassadenversuchsstand: 20,3 W/m² bis 23,5 W/m², Einzelbüro: 22,2 W/m² bis 23,8 W/m²).

Die dezentrale Fassadenlüftung für das Einzelbüro wird bis auf die Laufzeit (Montag bis Freitag, 5.00 Uhr bis 18.00 Uhr, Fassadenversuchsstand: Montag bis Sonntag, 5.00 Uhr bis 17.00 Uhr) analog dem Fassadenversuchsstand in Rednitzhembach betrieben (Tab. A23 im Appendix)

Die Parameter der untersuchten Begrünungssysteme bleiben gegenüber dem Fassadenversuchsstand unverändert (vgl. Tab. A1 im Appendix). Es erfolgt lediglich eine Anpassung des LAI für das System Jakob, aufgrund des noch nicht vollständigen Bewuchses während der Messreihe von 2,6 auf 5,0.

Kühlleistungsberechnung nach VDI 2078:2015-06

Für den Büroraum ergibt sich nach VDI 2078:2015-06 für einen Raumtemperatursollwert von 24 °C eine Kühlleistung von 255 W (21,8 W/m²) und für einen Raumtemperatursollwert von 26 °C eine Kühlleistung von 240 W (20,5 W/m²) bei einer 100 % konvektiven Wärmeabfuhr. Die Raumkühlleistung der dezentralen Fassadenlüftung entspricht der Kühlleistung.

Grenzschnitttemperatur im Ansaugbereich der dezentralen Fassadenlüftung, Verdunstungskühlung und Verschattungswirkung Begrünungssystem

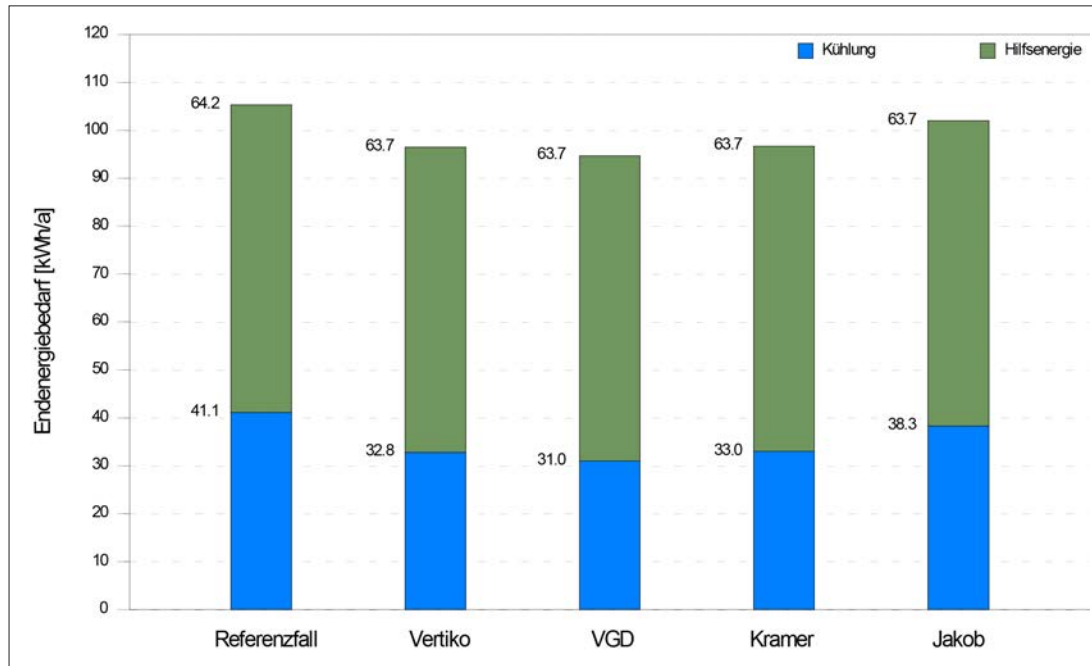
Die mit der thermisch-energetischen Gebäudesimulation ermittelte maximale sowie mittlere Temperaturdifferenz in der Grenzschnitt der Fassade (entspricht der Luftansaugtemperatur der dezentralen Fassadenlüftung) zwischen dem Referenzraum und dem Raum mit Begrünungssystemen für das Einzelbüro zeigt Tab. 8. Weiterhin sind die maximalen und mittleren spezifischen Verdunstungskühlungsleistung sowie die errechneten Abminderungsfaktoren der solaren Einstrahlung (Fc-Wert) der Begrünungssysteme dargestellt.

Alle Begrünungssysteme zeigen gegenüber dem Referenzfall wiederum teils eine deutliche Reduzierung der Grenzschnitttemperatur und damit der Ansaugtemperatur der dezentralen Fassadenlüftung. Man erkennt, dass das wandgebundene System der Firma Verticalgreendesign (VGD) die größte Grenzschnitttemperaturdifferenz gegenüber dem Referenzfall erreicht, sowohl im Mittel als auch hinsichtlich des Maximalwerts.

Während über dem gesamten Betrachtungszeitraum im Mittel eine Absenkung von bis zu 1,3 K erwartet werden kann, sinken insbesondere die Spitzenwerte um bis zu 4,5 K. Die Systeme Vertiko und Kramer zeigen mit einer durchschnittlichen mittleren Temperaturdifferenz von 1,0 K und einer Maximaldifferenz von 3,6 K ähnliche Ergebnisse.

Das bodengebundene System Jakob bewirkt lediglich eine Maximaldifferenz von 0,9 K und eine mittlere Temperaturdifferenz von 0,2 K, was auf das fehlende Kühlpotential des Substrats zurückzuführen ist. Dies zeigt sich bei dieser Variante auch in der deutlich geringeren Verdunstungskühlung. Im Vergleich stellt sich eine Reduzierung um bis zu 47 % im Maximum und bis zu 48 % im Mittel.

Im Vergleich zu den Ergebnissen für den Fassadenversuchsstand ergeben sich vor allem für die wandgebundenen Systeme Vertiko und Verticalgreendesign (VGD) größere Grenzschnitttemperaturdifferenzen; dies resultiert bei gleichen Randbedingungen hinsichtlich der



Eingehende Darstellung
Experimentelle Studien I

Abb. 66 Endenergiebedarf des Fassadenlüftungssystems. Referenzfall und in Kombination mit den untersuchten Begrünungssystemen – Ergebnisse Simulation Einzelbüro (THN-ieg)

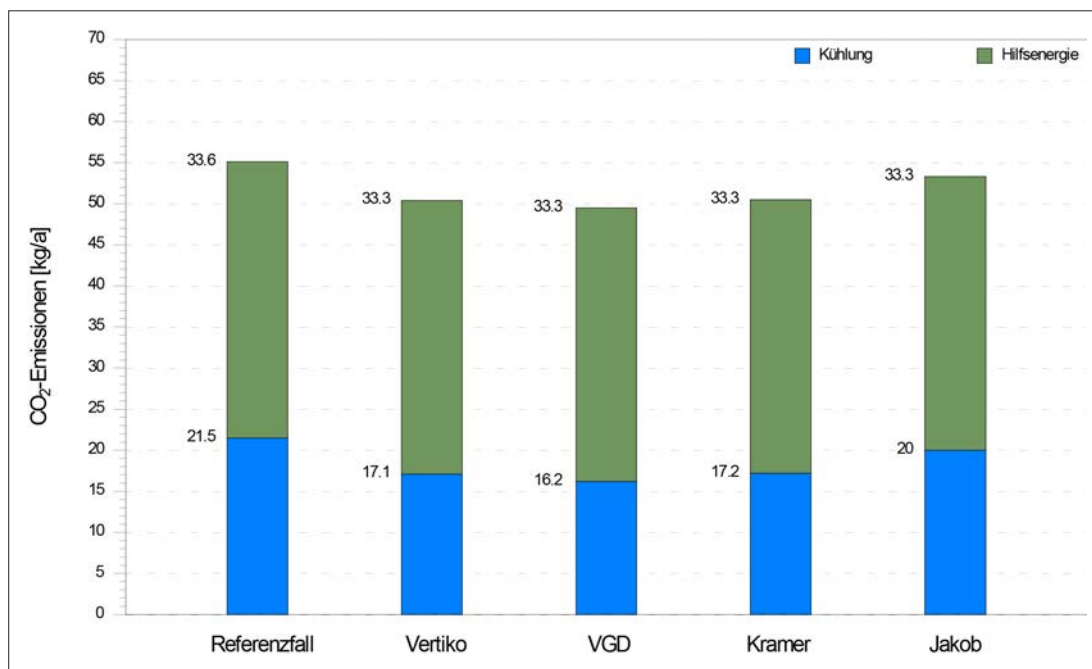


Abb. 67 CO₂-Emissionen des Fassadenlüftungssystems. Referenzfall und in Kombination mit den untersuchten Begrünungssystemen – Ergebnisse Simulation Einzelbüro (THN-ieg)

Begrünungssysteme aus der höheren Speicherwirkung des neuen Brüstungswandaufbaus mit einem besseren Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert), da sich durch die zusätzliche thermische Speichermasse für den Referenzraum höhere Brüstungsoberflächentemperaturen im Referenzfall ergeben.

Endenergiebedarf Kühlung, Hilfsenergiebedarf der dezentralen Fassadenlüftung

Alle Begrünungssysteme führen zu einer Reduzierung des Kühlenergiebedarfs gegenüber ihren Referenzfällen. (Abb. 66 und Tab. A24 im Appendix) Betrachtet man den Energiebedarf der dezentralen Fassadenlüftung genauer, erkennt man, dass für das wandgebundene System der Firma Verticalgreendesign (VGD) gegenüber dem Referenzfall (Einsparpotential für Kühlenergie: 24,5 %, Hilfsenergie: 0,8 %, Gesamtenergie: 10,0 %) und unter allen untersuchten Begrünungssystemen der niedrigste Endenergiebedarf resultiert.

System	$T_{op,max}$ [°C]		U-Std > 26 °C [h]		U-Std > 26 °C [%] 1)		Gh > 26 °C [Kh]	
	u	b	u	b	u	b	u	b
Vertiko	27,2	26,5	14	16	1,2	1,3	4,0	2,8
VGD	27,2	26,5	14	11	1,2	0,9	4,0	1,5
Kramer	27,2	26,5	14	14	1,2	1,1	4,0	2,3
Jakob	27,2	26,7	14	7	1,2	0,6	4,0	1,1

Eingehende Darstellung
 Experimentelle Studien I

Tab. 9 Empfundene Raumtemperaturen und Überschreitungen während der Nutzungszeit (Betrachtungszeitraum: Mai bis September) – Ergebnisse Simulation Einzelbüro (THN-ieg)

Das zweitbeste System ist in diesem Fall das System Vertiko (Einsparpotential für Kühlenergie: 20,2 %, Hilfsenergie: 0,7 %, Gesamtenergie: 8,3 %), dicht gefolgt vom System Kramer mit ähnlichen Werten (Einsparpotential für Kühlenergie: 19,8 %, Hilfsenergie: 0,8 %, Gesamtenergie: 8,2 %). Aufgrund des fehlenden Kühlpotentials des Substrats stellt sich das geringste Einsparpotential für Kühlenergie aller untersuchten Systeme für das bodengebundene System Jakob mit 6,9 % ein.

Im Gegensatz zu den Ergebnissen für den Fassadenversuchsstand stellen sich geringere Einsparpotentiale ein. Dabei kommt es zu einer Reduzierung der Einsparpotentiale von 13,5 % (Vertiko) bis 18,5 % (Verticalgreendesign (VGD)). Weiterhin zeigt das System Kramer nunmehr einen etwas höheren Endenergiebedarf als das System Vertiko. Dies bedeutet, dass der Energiebedarf und somit das Einsparpotential gegenüber einer Fassade ohne Begrünung auch vom Raum (Geometrie, Fensterflächenanteil, Wärmedurchgangskoeffizienten etc.) und dessen Nutzung abhängt. Durch die kürzere Laufzeit der dezentralen Fassadenlüftung ist auch das Verhältnis von Hilfsenergiebedarf zum Kühlenergiebedarf im Vergleich zum Fassadenversuchsstand rückläufig.

CO₂-Emissionen Kühlung, Hilfsenergiebedarf der dezentralen Fassadenlüftung

Die Einsparpotentiale hinsichtlich der CO₂-Emissionen verhalten sich analog den Einsparungen des End- bzw. Hilfsenergiebedarfs (vgl. Abb. 67 und Tab. A25 im Appendix).

Empfundene Raumtemperaturen

Es zeigt sich, dass alle Systeme den angestrebten Raumtemperatursollwert von 26 °C weitestgehend einhalten und somit die thermischen Behaglichkeitskriterien als erfüllt betrachtet werden können. Es gibt lediglich geringfügige Unterschiede zwischen den einzelnen Systemen und gegenüber dem Referenzfall stellen sich etwas niedrigere Temperaturwerte ein. Gegenüber dem Fassadenversuchsstand ist eine leichte Zunahme der Überschreitungshäufigkeit aufgrund der etwas höheren internen Wärmelasten feststellbar.

Die ermittelten maximalen empfundenen Raumtemperaturen und die dazugehörigen Überschreitungsstunden sowie Übertemperaturgradstunden größer 26 °C während der Nutzungszeit von Montag bis Freitag im Zeitraum von 7.00 Uhr bis 18.00 Uhr (Gesamtnutzungszeit: 1.200 h) zeigt Tab. 9 für die untersuchten Begrünungssysteme.

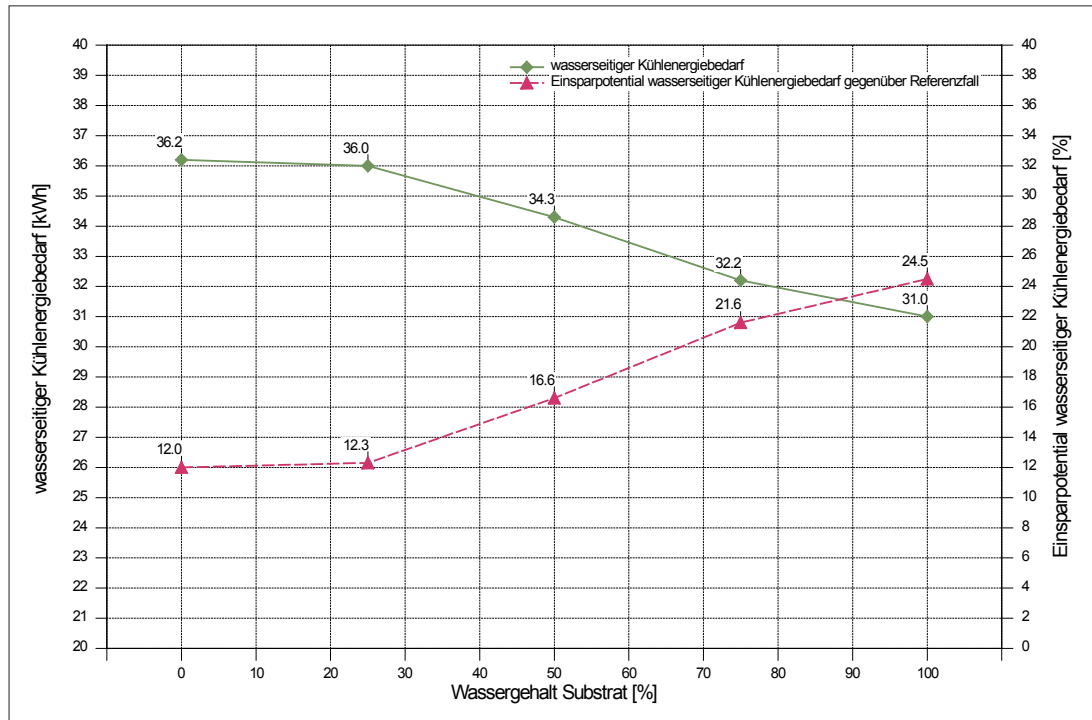
Variation der Parameter der Begrünungssysteme

Es werden nachstehende Einflussfaktoren des Begrünungssystems auf den Energiebedarf der dezentralen Fassadenlüftung und damit auf die CO₂-Emissionen sowie die thermische Behaglichkeit für das Einzelbüro näher untersucht:

- Wassersättigung des Substrats/ Erdreichs
- Blattdurchmesser, Oberflächenwiderstand und Albedo der Pflanzen

Hierzu wird lediglich das System Verticalgreendesign (VGD) näher betrachtet, da dieses System in den Simulationsbetrachtungen das höchste Einsparpotential gegenüber dem Referenzfall zeigt.

Die Wassersättigung gibt an, zu welchem Grad die Hohlräume des Substrats mit Wasser befüllt sind. Ist das Substrat zu 100 % wassergesättigt sind alle Hohlräume mit Wasser gefüllt. Jedoch sollte beachtet werden, dass es nicht zu einer Überwässerung der Begrünungssysteme kommt. Wenn Pflanzen zu viel Wasser bekommen, ist das für sie oft schädlicher als



Eingehende Darstellung
Experimentelle Studien I

Abb. 68 Wasserseitiger Kühlenergiebedarf (Strom) in Abhängigkeit des Wassergehalts des Substrats – Ergebnisse Simulation Einzelbüro, System Verticalgreendesign (VGD) (THN-ieg)

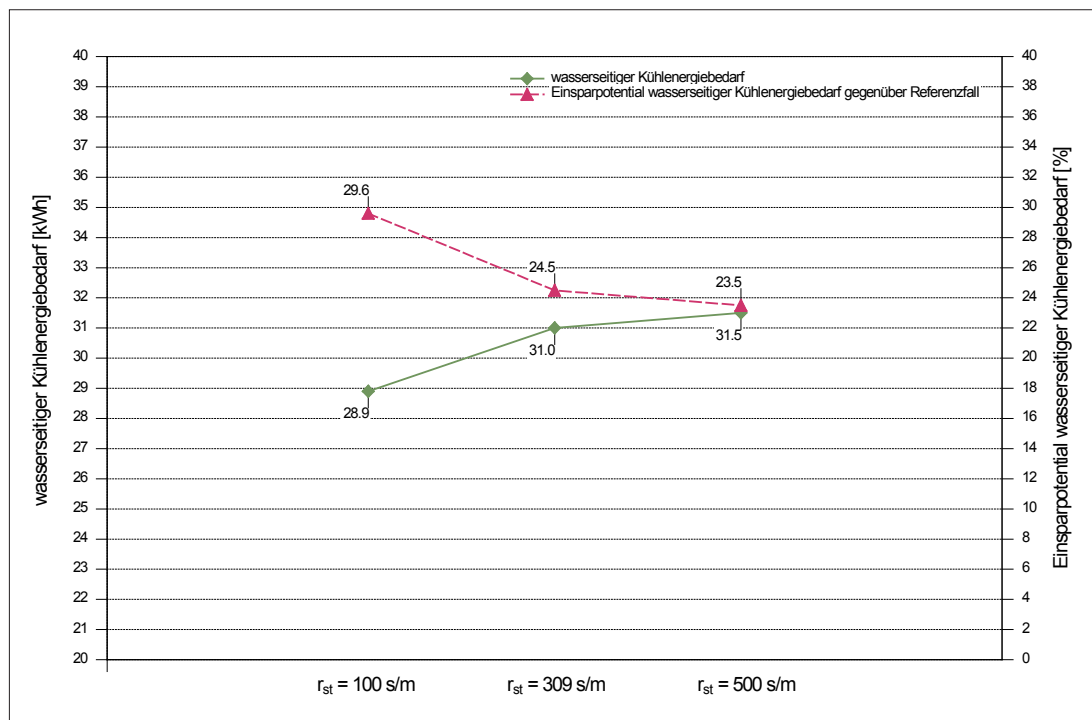


Abb. 69 Wasserseitiger Kühlenergiebedarf (Strom) in Abhängigkeit des Oberflächenwiderstands der Pflanzen – Ergebnisse Simulation Einzelbüro, System Verticalgreendesign (VGD) (THN-ieg)

ein zeitweilig verringertes Wasserangebot. „Zuviel Wasser im Boden verdrängt die Bodenluft, bringt so die Wurzeln um den lebensnotwendigen Sauerstoff und lässt im schlimmsten Fall die Wurzeln ersticken. Die oberirdischen Pflanzenteile bekommen dann weder Wasser noch gelöste Nährstoffe, d. h. sie verwelken.“⁶ Wenn Wasser über längere Zeit im Substratbehälter stehenbleibt, können die Wurzeln kein Wasser aufnehmen, obwohl genug Feuchtigkeit

Variante	$W_{el,c}$ [kWh]		$W_{el,aux}$ [kWh]		$\Delta W_{el,c}$ [%]	$\Delta W_{el,aux}$ [%]
	u	b	u	b		
Kompletter Fassadenbereich begrünt	41,1	31,0	64,2	63,7	-24,5	-0,8
Nur der Brüstungsbereich begrünt	41,1	32,3	64,2	64,1	-21,4	-0,1

Eingehende Darstellung
 Experimentelle Studien I

Tab. 10 Endenergiebedarf Kühlung, Hilfsenergiebedarf (Betrachtungszeitraum: Mai bis September), Variation Bereiche mit Begrünungssystem – Ergebnisse Simulation Einzelbüro, System Verticalgreendesign (VGD) (THN-ieg)

vorhanden ist. Meist erholen sich Pflanzen nicht wieder, weil bereits ein Teil der Wurzeln verfault ist. „Staunässe entsteht durch zu häufiges Gießen oder durch ein verstopftes Abzugsloch im Topf.“⁷

Den wasserseitigen Kühlenergiebedarf (Strom) für verschiedene Wassersättigungsgrade des Substrats sowie das dementsprechende Einsparpotential gegenüber dem Referenzfall ohne Begrünungssystem zeigt Abb. 68. Es ist eine deutliche Abhängigkeit des wasserseitigen Kühlenergiebedarfs vom Wassergehalt des Substrats erkennbar. So führt eine Zunahme des Wassergehalts zu einer Reduzierung des Kühlenergiebedarfs. Je feuchter das Substrat, desto höher ist das Einsparpotential gegenüber dem Referenzfall (100 % Sättigung: 24,5 % Einsparung; 0 % Sättigung: 12,0 % Einsparung). Ein Einfluss auf den Hilfsenergiebedarf (Einsparpotential zwischen 0,7 % und 0,8 %) ist nicht feststellbar.

Den wasserseitigen Kühlenergiebedarf (Strom) in Abhängigkeit des Blattdurchmessers, des Oberflächenwiderstands der Blätter und des Albedo der Pflanzen und das dementsprechende Einsparpotential gegenüber dem Referenzfall ohne Begrünungssystem geben Abbildung 69 sowie A35 und A36 im Appendix wieder. Je kleiner die Blätter, je geringer der Oberflächenwiderstand der Blätter und je heller die Blätter (d. h. je größer der Albedo) sind, desto größer ist die Einsparung gegenüber dem Referenzfall.

Ausgehend von einem durchschnittlichen Wert von 15 mm führt eine Vergrößerung des durchschnittlichen Blattdurchmessers zu einer Reduzierung des Einsparpotentials gegenüber dem Referenzfall um 2,7 %. Ein fünfmal so großer Oberflächenwiderstand der Blätter (alt: 100 s/m, neu: 500 s/m) resultiert in einer Abnahme des Einsparpotentials um 6,1 %. Heller Blätter liefern lediglich einen Zuwachs von 0,3 %. (Abb. A35 im Appendix)

Hierbei ist aber zu beobachten, dass der Einfluss der Blattgröße und des Oberflächenwiderstands gewichtiger sind und der Albedo nur einen geringfügigen Einfluss auf das Einsparpotential aufweist. (Abb. A36 im Appendix)

Bei den untersuchten Varianten ist hierbei nur ein unwesentlicher Einfluss auf den Hilfsenergiebedarf der dezentralen Fassadenlüftung erkennbar. Dies gilt ebenso für die thermische Behaglichkeit in Form von Überschreitungsstunden und Übertemperaturgradstunden größer 26 °C bezogen auf die empfundene Raumtemperatur, wenn die dezentrale Fassadenlüftung ausreichend groß dimensioniert ist.

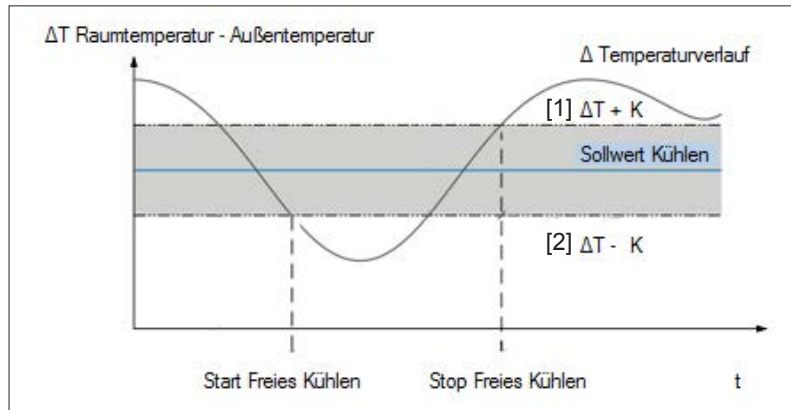
Analog zu den Endenergiebedarfswerten verhalten sich für alle Varianten die Werte hinsichtlich der CO₂-Emissionen.

2.2.4 Thermisch-Energetische Gebäudesimulationsbetrachtung Einzelbüro – Variationen und Optimierung

In einem abschließenden Schritt werden verschiedene Grünfassaden- und Lüftungskonzepte für das Einzelbüro mit Hilfe der thermisch-energetischen Gebäudesimulation bewertet:

- Lage bzw. Größe des Begrünungssystems
- Berücksichtigung einer zusätzlicher Nachtlüftung (NL) sowie optimierte freie Kühlung hinsichtlich der Betriebsweise der dezentralen Fassadenlüftung

Wird das Begrünungssystem lediglich im Brüstungsbereich vorgesehen, senkt dies die Investitions- und Bewässerungskosten, daher werden die Auswirkungen auf den Energiebedarf und die thermische Behaglichkeit näher betrachtet.



Eingehende Darstellung
 Experimentelle Studien I

Abb. 70 Reglerfunktion freies Kühlen – FSL-Connect 4.2.0.0
 (vgl. Trox, FSL-Connect II Software, Version 4.2.0.0, 2019)

Eine weitere Möglichkeit die Systeme hinsichtlich ihrer Performance zu verbessern, bietet eine zusätzliche Berücksichtigung bzw. Optimierung der Betriebsmodi freie Kühlung und Nachtauskühlung der dezentralen Fassadenlüftung.

Es wird wiederum nur das Begrünungssystem Verticalgreendesign (VGD), als das System mit den besten Kennwerten in den Simulationsbetrachtungen, untersucht.

Lage und Größe des Begrünungssystems

Den Endenergiebedarf (Strom) für die Kühlung sowie den Hilfsenergiebedarf der dezentralen Fassadenlüftung für einen komplett begrünten Fassadenbereich und Begrünung nur im Brüstungsbereich gibt Tab. 10 wieder.

Wird das Begrünungssystem nur im Brüstungsbereich installiert, führt dies zu einer Erhöhung des wasserseitigen Kühlenergiebedarfs um 4,2 % gegenüber einem vollbegrünten Fassadenabschnitt. Der Hilfsenergiebedarf steigt hingegen nur unwesentlich um 0,6 % an. Dies bedeutet für den Gesamtenergiebedarf eine Zunahme um lediglich 1,8 %.

Es kommt zu einer leichten Erhöhung der maximalen empfundenen Raumtemperaturen um +0,4 K von 26,5 °C auf 26,9 °C. Die Zahl der Überschreitungsstunden erhöht sich um 46 % von 11 h auf 16 h. Die Übertemperaturgradstunden steigen ausgehend von 1,5 Kh auf 4,0 Kh an, dies entspricht einer durchschnittlichen Überschreitung von etwa 0,3 K. Diese Werte liegen dennoch weiterhin im thermischen Behaglichkeitsfeld.

Im Wesentlichen ist nur ein geringer Einfluss auf den Energiebedarf und thermische Behaglichkeit feststellbar. Die Zunahme hinsichtlich der Überschreitungshäufigkeiten und des Endenergiebedarfs ist jeweils auf den zusätzlichen Wärmeeintrag über den unverschattet Fassadenbereich zurückzuführen.

Betriebsweise dezentrale Fassadenlüftung – Nachtauskühlung, freie Kühlung

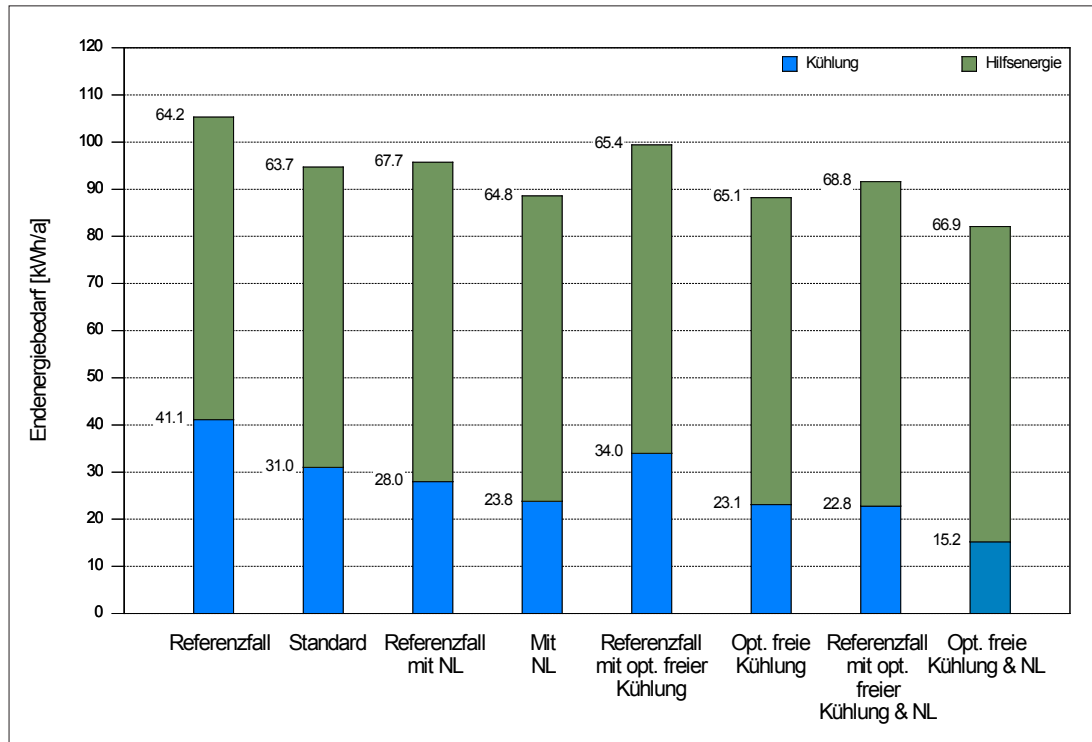
Eine weitere Möglichkeit positiv auf den Kühlenergiebedarf einzuwirken, ist die Berücksichtigung der Betriebsmodi Nachtauskühlung und freie Kühlung. Dabei wird das Kühlpotential kühler Außenluft genutzt, indem die Wärmerückgewinnung im Bypass umfahren wird und die Außenluft ohne zusätzliche Kühlung in den Raum eingebracht wird.

In der ursprünglichen Betrachtung wurde keine zusätzliche Nachtlüftung vorgesehen. Der im Standardfall eingesetzte Modus der freie Kühlung ist noch nicht hinsichtlich des Kühlenergiebedarfs optimiert. (vgl. Tab. A24 im Appendix)

Die zusätzliche Nachtlüftung wird in Abhängigkeit der Raumtemperatur, der Außentemperatur und dem Kühlsollwert in der Nichtnutzungszeit von Montag bis Sonntag zwischen 0.00 Uhr und 5.00 Uhr aktiviert. Befindet sich die Raumtemperatur über dem Kühlsollwert (26 °C während der Nichtnutzungszeit) und ist die Außentemperatur mindestens 2,5 K unter diesem Kühlsollwert, wird die Wärmerückgewinnung im Bypass umgangen und der Raum mit der höchsten Lüfterstufe (Luftvolumenstrom: 150 m³/h) gelüftet. Die Nachtauskühlung wird wieder deaktiviert, wenn die Raumtemperatur 1,0 K über dem Heizsollwert (18 °C während der Nichtnutzungszeit) liegt.

In der ursprünglichen Betrachtung ist das freie Kühlen erst ab einer Differenz zwischen Raum- und Außentemperatur von -6,0 K (Start Freies Kühlen [2]) vorgesehen und wird bei einer Temperaturdifferenz von +4,0 K (Stop Freies Kühlen [1]) wieder deaktiviert (Abb. 70).

In einer zusätzlichen Variante „optimiertes freies Kühlen“ wird das freie Kühlen dahingegen optimiert, dass ein Aktivieren dieses Modus bereits bei geringeren Untertemperaturen der Außenluft gegenüber der Raumluft vorgesehen wird. Der Modus Nachtauskühlung wird nicht berücksichtigt. Bei der Funktion freie Kühlung wird die Außenluft ohne Durchströmen des



Eingehende Darstellung
Experimentelle Studien I

Abb. 71 Endenergiebedarf der verschiedenen Lüftungskonzepte, Variation Betriebsweise DFL – Ergebnisse Simulation Einzelbüro, System Verticalgreendesign (VGD) (THN-ieg)

Variante	W _{el,c} [kWh]		W _{el,aux} [kWh]		ΔW _{el,c} [%]	ΔW _{el,aux} [%]
	u	b	u	b		
Standardfall	41,1	31,0	64,2	63,7	-24,5	-0,8
Mit Nachtlüftung	28,0	23,8	67,7	64,8	-15,1	-4,2
Mit optimierter freier Kühlung ohne Nachtlüftung	34,0	23,1	65,4	65,1	-32,0	-0,6
Mit Nachtlüftung und optimierter freier Kühlung	22,8	15,2	68,8	66,9	-33,0	-2,2

Tab. 11 Endenergiebedarf Kühlung, Hilfsenergiebedarf (Betrachtungszeitraum: Mai bis September), Variation Betriebsweise DFL – Ergebnisse Simulation Einzelbüro, System Verticalgreendesign (VGD) (THN-ieg)

Wärmerückgewinners direkt in den Raum während der Betriebszeit von Montag bis Freitag zwischen 5.00 Uhr und 18.00 Uhr eingeblasen. Dabei muss die Raumtemperatur oberhalb des Komfortbereichs (24 °C während der Nutzungszeit) liegen, die Außentemperatur kleiner als die Obergrenze des Komfortbereichs (24 °C während der Nutzungszeit) und die Differenz zwischen Raum- und Außentemperatur größer 3,0 K (Start Freies Kühlen) sein, die Zulufttemperaturgrenze (18 °C während der Nutzungszeit) darf nicht unterschritten werden. Fällt die Differenz der Raumtemperatur zur Außentemperatur unter 2,0 K (Stop Freies Kühlen) oder erreicht die Raumtemperatur den Komfortbereich wird das freie Kühlen wieder deaktiviert.

In einer abschließenden Variante werden die Betriebsmodi Nachtauskühlung und optimierte freie Kühlung miteinander kombiniert.

Den Endenergiebedarf für Kühlung und Hilfsenergiebedarf (Ventilatoren etc.) der betrachteten Lüftungskonzepte gibt Abb. 71 wieder. Dargestellt sind hier auch die beiden Ausgangsvarianten für den Referenzfall und das Begrünungssystem (Standard).

Den Endenergiebedarf (Strom) für die Kühlung sowie den Hilfsenergiebedarf der dezentralen Fassadenlüftung zeigt für die untersuchten Systeme Tab. 11 auf.

Eingehende Darstellung

Nachtlüftung

Experimentelle Studien I

Eine zusätzliche Nachtlüftung (Kennzeichnung in Abb. 71 „Mit NL“) führt zu einer deutlichen Reduzierung des Kühlenergiebedarfs um 23,2 % auf 28,0 kWh/a gegenüber dem Standardfall ohne Nachtlüftung. Da im Referenzfall mit Nachtlüftung der Kühlenergiebedarf noch stärker reduziert wird, sinkt das Einsparpotential gegenüber dem Referenzfall von 24,5 % auf 15,1 %.

Aufgrund der längeren Laufzeit der dezentralen Fassadenlüftung erhöht sich der Hilfsenergiebedarf aber lediglich um 1,7 % gegenüber dem Standardfall ohne Nachtlüftung. Dies bedeutet für den gesamten Endenergiebedarf eine Reduzierung um 6,4 % auf 88,6 kWh/a gegenüber dem Standardfall ohne Nachtlüftung und eine Reduzierung des Einsparpotentials gegenüber dem Referenzfall von 10,0 % auf 7,4 %.

Die Überschreitungsstunden und Übertemperaturgradstunden bleiben weitestgehend unverändert. Es kommt lediglich zu einer leichten Reduzierung der Überschreitungsstunden größer 26 °C (alt: 11 h, neu: 4 h) und der Übertemperaturgradstunden größer 26 °C (alt: 1,5 Kh, neu: 1,3 Kh). Dies führt zu einer durchschnittlichen Überschreitung von 0,3 K.

Optimierte freie Kühlung

Durch eine optimierte freie Kühlung mit verringerter Laufzeit ist es möglich den Kühlenergiebedarf um 25,5 % auf 23,1 kWh/a gegenüber dem Standardfall zu senken. Das Einsparpotential gegenüber dem Referenzfall ohne Begrünung erhöht sich gegenüber dem Standardfall von 24,5 % auf 32,0 %. Dabei ist eine minimale Erhöhung des Hilfsenergiebedarfs um 2,2 % bei nahezu unverändertem Einsparpotential gegenüber dem Referenzfall feststellbar. Dies resultiert zu einer Reduzierung um 6,9 % auf 88,2 kWh/a gegenüber dem Standardfall für den gesamten Endenergiebedarf und zu einer Zunahme des Einsparpotentials gegenüber dem Referenzfall von 10,0 % auf 11,3 %. (vgl. Abb. 71 und Tab. 11)

Betrachtet man die thermische Behaglichkeit in den Räumen ist jedoch eine deutliche Zunahme der Überschreitungsstunden größer 26 °C (alt: 11 h, neu: 100 h) und der Übertemperaturgradstunden größer 26 °C (alt: 1,5 Kh, neu: 34,4 Kh) erkennbar. Es kommt zu einer durchschnittlichen Überschreitung von 0,3 K (vorher: 0,1 K).

Nachtlüftung in Kombination mit optimierter freier Kühlung

Eine Kombination dieser beiden Varianten führt zu einer wesentlichen Reduzierung des Kühlenergiebedarfs um 50,8 % auf 15,2 kWh/a und zu einem Anstieg des Einsparpotentials gegenüber dem Referenzfall um 8,5 % auf 33,0 % im Vergleich zum Standardfall. Hinzu kommt ein leichter Anstieg des Hilfsenergiebedarfs um 5,0 % gegenüber dem Standardfall. Für den Gesamtenergiebedarf beutet dies eine Reduzierung um 13,3 % auf 82,1 kWh/a gegenüber dem Standardfall und eine Reduzierung des Einsparpotentials gegenüber dem Referenzfall um 0,1 % auf 9,9 %. (vgl. Abb. 71 und Tab. 11)

Die Überschreitungsstunden größer 26 °C (alt: 11 h, neu: 16 h) und Übertemperaturgradstunden größer 26 °C (alt: 1,5 Kh, neu: 2,7 Kh) steigen leicht an. Dies bedeutet eine durchschnittliche Überschreitung von 0,2 K.

Analog zu den Endenergiebedarfswerten verhalten sich die Werte hinsichtlich der CO₂-Emissionen.

Durch die Betriebsmodi freie Kühlung und Nachtaus Kühlung ist möglich den Kühlenergiebedarf deutlich zu reduzieren. Die minimal höheren Hilfsenergiebedarfswerte aufgrund der längeren Laufzeit der Lüftungsgeräte wirken sich hierbei nicht negativ auf den Gesamtenergiebedarf aus. Es zeigt sich weiterhin, dass mit einer optimierten Betriebsweise der dezentralen Fassadenlüftung höhere Einsparpotentiale gegenüber einer Fassade ohne Begrünungssystem erzielen lassen. Deutlich wird dies vor allem bei einer zusätzlichen Nachtaus Kühlung während der Nichtnutzungszeit.

3 Experimentelle Studien II (IBP)

Eingehende Darstellung

3.1 Allgemeines

Experimentelle Studien II

Das Arbeitspaket 7 „Experimentelle Studien II“ setzt sich zusammen aus folgenden Arbeiten:

Ermittlung von

- Gesamtenergie für Raumklimatisierung durch dezentrale Fassadenlüftungseinheiten
- Beeinflussung des Mikroklimas durch Funktionsmodell innerhalb des oberflächennahen Bereichs im Untersuchungsraum
- Lufttemperatur vor dem Funktionsmodell, im Raum zwischen Funktionsmodell und thermischer Fassadenhülle und im Innenraum
- Luftfeuchtigkeit vor dem Funktionsmodell, im Raum zwischen Funktionsmodell und thermischer Fassadenhülle und im Innenraum
- gesamtem solaren Wärmeeintrag über die Fassade
- gesamter adiabater Kühlwirkung der Fassadenbegrünung
- Tageslicht im Raum

Bewertung von

- Thermischer und visueller Behaglichkeit im Innenraum Beratung hinsichtlich ganzheitlicher Auswertung und Validierung der Messergebnisse

3.2 Versuchsaufbau

3.2.1 Versuchsräume

Die Untersuchungen werden am Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP an der Versuchseinrichtung für energetische und raumklimatische Untersuchungen VERU (Abb. 72) durchgeführt. Im 2. Obergeschoss des Gebäudes befinden sich südseitig zwei identische Versuchsräume (energetische Zwillingräume), die speziell für energetische Vergleichsmessungen konzipiert sind (Abb. 73). Durch hochgedämmte und temperierbare Hüllflächen können die Wärmeströme über die nicht versuchsrelevanten Innenbauteile auf ein Minimum begrenzt werden. Die beiden Räume haben jeweils eine Raumbreite von 3,60 m, eine Raumtiefe von 5,50 m und eine Höhe von 2,80 m (Tab. 12). Die Versuchsräume können zum thermisch-energetischen Vergleich unterschiedlicher baulicher und anlagentechnischer Komponenten oder Kontrollstrategien bedarfsabhängig angepasst werden. Einer der beiden Versuchsräume dient dabei als Referenz.



Abb. 72 Energetische Zwillingräume an der Versuchseinrichtung für energetische und raumklimatische Untersuchungen (VERU) (IBP)



Abb. 73 Grundriss der Zwillingräume (2. OG) (IBP)

Abmessungen (Innenmaße) B x T x H	[m]	3,6 x 5,6 x 3,1
Höhe (Fußboden bis Unterdecke)	[m]	2,8
Zugangstüren B x H	[m]	1,10 x 2,24
Nettogrundfläche	[m ²]	20,1

Eingehende Darstellung
Experimentelle Studien II

Tab. 12 Geometrie der Zwillingräume (IBP)



Abb. 74 Innenansicht des DFL-Gerätes während der Inbetriebnahme (IBP)

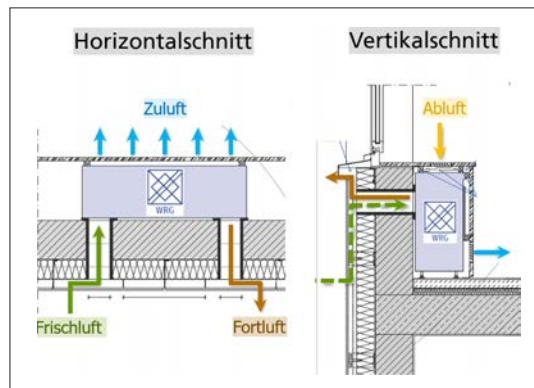


Abb. 75 Luftein- und -auslässe des DFL-Gerätes (TROX 10/2016)



Abb. 76 Frischluft- und Fortluftöffnung mit Insektenschutzgitter (IBP)



Abb. 77 Frischluft- und Fortluftöffnung am Testraum mit Abschottungen in 2021 (IBP)

Für die Untersuchungen mit den Grünfassaden wird die dreigeteilte Fassade in beiden Räumen in zwei Teile Fenster und Brüstung sowie ein Teil geschlossene Fassade unterteilt. Die dezentralen Fassadenlüftungsgeräte (DFL) sowie die Fassadenbegrünung im Testraum werden jeweils im Bereich der geschlossenen Fassade angebracht.¹

3.2.2 Sonnenschutz

Die beiden Fenster der Zwillingräume werden mit einem außenliegenden Sonnenschutz ausgestattet. Um mit den Messungen an der Versuchseinrichtung in Rednitzhembach (THN) vergleichbar zu sein, werden ebenfalls Raffstores AR 92 S M der Firma HELLA² in der Lamellenfarbe RAL 9006 (weißaluminium) in Kombination mit einem Jalousiemotor montiert.

3.2.3 Dezentrale Fassadenlüftungsgeräte (DFL)

Im Bereich der geschlossenen Fassade wird in jedem Raum, identisch wie im Fassadenver-

¹ Sinnesbichler, 2018

² HELLA Sonnenschutztechnik GmbH, Duisburg



Eingehende Darstellung
Experimentelle Studien II

Abb. 78 Anbringen des Begrünungssystems von Verticalgreendesign (VGD) (07.08.2020) (IBP)



Abb. 79 Begrünung 2020 (07.08.2020) (IBP)



Abb. 80 Begrünung 2020 (07.08.2020) (IBP)



Abb. 81 Begrünung 2021 (IBP)



Abb. 82 Begrünung 2021 (21.07.2021) (IBP)

suchsstand in Rednitzhembach (THN, Experimentelle Studien I), ein dezentrales Fassadenlüftungsgerät (DFL) FSL-B-ZAB/SEK³ eingebaut, das horizontal an der Brüstung montiert wird (Abb. 74).

Es handelt sich um ein Zu- und Abluftgerät mit Wärmerückgewinnung und Umschaltmöglichkeit auf Sekundärluftbetrieb. (Abb. 75) Die Luftein- und -auslässe werden mit einem Insektenschutzgitter abgedeckt (Abb. 76). Zur Sicherstellung, dass die Frischluftansaugung beim

3 TROX, 2018. Technische Daten (S. 45): Abluft- und Zuluftvolumenstrom bis 150 m³/h, Gesamt-Kühlleistung bis 690 W, Raum-Kühlleistung bis 400 W



Abb. 83 Schaltschrank zur Bewässerungssteuerung (IBP)



Abb. 84 Trennstation/ Vorlaufbehälter (IBP)



Abb. 85 Wasseranschluss über das Dach (IBP)

Eingehende Darstellung
 Experimentelle Studien II

Testraum hinter der Begrünung erfolgt, wird bei der Messung in 2021 eine Abschottung im Brüstungsbereich eingebaut; damit sich Frischluft und Fortluft nicht vermischen, wird außerdem eine Abschottung um den Fortluftauslass ergänzt. (Abb. 77)

3.2.4 Begrünung

Nach den ersten Messungen der verschiedenen Begrünungssysteme im Frühsommer 2020 in Rednitzhembach, sowie den dazugehörigen Simulationen an der Technischen Hochschule Nürnberg (THN-ieg), wird das Begrünungssystem von Verticalgreendesign (VGD) nach Holzkirchen transportiert und vor dem Testraum am VERU angebracht (Abb. 78). Der Abstand zwischen der Rückseite des Begrünungsmoduls und der Fassade bzw. der Luftzwischenraum beträgt ca. 20 cm.

Während der Messphase 2020 wurden aufgrund von Problemen mit der Bewässerung (Kapitel A4.1 und Abb. A39+A40 im Appendix) einige Pflanzen ausgetauscht. Auch nach der Überwinterung des Systems werden vertrocknete und erfrorene Pflanzen entfernt und die Bepflanzung wieder ergänzt (Kapitel A4.2 und Abb. A41+A44 im Appendix). Abb. 79 – 82 zeigen die Begrünungen in 2020 und 2021.

3.2.5 Bewässerung

Die Bewässerungsanlage Living-Wall Outdoor mit der webbasierten Steuerung (Abb. 83) wird im Technikbereich im 2. OG des VERU installiert. Zur Trennung von der Trinkwasserleitung wird das Wasser über eine Trennstation (Abb. 84) geführt. Anschließend wird dem Wasser Dünger zugegeben und es mittels einer Hochdruckpumpe über das Dach des Gebäudes von oben an die Begrünung (Abb. 85) gepumpt.

3.2.6 Messtechnische Ausstattung des Versuchsaufbaus

Zum Vergleich der beiden Versuchsszenarien im Referenzraum und im begrünten Testraum werden umfangreiche Messstellen vorgesehen, die in Tabelle 13 zusammengestellt sind. Die verwendete Messsensorik inklusive Angaben zu deren Genauigkeit und Kalibrierung, die Rechenkanäle sowie Informationen zur Messdatenerfassung sind im Kapitel A4.3 im Appendix zusammengefasst.

Im Raum sind zur Erfassung des Raumklimas zwei Messbäume aufgestellt. (Abb. 86+87) An der Fassade sind über die Höhe 3 Messachsen festgelegt. (Abb. 88+89) Die Randbedingungen bzw. Profile sowie die Einstellungen der Fassadenlüftungsgeräte und des Sonnenschutzes sind in Tabelle 14 zusammengefasst.

3.2.7 Überprüfung der Zwillingräume/ Nullmessung

Vor dem Start der eigentlichen Messungen 2020 sowie bei Wiederinbetriebnahme 2021 wird vor Anbringen der Begrünung die genaue Vergleichbarkeit der beiden Zwillingräume überprüft. Hierbei werden die folgenden Untersuchungen durchgeführt:

- Luftdichtigkeitsprüfung (Kapitel A4.4.1 im Appendix)
- Energieverbrauch bei Kühlung über die vorhandene TGA des Prüfstands (Kapitel A4.4.2 im Appendix)
- ... bei Kühlung durch die Fassadenlüftungsgeräte (Kapitel A4.4.3 im Appendix)
- ... bei Kühlung durch die Fassadenlüftungsgeräte vor Wiederinbetriebnahme 2021 (Kapitel A4.4.4 im Appendix)

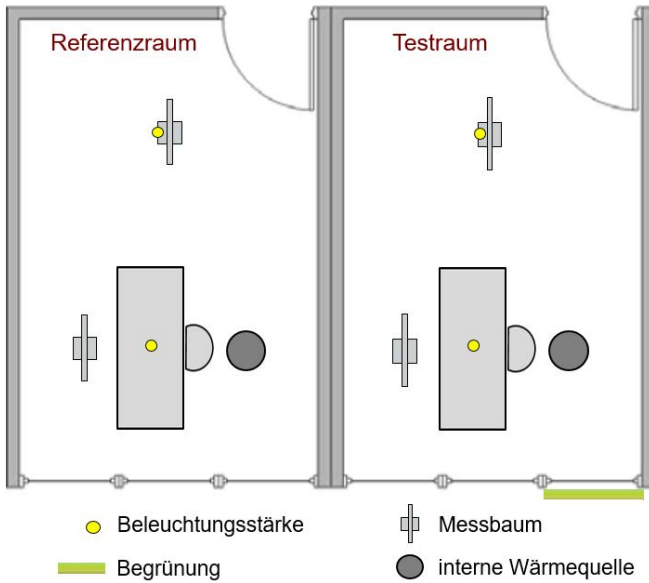


Abb. 86 Bürobelegung (1 Arbeitsplatz) Messräume. (IBP)



Abb. 87 Messaufbau in den Räumen. (IBP)

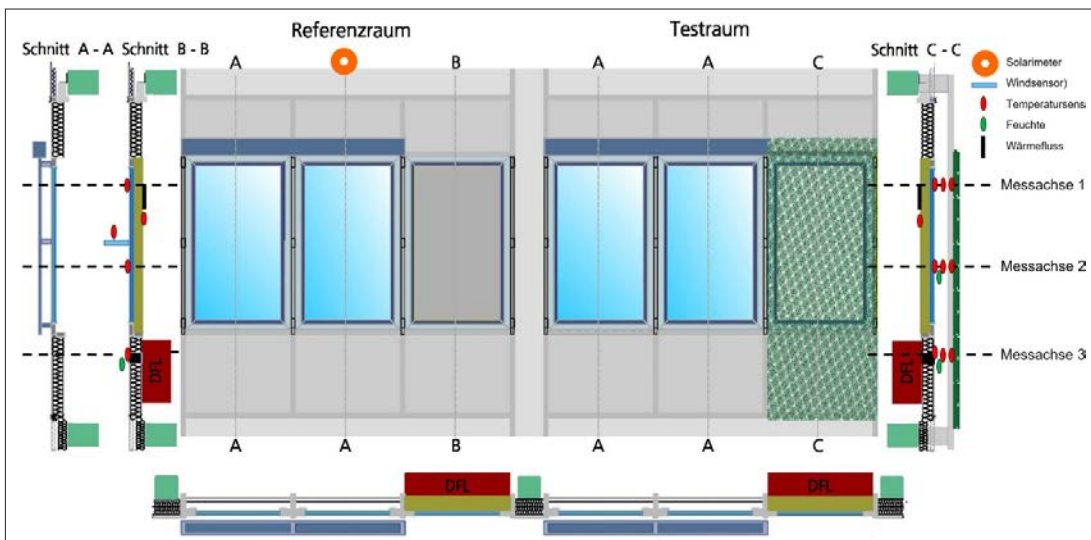


Abb. 88 Messachsen und Position der Sensorik an Fassade. Ansicht und Prinzipschnitte, o. M. (IBP)



Abb. 89 Außenansicht des Messaufbaus an der Fassade. (IBP)

Messgrößen		Wo / wie wird gemessen?	
Wetter- bedingungen	Außenlufttemperatur Südstrahlung Windgeschwindigkeit	Wetterstation VERU-Fassade VERU-Fassade	Abb. 88 Abb. 89
Raumklima	Lufttemperaturen (versch. Höhen) Globetemperatur (h = 1,1 m) relative Luftfeuchte (h = 1,1 m)	Messbaum 1 + 2 Messbaum 1 Messbaum 1	Abb. 86 Abb. 87
Beleuchtung	Beleuchtungsstärke vorne Beleuchtungsstärke hinten	Schreibtisch hinterer Raumbereich	Abb. 86 Abb. 87
Außenklima Fassade	Lufttemperaturen Oberflächentemperaturen relative Luftfeuchte	Messachse 1 - 3 Messachse 1 - 3 Messachse 1 + 2	Abb. 88 Abb. 89
Dezentrale Lüftungsgeräte (DFL)	Frischlufftemperatur Zulufttemperatur Ablufttemperatur Fortlufttemperatur Luftvolumenstrom Vorlauftemperatur Rücklauftemperatur Volumenstrom thermische Leistung elektrische Leistung	DFL (Messung + DFL-intern ⁴) DFL (Messung + DFL-intern) DFL (Messung + DFL-intern) DFL (Messung + DFL-intern) DFL (Messung + DFL-intern) DFL (DFL-intern) Raumgrenze + Gerätegrenze Raumgrenze + Gerätegrenze Raumgrenze + Gerätegrenze Rechenkanal DFL	Abb. 90

Eingehende Darstellung
Experimentelle Studien II

Tab. 13 Zusammenstellung der Messsensorik (IBP)

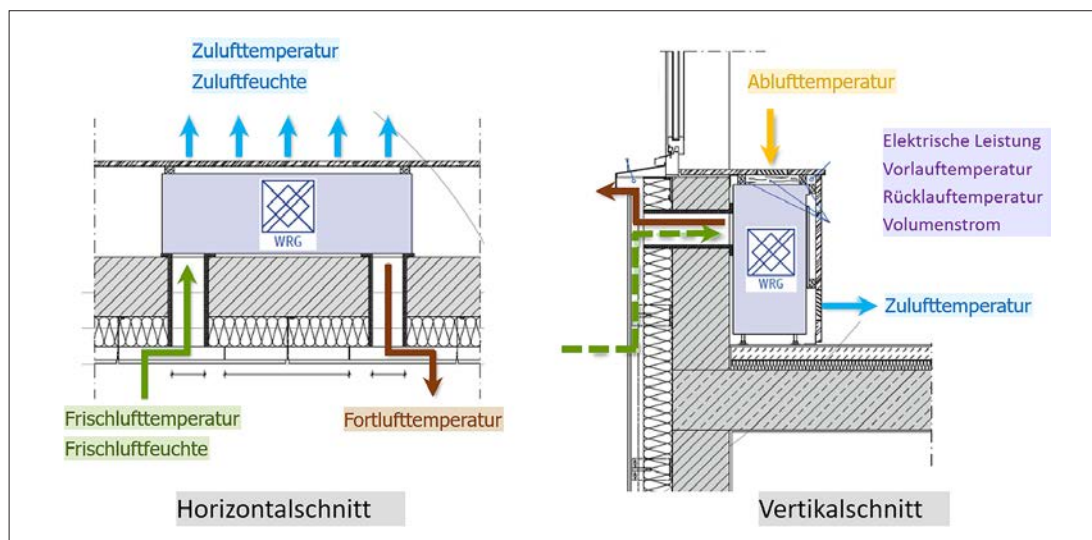


Abb. 90 DFL Messgrößen (TROX 10/2016)

Auswertezeitraum		1	2	3	4
		02.09.20 - 09.09.20	12.09.20 - 24.09.20	07.08.21 - 13.08.21	01.09.21 - 16.09.21
Profile	Arbeitszeit	7:00 h – 17:00 h			
	interne Wärmequellen während der Arbeitszeit	100 W			
Dezentrale Fassadenlüftungsgeräte (DFL)	Zeitprofil (Montag bis Sonntag)				
	Regelstrategie	Raumtemperaturregelung			
	min. Außentemperatur für aktives Kühlen	10,0 °C			
	Solltemperatur Kühlen	24,0 °C			
	Zulufttemperatur	13,0 °C – 42,0 °C			
	Raum- / Ablufttemperaturabweichung bei max. Lüfterstufe	3,0 K	1,5 K	1,5 K	1,5 K
	Hystereseschwelle für Zulufttemperatur	1,0 K	0,2 K	0,2 K	0,2 K
	Sonnenschutz	Südstrahlung > 180 W/m ²	Cut-Off	Sonnenschutz fährt runter, Lamellenstellung: geschlossen	
Südstrahlung < 100 W/m ²		Sonnenschutz fährt hoch			
Begrünung	Begrünungssystem	Verticalgreendesign			
	Gießzeiten	5 x 2 min: 6:00 h / 9:30 h / 13:00 h / 16:30 h / 20:00 h			
	Dünger	kontinuierlich 0,69 ml/l (Peters Excel Hard Water Grow)			

Tab. 14 Einstellungen/ Randbedingungen (IBP)

3.3 Auswertung

3.3.1 Allgemeines

Die Messdatenverläufe in der Auswertung werden in Sommerzeit dargestellt. Soweit nichts anderes vermerkt ist, sind 1-min-Mittelwerte dargestellt. In diesem Abschnitt werden beispielhaft nur die Messdaten des 15. September 2020 dargestellt. Die Diagramme aller vier Beispieltage sind im Kapitel A4.5 im Appendix zu finden

3.3.2 Auswerteziträume

Die Auswertung der Daten erfolgt in 4 Zeiträumen (Randbedingungen Tab. 14):

- Auswertezeitraum 1: 2. September 2020 bis einschl. 9. September 2020
- Auswertezeitraum 2: 12. September 2020 bis einschl. 24. September 2020
- Auswertezeitraum 3: 7. August 2021 bis einschl. 13. August 2021
- Auswertezeitraum 4: 1. September 2021 bis einschl. 16. September 2021

Die vorherrschenden Wetterbedingungen im Jahr 2020 sind in Abb. 91, die im Jahr 2021 in Abb. 92 dargestellt. Dabei wurde die Außentemperatur an der Wetterstation (vgl. Kapitel A4.3 im Appendix), die Südstrahlung sowie die Windgeschwindigkeit direkt an der Versuchsfassade am VERU gemessen. (Abb. 88+89)

Am 10. und 11. September 2020 erfolgte nach Rücksprache mit dem Hersteller noch einmal eine Anpassung der DFL-Regelungen (Tab. 14). Die wesentlichen Messergebnisse des gesamten Auswertezitraums sind in Tabelle 15 zusammengefasst (einzelne Auswerteziträume vgl. Tab. A30 im Appendix).

Eine detaillierte Auswertung erfolgt für 4 einzelne Tage mit hoher solarer Einstrahlung und hoher Außentemperatur. Dafür wird jeweils ein Tag pro Auswertezitraum ausgewählt:

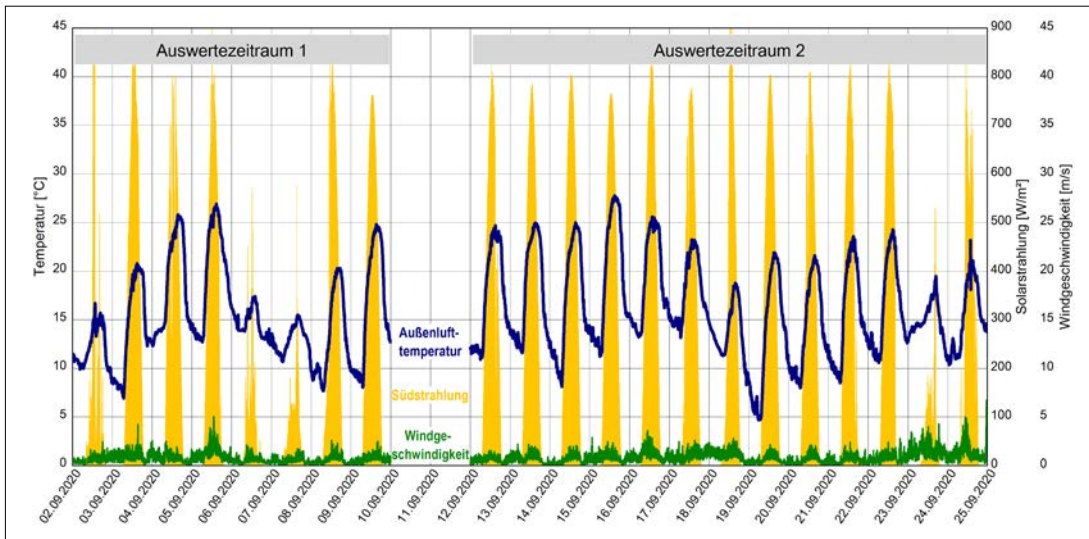
- Auswertezeitraum 1: 9. September 2020
- Auswertezeitraum 2: 15. September 2020
- Auswertezeitraum 3: 13. August 2021
- Auswertezeitraum 4: 14. September 2021

Die Wetterbedingungen vom 15. September 2021 sind in Abb. 93 dargestellt, die aller Beispieltage finden sich Abb. A61-A64 im Appendix.

Auswertezeitraum Dauer (DFL-Betrieb)		Gesamtauswerte zeitraum 2020 / 2021 44 d \triangleq 528 h	
Raum		Referenz	Test
Südstrahlung (VERU, direkt vor Fassade)	[W/m ²]	331	
Außenlufttemperatur (Wetterstation)	[°C]	17,7	
Raumlufttemperatur (Messbaum Fenster 1,1 m)	[°C]	23,9	23,8
Rel. Luftfeuchte (1,1 m)	[%]	47	50
Messachse M3 (Abb. 14)			
Fassadenoberflächentemperatur	[°C]	22,8	20,0
Zwischenraumtemperatur	[°C]	-	19,4
Temperatur in Begrünung	[°C]	-	18,2
Temperatur Frischluft	[°C]	19,9	19,7
Temperatur Zuluft	[°C]	18,9	19,1
Temperatur Abluft	[°C]	23,5	23,5
Temperatur Fortluft	[°C]	21,6	21,6
Therm. Kühlenergie (wasserseitig)	[kWh]	-45,0	-38,9
Einsparung Testraum / Referenzraum	[%]		-14%
Elektr. Energie (5 h – 17 h)	[kWh]	12,2	11,5
Elektr. Energie (17 h – 5 h) DFL-StandBy	[kWh]	5,3	5,5
Elektr. Energie gesamt (0 h – 24 h)	[kWh]	17,5	17,0
Therm. Energie (raumseitig, Luft-Kühlung)	[kWh]	-78,3	-72,6

Eingehende Darstellung
 Experimentelle Studien II

Tab. 15 Mittelwerte bzw. kumulierte Werte (Gesamtauswertezeitraum) während des DFL-Betriebs (Betriebszeit 5 h – 17 h entspricht 12 h/d).(IBP)



Eingehende Darstellung
Experimentelle Studien II

Abb. 91 Wetterbedingungen in 2020 (IBP)

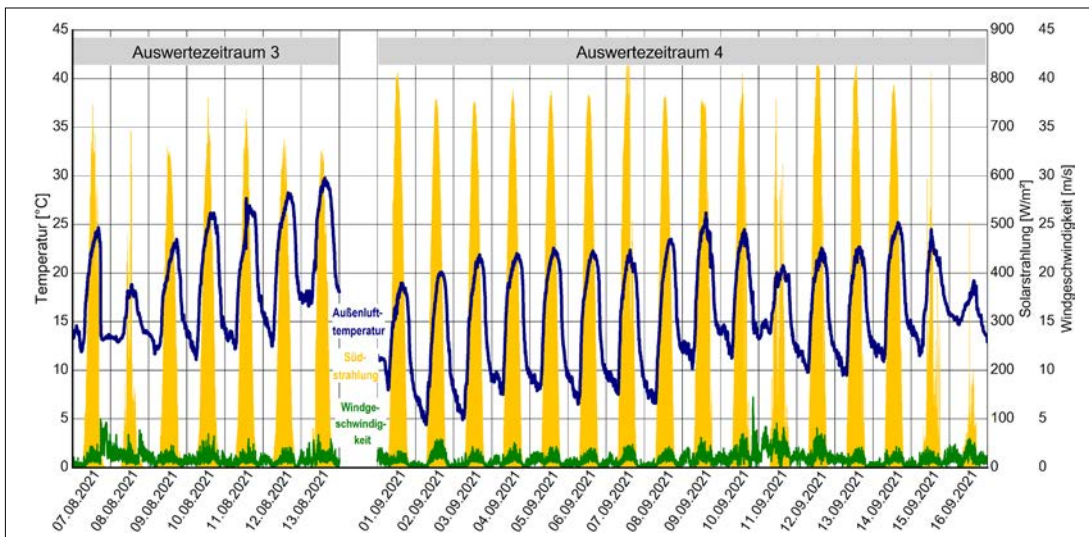


Abb. 92 Wetterbedingungen in 2021 (IBP)

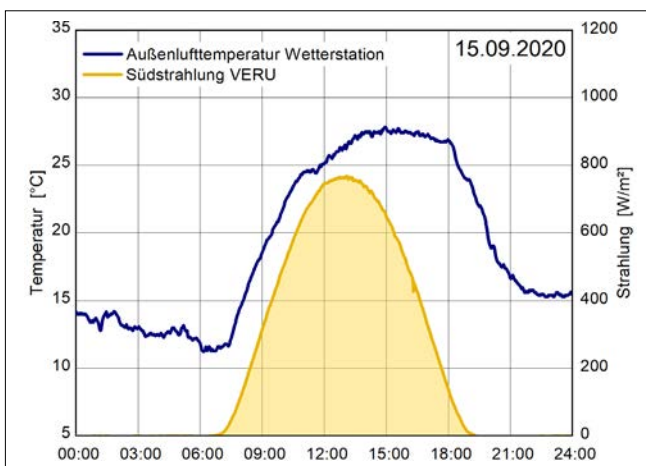


Abb. 93 Wetterbedingungen am 15.09.2020 (IBP)

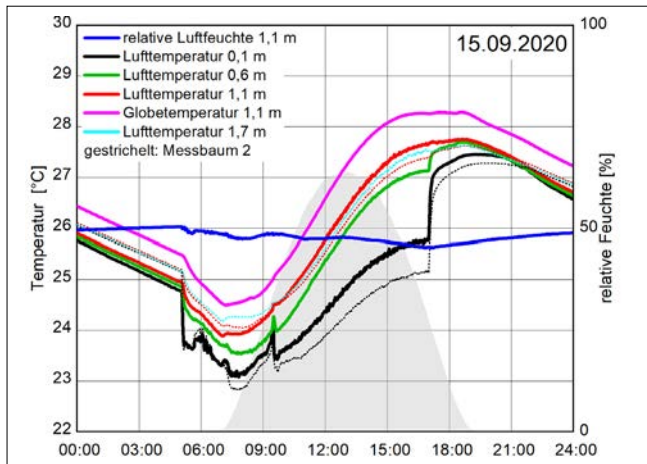


Abb. 94 Raumklima – Referenzraum am 15.09.2020 (IBP)

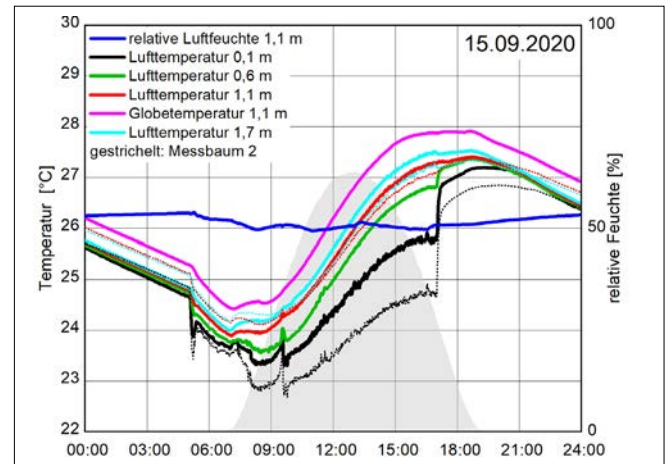


Abb. 95 Raumklima – Testraum am 15.09.2020 (IBP)

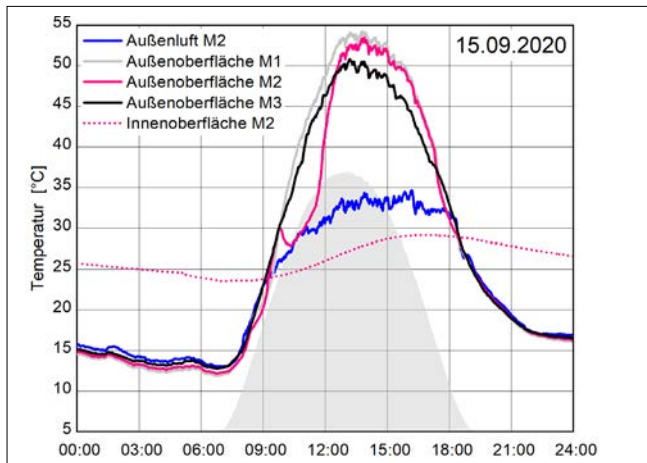


Abb. 96 Fassadenklima – Referenzraum am 15.09.2020 (IBP)

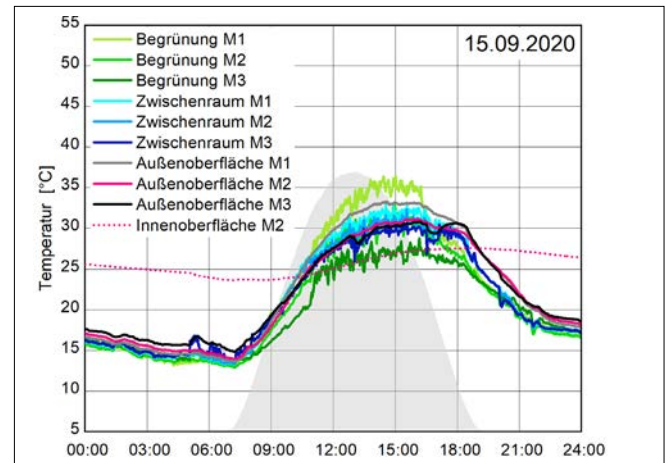


Abb. 97 Fassadenklima – Testraum am 15.09.2020 (IBP)

3.3.3 Raumklima und Fassade

Zur Bewertung des Raumklimas werden Lufttemperaturen auf verschiedenen Höhen, die Globetemperatur, sowie die relative Luftfeuchte erfasst (Tab. 13). Die entsprechenden Verläufe werden für den 15. September 2020 dargestellt (Referenzraum Abb. 94, Testraum Abb. 95). Die Verläufe aller Beispieltage finden sich in Abb. A65-A72 im Appendix.

In allen Lufttemperaturverläufen ist der Betriebsstart der dezentralen Fassadenlüftungsgeräte um 5:00 Uhr durch einen Temperatursprung erkennbar. Bei Beginn der Arbeitszeit um 7:00 Uhr steigen die Temperaturen durch den Betrieb der internen Wärmequellen und den Anstieg der solaren Einstrahlung. Die Temperaturen steigen im Referenzraum etwas höher als im begrünten Testraum. Da sich beide Räume über die gewünschte Maximaltemperatur erwärmen zeigt dies, dass die dezentralen Lüftungsgeräte an diesem Tag an ihrer Leistungsgrenze arbeiten.

Am 15. September 2020 betragen die Temperaturen um 17 h (entspricht Ende der Arbeitszeit sowie Ende der Betriebszeit des DFL) auf 27,7 °C im Referenzraum und 27,3 °C im Testraum.

Die Verläufe der Temperaturen an der Innen- und Außenoberfläche der Fassade, sowie die der fassadennahen Temperaturen sind für den 15. September 2020 in den folgenden Diagrammen dargestellt (Referenzraum Abb. 96, Testraum Abb. 97; vgl. Messachsen M1 (oben) bis M3 (unten) in Abb. 88). Die Verläufe für alle Beispieltage finden sich in Abb. A73-A80 im Appendix.

Vergleicht man die Temperaturen der Außenoberflächen von Test- und Referenzraum, sieht man an jeweiligen Tagen, dass die Maximalwerte der Außenoberflächentemperaturen am Referenzraum ca. 20 K über denen am Testraum hinter der Begrünung liegen.

Die Temperaturverläufe und die Wärmeströme an der Innenoberfläche der opaken Fassadenelemente sind für den 15. September 2020 in Abb. 98 dargestellt; Referenzraum

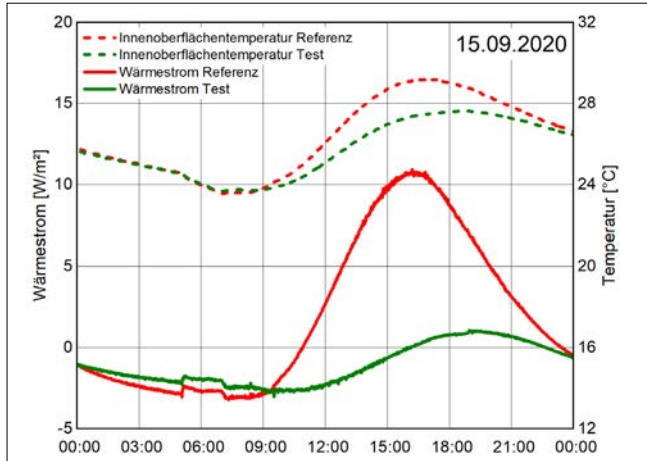


Abb. 98 Wärmeströme und Innenoberflächentemperaturen der opaken Bauteile am 15.09.2020 (IBP)

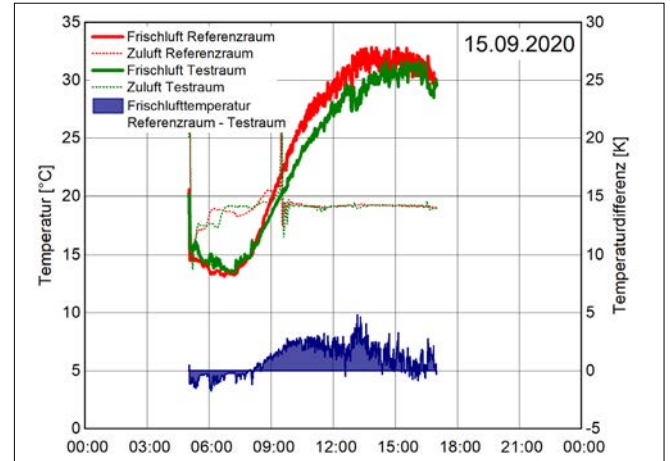


Abb. 99 Ansaug- bzw. Frischluft- und Zulufttemperatur am 15.09.2020 (IBP)

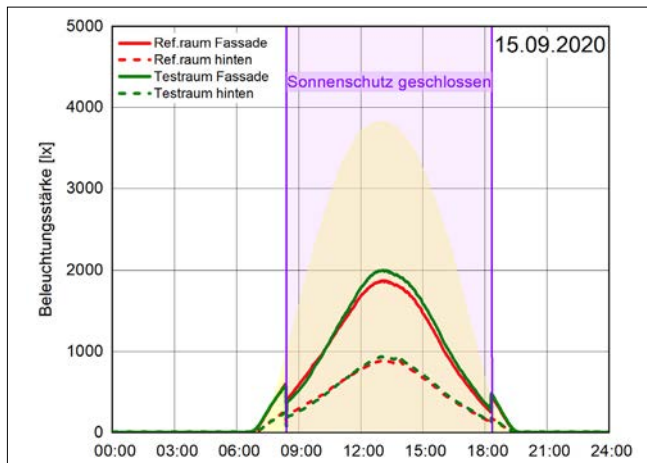


Abb. 100 Beleuchtungsstärke und Sonnenschutz (Cut-Off) am 15.09.2020 (IBP)

(rot) und Testraum (grün). Alle Beispieltage finden sich Abb. A81-A84 im Appendix. Hier ist erkennbar, dass aufgrund der höheren Temperaturen an der Außenoberfläche des Referenzraums auch die Temperaturen an der Innenoberfläche (knapp 2 K) und die Wärmeströme (bis zu 10 W/m²) über denen der begrünten Fassade liegen.

Die Verläufe der Feuchtemessungen für die beiden Tage sind in Abb. A85-A88 im Appendix dargestellt. Dabei ist am Verlauf der relativen Feuchte, die vor dem Testraum in Höhe von Messachse 3 gemessen wird (grüne Kurve), der Einfluss der Bewässerung zu erkennen.

3.3.4 Beleuchtungsstärke und Sonnenschutz

Der Sonnenschutz wird mit Hilfe der Südstrahlung (gemessen an der VERU-Fassade) gesteuert (Tab. 14). Hierbei wurden folgende Schaltkriterien definiert:

- Südstrahlung > 180 W/m² → Sonnenschutz zu (Cut-Off-Stellung)
- Südstrahlung < 100 W/m² → Sonnenschutz auf

Am 15. September 2020 ist der Sonnenschutz tagsüber geschlossen (Cut-Off) (Abb. 100). Alle Beispieltage finden sich in Abb. A89-A92 im Appendix (dabei stehen die Lamellen in den Auswertungszeiträumen 1, 2 und 4 auf Cut-Off, während die Lamellen im Auswertungszeitraum 3 ganz geschlossen sind).

Die Beleuchtungsstärke, die im vorderen und hinteren Bereich der Räume gemessen wird, ist in den beiden Räumen annähernd gleich. Hierdurch ist anzunehmen, dass auch die Neigung der Sonnenschutz-Lamellen der einzelnen Behänge identisch und somit die solare Einstrahlung in die Räume vergleichbar ist.

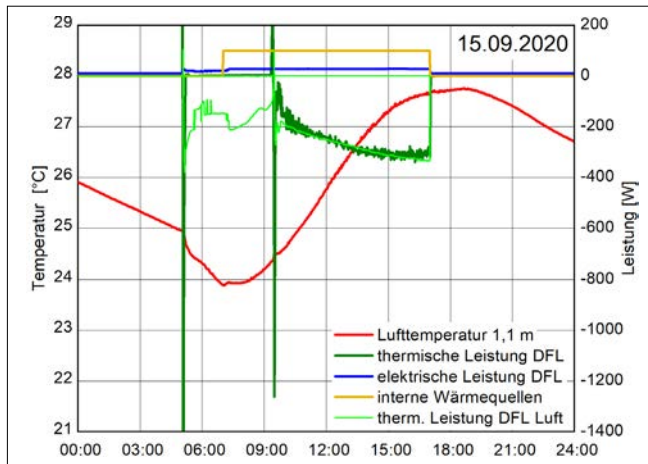


Abb. 101 Dezentrale Fassadenlüftungsgeräte – Referenzraum 15.09.2020 (IBP)

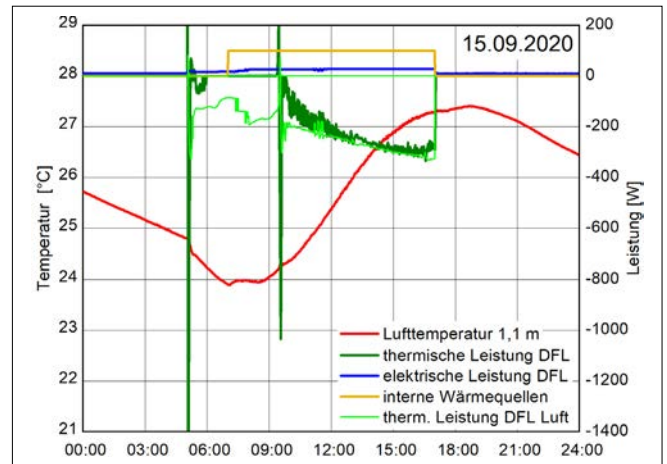


Abb. 102 Dezentrale Fassadenlüftungsgeräte – Testraum 15.09.2020 (IBP)

		thermische Energie wasserseitig*		thermische Energie raumseitig (Luft)*		elektrische Energie	
		Referenz	Test	Referenz	Test	Referenz	Test
09.09.2020	[kWh] [%]	-0,94 100%	-0,71 75%	-1,28 100%	-1,05 82%	0,34 100%	0,33 95%
15.09.2020	[kWh] [%]	-2,10 100%	-1,89 90%	-2,76 100%	-2,58 94%	0,43 100%	0,41 94%
13.08.2021	[kWh] [%]	-2,44 100%	-1,89 78%	-2,31 100%	-1,98 86%	0,41 100%	0,37 90%
14.09.2021	[kWh] [%]	-1,88 100%	-1,68 90%	-2,32 100%	-2,15 93%	0,43 100%	0,43 100%
gesamter Auswertzeitraum (44 Tage)	[kWh] [%]	-45,0 100%	-38,9 86%	-78,3 100%	-72,5 93%	17,5 100%	17,0 97%

Tab. 16 Energie der DFL an den 4 Beispieltagen und im Gesamtauswertzeitraum (44 d) (IBP)
* Berechnung siehe Tab. A26 im Appendix

3.3.5 Lüftungsgeräte

Den Verlauf der thermischen und elektrischen Leistung der dezentralen Fassadenlüftungsgeräte, sowie der internen Wärmequellen (während der Arbeitszeit von 7 h bis 17 h) und der Lufttemperatur auf 1,1 m Höhe am Schreibtisch des 15. Septembers 2020 zeigt für den Referenzraum Abb. 101 und den Testraum Abb. 102. Alle Beispieltage finden sich in Abb. A93-A100 im Appendix.

Da die dezentralen Fassadenlüftungsgeräte an den Beispieltagen an ihrer Kapazitätsgrenze arbeiten, steigt die Raumlufttemperatur im Referenzraum an allen vier Tagen höher als im Testraum. Vergleicht man die thermischen Leistungen der DFL in beiden Räumen, so liegt sie an allen Beispieltagen im Testraum niedriger als im Referenzraum. Die Einsparung beim thermischen Energieverbrauch (wasserseitig) liegt an den Beispieltagen zwischen 10 % und 25 %, bezogen auf den gesamten Auswertzeitraum ergibt sich eine Einsparung von 14 %. (Tab. 16)

Die Ansaugtemperaturen (Frischlufte) und die Zulufttemperaturen der DFL-Geräte in beiden Räumen, sowie die Differenz zwischen der Ansaugtemperatur (Frischlufte) von Referenzraum und Testraum am 15. September 2020 zeigt Abb. 99. Die entsprechenden Verläufe an den

Beispieltagen sind Abb. A101-A104 im Appendix dargestellt.

Morgens ist die Frischlufttemperatur im Testraum zunächst höher, da sie aus dem geschützten Bereich hinter der Begrünung, der über Nacht nicht so sehr auskühlt, angesaugt wird. Über den Tag liegt die Ansaugtemperatur für den Testraum niedriger, da sich der Ansaugbereich, geschützt durch die Begrünung, nicht so stark aufheizt. Abb. A105 im Appendix zeigt einen Boxplot der Frischlufttemperatur (entspricht Ansaugtemperatur) der DFL-Geräte für den gesamten Auswertzeitraum in 2020 und 2021 (entspricht 44 Tage). Dabei ist zu sehen, dass die Mittelwerte bzw. Mediane der Temperaturen im Testraum etwas tiefer liegen als im Referenzraum. Außerdem ist der Bereich, in dem sich 50% der Werte liegen, im Testraum etwas kleiner als im Referenzraum.

Eingehende Darstellung

Experimentelle Studien II

4 Analyse und interdisziplinäre Bewertung des Leistungspotentials

Eingehende Darstellung

4.1 Ergebnisse „Experimentelle Studien I“ (THN)

Analyse, Fazit

Zur Beurteilung des Kühl- und Verschattungspotentials von verschiedenen Grünfassaden in Kombination mit fassadenintegrierter dezentraler Gebäudetechnik sind Messreihen unterschiedlicher Begrünungssysteme an dem Fassadenversuchsstand in Rednitzhembach (THN, Experimentelle Studien I) durchgeführt worden.¹ Hierbei wurde zwischen einer Ansaugung im oberen und unteren Brüstungsbereich unterschieden.

Weiterhin erfolgten hierzu detaillierte Berechnungsmodelle in der thermisch-energetischen Gebäudesimulationsumgebung TRNSYS und der numerischen Strömungssimulationsumgebung ANSYS/ FLUENT.

Folgende Begrünungssysteme werden hierbei betrachtet:

- flächiges, wandgebundenes System der Fa. Vertiko GmbH, Buchenbach
- modulares, wandgebundenes System der Fa. Verticalgreendesign (VGD) GmbH, Berlin
- Mischsystem (Regalsystem) der Fa. Kramer Gartenbau, München
- bodengebundenes System mit Kletterpflanzen der Fa. Jakob Rope Systems, Ostfildern

In den Messungen am Fassadenversuchsstand wurde ersichtlich, dass eine Ansaugung im unteren Brüstungsabschnitt etwas günstigere Ansaugtemperaturen und damit ein größeres Einsparpotential hinsichtlich des Kühlenergieverbrauchs gegenüber dem Referenzfall liefert. Die Messungen zeigen maximale Ansaugtemperaturdifferenzen zwischen dem Referenzfall und den Begrünungssystemen von +1,2 K (System Jakob, Ansaugung oben) und +3,8 K (System Kramer, Ansaugung unten). Das wird auch in den numerischen Strömungssimulationen bestätigt. Diese Ansaugtemperaturdifferenz führt zu einer Einsparung des Kühlenergieverbrauchs zwischen 18,5 % (System Jakob, Ansaugung oben) und 37,6 % (System Kramer, Ansaugung oben) gegenüber dem Referenzfall.

Thermisch-dynamische Simulationsberechnungen zeigen ein Einsparpotential beim Kühlenergiebedarf und bei den CO₂-Emissionen für die Musterräume des Fassadenversuchsstands zwischen 22,6 % (System Jakob) und 43,0 % (System Verticalgreendesign (VGD)). Für ein Einzelbüro beträgt das Einsparpotential zwischen 6,9 % (System Jakob) und 24,5 % (System Verticalgreendesign (VGD)).

Im Vergleich zu den Ergebnissen für den Fassadenversuchsstand stellen sich für das Einzelbüro geringere Einsparpotentiale ein. Die Unterschiede reichen von -18,5 % (Verticalgreendesign (VGD)) bis -13,5 % (Vertiko). Dies bedeutet, dass der Energiebedarf und somit das Einsparpotential gegenüber einer Fassade ohne Begrünung auch vom Raum (Geometrie, Fensterflächenanteil, Wärmedurchgangskoeffizienten etc.) und dessen Nutzung abhängt. So führt zum Beispiel ein besserer Wärmedurchgangskoeffizient der Fassade hinter dem Begrünungssystem zu einem geringeren Einsparpotential.

Die Differenzen der einzelnen Systeme untereinander sind auf die unterschiedlichen geometrischen, biophysikalischen und spektralen Eigenschaften der Systeme an sich und auf die in den jeweiligen Begrünungen berücksichtigten Pflanzenarten zurückzuführen. Hierbei spielen vor allem der Oberflächenwiderstand der Blätter und der Wassersättigungsgrad des Substrats/ Erdreichs eine Rolle.

Andere Parameter wie der Albedo des Blattwerks oder der Blattdurchmesser zeigen nur einen geringen Effekt. Vor allem der Einfluss des Substrats auf das Kühlpotential zeigt sich im teils deutlich geringeren Einsparpotential für das bodengebundene System der Firma Jakob Rope Systems.

Weitere Einflussparameter sind die Größe und die Verortung der Begrünung. So zeigt ein vollflächig installiertes System einen größeren Effekt als ein nur im Brüstungsbereich vorgesehenes System. Jedoch fällt diese Wirkung hinsichtlich des Energiebedarfs im Wesentlichen gering aus. So führt eine großflächig begrünte Fassade zu einem um 4,0 % geringeren Kühlenergiebedarf.

Dies eröffnet bei der Planung von Funktionsflächen in der Fassade (unter den gegebenen Rahmenbedingungen wie U-Wert der Konstruktion und Ansaugort) gewisse Freiheitsgrade. So steht einer Reduzierung der Begrünungsfläche von einem geschosshohen Fassadenfeld auf den Brüstungsbereich um etwa zwei Drittel ein vergleichsweise geringer Kühlenergiebedarf gegenüber. Diese Flächen könnten unter anderem für den Einsatz von Photovoltaikmodulen genutzt werden.

Allerdings sind in dem Projekt keine konkreten, zahlenmäßige Flächenabschätzungen bzw. -relationen ermittelt worden; dies wäre ein Arbeitspaket für ein Folgeprojekt, unter Berücksichtigung von baulichen Lösungsprinzipien sowie Integrationsanforderungen (Abmessungen und Proportionen) in Fassaden- und Wandkonstruktionen. Ferner wäre zu prüfen,

¹ Zu den Methoden und Bewertungskriterien vgl. Kapitel II/ 2.1 Messungen am Fassadenprüfstand THN und 2.2 Simulationsberechnungen und Abgleich mit Messergebnissen

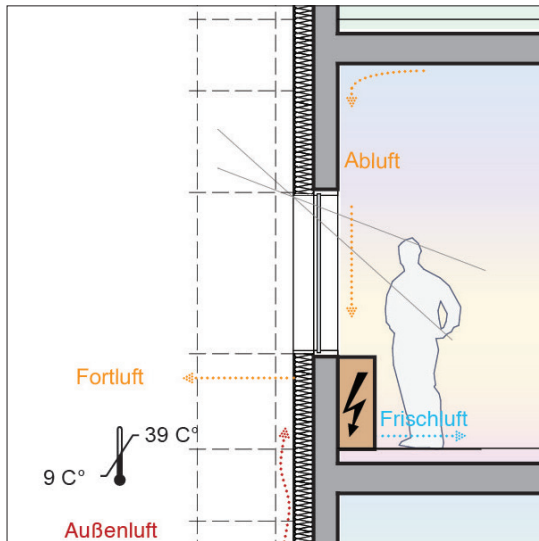


Abb. 103 Vergleich einer beispielhaften Temperaturentwicklung an Fassadenoberflächen an einem Sommertag, ohne Begrünung (THN-AR)

- Solarstrahlung erhitzt die Fassadengrenzschicht stark.
- UV – Strahlung und unkontrolliertes Wasser lässt die Fassade altern.
- Warme Aufwinde an der Fassade erschweren das natürliche Lüften.
- Es wird viel Energie zur Kühlung und Erwärmung der Frischluft benötigt.

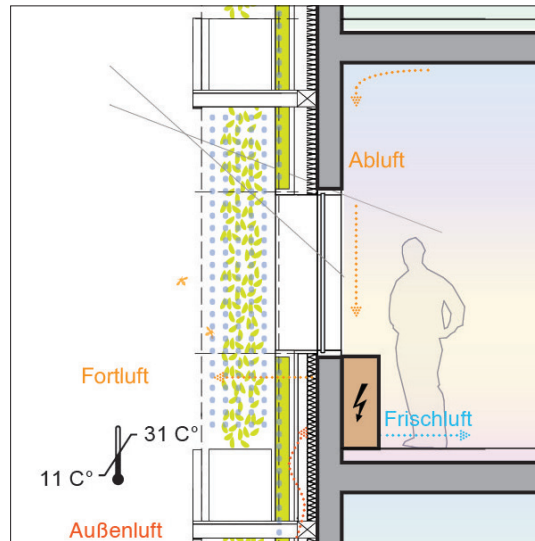


Abb. 104 mit Begrünung (THN-AR); durch Kombination mit DFL kann breites Spektrum von positiven Effekten erzielt werden (THN-AR)

- Fassadenbegrünung kühlt das gebäudenahere Umfeld durch Evapotranspiration.
- Frischluft wird durch die Fassadenbegrünung vorkonditioniert.
- In den Morgenstunden ist die Luft wärmer, in der Tagesmitte gekühlt.

Eingehende Darstellung
Analyse, Fazit

ob die Mehrinvestition an begrünter Fläche in Verbindung mit höheren Betriebskosten für zusätzliche Bewässerung noch rentabel sind.

Die Betriebsweise der dezentralen Fassadenlüftung, unter Berücksichtigung der Betriebsmodi freie Kühlung und Nachtauskühlung, wirkt sich positiv aus. So kann hierbei der Kühlenergiebedarf einer Zone mit Begrünungssystem (bis zu 51 %) und auch im Vergleich zu einem Referenzfall ohne Begrünungssystem (bis zu 33 %) erheblich reduziert werden. So führt eine Optimierung der Betriebsweise der dezentralen Fassadenlüftung zu einer Reduzierung des Kühlenergiebedarfs um 25,5 % gegenüber dem Standardfall und zu einer Reduzierung gegenüber dem Referenzfall ohne Begrünungssystem um 7,5 %.

Sind die dezentralen Fassadenlüftungsgeräte hinsichtlich ihrer Raumkühlleistung ausreichend dimensioniert, so sind keine Einschränkungen hinsichtlich der thermischen Behaglichkeit in Form von Überschreitungshäufigkeiten zu erwarten.

Eine im Vorfeld des Projekts durchgeführte Simulationsstudie² zeigt den Energiebedarf für die Raumlufttechnik eines Versuchsraumes ohne und mit Fassadenbegrünung auf. Die Ergebnisse stellen ein hohes Einsparpotential (18 % bis 48 %) für den Kühlenergiebedarf von dezentralen Fassadenlüftungsgeräten in Kombination mit einem bodengebundenen Begrünungssystem in Aussicht. (vgl. Tab. 1) Dieses Einsparpotential konnte in dem Projekt für die untersuchten Systeme sowohl in den Messungen (18,5 % bis 37,6 %) als auch in den Simulationsbetrachtungen für den Fassadenversuchsstand sowie für einen Einzelbüroraum (6,9 % bis 43,0 %) bestätigt werden. Lediglich bei den Simulationsbetrachtungen für das bodengebundene System der Firma Jakob für das Einzelbüro zeigt sich ein geringeres Einsparpotential (6,9 %) gegenüber der Vorstudie.

4.2 Ergebnisse „Experimentelle Studien II“ (IBP)

Anschließend an die Experimentellen Studien I in Rednitzhembach folgten die Experimentellen Studien II am Fraunhofer IBP in Holzkirchen. Dabei wird der Einfluss einer Fassadenbegrünung an den Zwillingerräumen des VERU (Versuchseinrichtung für energetische und raumklimatische Untersuchungen), die speziell für energetische Vergleichsmessungen konzipiert sind, untersucht. Beide Räume, mit einer Grundfläche von jeweils 20 m², wurden

wie am Fassadenversuchsstand in Rednitzhembach jeweils mit einem dezentralen Fassadenlüftungsgerät (DFL) ausgestattet.

Eingehende Darstellung

Nach Einbau der dezentralen Lüftungsgeräte erfolgten Nullmessungen, die eine sehr gute thermische und energetische Vergleichbarkeit der beiden Räume zeigten. Anschließend wurde vor einem Element der dreigeteilten Fassade am Testraum die Fassadenbegrünung von Verticalgreendesign (VGD) installiert. Die Messungen sind im September 2020, sowie im August und September 2021 durchgeführt worden. Insgesamt wurden 44 Tage, unterschieden in 4 Auswertezitrräumen mit leicht unterschiedlichen Versuchsrandbedingungen (Tab. 14) ausgewertet. Während eines Auswertezittraumes waren die Randbedingungen jeweils für Referenz- und Testraum identisch.

Analyse, Fazit

Im Folgenden sind die wesentlichen Ergebnisse der Untersuchungen zusammengefasst:

- An warmen Tagen mit hoher solarer Einstrahlung, wie an den exemplarisch ausgewählten Beispieltagen (vgl. Kapitel 3.3.2), steigt die Raumlufttemperatur im Referenzraum immer etwas höher als im Testraum, da das DFL an seiner Kapazitätsgrenze arbeitet.
- Die Ansaugtemperaturen (Frischlufftemperaturen) an den dezentralen Lüftungsgeräten liegen im Testraum (mit Begrünung) morgens zunächst um ca. 1–2 K höher als beim Referenzraum, da sich die Luft hinter dem geschützten Bereich der Begrünung über Nacht nicht so sehr abkühlt. Über den Tag, insbesondere bei hoher solarer Einstrahlung, liegt die Ansaugtemperatur beim Testraum um bis zu 3–4 K niedriger als beim Referenzraum, da sich der Ansaugbereich, geschützt durch die Begrünung, nicht so stark aufheizt.
- Ergänzend zur niedrigeren Ansaugtemperatur bewirkt die Fassadenbegrünung auch eine Verschattung der opaken Fassadenfläche. Dies wirkt sich im Sommer positiv auf die resultierenden Innenoberflächentemperaturen der Fassade aus. Die Temperatur- und Wärmestromverläufe an der Innenoberfläche der opaken Fassadenelemente zeigen, dass aufgrund der höheren Temperaturen an der Außenoberfläche des unverschatteten Referenzraums auch die Temperaturen an der Innenoberfläche (knapp 2 K) und die Wärmeströme (bis zu 10 W/m²) über denen der begrüneten Fassade liegen.
- Die Maximalwerte der Außenoberflächentemperaturen an der Fassade liegen für die ausgewählten Tage am Referenzraum ca. 20 K über denen am Testraum hinter der Begrünung.
- Die Einsparung bei der thermischen Energie (wasserseitig) der DFL im Testraum liegt an den Beispieltagen zwischen 10 % und 25 % gegenüber dem Referenzraum. Bezogen auf den gesamten Auswertezittraum (44 d) ergibt sich eine Einsparung von etwa 14 %. Beim elektrischen Hilfsenergieverbrauch konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen Referenz- und Testraum festgestellt werden.

Im Wesentlichen zeigen die während der Sommermonate durchgeführten Untersuchungen zwei Effekte zur Verbesserung des sommerlichen Wärmeverhaltens an der begrüneten Fassade. Einerseits führt die Begrünung zu einer Reduzierung der Ansauglufttemperatur der fassadenintegrierten, dezentralen Lüftungsgeräte. Andererseits trägt die Verschattung zu einer niedrigeren Fassadentemperatur bei, wodurch sich die solaren Einträge in den Raum reduzieren. Die Höhe der jeweiligen Effekte hängt u. a. von der Luftführung am dezentralen Fassadenlüftungsgerät (Frischluff und Fortluft), der solaren Einstrahlung und insbesondere von der Windgeschwindigkeit und Richtung der Windanströmung an der Fassade ab.

4.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

In einem GreenFaBS-Workshop mit externen Fachleuten Anfang Mai 2021 (vgl. Kapitel A5 im Appendix) zeigte sich, das bzgl. der Potentiale von Grünfassaden immer noch viel Unsicherheit und -wissenheit besteht, was auch reichlich Hemmnisse bei der erforderlichen qualitativen und quantitativen Umsetzung von Begrünungen in der Baupraxis bereitet.

Mit den vorliegenden Ergebnissen hat das Projekt GreenFaBS für das im Zuge von Klimaanpassungsstrategien im Bauwesen aktuell bedeutsame Praxis- und Forschungsfeld Fassadenbegrünung umfangreiche Messergebnisse erarbeitet und bereitgestellt, welche die Potentiale bei der Schnittstelle mit Geräten der dezentralen Fassadenlüftung (DFL) aufzeigen.

Bei der Bewertung der Ergebnisse ist jedoch einerseits zu berücksichtigen, dass der Fassadenversuchsstand (THN) als Leichtbau fehlende Speichermassen aufweist, andererseits führten die unterschiedlichen Versuchsanordnungen bei den Experimentellen Studien I und Experimentellen Studien II zu abweichenden Einschätzungen. Aufgrund der Fassadensituationen beim VERU-Gebäude (im 2. Obergeschoss, windexponiert) und in Rednitzhembach (bodennah) ist ein direkter Vergleich der Ergebnisse nur eingeschränkt möglich. Zur Beurteilung möglicher Einsparpotentiale ist daher insbesondere die reale Einbausituation Vorort zu berücksichtigen.

Die Projektarbeiten liefern darüber hinaus wichtige Impulse für weitere Forschungen. So müssen unter anderem die Einsparungspotentiale bei der Kühlleistung – als Argumentation für die Schnittstelle Fassadenbegrünung und Dezentrale Fassaden Lüftung – konkretisiert werden, hinsichtlich realer Einspareffekte beim Strombedarf für Kühlung in der Baupraxis.

Auch beim Thema Feuchtigkeit im Innenraum sind die Einflussfaktoren noch eingehender zu prüfen.

Eingehende Darstellung

Die insgesamt vielversprechenden Ergebnisse bei der Vermessung des Misch- (Regalsystem, Fa. Kramer Gartenbau, München) und des bodengebundenen Systems mit Kletterpflanzen (Fa. Jakob Rope Systems, Ostfildern) bestärken eine in der Baupraxis verbreitete Tendenz. So sind beispielsweise in der Landeshauptstadt München bisher nur wenige wandgebundene Systeme verbaut worden; bei den Fassadenbegrünungen liege der Fokus klar auf Kletterpflanzen. Das bestätigt auch der BuGG-Marktreport Gebäudegrün 2020.³ Es werden mit etwa 55.000 m² (mit Kletterhilfen) deutlich mehr bodengebundene im Gegensatz zu wandgebundenen Fassadenbegrünungen mit 10.000 m² installiert.

Analyse, Fazit

Bei der Kombination von dezentraler Fassadenlüftung und wandgebundener Begrünung zeigen sich Stärken gegenüber bodengebundener Begrünung. Hierbei sind vor allem eine höhere Kühlleistung sowie baukonstruktive Vorteile zu nennen. Die Projektergebnisse können somit auch eine Absatzsteigerung bei wandgebundenen Systemen ermöglichen.

Die Begrünung von Fassaden leistet einen wichtigen Beitrag für ressourcenschonendes Bauen, von dem auch die Branchen der Haus- und Gebäudetechnik, besonders im Bereich der Belüftung und Klimatisierung von Räumen, profitieren kann. In Verbindung mit raumautarker dezentraler Lüftungstechnik kann ein „Wohlfühlklima“ in Abhängigkeit des Nutzerverhaltens erschaffen werden. Nachweislich werden in diesem Zusammenhang Arbeitnehmer*innen leistungsfähiger und Krankheitstage im Unternehmen nehmen ab.

Angesichts der durchaus komplexen Bauaufgabe Fassadenbegrünung ist zu berücksichtigen, dass beim Einsatz von Pflanzen in der Vertikalen stets deren insgesamt vielfältigen günstigen Auswirkungen herauszustellen sind; neben den positiven Effekten auf das sommerliche Wärmeverhalten eines Gebäudes, leisten diese einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung des innerstädtischen Klimas (Vermeidung von Hitzeinseln) und fördern die Biodiversität. Und besonders im Schulbau können Fassadenbegrünungen auch die Aufenthaltsqualität der Schulhöfe im Sommer wesentlich verbessern.

Mit den durchgeführten Messreihen liegen nun zahlreiche Ergebnisse für einen relativen kleinen Zeitraum vor; was fehlt sind überfällige Langzeitversuche, ergänzt um Fragen der Wartung- und Instandhaltung insbesondere bei wandgebundenen Systemen, standortgerechten Pflanzen, bis hin zu detaillierten Untersuchungen des Einflusses von Geometrie und Art der Pflanzen.

In der Projektphase II des Forschungsprojektes „Mikroklimatische Wirkungen von Kletterpflanzen auf Gebäude und Umgebung“ beschäftigt man sich mit der „relative(n) Leistungsfähigkeit unterschiedlicher Pflanzenarten und insbesondere Kletterpflanzen“⁴. Die hier erhobenen Daten dienen als Entscheidungshilfe für das Bepflanzungskonzept bei dem Hochhaus Arabella26 in München. Durch kontinuierliches Wiegen der Pflanzen werden z. B. Rückschlüsse auf die Evapotranspiration gezogen. Gerade die Gebäudetypologie Hochhaus ist für die Kombination Fassadenbegrünung und dezentrale Fassadenlüftung interessant, da durch die Windgeschwindigkeiten das natürliche Lüften in den höheren Stockwerken erschwert ist. Mit einer optimierten Pflanzenauswahl könnte sich die Kühlenergie von DFL-Geräten nach den vorliegenden Einschätzungen aus dem GreenFaBS-Projekt weiter reduzieren lassen.

Angesichts der anstehenden zentralen Aufgaben im Baubereich, wie Energie- und Ressourcenwende sowie Klimaanpassungsstrategien, gleichermaßen bei Neubau und in der Bestandssanierung, ist das Thema der Fassadenkonkurrenz (z. B. Fassadenbegrünung in Verbindung mit Photovoltaik) bedeutsam; welche Flächenbelegungen benötigen die verschiedenen Schnittstellen bzw. Plusnutzungen, um den Flächenanteil der Fassadenbegrünung standortbezogenen zu optimieren. Auch hier geben die Ergebnisse der durchgeführten thermisch-energetischen Gebäudesimulationsergebnisse Hinweise für Planungsstrategien.

Nicht zuletzt steht die Umsetzung der Erfahrungen in Demonstrationsprojekte aus, damit die untersuchten Ansätze im Fokus der öffentlichen Wahrnehmung auch sichtbarer werden.

³ Mann/Gohlke, 2021, S. 30

⁴ [https://forschung.hswt.de/forschungsprojekt/\[Grünes Hochhaus Arabella 26\] <07.01.2022>](https://forschung.hswt.de/forschungsprojekt/[Grünes Hochhaus Arabella 26] <07.01.2022>)

5 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Eingehende Darstellung

Zu den wichtigsten Ausgaben im Projekt zählten bei THN wissenschaftliches Personal sowie Gegenstände / Investitionen (Fassadenversuchsstand, einschließlich Dezentrale Fassadenlüftungsgeräte, plus Installation umfangreicher Messtechnik, einschließlich Software) und Aufträge (Begrünungssysteme und Bewässerung).

Insgesamt konnte die Kostenplanung für die Arbeitspakete eingehalten werden. Allerdings wurde die Finanzplanung für die "Personalkosten Gesamt" geringfügig überschritten. Dabei gab es innerhalb der Positionen einige Verschiebungen, u.a. durch die Wahrnehmung der direkten Koordinierung mit den BuGG-Mitgliedsfirmen seitens THN und die kostenneutrale Verlängerung der Projektlaufzeit. Diese Mehraufwendungen wurden einerseits kompensiert durch eine geringere Beschäftigung von Studentischen Hilfskräften und andererseits durch deutlich reduzierte Ausgaben bei den Sachkosten; aufgrund der Corona-Pandemie entfielen ebenfalls zahlreiche Reisen.

Eine Anpassung des Kostenbudgets war auch bei Fraunhofer-IBP innerhalb der verlängerten Laufzeit des Vorhabens nicht nötig. Während der Projektlaufzeit wurden Mittel umgewidmet. In Summe wurden die Kosten eingehalten.

6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Aufwand und Arbeiten, die zur Beantwortung und Zusammenfassung der Forschungsfragen in den Arbeitspaketen

- 1 Entwicklung Lösungsstrategien
- 4 Auswertung Lösungsstrategien
- 5 Entwicklung von Funktionsmodell
- 6 Realisierung musterhafter Anwendungen
- 7 Experimentelle Studien II (VERU Versuchsgebäude)
- 8 Analyse Leistungspotential

führten, sowie Aufwand und Überlegungen zur Koordinierung des Projektes (AP 0 Projektmanagement) können insgesamt als angemessen betrachtet werden.

Wie in Kapitel „I/2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde/ Planung und Ablauf des Vorhabens“ bereits erläutert, war im Arbeitspaket „2 Realisierung Versuchsstand THN“, insbesondere in den Teilbereichen „AP 2.1 Konzeption und Aufbau“ und „AP 2.2 Konzeption und Integration der Messtechnik“ zum Teil deutlich Mehraufwand zu leisten. Beim Arbeitspaket „3 Experimentelle Studien I (Versuchsstand THN)“ führte die Verzögerung der Inbetriebnahme des Fassadenversuchsstand THN zur Herausforderung, die Begrünungssysteme über zwei Winterperioden instandzuhalten (vgl. Kapitel „IV/A1.1 Überwinterung der Begrünungssysteme (THN)“ und „IV/A3.2 Überwinterung der Begrünungssysteme (IBP)“).

Die dezentralen Fassadenlüftungsgeräte konnten durch die Verzögerungen am Versuchsstand der THN nicht wie geplant für die Untersuchungen am Fraunhofer IBP übernommen werden, sondern mussten für die Messungen am VERU separat angeschafft werden. Die Finanzierung konnte über eine anteilige Mittelumwidmung des Budget erfolgen, das durch die geringeren Kosten für die Konstruktion zur Befestigung der Grünfassade frei wurde.

Insgesamt zeigte sich, dass die systematische Untergliederung der Tätigkeiten in die gewählten Arbeitsfelder und Arbeitsschritte wesentlich dazu beitrug, eine fundierte Erkenntnisbasis und somit auch belastbare Ergebnisse innerhalb des Projektes wie auch gegenüber Außenstehenden zu erarbeiten.

7 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Mit den vorliegenden Ergebnissen hat das Projekt GreenFaBS für das im Zuge von Klimaanpassungsstrategien im Bauwesen aktuell bedeutsame Praxis- und Forschungsfeld Fassadenbegrünung umfangreiche Messergebnisse erarbeitet und bereitgestellt, welche die Potentiale bei der Schnittstelle mit Geräten der Dezentrale Fassaden Lüftung (DFL) aufzeigen. (vgl. Kapitel II/4 Analyse und interdisziplinäre Bewertung des Leistungspotentials)

Aufgrund der interdisziplinären Bearbeitung des Projektes ist eine Verwertung von Arbeitsergebnissen in den Bereich der Wissenschaft und (Fach-)Öffentlichkeit bereits in Teilen erfolgt. (vgl. Kapitel III/3 Fortschreibung des Verwertungsplans) Ein Transfer in den Bereich der Hochschulausbildung, Wirtschaft und Fachverbände ist durch geplante Vorhaben gewährleistet, damit die Ergebnisse nachhaltig verwertet und weiter erforscht werden können. So

werden die Forschungsarbeiten u. a. an den Fakultäten Architektur und Maschinenbau und Versorgungstechnik der Technischen Hochschule Nürnberg im Rahmen einer Interdisziplinären Projektarbeit (IDP) im Sommersemester 2022 auch an Studenten weitergegeben. Desweiteren sollen die Ergebnisse als Beitrag auf verschiedenen Kongressen eingereicht werden. Dadurch wird das wissenschaftliche Potenzial der beteiligten Forschungseinrichtungen gestärkt.

Eingehende Darstellung

Die Hauptaufgabe der Fraunhofer-Gesellschaft bzw. deren Einzelinstitute ist der Technologietransfer aus der Forschung in die Wirtschaft. Durch die Stärkung der Kompetenz des Fraunhofer IBP im Bereich von Fassadenbegrünungen können die gewonnenen Erkenntnisse im Rahmen weiterer Forschungs- und Entwicklungsprojekten den überwiegend nationalen Industriepartnern zu Verfügung gestellt werden, was einen Standortvorteil für Deutschland darstellt. Darüber hinaus dient das Projekt dem IBP zur Stärkung und Festigung seiner Wettbewerbssituation, Außenwirkung und Sichtbarkeit im Bereich der Fassadenentwicklungen und insbesondere im Bereich der Gebäudebegrünung. Damit wird es dem IBP ermöglicht, sein bisher vorhandenes Knowhow auszubauen und sich auch mittelfristig eine führende Stellung in diesem Forschungsbereich zu sichern. Mittel- und langfristig erwartet das IBP weitere nationale und internationale Forschungsprojekte und Folgeaufträge im Bereich Gebäudebegrünung. Die Vorstellung der Projektergebnisse im Rahmen von Konferenzen wird das IBP zur Netzwerkbildung und Verbreitung der Erkenntnisse nutzen. Darüber hinaus sind weitere Veröffentlichung der Projektergebnisse im Rahmen von Fachpublikationen und ist die kostenlose Bereitstellung des Abschlussberichtes über die Webseite des Fraunhofer IBP vorgesehen.

Mit den Untersuchungs- und Simulationsmodellen stehen nun zum Ende des Projektes weitreichende Ergebnisse für Hersteller aus dem Bereich der Grünfassadensysteme und der dezentralen Gebäudetechnik zur Verfügung. Sowohl die Experimentellen Studien I (THN) und II (IBP) als auch die thermisch-energetischen Simulationsberechnungen bestätigen ein verbessertes Raumklima, bei gleichzeitiger Einsparung von Strom- und Klimatisierungskosten. Damit profitieren Interessensverbände, wie z.B. der Bundesverband GebäudeGrün e. V. (BuGG) oder auch der FGK – Fachverband Gebäude Klima e.V. direkt von den Projektergebnissen für Beratungs- und Kommunikationsarbeit.

Für die beteiligten Firmen im Bundesverband GebäudeGrün e. V. (BuGG) eröffnen die Forschungsergebnisse in den kommenden Jahren die Chance eines erhöhten Absatzes der jeweiligen Fassadenbegrünung. Dies ist insbesondere bei wandgebundenen Systemen zu erwarten, da hier die Kombination mit dezentraler Fassadenlüftung Vorteile gegenüber bodengebundener Fassadenbegrünung zeigt. Dies sollte sich auch den Absatz von Geräten dezentraler Lüftungstechnik positiv auswirken. Bereits im Rahmen eines internen Online-Workshops wurden die Ergebnisse präsentiert und mit externen Fachleuten diskutiert. (vgl. Kapitel IV/A5 GreenFaBS-Workshop mit externen Fachleuten, Teilnehmer) Mit der Teilnahme an der „Langen Nacht der Wissenschaften 2022 in Nürnberg (Samstag, 21.05.2022) sollen die Projekteinschätzungen und -ergebnisse auch an ein interessiertes (Fach-)Publikum weiter vermittelt werden.

Mit der fortlaufend (professionellen fotografischen Dokumentation der Untersuchungsmodelle an den Versuchsständen ist über Posterbeiträge bereits eine öffentliche Sichtbarkeit in Expertenkreisen erreicht worden. U. a. mit dem Hochbauamt Stadt Nürnberg/ Kommunales Energiemanagement bestehen bereits Arbeitszusammenhänge, um im Rahmen eines Folgeprojektes ein Demonstrationsvorhaben mit (großmaßstäblicher) Übertragung in die Baupraxis vorzubereiten.

8 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Es sind uns keine Ergebnisse von dritter Seite bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant waren.

9 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

9.1 Erfolgte Veröffentlichungen

- Grünfassade als Klimaanlage. Im Technikum Rednitzhembach wurde neuer Versuchstand für ein Forschungsprojekt zur Energieeffizienz vorgestellt. In: Schwabacher Tageblatt [Nürnberg Nachrichten], 24.10.2019, S. L25.
- Krippner, Roland: EnOB: GreenFaBS. Einsatz von Grünfassaden zur Reduzierung des Kühlenergiebedarfs fassadenintegrierter dezentraler Gebäudetechnik (Schul- und Verwaltungsgebäuden) (02/2019–01/2021). In: Jahrbuch 2019. Fakultät Architektur. Li Xiaotian (Redaktion und Koordination). Nürnberg Januar/2020, S. 294–297.

- Fraunhofer-IBP (Hrsg.): Jahresbericht 2019/2020. Ökologische Transformation unserer Lebensräume. Stuttgart 2020, S. 29. <https://www.ibp.fraunhofer.de/de/presse-medien/informationmaterial.html> <14.01.2022>
- Bauer, Jasmin: Fassade in Grün. Gebäudefassaden für klimaneutrale und lebenswerte Städte. In: OHM-Journal [Hochschulmagazin der Technischen Hochschule Nürnberg], 01 [01.07.2020]/2020, S. 24–27.
- Krippner, Roland; Bott, Boris; Stephan, Wolfram; Franz, Mario; Sinnesbichler, Herbert; Schade, Almuth: EnOB: GreenFaBS (02/2019 – 01/2021). In: Fachkonferenz „Energetische Biomassenutzung“. 24. November 2020 [Online]. Daniela Thrän; Diana Pfeiffer (Hrsg.). Reader. Leipzig: DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH, [November]/2020, S. 192–193.
- Bott, Boris; Krippner, Roland: Einsatz von Grünfassaden zur Reduzierung des Kühlenergiebedarfs fassadenintegrierter dezentraler Gebäudetechnik (Schul- und Verwaltungsgebäude). Vortrag und Posterpräsentation. Bundeskongress Gebäudegrün über die Online-Plattform Zoom, 23. und 24. November 2021.

Eingehende Darstellung

9.2 Geplante Veröffentlichungen

- Nürnberg, Lange Nacht der Wissenschaften 2022/ Samstag, 21.05.2022
Wissenschaftliche Vorträge und Ausstellungen rund um innovative Fassadentechnologien
- GebäudeGrün. Dach Fassade Raum Grün. Berlin, Patzer Verlag. Heft 2/2022

Teilnahmen an Tagungen

- PowerSKIN Conference. Virtual venue on Thursday, 8th December 2022
- Weltkongress GebäudeGrün. Juni 2023, Berlin
- 18th International Advanced Building Skins Conference & Expo, October 2023, Bern

10 Anhang

Anhang

10.1 Literatur- und Internetverzeichnis

- ANSYS/ FLUENT, ANSYS Corporation, Canonsburg, Pennsylvania, USA.
- Baumann, Rudi: Begrünte Architektur. Bauen und Gestalten mit Kletterpflanzen. München 1983
- Baumann, Rudi: Pflanzliche Verschattungselemente an der Gebäudeoberfläche als Maßnahme zur Reduzierung der Strahlungsbelastung unter sommerlichen Bedingungen – „Pullover“. Dissertation. Kassel 1980.
- Blanc, Patrick; Hesemann, Sabine; Nouvel, Jean; Lalot, Véronique: Vertikale Gärten. Die Natur in der Stadt. Stuttgart 2009.
- Dentel, Arno: Simulationsstudie zu Einfluss der Fassadenbegrünung auf Raumtemperatur und Energiebedarf auf der Basis von TRNSYS 17, interner Bericht THN encn, 7/2015
- Dentel, Arno; Dietrich, Udo: Primero-Komfort. Thermische Behaglichkeit – Komfort in Gebäuden. Dokumentation. Hamburg/ Nürnberg 2008
- DIN EN 16798-1:2021-04, Energetische Bewertung von Gebäuden – Lüftung von Gebäuden – Teil 1: Eingangsparameter für das Innenraumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden bezüglich Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik – Modul M1-6. Berlin, 2021.
- DIN V 18599-10:2018-09, Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung, Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten. Berlin, 2018.
- Eberl, Michael; Sinnesbichler, Herbert: Nutzung von technischen Mockups in der integralen Planung einer Neubaufassade. Überprüfung von Funktion und Behaglichkeit vor der Umsetzung. In: IBP-Mitteilung, 42. Jg., No. 540/2015.
- Eppel, Jürgen; Bohl, Johanne: Klima-Forschungs-Station. Entwicklung und Optimierung begrünbarer Klimafassaden. Endbericht zum Forschungsvorhaben KL/17/04. Veitshöchheim 2020.
- Fisch, Manfred; Plesser, Stefan: Energiedesign der Zukunft. In: DBZ – Deutsche Bauzeitschrift, 53. Jg. 3/2005, S. 54-59.
- Fischer Garland Katherine: Production of heuchera and coleus. B.A., University of Maine/ USA, 2009. <https://digitalcommons.library.umaine.edu/etd/449/> <...>
- Grobbauer, Michael; Mach, Thomas: Design and Implementation of the physical Prototypes. In: Thomas Mach, et al. (Hrsg.): mppf – The multifunctional plug & play approach in facade technology. Graz 2015, S. 220–243.
- Gruner, Michael; Haase, Matthias: The potential of facade-integrated ventilation systems in nordic climate. Advanced decentralised ventilation systems as sustainable alternative to conventional systems. (Ed.): Norwegian University of Science and Technology. Trondheim 2012.
- Herzog, Thomas; Krippner, Roland; Lang, Werner (Hrsg.): Fassaden Atlas. Edition Detail. München 3/2020.
- Herzog, Thomas; Krippner, Roland; Lang, Werner: »Installierte« Fassaden. In: Fassaden Atlas. München 3/2020, S. 322–327.
- Herzog, Thomas; Krippner, Roland; Lang, Werner: Begrünte Fassaden. In: Fassaden Atlas. München 3/2020, S. 337–341.
- Heusler, Ingo; Sinnesbichler, Herbert; Erhorn, Hans; Nimtsch, Andreas: Erarbeitung einer vereinfachten Berechnungsmethode für Glas-Doppelfassaden für die Integration in die deutsche EPBD-Energieeffizienzbewertungsmethode DIN V 18599 (Bewertungsmethode GDF). IBP- Bericht ESB-002/2009 HOKI. Stuttgart 2011.
- Heusler, Ingo; Sinnesbichler, Herbert: Neue Berechnungsmethode für Glas-Doppelfassaden nach DIN V 18599 und deren Überprüfung an realen Gebäuden. In: IBP-Mitteilung, 41. Jg., No. 533/2014.
- Hirn, Gerhard: Bürogebäude dezentral lüften und klimatisieren. In: BINE projektinfo 13/09. Eggenstein-Leopoldshafen 2009.
- HsWT – Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Freising/Weidenbach, o.J. Grünes Hochhaus Arabella 26 im Wandel der Jahreszeiten. Forschungsversuch: Mikroklimatische Wirkungen von Kletterpflanzen auf Gebäude und Umgebung. <https://forschung.hswt.de/forschungsprojekt/1345-arabella-26-phase-ii-forschungsversuch> <10.01.2022>
- Jones, Hamlyn G.: Plants and microclimate – A quantitative approach to environmental plant physiology. 3rd Edition, Cambridge/UK, 2014.

- Kaltenbach, Frank: Lebende Wände, vertikale Gärten, Vom Blumentopf zur grünen Systemfassade. In: Detail – Zeitschrift für Architektur + Baudetail, 12/2008, S. 1454–1467.
- Kersken, Matthias; Haag, Georg; Sinnesbichler, Herbert: Errichtung einer Versuchseinrichtung für energetische, feuchtetechnische und strahlungsphysikalische Untersuchungen an neuartigen Dachsystemen und transparenten Außenkonstruktionen. Kalorimetrischer Fassaden- und Dachprüfstand. Fraunhofer-Institut für Bauphysik (Hrsg.) IBP-Bericht ESB- 003/2012 HOKI. Stuttgart 2012.
- Köhler, Manfred: Handbuch Bauwerksbegrünung. Planung – Konstruktion – Ausführung. Köln 2012
- Köhler, Manfred: Boden- vs wandgebundene Fassadenbegrünungen. Vergleich der Bauweisen, Möglichkeiten und Herstellungskosten. In: 7. FBB-Symposium Fassadenbegrünung 2014. Tagungsband. Saarbrücken 2014, S. 48-51.
- Krause, Michael: Energieoptimiertes Bauen: Entwicklung von vorgefertigten, multifunktionalen Systemen zur energetischen Sanierung von Wohngebäuden. Abschlussbericht. Kassel 2013.
- Krippner, Roland: Innovative Fassadenlösungen für energieeffiziente Gebäude. In: 19. Internationales Holzbau-Forum (IHF 2013). "Aus der Praxis - Für die Praxis". Band II, 5. und 6. Dezember 2013. Hrsg. v. forum-holzbau, Biel/Bienne. Tagungsband / Proceedings. Biel/Bienne: 2013, S. 1–11.
- Krippner, Roland: EnOB: GreenFaBS. Einsatz von Grünfassaden zur Reduzierung des Kühlenergiebedarfs fassadenintegrierter dezentraler Gebäudetechnik (Schul- und Verwaltungsgebäuden) (02/2019–01/2021). In: Jahresbuch 2019. Fakultät Architektur. Li Xiaotian (Redaktion und Koordination). Nürnberg Januar/2020, S. 294–297
- Krippner, Roland: EnOB: GreenFaBS. Einsatz von Grünfassaden zur Reduzierung des Kühlenergiebedarfs fassadenintegrierter dezentraler Gebäudetechnik. Projektdatenblatt. Nürnberg: März/2021 [<https://www.th-nuernberg.de/forschung-innovation/die-zehn-leit-themen-der-technischen-hochschule-nuernberg/staedte-und-gebaeude-der-zukunft/forschungsprojekte/>]
- Krippner, Roland; Bott, Boris; Stephan, Wolfram; Franz, Mario; Sinnesbichler, Herbert; Schade, Almuth: EnOB: GreenFaBS (02/2019 – 01/2021). In: Fachkonferenz „Energetische Biomassenutzung“. 24. November 2020 [Online]. Daniela Thrän; Diana Pfeiffer (Hrsg.). Reader. Leipzig: DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH, November/2020, S. 192–193.
- Krippner, Roland; Serode, Jan: Fassadenintegrierte dezentrale Gebäudetechnik. Initialprojekt: Nuremberg Campus of Technologie – NCT Energie und Speichertechnologien. Forschungsprojekt (11/2012 – 06/2015). Gefördert durch das Bayerische Staatsministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst, München. Dokumentation (unveröffentlicht). Nürnberg Dezember/2014
- Mahler, B.; Himmler, R.; Silberberger, C., Matt, C.: DeAL – Evaluierung dezentraler außenwandintegrierter Lüftungssysteme. Hrsg. v.: Steinbeis-Transferzentrum und Steinbeis-Forschungszentrum/ Energie-, Gebäude- und Solartechnik. Abschlußbericht, STZ-Projekt-Nr. 24306. Stuttgart August/2008.
- Mahler, B.; Himmler, R.: Auf dem Prüfstand XIII. DeAL – Evaluierung dezentraler Außenwandintegrierter Lüftungssysteme. In: AIT. Heft 63/2008. S. 66-70.
- Mahler, Boris; Caspary-Weber, Monique: Flexibel und flächeneffizient lüften. Evaluierung dezentraler außenwandintegrierter Lüftungssysteme. In: Transfer, 01/2009, S. 7.
- Mann, Gunter; Gohlke, Rebecca: BuGG-Marktreport Gebäudegrün 2021. Dach-, Fassaden- und Innenraumbegrünung Deutschland. Berlin 2021
- Mayer, Wilhelm/ TROX GmbH, Neukirchen-Vluyn. Gespräch im Rahmen des Forschungsprojekts: Fassadenintegrierte dezentrale Gebäudetechnik (Initialprojekt), Nuremberg Campus of Technology. Nürnberg (THN-AR) 08. August 2014.
- Miranda T. et al.: Diurnal pattern of stomatal conductance in the large-leaved temperate liana *aristolochia macrophylla* depends on spatial position within the leaf lamina. In: Annals of botany, Volume 111, 2013, S. 905-915.
- Monteith, J. L. Unsworth, M. H.: Principles of environmental physics – Plants, animals, and the atmosphere. 4th Edition, Oxford/UK, 2013.
- Müller, Helmut: TEemotion. Innovation in der Entwicklung von Fassadensystemen. Projektdokumentation, 2005.
- N.N.: Behagliches Innenraumklima beginnt an der Fassade. Optimierung des Raumklimas in Nichtwohngebäuden mit in der Fassade integrierten dezentralen Lüftungsgeräten und Sonnenschutzrosten. In: GFF – Das Praxismagazin für Produktion und Montage, 6-2008. S. 40-43.

- Perini, Katia; Bazzocchi, Francesca: Field monitoring in Mediterranean climate to quantify thermal performances of vertical greening systems. In: Thomas Auer; Ulrich Knaack; Schneider, Jens (Hrsg.): Powerskin Conference. Proceedings. January 19th 2017–Munich. Delft 2017, S. 113–122.
- Pfafferott, J. et al.: Ein einfaches Modell zur Vorhersage der Fassaden- und Grenzschichttemperatur. In: Bauphysik – Wärme, Feuchte, Schall, Brand, Licht, Energie, 33. Jg., 3/2011, S. 150-157.
- Pfoser, Nicole; Jenner, Nathalie; Henrich Johanna; Heusinger, Jannick; Weber, Stephan: Gebäude, Begrünung und Energie. Potenziale und Wechselwirkungen. Abschlussbericht. Darmstadt 2013.
- Pfoser, Nicole: Fassade und Pflanze – Potenziale einer neuen Fassadengestaltung. Eine Untersuchung zu Sachstand, Motivation und Zukunftseignung der weltweit zunehmenden Fassadenbestimmung als funktionale und ästhetische Fusion von Vegetation und vertikalen Bauteilen. Dissertation. Darmstadt 2016.
- Pfoser, Nicole: Lebendige Vielfalt – Anwendungstechniken der Fassadenbegrünung. In: Detail – Zeitschrift für Architektur + Baudetail, 57. Jg., 12/2017, S. 66–76
- Preiss, Jürgen: Leitfaden Fassadenbegrünung. (Hrsg.): Magistrat der Stadt Wien. Wien 2013
- Reichmann, Brigitte: Konzepte der Regenwasserbewirtschaftung. Gebäudebegrünung, Gebäudekühlung. Leitfaden für Planung, Bau, Betrieb und Wartung. Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin (Hrsg.). Berlin 2010.
- Röben, Jürgen: Fassadenintegrierte Lüftungstechnik. Ästhetisch und energieeffizient. In: DBZ – Deutsche Bauzeitschrift, 61. Jg. 9/2013. S. 76-78.
- Sajbidorova V. et al.: Plants recovery performance from water stress. In: Acta Universitatis Agriculturae Et Silviculturae Mendelianae Brunensis, Volume 67, Number 2, 2019, S. 453-462.
- Santamouris M. et al.: Progress in urban greenery mitigation science – assessment methodologies advanced technologies and impact on cities. In: Journal of civil engineering and management, Volume 24, Issue 8, 2018, S. 638-671.
- Scherzinger, Simon: Bachelorarbeit: Thermische Auswirkungen von Fassadenbegrünung auf die Urban Canopy Layer. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg. Prof. Dr. Helmut Mayer. Meteorologisches Institut. Freiburg 2012. Zusammenfassung: <https://www.stadtklima-stuttgart.de/index.php?id=1005,0,0,1,0,0> <14.01.2022>
- Schwarz, Willfried: Methoden zur Bestimmung der Messunsicherheit nach GUM – Teil 2 (AVN). ... 2020 [https://www.gik.kit.edu/downloads/%5bSCHW20%5dGUM_AVN_Teil2.pdf <14.01.2022>]
- Shrewsbury P. M. et al.: Integrating cultural management practices and biological control to suppress citrus mealybug. In: Acta Horticulturae, Volume 633, 2004, S. 425-434.
- SIA 2024: Raumnutzungsdaten für die Energie- und Gebäudetechnik. Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2015.
- Sinnesbichler, Herbert: Energetische Zwillingräume. Informationsflyer. Holzkirchen 2018. [und <https://www.pruefstellen.ibp.fraunhofer.de/de/energieeffizienz-und-raumklima/energetische-zwillingsraeume.html> < 14.01.2022 >]
- Sinnesbichler, Herbert; Heusler, Ingo: VERU – Versuchseinrichtung für energetische und raumklimatische Untersuchungen. In: Bauingenieur. VDI-Bautechnik Jahresausgabe 2013/2014 [Sonderdruck], S. 104-107.
- Thiel, Dieter; Paschant, Maren; Ruoff, Joachim; Jager, Werner; Taggenbrock, Sabine: Integrale Revitalfassade. Ein Fassaden-/ Technikmodul für die Gebäudesanierung. In: Projektblatt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt. Osnabrück 2010.
- Thiel, Dieter: Alles drin: Die Fassade der Zukunft. In: Technik und Innovation. Deutsches Ingenieurblatt, 12/2005, S. 14-20.
- TROX Technik „Dezentrale Fassadenlüftung“. Neukirchen-Vluyn 10/2016.
- TROX Technik „Montage und Betriebsanleitung Dezentrale Lüftungsgeräte/ Brüstungsgeräte“. Neukirchen-Vluyn 2018.
- TRNSYS, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison USA.
- UBA – Umweltbundesamt: Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 – 2018. Dessau-Roßlau, 2018.
- update:BAU (Hrsg.): Capricorn Haus, Düsseldorf. Gatterman + Schossig, Köln. In: DBZ-Baucolleg, BauWerk_02. München Sommersemester 2007.
- VDI 2078:1996-07, Berechnung der Kühllast klimatisierter Räume (VDI-Kühllastregeln). Berlin 1996.

- VDI 2078:2015-06, Berechnung der thermischen Lasten und Raumtemperaturen (Auslegung Kühllast und Jahressimulation) Berlin 2015. Anhang
- VDI 6007-2:2012-03, Berechnung des instationären thermischen Verhaltens von Räumen und Gebäuden, Blatt 2: Fenstermodell. Berlin 2012.
- Energieeinsparverordnung (EnEV, Fassung 2016). Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.). Berlin, 01.01.2016
- Voss, Karsten: Energieoptimiertes Bauen: Dezentrale Lüftung in Bürogebäuden – Mikroklimatische und baukonstruktive Einflüsse. Schlussbericht. Wuppertal 2010.
- Wolf, Klaus-Dieter (Fa. TROX GmbH, Neukirchen-Vluyn). Internes Arbeitstreffen/ Zoom-Meeting beitreten, 21.01.2021.
- Wolter A.: Untersuchung zu einem mit Hedera Helix 'Woerner' begrünten, hydroponische Nutzwandssystem: Evaluierung ertrags- und pflanzenphysiologischer Parameter unter Berücksichtigung der klimatischen Einflüsse zur Modellierung eines intelligenten Wasser- und Nährlösungsmanagements. Freiberg 2015.
- Yazdanseta A. et al.: Estimating the untapped cooling power of green walls as evaporative coolers for buildings. In: Building simulation 2017, San Francisco/USA, 7th – 9th August 2017.

10.2 Abbildungsverzeichnis

I. Kurzdarstellungen

Titelbild; Abb. 1, 3, 4, 5, 6
 Technische Hochschule Nürnberg, Fakultät Architektur

Abb. 2
 TROX GmbH, Neukirchen-Vluyn

II. Eingehende Darstellung

Abb. 7, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 36 (bearbeitete Vorlage von <https://www.google.de/maps>), 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54 (bearbeitete Vorlage von TROX GmbH, Neukirchen-Vluyn), 56, 103, 104
 Technische Hochschule Nürnberg, Fakultät Architektur

Abb. 8, 9, 75
 TROX GmbH, Neukirchen-Vluyn

Abb. 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 55, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71
 Technische Hochschule Nürnberg, Institut für Energie und Gebäude – ieg

Abb. 72, 73, 74, 76, 77, 76, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102,
 Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Standort Holzkirchen

III. Appendix

Abb. A1, A2, A3, A4, A6, A7, A8, A9, A10, A11, A12, A13, A14, A15, A16, A17, A18, A19, A20, A21, A22, A23, A24, A25, A26...
 Technische Hochschule Nürnberg, Fakultät Architektur

Abb. A27, A28, A29, A30, A31, A32, A33, A34, A35, A36...
 Technische Hochschule Nürnberg, Institut für Energie und Gebäude – ieg

Abb. A37, A38, A39, A40, A41, A42, A43, A44, A45, A46, A47, A48, A49, A50, A51, A52, A53, A54, A55, A56, A57, A58, A59, A60, A61, A62, A63, A64, A65, A66, A67, A68, A69, A70, A71, A72, A73, A74, A75, A76, A77, A78, A79, A80, A81, A82, A83, A84, A85, A86, A87, A88, A89, A90, A91, A92, A93, A94, A95, A96, A97, A98, A99, A100, A101, A102, A103, A104, A105
 Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Standort Holzkirchen

10.3 Tabellenverzeichnis

I. Kurzdarstellungen

Tab. 1
 Technische Hochschule Nürnberg, Energie Campus Nürnberg (EnCN)

II. Eingehende Darstellung

Tab. 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11
 Technische Hochschule Nürnberg, Institut für Energie und Gebäude – ieg

Tab. 12, 13, 14, 15, 16
Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Standort Holzkirchen

Anhang

III. Appendix

Tab. A1, A2, A3, A4, A5, A7, A8, A14, A15, A16, A17, A18, A19, A20, A21, A22, A23, A24, A25
Technische Hochschule Nürnberg, Institut für Energie und Gebäude – ieg

Tab. A6, A9, A10, A11, A12, A13
Technische Hochschule Nürnberg, Fakultät Architektur

Tab. A26, A27, A28, A29, A30
Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Standort Holzkirchen

III. Appendix

Appendix

A1 Konzeptionelle Entwicklung von Lösungsstrategien

	Vertiko	VGD	Kramer	Jakob
Verhältnis Blattfläche zu Gesamtfläche (xFläche) [-]	0,75	0,50	0,55	1,00
Abstand zur Fassade [mm]	265	225	225	230
Durchschnittlicher Blattdurchmesser [mm]	53	45	63	90
Durchschnittlicher Albedo Blätter [-]	0,24	0,23	0,23	0,25
Albedo Substrat / Erdreich [-]	1,00	1,00	1,00	-
Emissivität Blätter [-]	0,97	0,97	0,97	0,97
Emissivität Substrat / Erdreich [-]	0,94	0,95	0,95	-
Durchschnittlicher Oberflächenwiderstand Blätter [s/m]	282	309	312	410
Blattflächenindex [m ² /m ²]	-	-	6,0	2,6
Schichtdicke des Blattwerks [mm]	-	-	450	300
Flächenanteil Begrünung an der Fassade [%]	41,3	41,3	41,3	41,3

Tab. A1 Parameter der untersuchten Begrünungssysteme (THN-ieg)
 Vgl. Kapitel II/ 1.1.2 Aufbau von Simulationsmodellen (TEG und CFD), S. 20 sowie S. 31ff., 39, 41f. 47

Simulationszeitraum	1. Mai bis 30. September
Simulationszeitschritt	5 Minuten
Standort	Siemenstrasse 1, 91126 Rednitzhembach
Geographische Breite	49° 18' N
Geographische Länge	11° 40' O
Fassadenausrichtung mit den Begrünungssystemen	Nach Süden
Wetterdatensatz	Ortsgenaueres Normal-Testreferenzjahr des Deutschen Wetterdienstes von 2017 für den Standort Rednitzhembach
Abmessungen Musterräume (B x L x H)	2,74 m x 2,05 m x 2,94 m
Raumfläche	5,62 m ²
Raumvolumen	16,51 m ³
U-Wert Außenwand, Bodenplatte, Trennwand zum Technikraum	0,23 W/(m ² K)
U-Wert Dach	0,22 W/(m ² K)
U-Wert Brüstung	1,16 W/(m ² K)
U-Wert abgedecktes Fenster mit HPL-Platte	0,90 W/(m ² K)
U-Wert Innenwand	0,36 W/(m ² K)
U-Wert Außentür	1,16 W/(m ² K)
U-Wert Fenster (groß)	1,01 W/(m ² K)
U-Wert Fenster (klein)	0,96 W/(m ² K)
U-Wert Verglasung (Wärmeschutzverbundglas)	1,00 W/(m ² K)
g-Wert Verglasung	0,52
U-Wert Fensterrahmen (großes Fenster)	1,02 W/(m ² K)
U-Wert Fensterrahmen (kleines Fenster)	0,48 W/(m ² K)
Fensterflächenanteil	34,1 % bzw. 57,3 %
Abminderungsfaktor außenliegender Sonnenschutz (Fc-Wert Raffstore) im geschlossenen Zustand	0,05
Schwellwerte außenliegender Sonnenschutz	Schließen: solare Einstrahlung auf die Fassade > 180 W/m ² Öffnen: solare Einstrahlung auf die Fassade < 100 W/m ² Windgrenzwert > 10 m/s, zur Vermeidung von Sturmschäden
Solarer Absorptionsgrad Außenhülle	0,85
Emissionsgrad Fassade	0,89
Emissionsgrad Dach	0,90
Emissionsgrad Verglasung	0,837
Infiltrationsluftwechsel	0,10 1/h
Interne Wärmelast	Kühllastsimulator: 100 W (17,8 W/m ² , 50 % konvektiv, 50 % Strahlung) Abwärme DFL: i.A. Lüfterstufe (80 % konvektiv, 20 % Strahlung), Gesamt: 114 W (20,3 W/m ²) bis 132 W (23,5 W/m ²)
Belegungszeit	Montag bis Sonntag, von 7.00 bis 17.00 Uhr

Appendix

Tab. A2 Randbedingungen des Fassadenversuchsstands für die thermisch-energetische Gebäudesimulation (THN-ieg)
 Vgl. Kapitel II/ 1.1.2 Aufbau von Simulationsmodellen (TEG und CFD), S. 22

Appendix

Laufzeit	Montag bis Sonntag, von 5.00 bis 17.00 Uhr		
Luftvolumenstrom	3-stufig (60, 90 bzw. 120 m ³ /h) in Abhängigkeit der Raumtemperatur Temperaturabweichung für Lüfterstufe 2 (90 m ³ /h): +0,8 K Temperaturabweichung für Lüfterstufe 3 (120 m ³ /h): +1,6 K		
Raumtemperatursollwert Kühlen	24 °C		
Soll-Zulufttemperatur im Komfortbereich	19 °C		
Minimal zulässige Zulufttemperatur	18 °C		
Freie Kühlung (Bypass Luft-Wärmetauscher)	Start ΔT (Differenz Raum- zu Außentemperatur): +6,0 K Stopp ΔT (Differenz Raum- zu Außentemperatur): +4,0 K		
Wärmerückgewinnung - Rekuperativer Luft-Wärmetauscher	$\eta = 50 \%$		
Nachtauskühlung (Bypass Luft-Wärmetauscher)	keine		
Kaltwasservorlauftemperatur	16 °C		
Technische Daten Wärmeübertrager lt. Auslegung Trox			
Luftvolumenstrom	80 m ³ /h	100 m ³ /h	120 m ³ /h
Kaltwassermassenstrom	100 l/h	150 l/h	200 l/h
Kaltwasserrücklauftemperatur	18,3 °C	18,0 °C	17,8 °C
Gesamtkühlleistung (bezogen auf die Raumfläche)	270 W (48,0 W/m ²)	340 W (60,5 W/m ²)	410 W (73,0 W/m ²)
Raumkühlleistung (bezogen auf die Raumfläche)	160 W (28,5 W/m ²)	200 W (35,6 W/m ²)	240 W (42,7 W/m ²)

Tab. A3 Randbedingungen der dezentralen Fassadenlüftung für die thermisch-energetische Gebäudesimulation für den Fassadenversuchsstand (THN-ieg)
 Vgl. Kapitel II/ 1.1.2 Aufbau von Simulationsmodellen (TEG und CFD), S. 22

Appendix

	Referenzfall	Vertiko		VGD		Kramer		Jakob	
		oben	unten	oben	unten	oben	unten	oben	unten
Ansaugung	-	oben	unten	oben	unten	oben	unten	oben	unten
$T_{\text{Brüstung,mean}} [^{\circ}\text{C}]$	54,8	24,0	24,0	23,6	23,6	30,2	30,2	32,3	32,3
$T_{\text{Spalt,mean}} / T_{\text{Außenluft,mean}} [^{\circ}\text{C}]$	32,1	26,8	26,7	26,6	26,3	27,6	27,6	28,2	28,4
$T_{\text{Ansaug,min}} [^{\circ}\text{C}]$	27,0	24,9	24,8	24,6	24,5	27,4	27,0	28,2	27,8
$T_{\text{Ansaug,max}} [^{\circ}\text{C}]$	45,2	26,4	26,5	26,4	26,2	29,5	29,3	30,9	30,9
$T_{\text{Ansaug,mean}} [^{\circ}\text{C}]$	33,0	25,9	25,9	25,7	25,6	28,3	27,9	29,2	29,1

Tab. A4 Temperaturen im Ansaugbereich für den Referenzfall sowie für die einzelnen Begrünungssysteme auch die entsprechenden Brüstungsoberflächentemperaturen und die Lufttemperaturen im Spalt zwischen Begrünungssystem und Fassade bzw. die Außenlufttemperatur für den Referenzfall auf. Unterschieden wird eine Ansaugung im oberen und unteren Abschnitt der Brüstung (THN-ieg)
 Vgl. Kapitel II/ 1.1.2 Aufbau von Simulationsmodellen (TEG und CFD), S. 24f.

Wasserseitige Bilanzierung:

$$\dot{Q}_{c,w} = \dot{V}_w \cdot \rho_w \cdot c_{p,w} \cdot (T_{rl,w} - T_{vl,w}) \quad [\text{A1}]$$

Dabei ist:

$\dot{Q}_{c,w}$	wasserseitige Kühlleistung in W
\dot{V}_w	Kaltwasservolumenstrom in l/h
ρ_w	Dichte von Wasser in kg/m ³
$c_{p,w}$	spezifische Wärmekapazität von Wasser in kJ/(kg K)
$T_{rl,w}$	Kaltwasserrücklauftemperatur in K
$T_{vl,w}$	Kaltwasservorlauftemperatur in K

Luftseitige Bilanzierung der Kühlleistung

$$\dot{Q}_{c,l} = \dot{V}_l \cdot \rho_l \cdot c_{p,l} \cdot (T_{rl} - T_{zl}) \quad [\text{A2}]$$

Dabei ist:

$\dot{Q}_{c,l}$	raumseitige (luftseitige) Kühlleistung in W
\dot{V}_l	Zuluftvolumenstrom in m ³ /h
ρ_l	Dichte von Luft in kg/m ³
$c_{p,l}$	spezifische Wärmekapazität von Luft in kJ/(kg K)
T_{rl}	Raumlufttemperatur in K
T_{zl}	Zulufttemperatur in K

Appendix

Bezeichnung		Position	Messgröße	Messbereich	Genauigkeit
Wetterstation Typ WENTO- IND Lambrecht	Thermo- meter	1	Lufttemperatur [°C]	-30 °C - +70 °C	±0,8 K
	Hygro- meter	2	Relative Luftfeuchte [%]	0 % - 100 %	±3 % (10 % - 90 %) ±4 % (0 % - 100 %)
	Anemo- meter	3	Windgeschwin- digkeit [m/s]	0,3 m/s - 75 m/s	±2 %
	Wind- fahne	4	Windrichtung [°]	0 ° - 360 °	±1 °
	Barometer	5	Luftdruck [hPa]	600 hPa - 1.100 hPa	±2 hPa
Pyranometer Typ SKS 1110 Driesen + Kern GmbH		6 - 8	Solarstrahlung [W/m²]	0 W/m² - 5.000 W/m²	< 3 %, max. 5 %
Hygrothermogeber Typ 907021 inkl. Strahlungsschutz Jumo		9, 11, 29, 33, 37	Lufttemperatur [°C]	-40 °C - +80 °C	±0,2 K
		10, 12, 31, 38, 39	Relative Luftfeuchte [%]	0 % - 100 %	±2 %
Oberflächentemperatur- fühler Typ PT 1000 Klasse B		13 - 18 / 21 - 24	Oberflächen- temperatur [°C]	0 °C - +70 °C	±0,2 K + max. 3 % v. Endwert
Außentemperaturfühler inkl. Strahlungsschutz Typ PT 1000 Klasse B		25 - 27, 32, 34 - 36	Lufttemperatur [°C]	0 °C - +70 °C	±0,2 K + max. 3 % v. Endwert
Luftgeschwindigkeits- Messumformer Typ 8455 Driesen + Kern GmbH		40	Luftgeschwin- digkeit [m/s]	0 m/s - 35 m/s	±2 % v. Messwert ±0,5 % v. Messbereich
Einschraubfühler Typ PT 1000		41, 42, 44, 45	Kaltwasser- Temperatur [°C]	0 °C - +40 °C	±0,2 K + max. 3 % v. Endwert
Magnetisch-Induktiver Durchflussmesser Typ Promag P 300 Endress + Hauser		43, 46	Kaltwasser- Volumenstrom [l/h]	0 l/h - 350 l/h	±0,5 % v. Messwert
Globe-Thermometer / Strahlungsfühler Typ PT 1000 Klasse B		47, 48	Strahlungs- temperatur [°C]	0 °C - +40 °C	±0,2 K + max. 3 % v. Endwert

Tab. 5 Übersicht der am Fassadenversuchsstand in Rednitzhembach installierten Messtechnik (THN-ieg)
 Vgl. Kapitel II/ 1.2.2 Konzeption und Integration der Messtechnik, S. 28 sowie Abbildungen 45 – 47, S. 29

Appendix

Messstellenübersicht Pos. – Sensor	höhe über FFB		höhe über FFB
	[m]		[m]
1 – Thermometer	4,20	25 – Temperatur und Feuchte	2,40
2 – Hygrometer	4,20	26 – Aussentemperaturfühler	0,30
3 – Anemometer	4,20	27 – Aussentemperaturfühler	0,30
4 – Windfahne	4,20	29 – Temperatur und Feuchte	1,50
5 – Barometer	4,20	31 – Temperatur und Feuchte	1,50
6 – Pyranometer	3,30	32 – Aussentemperaturfühler	2,40
7 – Pyranometer	3,50	34 – Aussentemperaturfühler	0,60
8 – Pyranometer	1,50	35 – Aussentemperaturfühler	0,10
9 – Temperatur und Feuchte	1,10	36 – Aussentemperaturfühler	0,30
10 – Temperatur und Feuchte	1,10	37 – Temperatur und Feuchte	1,50
11 – Temperatur und Feuchte	1,10	38 – Temperatur und Feuchte	1,50
12 – Temperatur und Feuchte	1,10	39 – Temperatur und Feuchte	1,50
13 – Oberflächentemperaturfühler	2,40	40 – Luftgeschwindigkeit	1,50
14 – Oberflächentemperaturfühler	1,50	41 – Einschraubfühler	-
15 – Oberflächentemperaturfühler	0,30	42 – Einschraubfühler	-
16 – Oberflächentemperaturfühler	0,30	43 – Durchflussmessgerät	-
17 – Oberflächentemperaturfühler	1,50	44 – Einschraubfühler	-
18 – Oberflächentemperaturfühler	0,30	45 – Einschraubfühler	-
21 – Oberflächentemperaturfühler	0,30	46 – Durchflussmessgerät	-
22 – Oberflächentemperaturfühler	2,40	47 – Strahlungsfühler	1,10
23 – Oberflächentemperaturfühler	1,50	48 – Strahlungsfühler	1,10
24 – Oberflächentemperaturfühler	0,30		
33 – Temperatur und Feuchte	1,50		

Tab. A6 Rednitzhembach, Technikum/ Fassadenversuchsstand – Messstellenübersicht (THN-AR)
 Vgl. Kapitel II/ 1.2.2 Konzeption und Integration der Messtechnik, S. 28 sowie Abbildungen 45 – 47, S. 29

Appendix

Bezeichnung	Position	Messgröße
Aktuelle Zulufttemperatur	49, 60	Lufttemperatur [°C]
Aktuell verwendete Betriebsart	50, 61	Anwesenheit [0], Abwesenheit [1], Boost [2], Bereitschaft [3], ungültig [255]
Effektiver Raumtemperatursollwert	51, 62	Lufttemperatur [°C]
Aktuelle Ventilatorstufe	52, 63	AUS - manuell [1], 1 - manuell [10241], 2 - manuell [20481], 3 - manuell [30721], 4 - manuell [40961], 5 - manuell [51201], AUS - Automatik [0], 1 - Automatik [10240], 2 - Automatik [20480], 3 - Automatik [30720], 4 - Automatik [40960], 5 - Automatik [51200]
Aktueller Betriebszustand	53, 64	keine Funktion [255], Automatikmodus [0], Heizmodus [1], Kühlmodus [3], Nachtauskühlung [4], keine Lüftung [6], Frostschutz [8], nur Lüftungsbetrieb [9], freies Kühlen [10], Anfahrtschaltung [12], freies Heizen [1]
Aktuelle Außentemperatur	54, 65	Lufttemperatur [°C]
Eingestellter Temperatur-Offset	55, 66	Temperaturdifferenz [K]
Aktuelle Raumtemperatur	56, 67	Lufttemperatur [°C]
Aktuelle Raumluftheuchte	57, 68	Relative Raumluftheuchte [%]
Summenvolumenstrom Zuluft	58, 69	Luft-Volumenstrom [l/s]
Summenvolumenstrom Abluft	59, 70	Luft-Volumenstrom [l/s]

Tab. A7 Übersicht Ausgabewerte der Datenpunktliste der dezentralen Fassadenlüftung der Firma Trox (THN-ieg)
 Vgl. Kapitel II/ 1.2.2 Konzeption und Integration der Messtechnik, S. 28

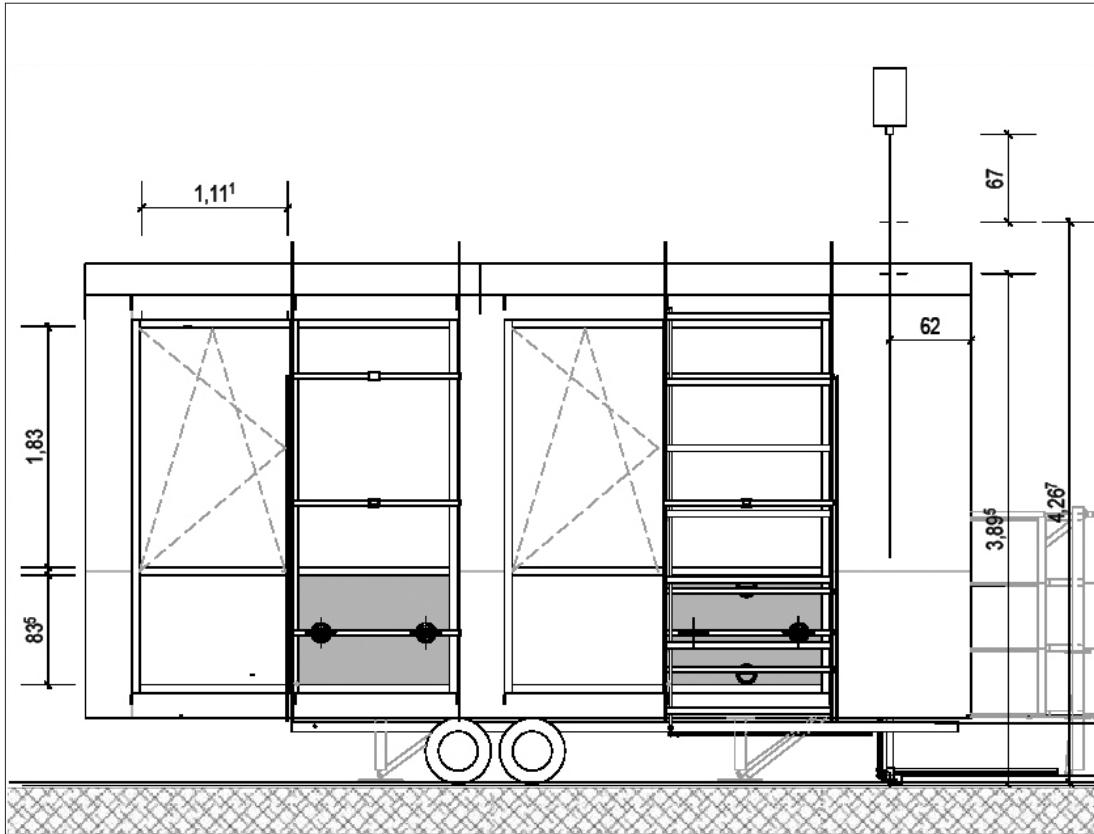


Abb. A1 Rednitzhembach, Technikum/ Fassadenversuchsstand – Ansicht (o. M.) (THN-AR)

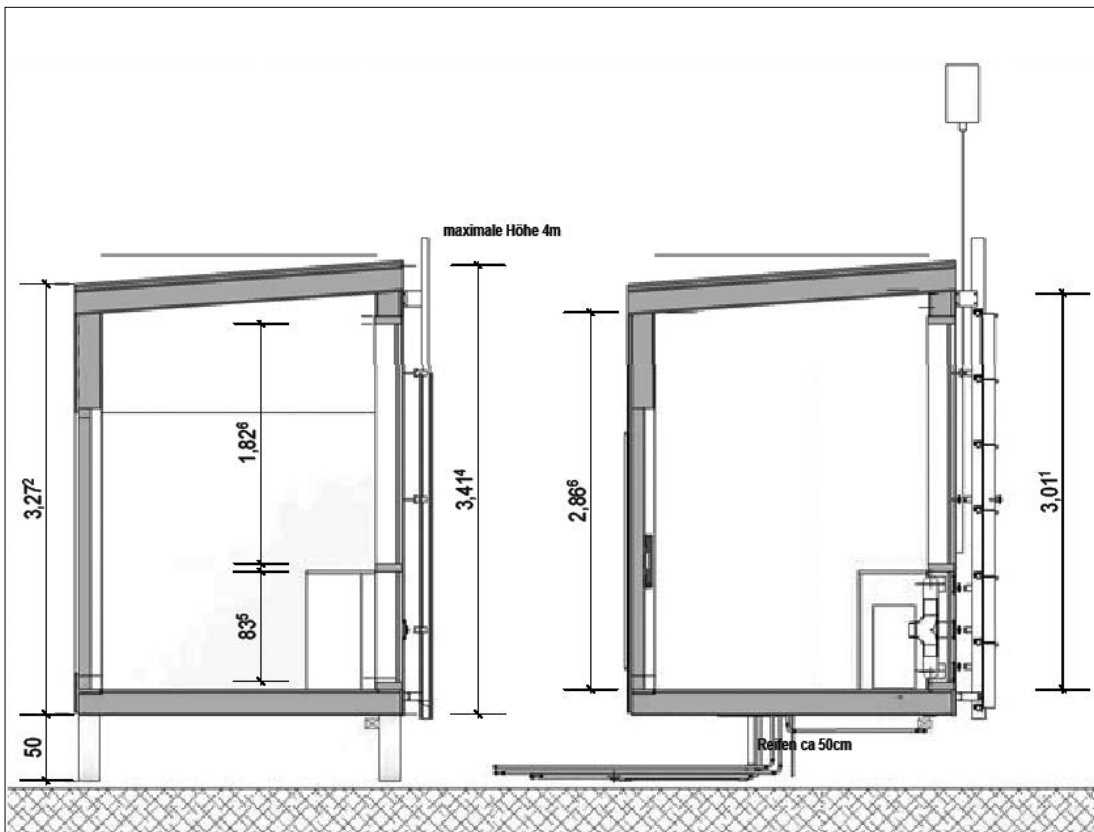


Abb. A2 Rednitzhembach, Technikum/ Fassadenversuchsstand – Schnitt (o. M.) (THN-AR)

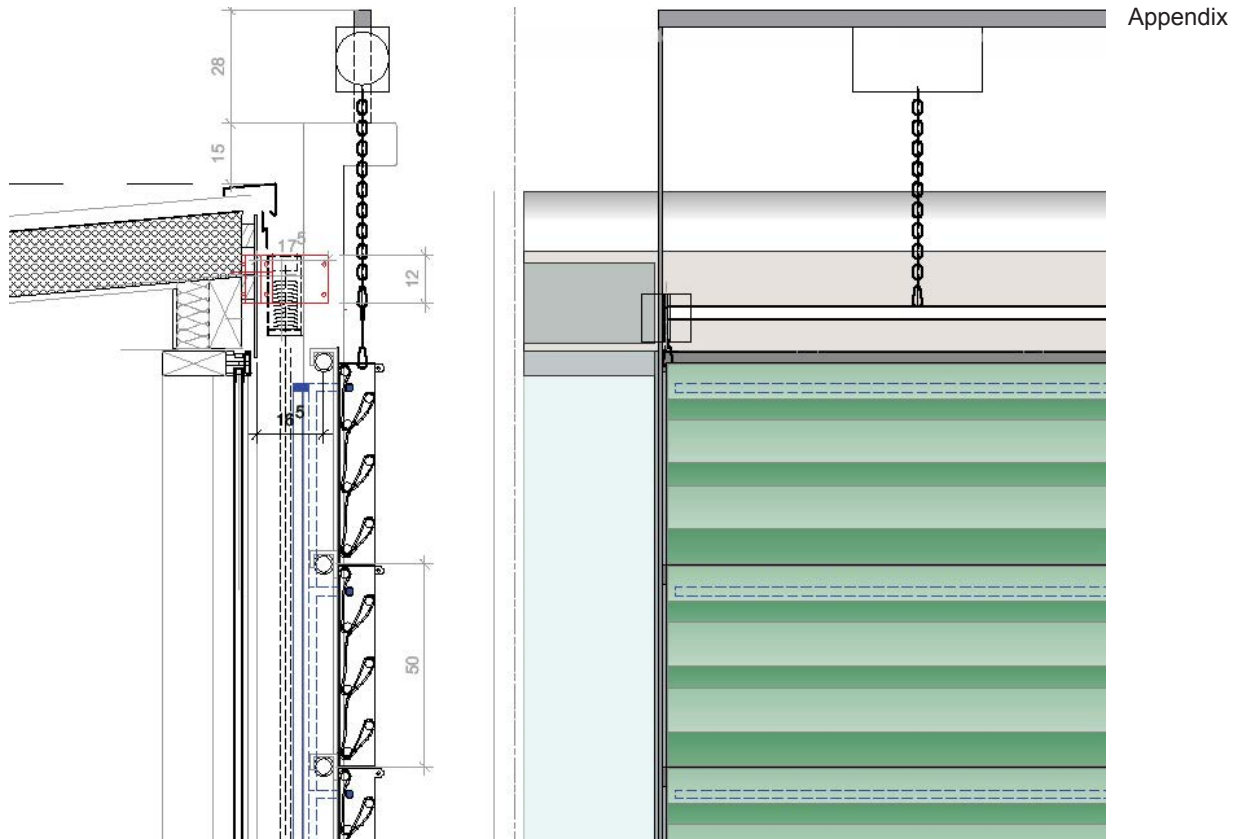


Abb. A3 Rednitzhembach, Technikum/ Fassadenversuchsstand – Traufdetail (o. M.) (THN-AR)

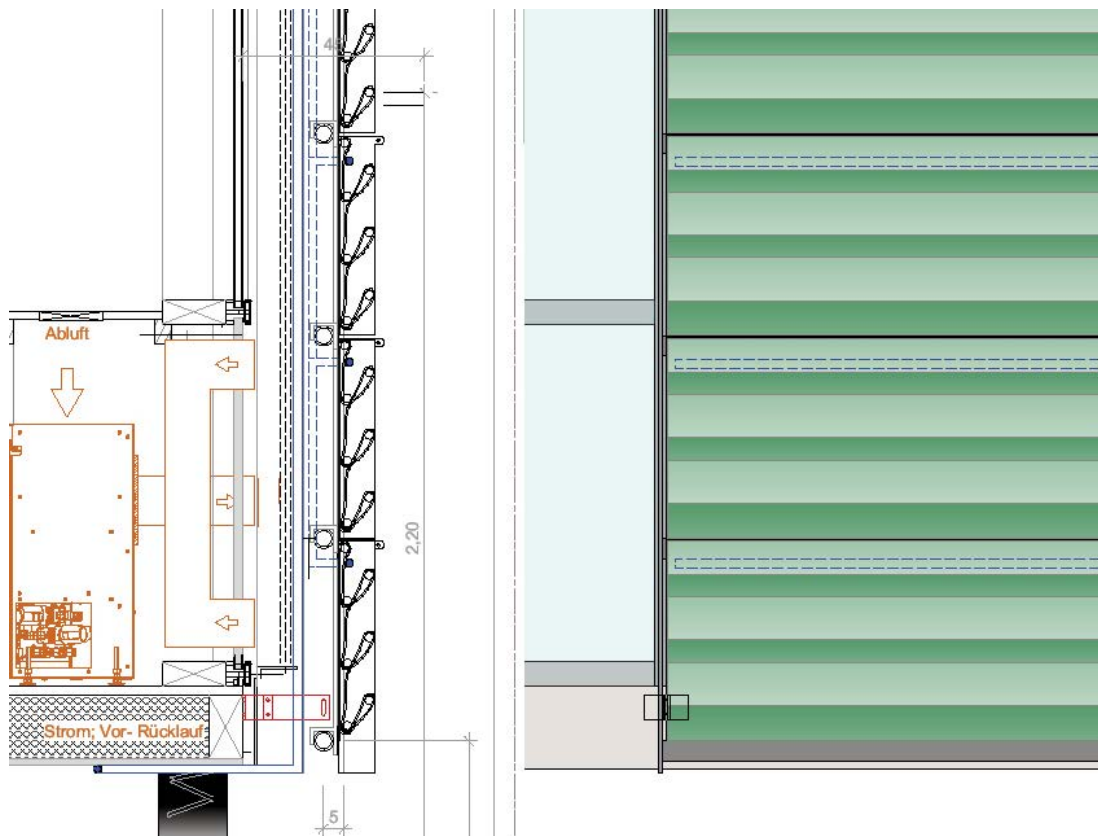


Abb. A4 Rednitzhembach, Technikum/ Fassadenversuchsstand – Sockeldetail (o. M.) (THN-AR)



Abb. A5 Schaltschrank, Messumformer Kryostat (THN-AR)



Abb. A6 Klemmkasten (THN-AR)



Abb. A7 Wetterstation (THN-AR)



Abb. A8 Pyranometer horizontal (THN-AR)



Abb. A9 Pyranometer vertikal (THN-AR)

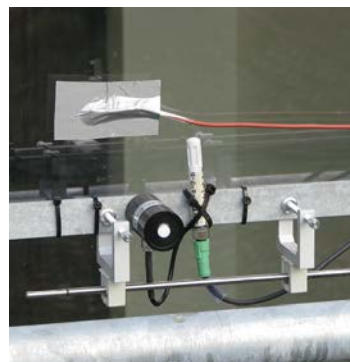


Abb. A10 Oberflächentemperatur, Hygrothermometer, Luftgeschwindigkeit (THN-AR)



Abb. A11 Oberflächentemperatur, Hygrothermometer (THN-AR)

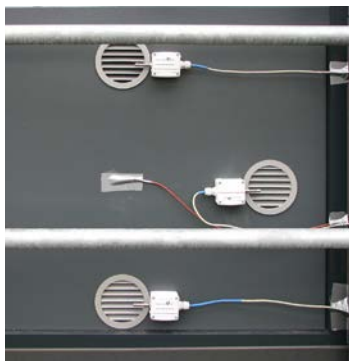


Abb. A12 Lufttemperatur, Oberflächentemperatur (THN-AR)



Abb. A13 Ansaugtemperatursensor DFL (THN-AR)



Abb. A14 Innenraumtemperatur Globethermometer (THN-AR)



Abb. A15 Durchflussmessgerät, Vorlauf- / Rücklauf-temperatur (THN-AR)



Abb. A16 Kühllastsimulator (THN-AR)

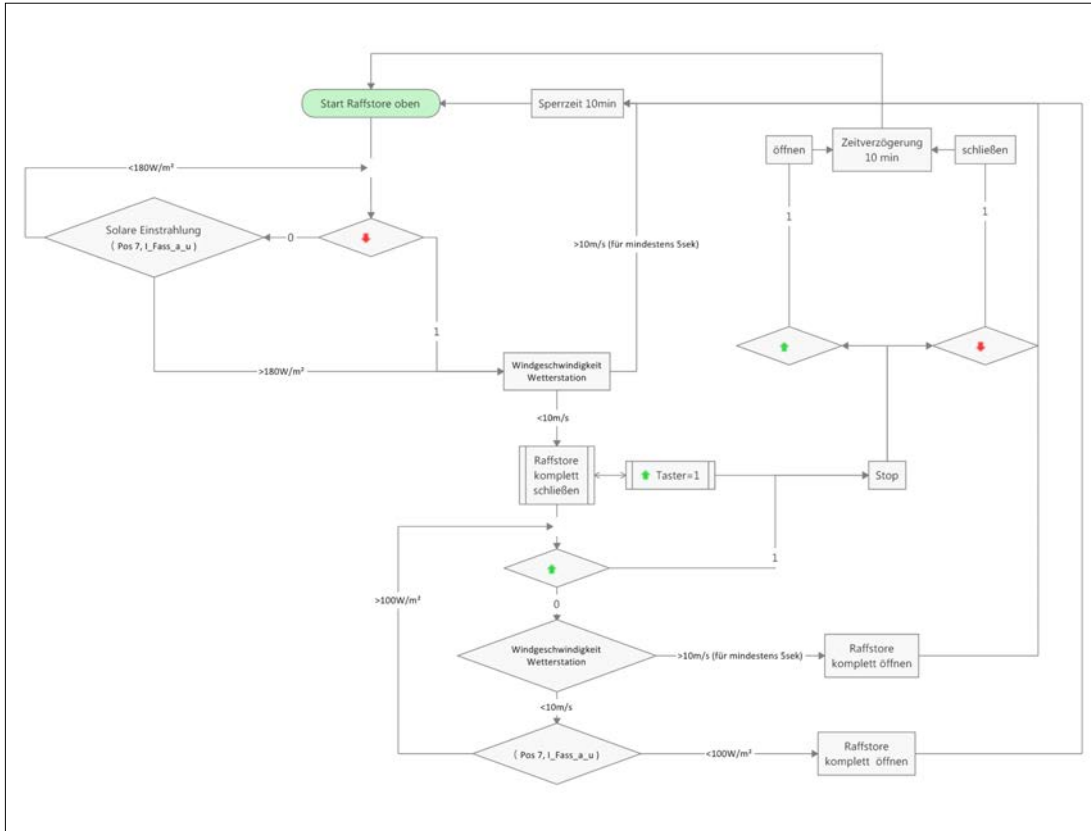


Abb. A17 Rednitzhembach, Technikum/ Fassadenversuchsstand –
Funktionsschema Raffstoresteuerung (THN-AR)












Appendix

Laufzeit	Montag bis Sonntag, von 5.00 bis 17.00 Uhr
Luftvolumenstrom	3-stufig (60, 90 bzw. 120 m ³ /h) in Abhängigkeit der Raumtemperatur Temperaturabweichung für Lüfterstufe 2 (90 m ³ /h): +0,8 K Temperaturabweichung für Lüfterstufe 3 (120 m ³ /h): +1,6 K
Raumtemperatursollwert Kühlen	24 °C
Raumtemperatursollwert Heizen	10 °C
Soll-Zulufttemperatur im Komfortbereich	19 °C
Minimal zulässige Zulufttemperatur	18 °C
Freie Kühlung (Bypass Luft-Wärmetauscher)	Start ΔT (Differenz Raum- zu Außentemperatur): +6,0 K Stopp ΔT (Differenz Raum- zu Außentemperatur): +4,0 K
Nachtauskühlung (Bypass Luft-Wärmetauscher)	nicht aktiviert













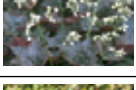







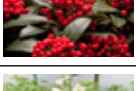

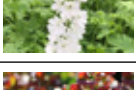

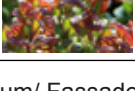

Tab. A8 Parameter der dezentralen Fassadenlüftung für die Messungen am Fassadenversuchsstand in Rednitzhembach (THN-ieg)
Vgl. Kapitel II/ 1.2.3 Nullversuch, S. 30 und II/ 2.1 Messungen am Fassadenprüfstand THN, S. 36ff.

Bewässerungsmenge	Durchfluss	Laufzeit	Zyklen pro Tag	Verbrauch
	[l / min]	[min / ZK]	[ZK]	[l / m ²]
Variante 1 - Vertiko	0,75	5	15	4,05
Variante 2 - Verticalgreendesign	1,75	3	5	7,09
Variante 3 - Kramer	3,50	3	3	8,51
Variante 4 - Jakob	6,67	1,5	3	8,11









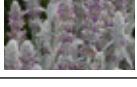
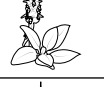


Tab. A9 Rednitzhembach, Technikum/ Fassadenversuchsstand – Bewässerungsmengen (THN-AR)
Vgl. Kapitel II/ 1.2.4 Konzeption Bepflanzung und Bewässerung, S. 31 und II/ 2.1 Messungen am Fassadenprüfstand THN, S. 36ff.

Vertiko lat. Name, dt. Name	Textur	Blattform	Laub	Breite in [cm]	Preis	Licht
			Blütezeit	Höhe [cm]	[€]	Wasser
Bergenia codifolia Herzblättrige Bergenie ①			wintergrün Apr. - Mai	35 - 40 25 - 30	6,50	3,2 mittel
Carex morowii Japanische Segge ②			wintergrün März - Mai	30 - 50 30 - 40	3,30	2,1 mittel
Geranium macrorrhizum Balkan-Storch-Schnabel ③			wintergrün Mai - Juli	25 - 30 20 - 50	3,30	3 wenig, mittel
Heuchera villosa Purpurglöckchen ④			wintergrün Juli - August	40 - 50 30 - 70	3,60	2 -
Heuchera x cultorum Silberglöckchen ⑤			abwerfend Juni - August	50 - 70 40 - 70	9,20	2 -
Tiarella Sugar and Spice Zipfelblättrige Schaumblüte ⑥			wintergrün April - Mai	20 - 30 15 - 25	8,20	2,1 -







Tab. A10 Rednitzhembach, Technikum/ Fassadenversuchsstand
 Variante: 1 – Vertiko GmbH, Buchenbach – Pflanzliste
 (THN-AR) (Quellen: <https://www.baumschule-horstmann.de/>, <https://stauden-ratgeber.de/>,
<https://www.obi.de/garten-freizeit/pflanzen/c/867>, <https://de.wikipedia.org/wiki/Staude>)
 Vgl. Kapitel II/ 1.2.4 Konzeption Bepflanzung und Bewässerung, S. 31

Vertical Green Design lat. Name, dt. Name		Textur	Blattform	Laub	Breite in [cm]	Preis	Licht
				Blütezeit	Höhe [cm]	[€]	Wasser
Gypsophila Rispigiges Schleierkraut	①			abwerfend Juli - August	40 - 80 50 - 100	7,30	3 gering
Ajuga reptans Günsele	②			wintergrün Mai - Juni	25 - 30 25 - 30	4,40	3,2 -
Plectranthus Harfenstrauch	③			- -	- 5 - 60	-	3,2 gering
Geranium cantabrigiense Cambridge Storchschnabel	④			wintergrün Mai - Juli	20 - 30 10 - 30	4,00	3 gering
Hedera helix Efeu	⑤			wintergrün Sept. - Okt.	100 - 300 300 - 400	3,30	3,2 -
Heuchera americana Silberglöckchen	⑥			wintergrün Juni - August	30 - 40 20 - 50	8,20	3,2 -
Heuchera micrantha Rotblättriges Silberglöckchen	⑦			wintergrün Juni - August	20 - 40 20 - 60	3,00	3,2 mittel
Mühlenbeckia Drahtstrauch	⑧			wintergrün Juni - Juli	20 - 30 5 - 10	2,90	3 -
Aquilegia caerulea Sibirische Akelei	⑨			abwerfend Mai - Juni	20 - 25 20 - 30	4,50	2 -
Begonia Dragon Wing Drachenflügelbegonie	⑩			einjährig Mai - Okt.	40 60	2,95	3,2 -
Skimmia japonica Japanische Blütenskimmie	⑪			immergrün April - Mai	100 - 120 60 - 100	11,60	3,2 -
Delphinium elatum Verzweigter Rittersporn	⑫			abwerfend Juni - Oktober	- 120 - 150	4,40	3 -
Leucothoe axillaris Curly Red Lavendelheide	⑬			immergrün Mai - Juni	30 - 45 30 - 45	17,00	2,1 -

Tab. A11 Rednitzhembach, Technikum/ Fassadenversuchsstand
 Variante: 2 – Verticalgreendesign (VGD), Berlin – Pflanzliste
 (THN-AR) (Quellen: <https://www.baumschule-horstmann.de/>, <https://stauden-ratgeber.de/>,
<https://www.obi.de/garten-freizeit/pflanzen/c/867>, <https://de.wikipedia.org/wiki/Staude>)
 Vgl. Kapitel II/ 1.2.4 Konzeption Bepflanzung und Bewässerung, S. 32

Kramer Gartenbau lat. Name, dt. Name	Textur	Blattform	Laub	Breite in [cm]	Preis	Licht
			Blütezeit	Höhe [cm]	[€]	Wasser
Bergenia codifolia Herzblättrige Bergenie ①			wintergrün April - Mai	35 - 40 25 - 30	6,50	3,2 mittel
Geranium magnificum Pracht-Storchschnabel ②			abwerfend Mai - August	30 - 50 40 - 50	3,70	3,2 -
Heucera micrantha Rotblättriges Silberglöckchen ③			wintergrün Juni - August	20 - 40 20 - 60	3,00	3,2 mittel, stark
Pennisetum alopecuroides Lampenputzergas ④			abwerfend August - Okt.	50 - 60 60 - 90	5,00	3 -
Stachy byzantina Woll-Ziest ⑤			wintergrün Juni - Juli	25 - 30 15 - 20	3,70	3 gering
Teucrium chamaedrys Edel-Gamander ⑥			abwerfend Juli - August	20 - 30 20 - 25	3,20	3 -

Tab. A12 Rednitzhembach, Technikum/ Fassadenversuchsstand
Variante: 3 – Kramer, München – Pflanzliste
(THN-AR) (Quellen: <https://www.baumschule-horstmann.de/>, <https://stauden-ratgeber.de/>,
<https://www.obl.de/garten-freizeit/pflanzen/c/867>, <https://de.wikipedia.org/wiki/Staude>)
Vgl. Kapitel II/ 1.2.4 Konzeption Bepflanzung und Bewässerung, S. 32

Jakob lat. Name, dt. Name	Textur	Blattform	Laub	Breite in [cm]	Preis	Licht
			Blütezeit	Höhe [cm]	[€]	Wasser
Ipomea Prunkwinde, Trichterwinde ①			einjährig Juli - Okt.	- 300	-	3 feucht
Aristolochia durior Pfeifenwinde, Pfeifenblume ②			abwerfend Juni - August	200 - 600 600 - 1000	28,00	- -
Akebie Fingerblättrige Klettergurke ③			abwerfend Mai	40 - 250 600 - 700	22,50	3,2 -

Tab. A13 Rednitzhembach, Technikum/ Fassadenversuchsstand
Variante: 4 – Jakob, Ostfildern – Pflanzliste
(THN-AR) (Quellen: <https://www.baumschule-horstmann.de/>, <https://stauden-ratgeber.de/>,
<https://www.obl.de/garten-freizeit/pflanzen/c/867>, <https://de.wikipedia.org/wiki/Staude>)
Vgl. Kapitel II/ 1.2.4 Konzeption Bepflanzung und Bewässerung, S. 33

A1.1 Überwinterung der Begrünungssysteme (THN)

Die Verzögerung der Arbeiten bei der Realisierung des Fassadenversuchsstands THN und die damit einhergehende Verschiebung der Experimentellen Studien I in den Frühsommer 2020 erforderten besondere Maßnahmen für die Überwinterung der Pflanzen des Living Wall Outdoor (LWO)-Systems der Firma Vertiko (Varianten 1). Allein durch natürliche Beregnung kann keine ausreichende Bewässerung erfolgen. Dies liegt in der Hauptsache an zwei Faktoren. Zum einen an einer geringen Wasserspeicherfähigkeit durch einen sehr geringen Substratanteil, zum anderen ist das System mit einem Geotextil bespannt, welches wasserabweisend ist. Somit ist es notwendig, die Module automatisiert zu bewässern.

Da die Bewässerungsanlage beim Fassadenversuchsstand in Rednitzhembach sich in einem nicht frostfreien Bereich befindet, muss sie während der Wintermonate stillgelegt werden. Daher ist eine Lagerung der LWO im Außenbereich nicht möglich. Auch eine Überwinterung im beheizten Innenbereich (Temperatur selten unter 21 °C) ist nicht empfehlenswert. (Abb. A18)

Als Ort zur Überwinterung 2019/2020 wurde einer der beiden Versuchsräume gewählt. Hier ist eine kontrollierte Steuerung der klimatischen Verhältnisse möglich. Ein Heizlüfter mit Frostwächterfunktion gewährleistet eine Temperatur über 10 °C. Zur Befestigung von Steuerung und Vorlaufbehälter der Bewässerung dient eine mobile Unterkonstruktion. Für eine temporäre Verbindung der Bewässerungsanlage mit den Modulen wurden flexible Schläuche verbaut. Die Begrünungsmodule werden in Kunststoffbehälter eingestellt, in denen das überschüssige Wasser aufgefangen wird. (Abb. A20+21)

Die verbleibenden Varianten 2 – 4 benötigen zur Überwinterung lediglich eine sporadische manuelle Bewässerung und konnten am Lagergerüst verbleiben. (Abb. A22–26)

Die Maßnahmen zur Überwinterung des Living Wall Outdoor (LWO)-Systems zeigten nach den Erfahrungen im Winter 2019/2020 weiterhin Optimierungspotential (ca. 20 % Ausfallquote). Die Innenraumtemperatur über 10 °C und eine automatisierte Bewässerung ermöglichte ein konstantes Wachstum der Pflanzen, jedoch konnte sich somit auch eine Population von Blattläusen entwickeln und ausbreiten. Diese verursachten indessen nur geringfügig Schäden und konnten mit einer Lösung aus Essigreiniger und Wasser entfernt werden. Bedeutsamer war der Ausfall der Pflanzen an Stellen mit geringer Belichtung.

Die Überwinterung der LWO 2020/2021 wurde ohne automatisierte Bewässerung geplant. Die Module wurden bodennah in einem 45° Winkel am Lagergerüst aufgestellt. Dies begünstigt die passive Fähigkeit zur Aufnahme von Regenwasser und weniger Belastung durch Frost, da in Bodennähe Erfahrungsgemäß mit geringeren Temperaturschwankungen zu rechnen ist. Zusätzlich wurde eine Gießhilfe aus 3D-Druckteilen und Kunststoffleitungen ergänzt.

Das sporadisch manuell eingefüllte Gießwasser wird in das Substrat hinter der Geotextilebene geleitet, wo es von den Wurzeln aufgenommen werden kann. Durch die Überwinterung im Außenbereich wird zusätzlich die Gefahr von Wasserschäden im Innenraum vermieden und ein geringerer Befall der Vegetation durch Schädlinge erwartet. Die verbleibenden Varianten 3 und 4 wurden ebenfalls sporadisch manuell bewässert.

Um die Begrünungssysteme Variante 1 (LWO Vertiko) und Variante 3 (Kramer) vor zu starken Kälteeinflüssen (zweistelliger Minusbereich) zu schützen wurden Dämmmaterialien und Folien zeitweilig (KW 6 – 8/2021) auf die Begrünungssysteme aufgebracht. Dies ist erforderlich, da die Pflanzen in der Lagersituation stärker den Umwelteinflüssen ausgesetzt sind als in einem gebäudenahen Umfeld.

Die Gießvorrichtung aus 3D-gedruckten Bauteilen, abgestimmt auf die Variante 1 Vertiko ermöglichte die manuelle Bewässerung während der Übergangszeit mit deaktivierter Bewässerungsanlage aufgrund von Frostgefahr. Zusammen mit einem regelmäßigeren Tagesgang konnten somit die Ausfälle zwar reduziert werden. (Abb. A19)

Dennoch waren hohe Ausfallquoten bedingt durch den kalten und trockenen Winter zu verzeichnen (Variante 1: 60 %, Variante 3: 75 %).



Abb. A18 Rednitzhembach, Technikum/ Fassadenversuchsstand – Bewässerungsanlage (THN-AR)



Abb. A19 Rednitzhembach, Technikum/ Fassadenversuchsstand – Gießhilfe (THN-AR)



Abb. A20 Pflanzen Variante 1 (Vertiko) bei Überwinterung im Fassadenversuchsstand, 21. Januar 2020 (THN-AR)



Abb. A21 Pflanzen Variante 1 (Vertiko) nach Überwinterung im Fassadenversuchsstand, 03. März 2020 (THN-AR)

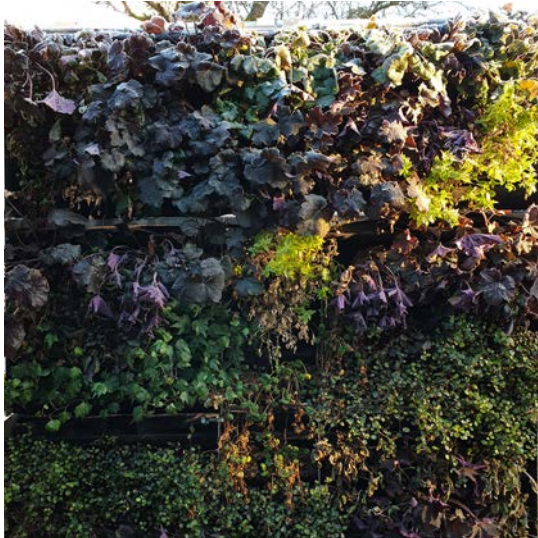


Abb. A22 Pflanzen Variante 2 (VGD) bei Überwinterung am Lagergerüst, 21. Januar 2020 (THN-AR)

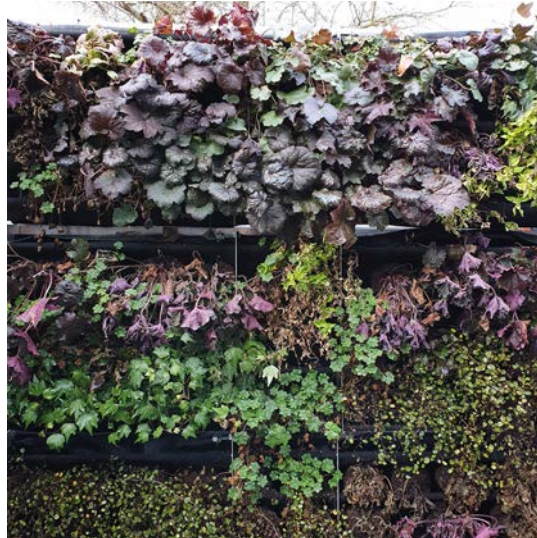


Abb. A23 Pflanzen Variante 2 (VGD) nach Überwinterung am Lagergerüst, 03. März 2020 (THN-AR)



Abb. A24 Pflanzen Variante 3 (Kramer) bei Überwinterung am Lagergerüst, 21. Januar 2020 (THN-AR)

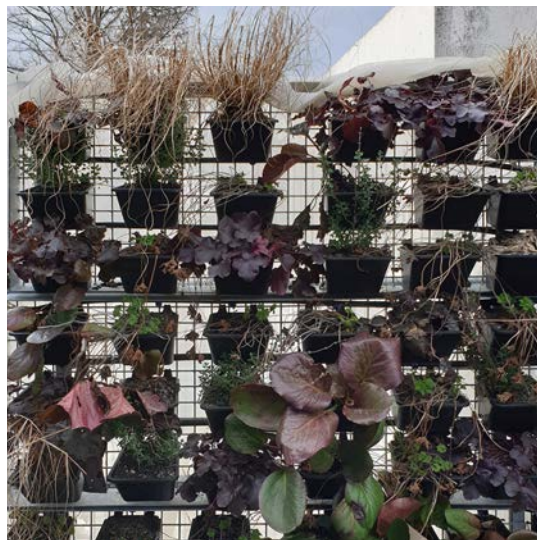


Abb. A25 Pflanzen Variante 3 (Kramer) nach Überwinterung am Lagergerüst, 03. März 2020 (THN-AR)



Abb. A26 Pflanzen Variante 4 (Jakob) nach Überwinterung, 31. März 2020 (THN-AR)

A2 Experimentelle Studien I (THN)

Appendix



Abb. A27 Rednitzhembach, Technikum/ Fassadenversuchsstand – Referenzraum mit HPL-Platte (THN-ieg)



Abb. A28 Rednitzhembach, Technikum/ Fassadenversuchsstand – Referenzraum mit Verglasung und Raffstore (THN-ieg)

Appendix

Variante	$Q_{c,w}$ [kWh]		$Q_{c,l}$ [kWh]		$Q_{c,aux}$ [kWh]		$\Delta Q_{c,w}$ [%]	$\Delta Q_{c,l}$ [%]	$\Delta Q_{c,aux}$ [%]
	u	b	u	b	u	b			
VGD-o	3,81	2,94	6,71	5,38	2,96	2,94	-23,0	-19,8	-0,7
VGD-u	3,76	2,90	7,70	6,20	2,99	2,96	-22,9	-19,4	-0,7
Vertiko-o	5,64	4,42	8,51	7,29	2,99	2,96	-21,7	-14,4	-1,1
Vertiko-u*	9,27	6,93	9,28	7,83	2,57	2,52	-25,2	-15,7	-2,5
Kramer-o	6,66	4,44	9,23	7,58	2,99	2,93	-33,4	-17,9	-2,3
Kramer-u	6,52	4,12	9,43	7,51	3,00	2,97	-36,7	-20,4	-1,0
Kramer-v2-o	13,31	8,31	13,83	10,11	3,17	3,01	-37,6	-26,9	-5,1
Jakob-o	4,45	3,62	9,22	8,44	3,01	2,97	-18,5	-8,5	-1,5
Jakob-u	3,55	2,62	8,08	7,30	2,96	2,93	-26,3	-9,6	-0,9

Tab. A14 Wasserseitiger, raumseitiger Kühlenergieverbrauch sowie Hilfsenergieverbrauch der dezentralen Fassadenlüftung während der jeweiligen Messreihe – Ergebnisse Messung Fassadenversuchsstand Rednitzhembach (THN-ieg)
 Vgl. Kapitel II/ 2.1 Messungen am Fassadenprüfstand THN, S. 39

$Q_{c,w}$	wasserseitiger Kühlenergieverbrauch
$Q_{c,l}$	raumseitiger Kühlenergieverbrauch
$Q_{c,aux}$	Hilfsenergieverbrauch DFL
$\Delta Q_{c,w}$	Differenz wasserseitiger Kühlenergieverbrauch – un-/begrünt
$\Delta Q_{c,l}$	Differenz raumseitiger Kühlenergieverbrauch – un-/begrünt
$\Delta Q_{c,aux}$	Differenz Hilfsenergieverbrauch DFL – unbegrünte/begrünte Fassade
u	unbegrünt (Referenzfall)
b	begrünt
*	aufgrund Stromausfall nur fünf Tage auswertbar

Variante	T _{op,max} [°C]		U-Std > 26 °C [h]		Gh > 26 °C [Kh]		Ø-Ü > 26 °C [K]	
	u	b	u	b	u	b	u	b
VGD-oben	27,0	26,8	4	3	1,8	1,6	0,5	0,5
VGD-unten	28,7	28,4	6	6	6,1	5,6	1,0	0,9
Vertiko-oben	26,9	26,9	6	6	2,1	2,7	0,4	0,5
Vertiko-unten*	28,1	28,1	13	14	13,0	13,2	1,0	1,0
Kramer-oben	26,7	26,7	5	5	1,2	1,4	0,3	0,3
Kramer-unten	27,6	27,6	7	6	4,5	4,1	0,7	0,7
Kramer-v2-oben	27,6	27,6	17	16	11,4	10,3	0,7	0,7
Jakob-oben	27,7	27,0	4	4	3,6	1,9	0,8	0,5
Jakob-unten	26,4	26,8	3	3	0,6	0,7	0,2	0,2

Tab. A15 Empfundene Raumtemperaturen und Überschreitungen während der Nutzungszeit – Ergebnisse Messung Fassadenversuchsstand Rednitzhembach (THN-ieg)
 Vgl. Kapitel II/ 2.1 Messungen am Fassadenprüfstand THN, S. 41

Top,max	maximale empfundene Raumtemperatur
U-Std	Überschreitungsstunden
Gh	Übertemperaturgradstunden
Ø-Ü	durchschnittliche Überschreitung
u	unbegrünt (Referenzfall)
b	begrünt
*	aufgrund Stromausfall nur fünf Tage auswertbar

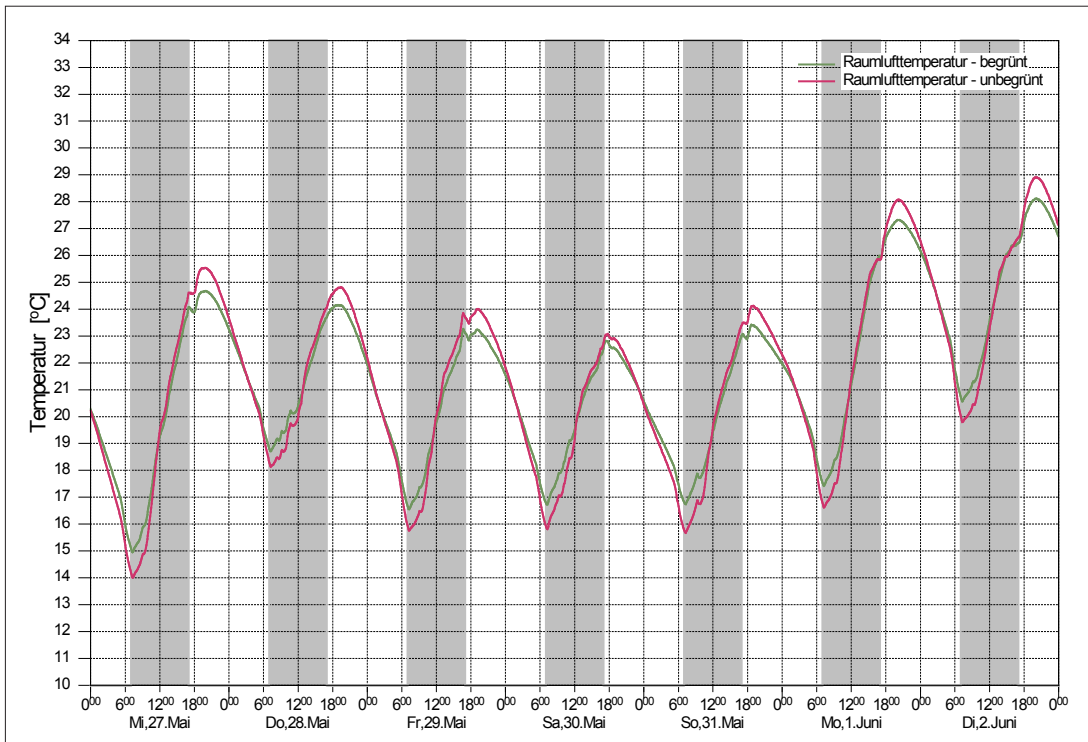


Abb. A29 Verlauf der empfundenen Raumtemperatur für die beiden Musterräume für das System Verticalgreendesign (VGD) (Ansagung oben) – Ergebnisse Messung Fassadenversuchsstand Rednitzhembach (27. Mai – 2. Juni 2020) (THN-ieg)

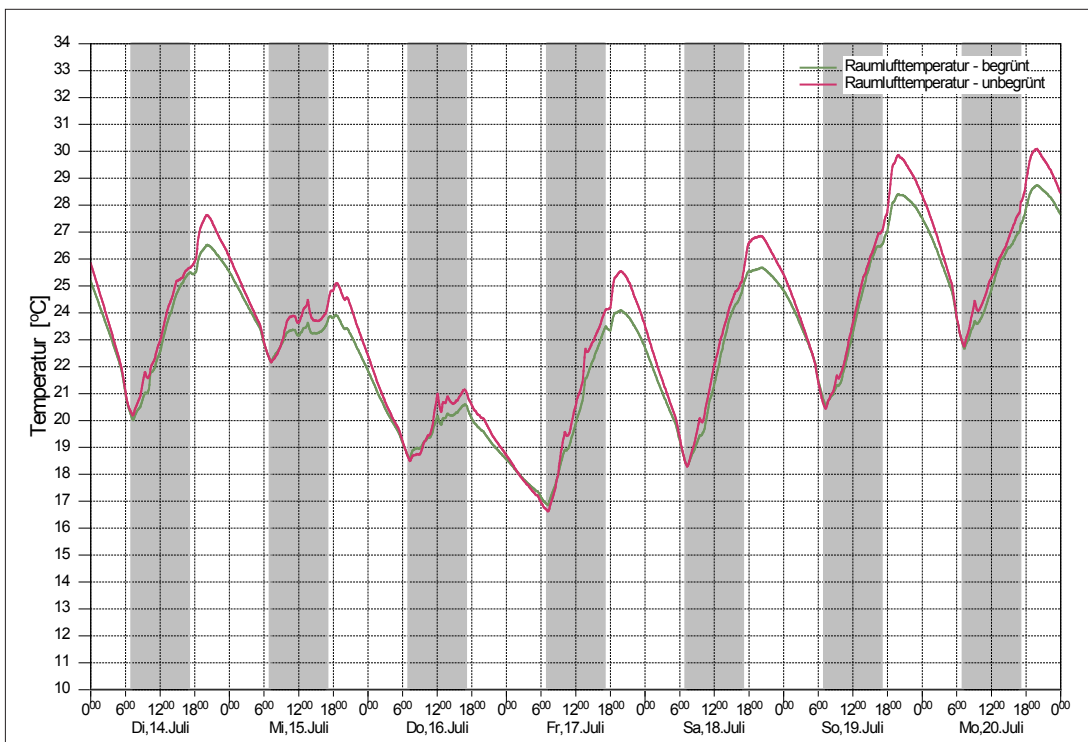


Abb. A30 Verlauf der empfundenen Raumtemperatur für die beiden Musterräume für das System Kramer (Ansagung unten) – Ergebnisse Messung Fassadenversuchsstand Rednitzhembach (14. Juli – 20. Juli 2020) (THN-ieg)

Appendix

Variante	AH _{min} [g/kg]		AH _{mean} [g/kg]		AH _{max} [g/kg]		ΔAH _{min} [%]	ΔAH _{mean} [%]	ΔAH _{max} [%]
	u	b	u	b	u	b			
VGD-o	4,7	4,8	6,0	6,1	7,2	7,3	+2,5	+0,6	+0,9
VGD-u	5,7	5,8	9,1	9,1	11,4	11,6	+1,5	+0,4	+1,1
Vertiko-o	7,6	7,6	9,8	9,7	12,3	12,4	+0,5	-1,0	+0,7
Vertiko-u*	7,2	7,2	10,0	9,8	11,9	11,9	+0,4	-1,4	+0,5
Kramer-o	6,0	6,2	8,8	8,9	11,4	11,5	+2,0	+0,7	+0,9
Kramer-u	6,6	7,0	8,8	9,0	10,7	10,8	+6,8	+2,2	+0,7
Kramer-v2-o	5,8	6,3	8,9	9,1	12,7	12,6	+8,3	+2,3	-0,8
Jakob-o	7,6	7,6	9,8	9,8	12,4	12,3	+0,2	+0,4	-0,2
Jakob-u	8,5	8,7	10,7	10,8	12,3	12,4	+2,0	+0,9	+1,2

Tab. A16 Absolute Raumlufffeuchte in den beiden Musterräumen während der Nutzungszeit – Ergebnisse Messung Fassadenversuchsstand Rednitzhembach (THN-ieg)
Vgl. Kapitel II/ 2.1 Messungen am Fassadenprüfstand THN, S. 41

- AH_{min} minimale absolute Raumlufffeuchte
- AH_{mean} mittlere absolute Raumlufffeuchte
- AH_{max} maximale absolute Raumlufffeuchte
- ΔAH_{min} Differenz minmale absolute Raumlufffeuchte – unbegrünte/ begrünte Fassade
- ΔAH_{mean} Differenz mittlere absolute Raumlufffeuchte – unbegrünte/ begrünte Fassade
- ΔAH_{max} Differenz maximale absolute Raumlufffeuchte – unbegrünte/ begrünte Fassade
- u unbegrünt (Referenzfall)
- b begrünt
- * aufgrund Stromausfall nur fünf Tage auswertbar

Simulationsberechnungen und Abgleich mit Messergebnissen

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{\sum_{i=1}^n (G_i - S_i)^2}{n} \right)}$$

[A2]

Dabei ist:

- RMSE quadratische Mittelwertabweichung/ Mittelwertfrequenz
- G_i gemessene Wert im jeweiligen Zeitschritt
- S_i simulierte Wert im jeweiligen Zeitschritt
- n Gesamtanzahl der Zeitschritte

$$NRMSE = \frac{RMSE}{(G_{max} - S_{min})}$$

[A3]

Dabei ist:

- NRMSE normierte quadratische Mittelwertabweichung/ -frequenz in %
- G_{max} maximal gemessener Wert im gesamten Betrachtungszeitraum
- S_{min} minimal simulierter Wert im gesamten Betrachtungszeitraum

Appendix

System	Kennzahl	$T_{op,u}$	$T_{op,b}$	$\dot{Q}_{c,w,u}$	$\dot{Q}_{c,w,b}$	$\dot{Q}_{c,l,u}$	$\dot{Q}_{c,l,b}$
Vertiko	R^2	0,94	0,95	0,79	0,71	0,88	0,83
	RMSE	0,8 K	0,5 K	38 W	37 W	24 W	24 W
	NRMSE	7,9 %	5,5 %	11,6 %	15,2 %	8,5 %	6,3 %
VGD	R^2	0,95	0,96	0,80	0,72	0,79	0,79
	RMSE	0,9 K	0,6 K	31 W	31 W	30 W	22 W
	NRMSE	6,4 %	4,9 %	11,0 %	14,9 %	8,8 %	5,4 %
Kramer	R^2	0,91	0,95	0,91	0,83	0,94	0,92
	RMSE	0,9 K	0,5 K	40 W	37 W	27 W	23 W
	NRMSE	8,6 %	5,7 %	12,1 %	14,5 %	7,8 %	5,4 %
Jakob	R^2	0,94	0,96	0,83	0,81	0,89	0,88
	RMSE	0,8 K	0,5 K	29 W	25 W	29 W	27 W
	NRMSE	5,6 %	3,9 %	6,9 %	6,1 %	9,1 %	6,9 %

Tab. A17 Bestimmtheitsmaß R^2 , quadratische Mittelwertabweichung RMSE und normierte quadratische Mittelwertabweichung NRMSE von Simulation und Messung (THN-ieg)
 Vgl. Kapitel II/ 2.2 Simulationsberechnungen und Abgleich mit Messergebnissen, S. 42

$T_{op,u}$	empfundene Raumtemperatur für den Referenzfall
$T_{op,b}$	empfundene Raumtemperatur für den begrünten Fall
$\dot{Q}_{c,w,u}$	wasserseitige Kühlleistung für den Referenzfall
$\dot{Q}_{c,w,b}$	wasserseitige Kühlleistung für den begrünten Fall
$\dot{Q}_{c,l,u}$	raumseitige Kühlleistung für den Referenzfall
$\dot{Q}_{c,l,b}$	raumseitige Kühlleistung für den begrünten Fall

Appendix

System	$Q_{c,w,u}$ [kWh]		$Q_{c,w,b}$ [kWh]		$\Delta Q_{c,w,u}$ [%]	$\Delta Q_{c,w,b}$ [%]
	simuliert	gemessen	simuliert	gemessen		
Vertiko	5,80	5,64	4,38	4,42	+2,8	-0,9
VGD	4,06	3,81	2,93	2,94	+6,6	-0,2
Kramer	14,04	13,31	8,77	8,31	+5,5	+5,5
Jakob	4,62	4,45	3,50	3,62	+4,0	-3,3

Tab. A18 Vergleich des wöchentlichen wasserseitigen Kühlenergiebedarfs von Simulation und Messung (jeweils Messperiode Ansaugung oben, vgl. S. ...) (THN-ieg)
 Vgl. Kapitel II/ 2.2 Simulationsberechnungen und Abgleich mit Messergebnissen, S. 42

$Q_{c,w,u}$ wasserseitiger Kühlenergiebedarf für den Referenzfall
 $Q_{c,w,b}$ wasserseitiger Kühlenergiebedarf für den begrünten Fall
 $\Delta Q_{c,w,u}$ relative Abweichung wasserseitiger Kühlenergiebedarf für den Referenzfall
 $\Delta Q_{c,w,b}$ relative Abweichung wasserseitiger Kühlenergiebedarf für den begrünten Fall

System	$Q_{c,l,u}$ [kWh]		$Q_{c,l,b}$ [kWh]		$\Delta Q_{c,l,u}$ [%]	$\Delta Q_{c,l,b}$ [%]
	simuliert	gemessen	simuliert	gemessen		
Vertiko	8,54	8,51	7,89	7,29	+0,3	+8,3
VGD	6,28	6,71	5,86	5,38	-6,4	+9,0
Kramer	13,27	13,83	10,24	10,11	-4,0	+1,3
Jakob	8,72	9,22	8,10	8,44	-5,4	-4,0

Tab. A19 Vergleich des wöchentlichen raumseitigen Kühlenergiebedarfs von Simulation und Messung (jeweils Messperiode Ansaugung oben, vgl. S. ...) (THN-ieg)
 Vgl. Kapitel II/ 2.2 Simulationsberechnungen und Abgleich mit Messergebnissen, S. 42

$Q_{c,l,u}$ raumseitiger Kühlenergiebedarf für den Referenzfall
 $Q_{c,l,b}$ raumseitiger Kühlenergiebedarf für den begrünten Fall
 $\Delta Q_{c,l,u}$ relative Abweichung raumseitiger Kühlenergiebedarf für den Referenzfall
 $\Delta Q_{c,l,b}$ relative Abweichung raumseitiger Kühlenergiebedarf für den begrünten Fall

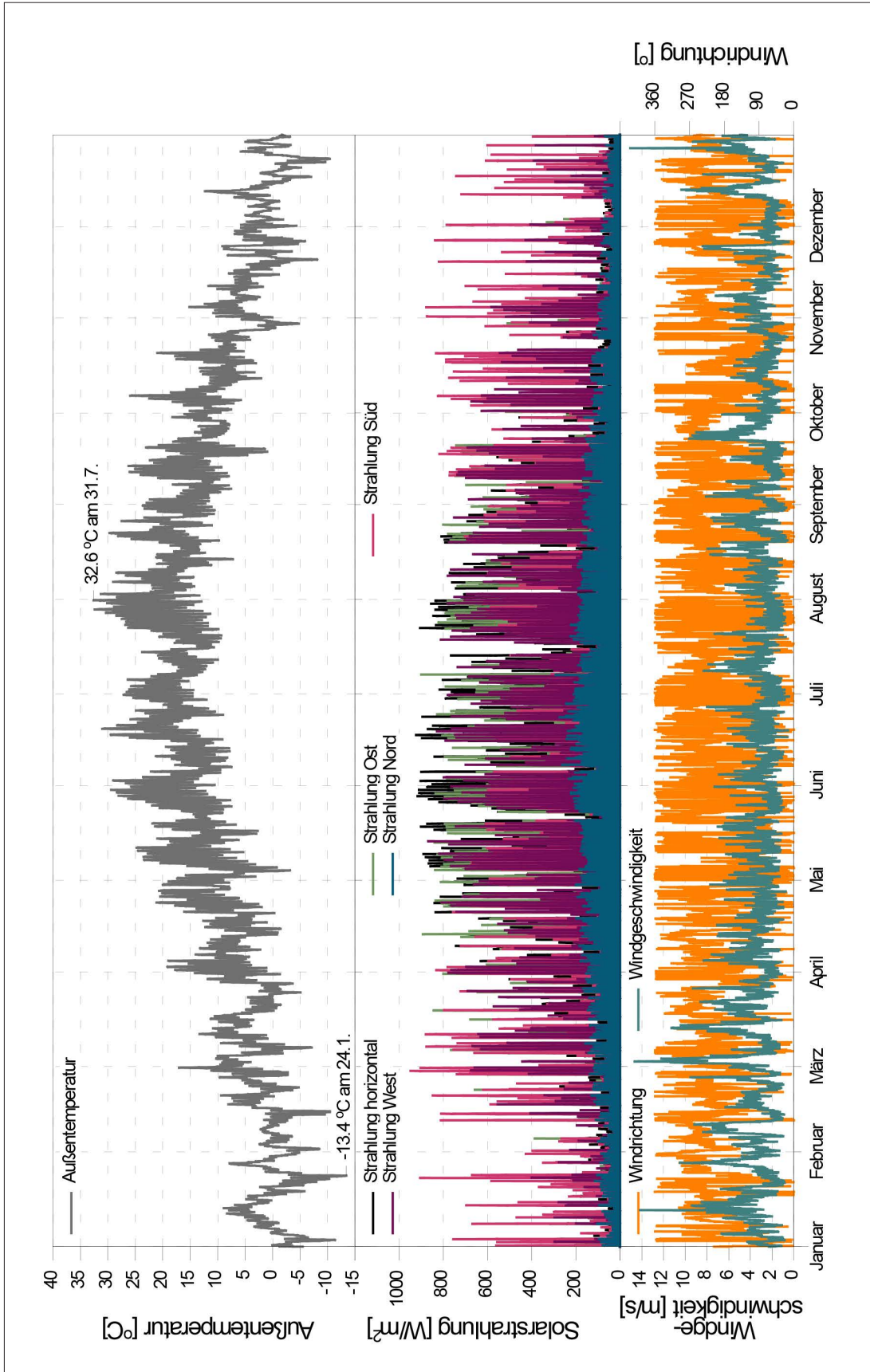


Abb. A31 Jahresverlauf ortsgenaues Testreferenzjahr (TRY 2017) für den Standort Rednitzhembach (THN-ieg)

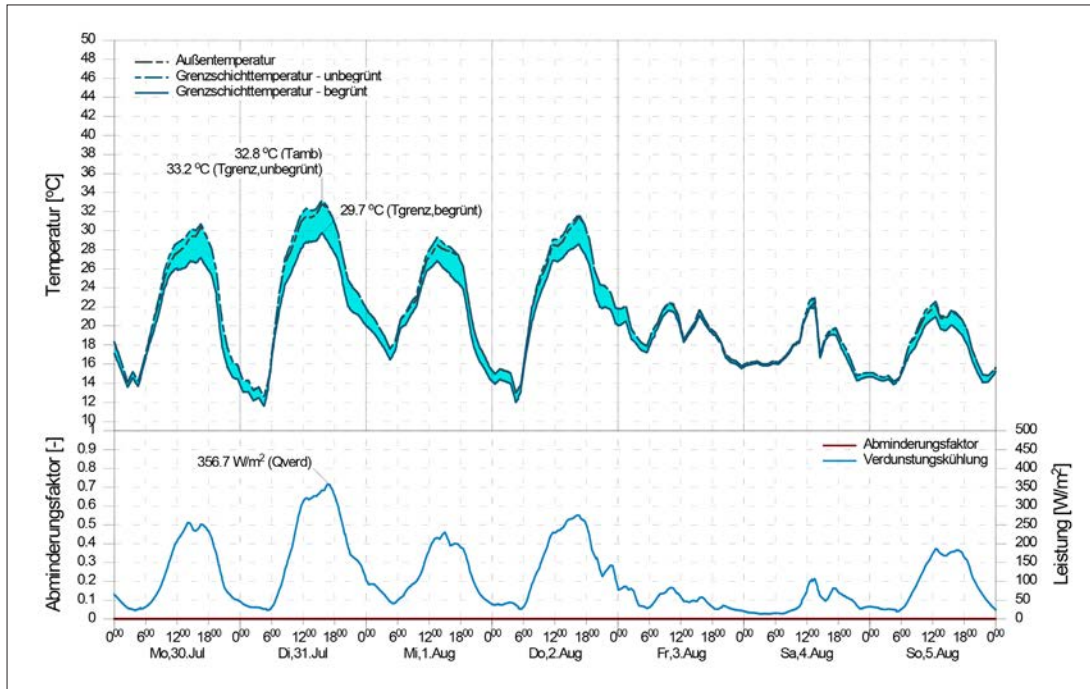


Abb. A32 Grenzschichttemperatur, Verdunstungskühlung und Abminderungsfaktor für eine Sommerwoche (30. Juli – 5. August [TRY 2017]) für das System Verticalgreendesign (VGD) – Ergebnisse Simulation Fassadenversuchsstand Rednitzhembach (THN-ieg)

System	$W_{el,c}$ [kWh]		$W_{el,aux}$ [kWh]		$\Delta W_{el,c}$ [%]	$\Delta W_{el,aux}$ [%]
	u	b	u	b		
Vertiko	21,6	14,3	65,2	64,6	-33,7	-0,9
VGD	21,6	12,2	65,2	64,5	-43,0	-1,0
Kramer	21,6	13,5	65,2	64,6	-37,3	-0,9
Jakob	21,6	16,8	65,2	64,7	-22,6	-0,8

Tab. A20 Endenergiebedarf Kühlung, Hilfsenergiebedarf (Betrachtungszeitraum: Mai bis September [TRY 2017]) – Ergebnisse Simulation Fassadenversuchsstand Rednitzhembach (THN-ieg)
Vgl. Kapitel II/ 2.2 Simulationsberechnungen und Abgleich mit Messergebnissen, S. 44

$W_{el,c}$ Endenergiebedarf Kühlung (Arbeitszahl Kälteerzeugung: 3,50)
 $W_{el,aux}$ Hilfsenergiebedarf dezentrale Fassadenlüftung
 $\Delta W_{el,c}$ relative Abweichung Endenergiebedarf Kühlung – unbegrünte/ begrünte Fassade
 $\Delta W_{el,aux}$ relative Abweichung Hilfsenergiebedarf – unbegrünte/ begrünte Fassade
 u unbegrünt (Referenzfall)
 b begrünt

System	CO _{2,el,c} [kg]		CO _{2,el,aux} [kg]		ΔCO _{2,el,c} [%]	ΔCO _{2,el,aux} [%]
	u	b	u	b		
Vertiko	11,3	7,5	34,1	33,8	-33,7	-0,9
VGD	11,3	6,4	34,1	33,7	-43,0	-1,0
Kramer	11,3	7,1	34,1	33,8	-37,3	-0,9
Jakob	11,3	8,8	34,1	33,8	-22,6	-0,8

Tab. A21 CO₂-Emissionen Kühlung, Hilfsenergiebedarf (Betrachtungszeitraum: Mai bis September [TRY 2017]) – Ergebnisse Simulation Fassadenversuchsstand Rednitzhembach (THN-ieg)
 Vgl. Kapitel II/ 2.2 Simulationsberechnungen und Abgleich mit Messergebnissen, S. 45

CO _{2,el,c}	CO ₂ -Emissionen Kühlung
CO _{2,el,aux}	CO ₂ -Emissionen Hilfsenergie dezentrale Fassadenlüftung
ΔCO _{2,el,c}	relative Abweichung CO ₂ -Emissionen Kühlung – unbegrünte/ begrünte Fassade
ΔCO _{2,el,aux}	relative Abweichung CO ₂ -Emissionen Hilfsenergie – unbegrün- te/ begrünte Fassade
u	unbegrünt (Referenzfall)
b	begrünt

Simulationszeitraum	1. Mai bis 30. September
Simulationszeitschritt	5 Minuten
Standort	Siemenstrasse 1, 91126 Rednitzhembach
Geographische Breite	49° 18' N
Geographische Länge	11° 40' O
Fassadenausrichtung mit den Begrünungssystemen	Nach Süden
Wetterdatensatz	Ortsgenaues Normal-Testreferenzjahr des Deutschen Wetterdienstes von 2017 für den Standort Rednitzhembach
Abmessung Einzelbüro (B x L x H)	2,74 m x 4,27 m x 2,95 m
Raumfläche	11,70 m ²
Raumvolumen	34,52 m ³
U-Wert Außenwand	0,23 W/(m ² K)
U-Wert Brüstung	0,23 W/(m ² K)
U-Wert Fenster	1,01 W/(m ² K)
U-Wert Verglasung (Wärmeschutzverbundglas)	1,00 W/(m ² K)
g-Wert Verglasung	0,52
U-Wert Fensterrahmen	1,02 W/(m ² K)
Fensterflächenanteil	23,2 %
Abminderungsfaktor außenliegender Sonnenschutz (Fc-Wert Raffstore) im geschlossenen Zustand	0,05
Schwellwerte außenliegender Sonnenschutz	Schließen: solare Einstrahlung auf die Fassade > 180 W/m ² Öffnen: solare Einstrahlung auf die Fassade < 100 W/m ² Windgrenzwert > 10 m/s, zur Vermeidung von Sturmschäden
Solarer Absorptionsgrad Außenhülle	0,85
Emissionsgrad Fassade	0,89
Emissionsgrad Verglasung	0,837
Infiltrationsluftwechsel	0,10 1/h
Interne Wärmelast	1 Person: 70 W (50 % konvektiv, 50 % Strahlung) Arbeitshilfen: 15 W/m ² (60 % konvektiv, 40 % Strahlung) Abwärme DFL: i.A. Lüfterstufe (80 % konvektiv, 20 % Strahlung), Gesamt: 260 W (22,2 W/m ²) bis 278 W (23,7 W/m ²)
Belegungszeit	Montag bis Freitag, von 7.00 bis 18.00 Uhr

Appendix

Tab. A22 Randbedingungen des Einzelbüros für die thermisch-energetische Gebäudesimulation (THN-ieg)
 Vgl. Kapitel II/ 2.2 Simulationsberechnungen und Abgleich mit Messergebnissen, S. 46

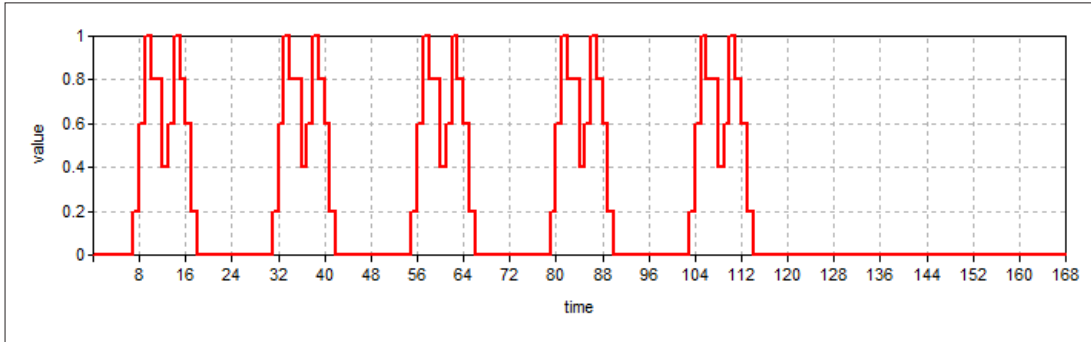


Abb. A33 Nutzungsprofil für Personen nach SIA 2024:2015 (THN-ieg)
Vgl. Kapitel II/ 2.2 Simulationsberechnungen und Abgleich mit Messergebnissen, S. 46

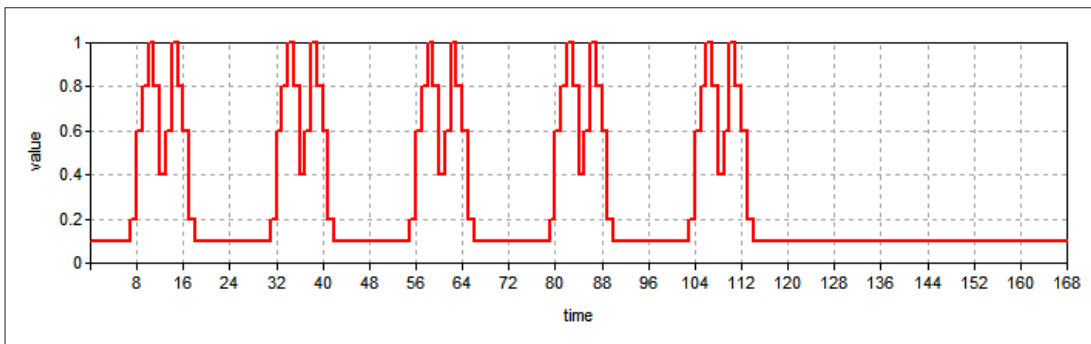


Abb. A34 Nutzungsprofil für Arbeitshilfen nach SIA 2024:2015 (THN-ieg)
Vgl. Kapitel II/ 2.2 Simulationsberechnungen und Abgleich mit Messergebnissen, S. 46

Appendix

Laufzeit	Montag bis Freitag, von 5.00 bis 18.00 Uhr		
Luftvolumenstrom	3-stufig (60, 90 bzw. 120 m ³ /h) in Abhängigkeit der Raumtemperatur Temperaturabweichung für Lüfterstufe 2 (90 m ³ /h): +0,8 K Temperaturabweichung für Lüfterstufe 3 (120 m ³ /h): +1,6 K		
Raumtemperatursollwert Kühlen	24 °C		
Soll-Zulufttemperatur im Komfortbereich	19 °C		
Minimal zulässige Zulufttemperatur	18 °C		
Freie Kühlung (Bypass Luft-Wärmetauscher)	Start ΔT (Differenz Raum- zu Außentemperatur): +6,0 K Stopp ΔT (Differenz Raum- zu Außentemperatur): +4,0 K		
Wärmerückgewinnung - Rekuperativer Luft-Wärmetauscher	$\eta = 50 \%$		
Nachtauskühlung (Bypass Luft-Wärmetauscher)	keine		
Kaltwasservorlauftemperatur	16 °C		
Technische Daten Wärmeübertrager lt. Auslegung Trox			
Luftvolumenstrom	80 m ³ /h	100 m ³ /h	120 m ³ /h
Kaltwassermassenstrom	100 l/h	150 l/h	200 l/h
Kaltwasserrücklauftemperatur	18,3 °C	18,0 °C	17,8 °C
Gesamtkühlleistung (bezogen auf die Raumfläche)	270 W (23,1 W/m ²)	340 W (29,1 W/m ²)	410 W (35,0 W/m ²)
Raumkühlleistung (bezogen auf die Raumfläche)	160 W (13,7 W/m ²)	200 W (17,1 W/m ²)	240 W (20,5 W/m ²)

Tab. A23 Randbedingungen der dezentralen Fassadenlüftung für die thermisch-energetische Gebäudesimulation für das Einzelbüro (THN-ieg)

Vgl. Kapitel II/ 2.2 Simulationsberechnungen und Abgleich mit Messergebnissen, S. 46

System	$W_{el,c}$ [kWh]		$W_{el,aux}$ [kWh]		$\Delta W_{el,c}$ [%]	$\Delta W_{el,aux}$ [%]
	u	b	u	b		
Vertiko	41,1	32,8	64,2	63,7	-20,2	-0,7
VGD	41,1	31,0	64,2	63,7	-24,5	-0,8
Kramer	41,1	33,0	64,2	63,7	-19,8	-0,7
Jakob	41,1	38,3	64,2	63,7	-6,9	-0,8

Tab. A24 Endenergiebedarf (Strom) für die Kühlung sowie für den Hilfsenergiebedarf der dezentralen Fassadenlüftung für die untersuchten Systeme (Betrachtungszeitraum: Mai bis September [TRY 2017]) – Ergebnisse Simulation Einzelbüro (THN-ieg)
 Vgl. Kapitel II/ 2.2 Simulationsberechnungen und Abgleich mit Messergebnissen, S. 47

System	$CO_{2,el,c}$ [kg]		$CO_{2,el,aux}$ [kg]		$\Delta CO_{2,el,c}$ [%]	$\Delta CO_{2,el,aux}$ [%]
	u	b	u	b		
Vertiko	21,5	17,1	33,6	33,3	-20,2	-0,7
VGD	21,5	16,2	33,6	33,3	-24,5	-0,8
Kramer	21,5	17,2	33,6	33,3	-19,8	-0,7
Jakob	21,5	20,0	33,6	33,3	-6,9	-0,8

Tab. A25 CO_2 -Emissionen Kühlung, Hilfsenergiebedarf (Betrachtungszeitraum: Mai bis September [TRY 2017]) – Ergebnisse Simulation Einzelbüro (THN-ieg)
 Vgl. Kapitel II/ 2.2 Simulationsberechnungen und Abgleich mit Messergebnissen, S. 49

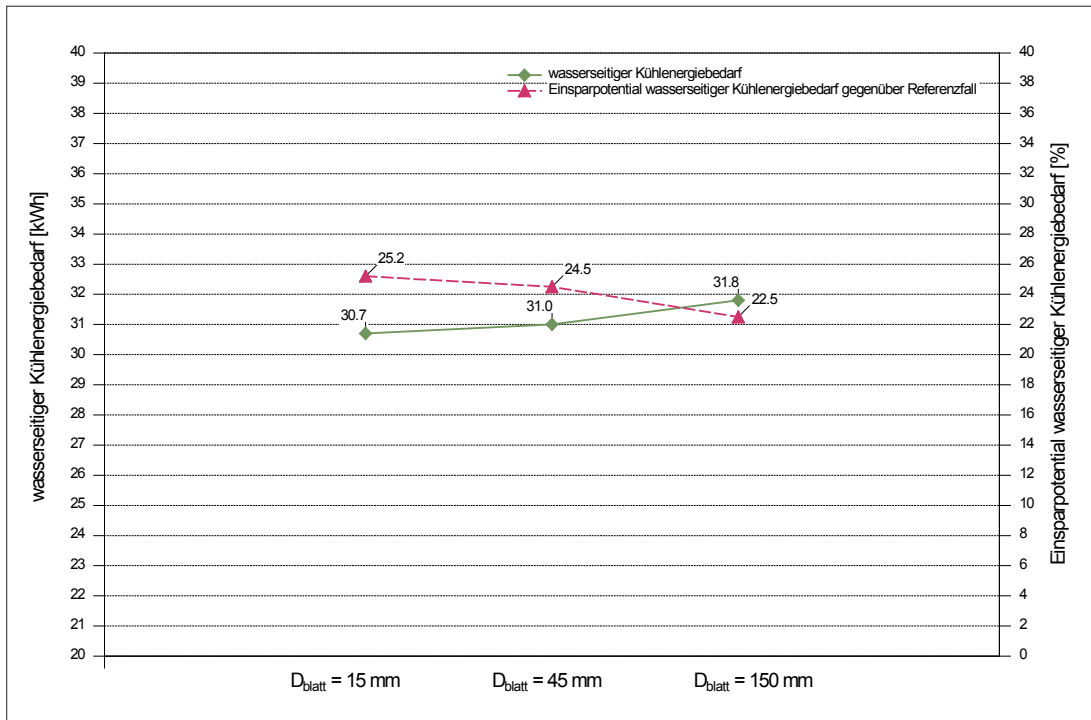


Abb. A35 Wasserseitiger Kühlenergiebedarf (Strom) in Abhängigkeit des Blattdurchmessers der Pflanzen – Ergebnisse Simulation Einzelbüro, System Verticalgreendesign (VGD) (THN-ieg)

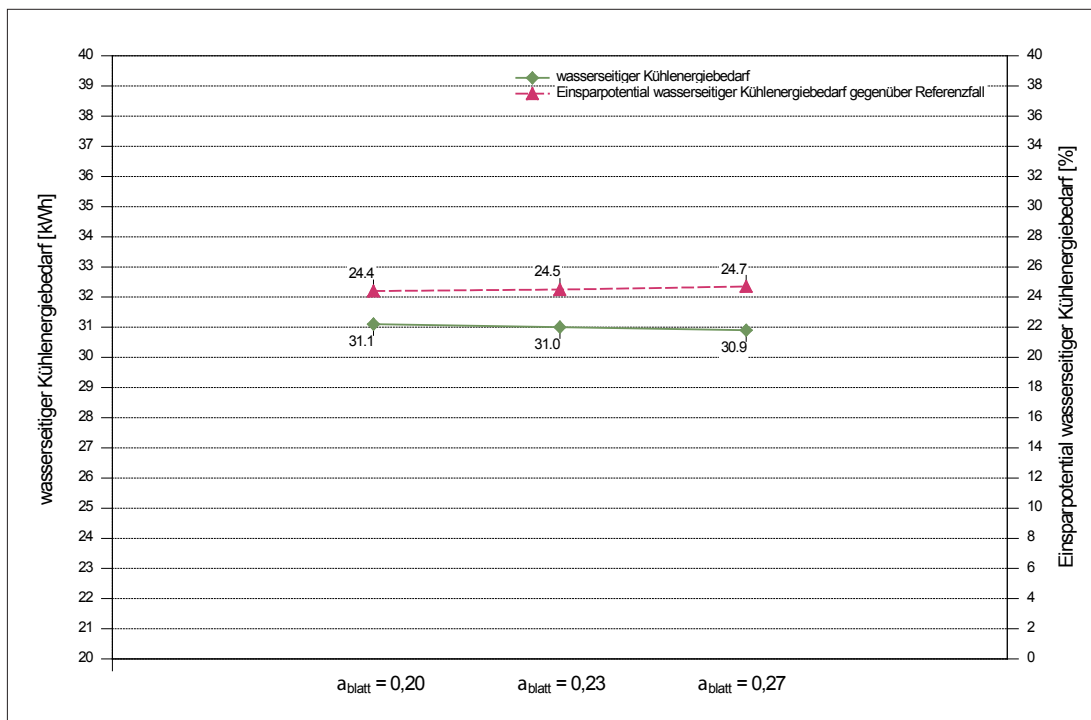


Abb. A36 Wasserseitiger Kühlenergiebedarf (Strom) in Abhängigkeit des Albedos der Pflanzen – Ergebnisse Simulation Einzelbüro, System Verticalgreendesign (VGD) (THN-ieg)

A3 Experimentelle Studien II (IBP)

Appendix

A3.1 Bewässerung

Das Begrünungssystem wurde mit der Anlage, wie in Abschnitt II/3.2.5 beschrieben, bewässert. Die Einstellungen der Bewässerungszeiten erfolgten gemeinsam mit dem Lieferant der Anlage in Abstimmung mit dem Lieferanten der Begrünung (Tab. 14): zu 5 x 2 min, mit einer kontinuierlichen Düngergabe (Peter Excel Hard Water Grow) von 0,69 ml/l.

Anfänglich ergab sich pro Gießvorgang eine Wassermenge von ca. 35 – 37 l, was sich zu einem Wasserverbrauch von ca. 180 l pro Tag aufsummierte (Überschüssiges Wasser wurde über eine Regenrinne unten an der Begrünung abgeführt).

Dadurch, dass die Begrünung Mitte August bereits ziemlich dicht gewachsen war, war nicht erkennbar, ob das Wasser alle Pflanzen gleichmäßig bewässerte.

Nach einiger Zeit vertrockneten einige Pflanzen, trotz genügend großer Wassermenge. Ursache war ein Schaden an einem der Bewässerungsschläuche (Südseite des Gebäudes im August 2020), was vom Boden aus nicht sofort zu erkennen war (Abb. A37), da der größte Teil der Pflanzen ausreichend mit Wasser versorgt wurde.

Nach Reparatur des Bewässerungsschlauchs (Abb. A38) wurden die vertrockneten Pflanzen durch neue Pflanzen ersetzt. Abb. A39 zeigt die Begrünung nach dem Aufbau direkt nach dem Transport aus Rednitzhembach und Abb. A40 nach dem Austausch der vertrockneten Pflanzen.



Abb. A37 Teilweise vertrocknete Pflanzen (IBP)



Abb. A38 Schaden an einem Bewässerungsschlauch (IBP)



Abb. A39 Begrünung am 7. August 2020 (übernommen von THN) (IBP)



Abb. A40 Begrünung nach Pflanzenaustausch am 19. August 2020 (IBP)

A3.2 Überwinterung der Begrünungssysteme (IBP)

Durch Verzögerungen im Projektablauf in 2020 wurde das Projekt bis Sommer 2021 verlängert. Für die Messungen im Folgejahr musste die Begrünung überwintert werden. Die Bewässerungsanlage war nicht für Winterbetrieb ausgelegt, so dass diese über den Winter abgebaut wurde.

Für die Begrünung wurde ein geschützter Platz auf der Nordseite einer Lagerhalle gefunden, (Abb. A41) wo die Pflanzen regelmäßig überprüft und bei Bedarf bewässert werden konnten.

Nach dem Winter 2020/2021 (Abb. A42) musste ein Teil der ursprünglichen Pflanzen ersetzt werden. (Abb. A43+A44) Dabei wurde darauf geachtet, dass überwiegend Pflanzen zum Einsatz kommen, die auf der ursprünglichen Pflanzliste der Begrünung (Tab. A11) angegeben waren. Der Anteil der im Winter abgestorbenen Pflanzen war vermutlich erhöht, da bedingt durch die Home-Office-Situation während der COVID-19-Pandemie die Überwachungssituation nicht optimal gewährleistet werden konnte.



Abb. A41 Überwinterung der Begrünung (IBP)



Abb. A42 Pflanzen nach Überwinterung am 29. April 2021 (IBP)



Abb. A43 Pflanzen am 2. Juli 2021 (IBP)



Abb. A44 Ergänzte Bepflanzung am 2. Juli 2021 (IBP)

A3.3 Messsensorik und Rechenkanäle

Appendix

Temperatur

- Lufttemperatur
Lufttemperaturen werden mit einem PT100-Keramik-Widerstand erfasst. Die Sensoren werden bei Bedarf mit einem Strahlenschutz vor der Erwärmung durch direkte Sonnenbestrahlung geschützt (Abb. A45). Die Genauigkeit beträgt $\pm 0,1\text{K}$ bei 0°C (Klasse 1/3 B).¹
- Oberflächentemperatur
Oberflächentemperaturen werden mit einem PT100-Rohfühler erfasst, der auf die Oberfläche geklebt wird. Die Genauigkeit beträgt $\pm 0,1\text{K}$ bei 0°C (Klasse 1/3 B).
- Vor- und Rücklauftemperatur
Die Vorlauf- und Rücklauftemperaturen werden mit Tauchfühlern gemessen (Abb. A46). Die Genauigkeit der Sensoren beträgt 1/10 DIN B. Die Kalibrierung der Temperaturdifferenz am 23.07.20 ergibt eine max. Abweichung von $\pm 0,02\text{K}$ im Temperaturbereich von 10°C bis 15°C .
- Globetemperatur
Die Globetemperatur wird mit einem Globethermometer (Abb. A45) gemessen. Dieses besteht aus einer schwarz lackierten hohlen Kupferkugel und einem PT100-Widerstandsthermometer in einer Edelhühse mit der Sensorspitze im Zentrum der Kugel. Die Genauigkeit des Temperatursensors beträgt $\pm 0,3\text{K}$ (Klasse B).²

Feuchte

Zur Messung der relativen Luftfeuchte wird ein kapazitiver Feuchtesensor (Abb. A47) verwendet. Die Genauigkeit (bei 23°C) wird vom Hersteller mit: $\pm 1,0\%$ angegeben.

Solarstrahlung

Die Solarstrahlung an der VERU-Fassade (orientiert Richtung Süden) wird mit einem Richtung Süden gerichteten Pyranometer CMP 11 (Abb. A48) gemessen.

Beleuchtungsstärke

Die Beleuchtungsstärke auf dem Schreibtisch sowie im hinteren Bereich des Raumes wird mit einem Photometerkopf (Abb. A49) gemessen. Der Durchmesser der empfindlichen Fläche beträgt 8mm . Die $V_{(\lambda)}$ -Anpassungsgüte beträgt $f_1 < 3\%$ (Klasse A) mit einer kosinuskorrigierten räumlichen Bewertung $f_2 < 1,5\%$.

Windgeschwindigkeit

Zur Erfassung der lokalen Wetterbedingungen wird die Windgeschwindigkeit vor der VERU-Fassade mit einem 2D-Ultraschall Anemometer erfasst.

Wetterstation

Die Freilandversuchsstelle des Fraunhofer IBP besitzt eine eigene Wetterstation³ mit einer umfangreichen Erfassung von Klimadaten. Davon wird die Außentemperaturmessung herangezogen. Südstrahlung und Windgeschwindigkeit dienen zum Vergleich bzw. Absicherung der am Versuchsgebäude gemessenen Werte. Die Wetterstation befindet sich in einer Entfernung von 250m Luftlinie vom Versuchsgebäude.

Durchflussmenge

Die Durchflussmenge wird mit einem Durchflussmesser gemessen. Dieser wird regelmäßig gereinigt und mit Hilfe der IBP-eigenen Kalibrierstrecke überprüft. Die maximal gemessene Abweichung beträgt am 31.08.20 $< 1\%$.

Thermische Leistung

Die thermische Leistung wird berechnet (Tab. A26). Dabei wird unterschieden zwischen der thermischen Leistung wasserseitig (außerhalb der Raumbegrenzung) und der thermischen Leistung raumseitig (= Kühlleistung durch Luft).

Elektrische Leistung

Die elektrischen Leistungen werden über Beckhoff-Leistungsklemmen vermessen.

1 DIN EN 60751 „Industrielle Platin-Widerstandsthermometer und Platin-Temperatursensoren“ 2009-05

2 DIN EN 60751 „Industrielle Platin-Widerstandsthermometer und Platin-Temperatursensoren“ 2009-05

3 <https://imcom2.hoki.ibp.fraunhofer.de/wetter/>

Appendix

$\dot{Q} = \dot{V} \cdot \rho \cdot c \cdot (\vartheta_i - \vartheta_a)$				
\dot{Q}	[W]	thermische Leistung	wasserseitig	raumseitig (Luft)
\dot{V}	[m³/h]	Volumenstrom	Messwert	DFL-Messwert
ρ	[kg/m³]	Rohdichte	999	1,2
c	[Wh/kgK]	spezifische Wärmekapazität	1,16	0,28
ϑ_i	[°C]	Vorlauf- bzw. Zulufttemperatur	Messwert	Messwert
ϑ_a	[°C]	Rücklauf- bzw. Ablufttemperatur	Messwert	Messwert

Tab. A26 Berechnung der thermischen Leistung (IBP)



Abb. A45 Globethermometer und Lufttemperatursensor mit Strahlungsschirm (IBP)



Abb. A46 Tauchfühler (IBP)



Abb. A47 Kapazitiver Feuchte-sensor (IBP)



Abb. A48 Solarimeter (IBP)



Abb. 49 Photometerkopf (IBP)



Abb. A50 Kühllastsimulator (IBP)

Wassermenge

Die Wassermenge wird über einen Impulswasserzähler mit ¼ l Schritten sowie zusätzlich durch eine Wasseruhr erfasst.

Kühllastsimulator

Für die internen Wärmequellen werden Kühllastsimulatoren (Abb. A50) verwendet. Dies sind elektrische beheizte Röhren, die ein ähnliches Verhältnis zwischen konvektiver und radiativer Wärmeabgabe wie Personen aufweisen.

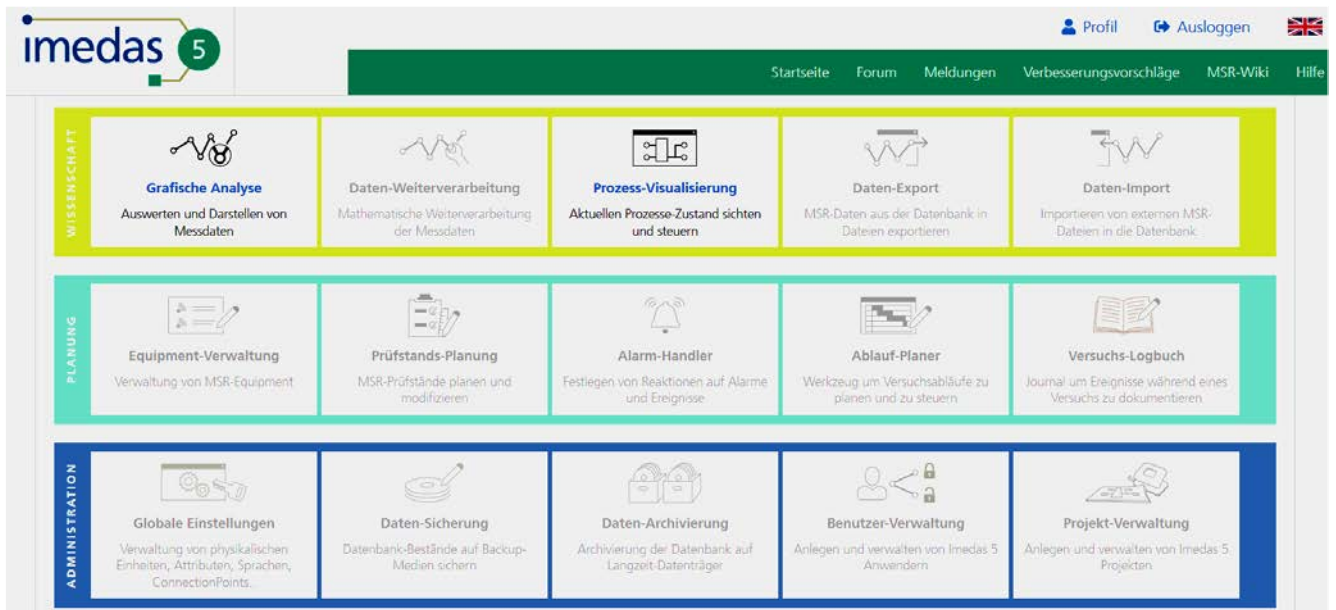




Abb. A51 Startseite des Messdatenerfassungssystems IMEDAS™.

Messdatenerfassung

Die Messdaten werden mit dem am Institut entwickelten Messdatenerfassungssystem IMEDASTM im Zeitintervall von 1 Sekunde bzw. 15 Sekunden erfasst und als Minutenmittelwerte in der zentralen Datenbank abgespeichert. Abb. A51 zeigt beispielhaft die Startseite des IMEDAS™-Systems.

Blower Door Test		Referenzraum		Testraum	
		Überdruck n_{L50} [h^{-1}]	Unterdruck n_{L50} [h^{-1}]	Überdruck n_{L50} [h^{-1}]	Unterdruck n_{L50} [h^{-1}]
	Lüftungsöffnungen abgeklebt	1,16 Mittelwert 1,21	1,25 Mittelwert 1,21	1,01 Mittelwert 1,12	1,23 Mittelwert 1,12
	Lüftungsöffnungen offen	1,24 Mittelwert 1,24	1,24 Mittelwert 1,24	0,95 Mittelwert 1,03	1,10 Mittelwert 1,03



Appendix

Tab. A27 Luftwechselraten n_{L50} bei einer Druckdifferenz von 50 Pa (IBP)

A3.4 Zwillingräume/ Nullmessungen

A3.4.1 Luftdichtigkeit

Die Luftdichtigkeit der Zwillingräume wird am 21. und am 22. Juli 2020 mit dem Differenzdruckverfahren¹ (Blower Door Messung) bei Unterdruck sowie bei Überdruck überprüft. Die dezentralen Lüftungsgeräte sind zum Zeitpunkt der Messung bereits eingebaut. Deswegen wird, um den Einfluss von evtl. schlecht schließenden Lüftungsklappen auszuschließen, jeweils eine Blower Door Messung mit abgeklebten sowie eine mit offenen Lüftungsöffnungen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tab. 9 zusammengefasst. Die Luftdichtigkeit der Zwillingräume sind im Rahmen der Unsicherheiten (typisch zwischen 3 % und 10 %) ausreichend gleich. (Tab. A27)

A3.4.2 Nullmessung mit Kühlung über die VERU-Anlage

Der Kühlenergieverbrauch der beiden Räume über die als Basisausstattung in den Räumen vorhandene Umluftkühlung wird am 25. Juli und am 26. Juli 2020 gemessen und verglichen. Bei beiden Tagen handelt es sich um warme Sommertage mit hoher Südeinstrahlung und einer Außentemperatur bis 25 °C (Abb. A52+A55). Die Räume werden jeweils auf eine Temperatur von 24 °C geregelt (Abb. A53+A56). Zwischen den beiden Räumen unterscheidet sich der Energieverbrauch am 25. Juli 2020 um weniger als 1 % (Abb. A54) und am 26. Juli 2020 um ca. 3 % (Abb. A57). Die beiden Räume zeigen daher in Bezug auf die Kühlleistung eine sehr gute Vergleichbarkeit.

A3.4.3 Nullmessung mit Kühlung über das Fassadenlüftungsgerät (DFL)

Der Energieverbrauch der beiden Räume bei Kühlung über die dezentralen Lüftungsgeräte wird am 1. August 2020 gemessen und verglichen (ohne Fassadenbegrünung). Der 1. August ist ein sehr warmer Sommertag mit hoher Südeinstrahlung und einer Außentemperatur bis 32 °C (Abb. A58). Die Einstellungen der beiden dezentralen Lüftungsgeräte sind gleich.

Die mittleren Raumtemperaturen der Räume ergeben sich zu 25,90 °C im Referenzraum, sowie 25,92 °C im Testraum (Abb. A59). Bei einem Betrieb der dezentralen Lüftungsgeräte von 5:00 h bis 24:00 h am 1. August 2020 ist der thermische Energieverbrauch (wasserseitige Kühlenergie) des DFL im Referenzraum um ca. 3% und der elektrische Energieverbrauch des DFL um ca. 2 % höher als im Testraum (Abb. A60). Die beiden Räume zeigen damit im Rahmen der zu erwartenden Messunsicherheiten eine gute Vergleichbarkeit.

A3.4.4 Wiederinbetriebnahme 2021

Vor dem Anbringen der Begrünung nach der Winterpause am 21. Juli 2021 wird der Energieverbrauch der beiden Räume bei Kühlung über die dezentralen Lüftungsgeräte gemessen und verglichen. Dazu werden die thermische Leistung der DFL im Zeitraum vom 8. Juni 2021 bis einschließlich 18. Juni 2021 von Referenzraum und Testraum während des DFL-Betriebs (5 Uhr bis 17 Uhr) verglichen. Der Sonnenschutz war in diesem Zeitraum durchgehend offen. Die Mittelwerte sind in Tab. A28 zusammengefasst. Die Räume und die DFL zeigen eine sehr gute Vergleichbarkeit.

¹ DIN EN ISO 9972 „Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden – Differenzdruckverfahren“; 2018-12

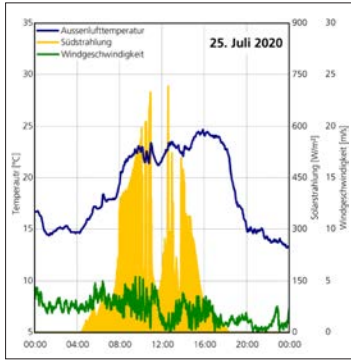


Abb. A52 Wetterbedingungen am 25. Juli 2020 (IBP)

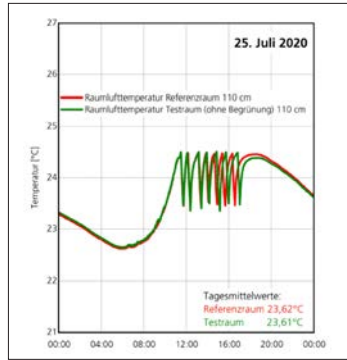


Abb. A53 Raumtemperatur (110 cm) in den Zwillingsräumen am 25. Juli 2020 (IBP)

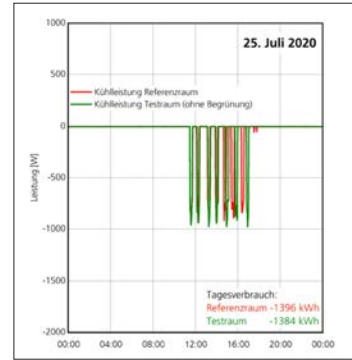


Abb. A54 Kühlleistung (Umluftkühlung) in den Zwillingsräumen am 25. Juli 2020 (IBP)

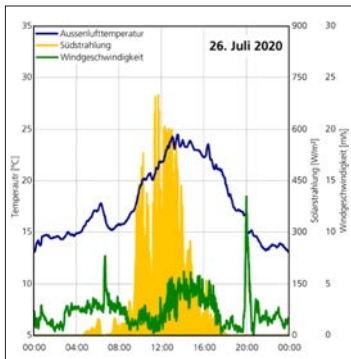


Abb. A55 Wetterbedingungen am 26. Juli 2020 (IBP)

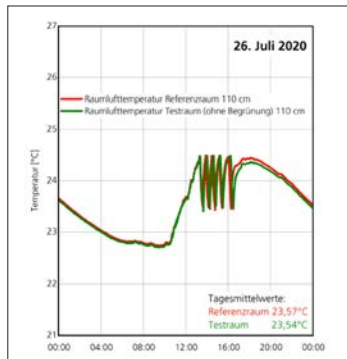


Abb. A56 Raumtemperatur (110 cm) in den Zwillingsräumen am 26. Juli 2020 (IBP)

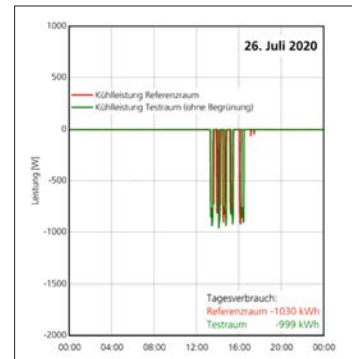


Abb. A57 Kühlleistung (Umluftkühlung) in den Zwillingsräumen am 26. Juli 2020 (IBP)

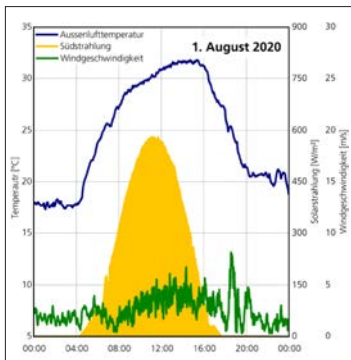


Abb. A58 Wetterbedingungen am 1. August 2020 (IBP)

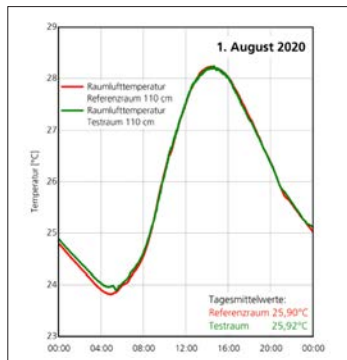


Abb. A59 Raumtemperatur (110 cm) in den Zwillingsräumen am 1. August 2020 (IBP)

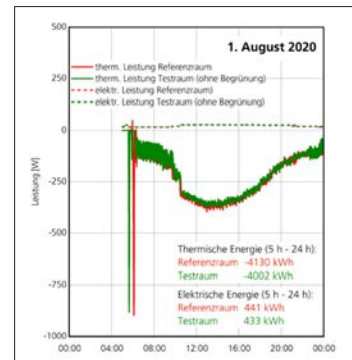





Abb. A60 Thermische (wasserseitig) und elektrische Leistung der DFL in den Zwillingsräumen am 1. August 2020 (IBP)

Appendix

		Referenzraum	Testraum
Südstrahlung (VERU)	[W/m ²]	268	
Außentemperatur (Wetterstation)	[°C]	20,7	
Raumtemperatur (Messbaum Schreibtisch 110 cm)	[°C]	26,12	26,16
Thermische Leistung DFL (wasserseitig)	[W] [%]	-147 100%	-146 99,3%

Tab. A28 Nullmessung vom 8.06.2021 bis 18.06.2021 (5 Uhr bis 17 Uhr) (IBP)

Ausgangs- bzw. berechneter Wert	Verteilung bzw. Berechnung	Abweichung	Wert 1	Wert 2
Vorlauftemperatur T _{VL}			15,8°C	15,8°C
Rücklauftemperatur T _{RL}			19,5°C	19,6°C
→ Temperaturspreizung = T _{VL} - T _{RL}	Normalverteilung 	0,02 K	-3,7 K	-3,8 K
Wassermassentrom m	Normalverteilung 	1%	39 $\frac{\text{kg}}{\text{h}}$	68 $\frac{\text{kg}}{\text{h}}$
Wärmespeicherkapazität C _P	Normalverteilung 	0,5%	1,16 $\frac{\text{Wh}}{\text{kgK}}$	1,16 $\frac{\text{Wh}}{\text{kgK}}$
→ Thermische Leistung	= (T _{VL} - T _{RL}) * C _P * m		-167,4 W	-299,6 W
→ 2-fache Standardabweichung	Grad des Vertrauens 95%		4,2 W ±2,5%	7,4 W ±2,5%

Tab. A29 Fehlerabschätzung für die thermische Leistung (IBP)

A3.4.5 Fehlerbetrachtung für die Ermittlung der thermischen Leistung

Die Abschätzung der Fehler bei der Bestimmung der thermischen Leistung erfolgt mit Hilfe der Monte-Carlo-Methode.¹ Dabei handelt es sich um ein Verfahren aus der Stochastik bei der eine sehr große Zahl gleichartiger Zufallsexperimente bzw. -berechnungen durchgeführt werden. Die Berechnung erfolgt mit den Ausgangswerten, die entsprechend den definierten Verteilungen und Abweichungen zufällig variiert werden, was eine Variation des Ergebnisses zur Folge hat. Wenn dieses Zufallsexperiment häufig genug durchgeführt wird, sind alle wahrscheinlichen Kombinationen von Ausgangswerten in entsprechend variierende Ergebnisse umgerechnet.

Die Ergebnisse pendeln sich, entsprechend dem Gesetz der großen Zahlen, auf einen festen Wert ein. Mit Hilfe der Schwankung des Ergebnisses kann der Fehler der Messung abgeschätzt werden. Die Ausgangswerte, Verteilungen und Abweichungen sowie die Ergebnisse der Monte-Carlo-Methode sind in Tab. A29 zusammengefasst. Die zweifache Standardabweichung ergibt sich damit zu kleiner als ±2,5%.

Auswertezeitraum Dauer (DFL-Betrieb)	1 02.09.20 - 09.09.20 8 d ± 96 h		2 12.09.20 - 24.09.20 13 d ± 156 h		3 07.08.21 - 13.08.21 7 d ± 84 h		4 01.09.21 - 16.09.21 16 d ± 192 h		Gesamtauswertezeitraum 2020 / 2021 44 d ± 528 h	
	Referenz	Test	Referenz	Test	Referenz	Test	Referenz	Test	Referenz	Test
Raum	279		352		306		352		331	
Südstrahlung (VERU, direkt vor Fassade) [W/m²]	16,4		17,8		20,5		17,1		17,7	
Außenlufttemperatur (Wetterstation) [°C]	22,8	22,7	24,7	24,5	23,8	23,7	23,9	23,8	23,9	23,8
Raumlufttemperatur (Messbaum Fenster 1,1 m) [°C]	48	49	47*	49*	49	53	46	50	47	50
Rel. Luftfeuchte (1,1 m) [%]										
Messchse M3 (Abb. 14)										
Fassadenoberflächentemperatur [°C]	19,0	18,9	20,8	20,6	28,6	22,1	23,9	19,2	22,8	20,0
Zwischenraumtemperatur [°C]	-	18,3	-	20,1	-	21,5	-	18,4	-	19,4
Temperatur in Begrünung [°C]	-	16,6	-	18,5	-	20,8	-	17,5	-	18,2
Temperatur Frischluft [°C]	18,4	18,2	20,1	20,0	22,4	21,6	19,4**	19,5**	19,9	19,7
Temperatur Zuluft [°C]	18,8	18,9	18,9	19,1	19,4	19,6	18,8**	19,0**	18,9	19,1
Temperatur Abluft [°C]	22,5	22,5	24,3	24,2	23,7	23,6	23,4**	23,4**	23,5	23,5
Temperatur Fortluft [°C]	20,4	20,4	22,2	22,3	23,3	22,8	21,6**	21,0**	21,6	21,6
Therm. Kühlenergie (wasserseitig) [kWh]	-4,0	-3,2	-16,0	-15,1	-8,3	-6,0	-16,7	-14,6	-45,0	-38,9
Einsparung Testraum / Referenzraum [%]		-20%		-8%		-28%		-12%		-14%
Elektr. Energie (5 h – 17 h) [kWh]	1,8	1,8	3,9	3,7	1,8	1,6	4,7	4,4	12,2	11,5
Elektr. Energie (17 h – 5 h) DFL-StandBy [kWh]	1,0	1,0	1,6	1,6	0,8	0,9	1,9	2,0	5,3	5,5
Elektr. Energie gesamt (0 h – 24 h) [kWh]	2,8	2,8	5,5	5,3	2,6	2,5	6,6	6,4	17,5	17,0
Therm. Energie (raumseitig, Luft-Kühlung) [kWh]	-9,3	-8,5	-30,1	-28,2	-10,3	-8,7	-28,6	-27,2	-78,3	-72,6

* Datenausfall für ca. 16,3 h

** Datenausfall für ca. 23,2 h

Tab. A30 Mittelwerte bzw. kumulierte Werte während des DFL-Betriebs (Betriebszeit 5 h – 17 h entspricht 12 h/d).(IBP)
Vgl. II/ 3.3 Auswertung, S. 61

A3.5 Beispieltage

Appendix

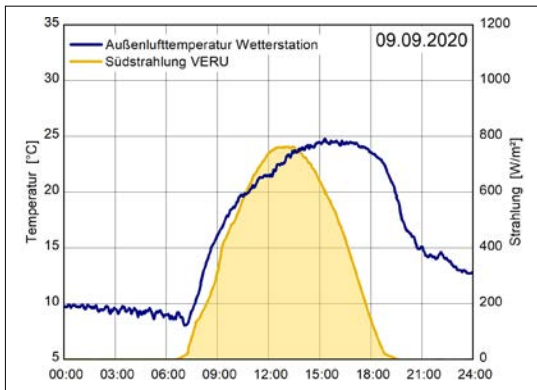


Abb. A61 Wetterbedingungen am 09.09.2020 (IBP)

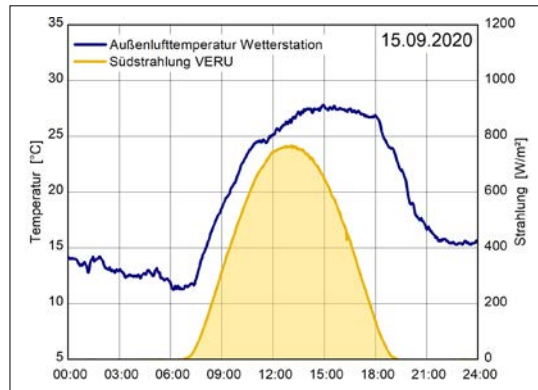


Abb. A62 Wetterbedingungen am 15.09.2020 (IBP)

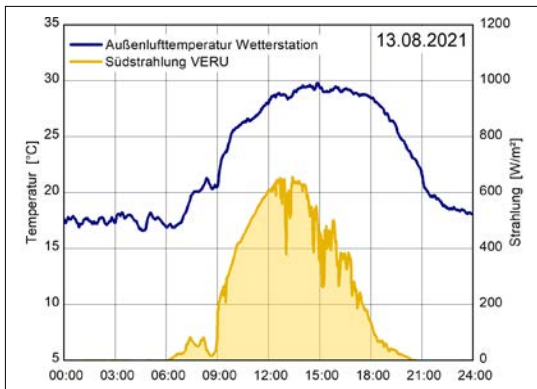


Abb. A63 Wetterbedingungen am 13.08.2021 (IBP)

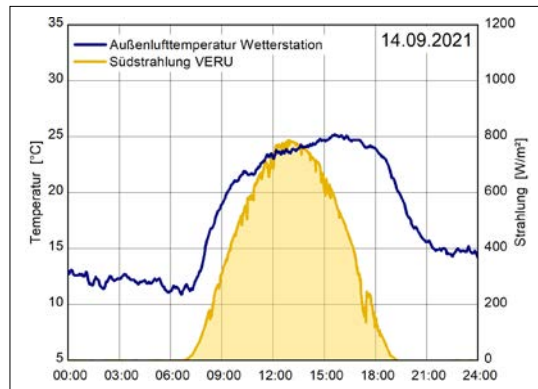


Abb. A64 Wetterbedingungen am 14.09.2021 (IBP)

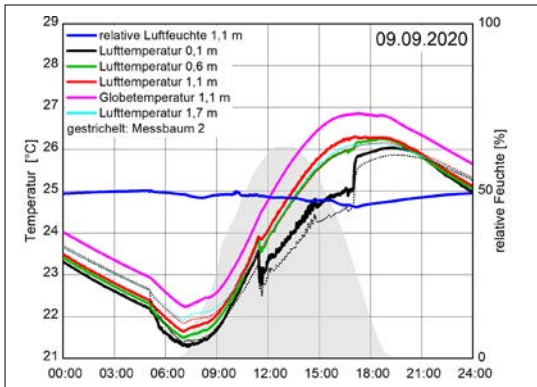


Abb. A65 Raumklima – Referenzraum 09.09.2020 (IBP)

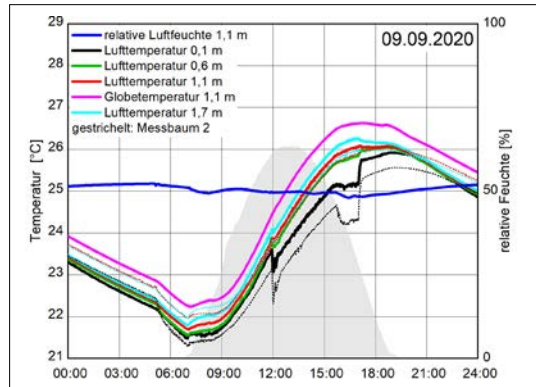


Abb. A66 Raumklima – Testraum 09.09.2020 (IBP)

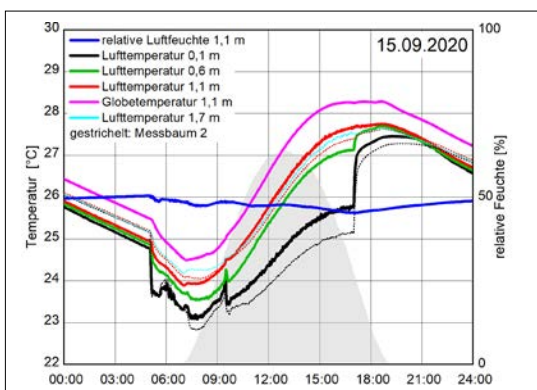


Abb. A67 Raumklima – Referenzraum 15.09.2020 (IBP)

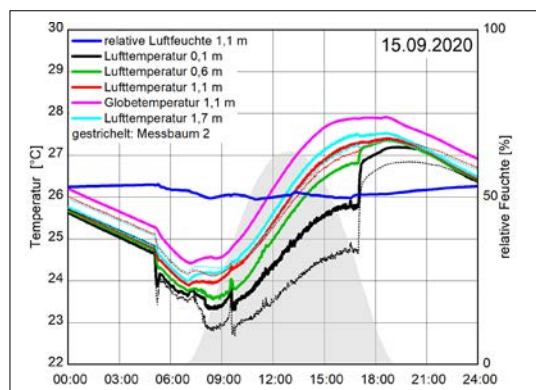


Abb. A68 Raumklima – Testraum 15.09.2020 (IBP)

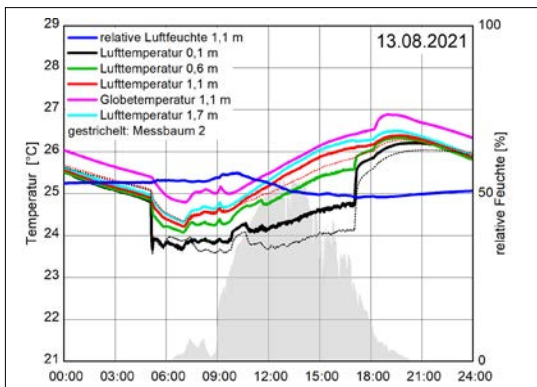


Abb. A69 Raumklima – Referenzraum 13.08.2021 (IBP)

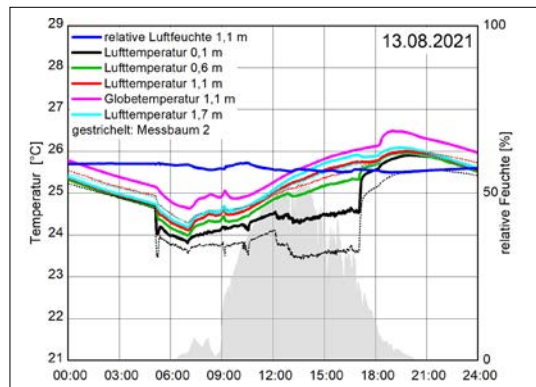


Abb. A70 Raumklima – Testraum 13.08.2021 (IBP)

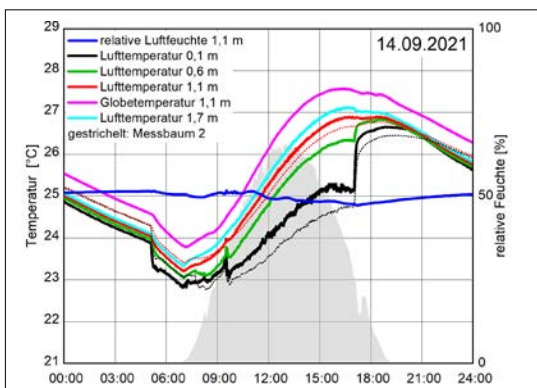


Abb. A71 Raumklima – Referenzraum 14.09.2021 (IBP)

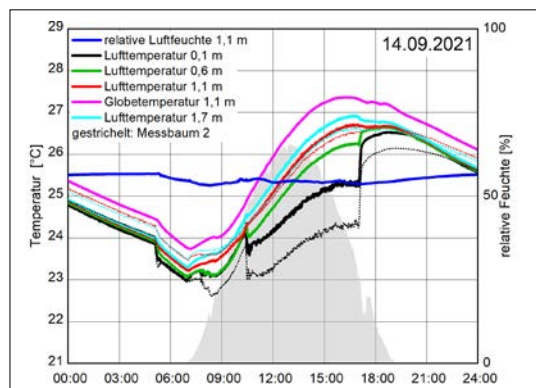


Abb. A72 Raumklima – Testraum 14.09.2021 (IBP)

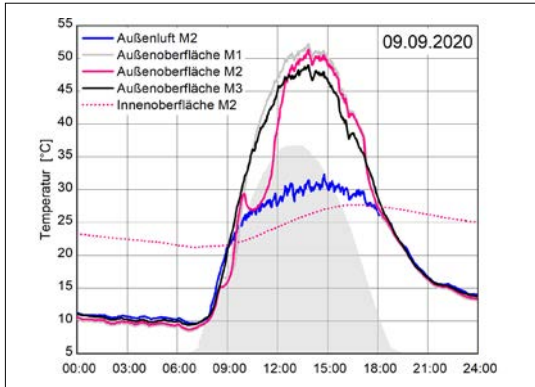


Abb. A73 Fassadenklima – Temperaturen der Referenzfassade 09.09.2020 (IBP)

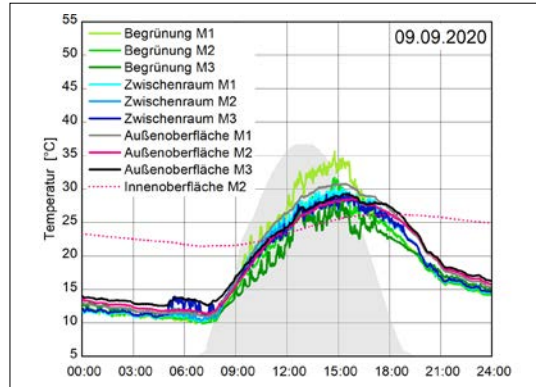


Abb. A74 Fassadenklima – Temperaturen der Testfassade 09.09.2020 (IBP)

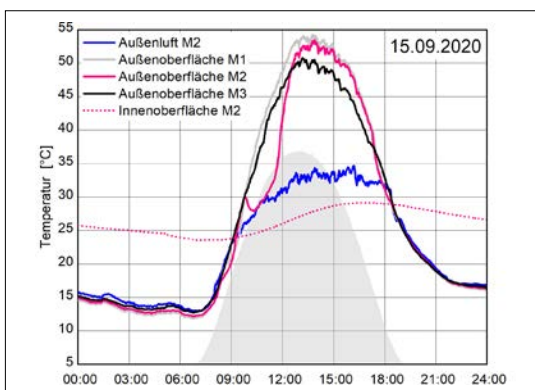


Abb. A75 Fassadenklima – Temperaturen der Referenzfassade 15.09.2020 (IBP)

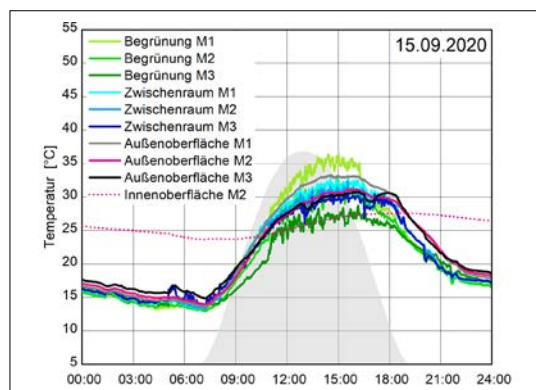


Abb. A76 Fassadenklima – Temperaturen der Testfassade 15.09.2020 (IBP)

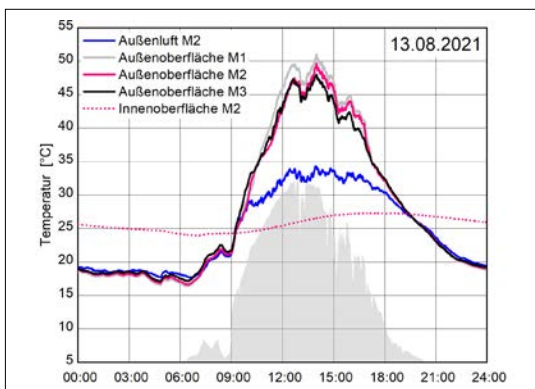


Abb. A77 Fassadenklima – Temperaturen der Referenzfassade 13.08.2021 (IBP)

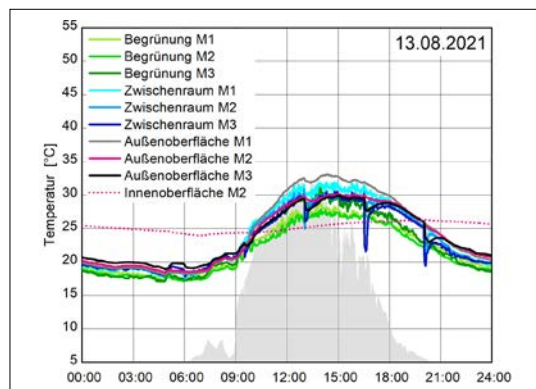


Abb. A78 Fassadenklima – Temperaturen der Testfassade 13.08.2021 (IBP)

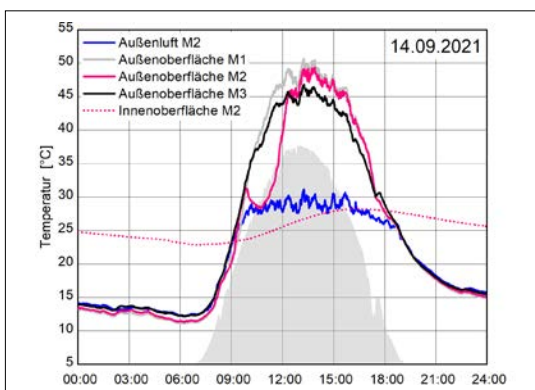


Abb. A79 Fassadenklima – Temperaturen der Referenzfassade 14.09.2021 (IBP)

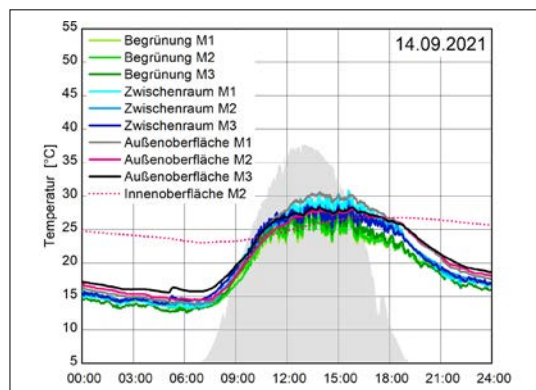


Abb. A80 Fassadenklima – Temperaturen der Testfassade 14.09.2021 (IBP)

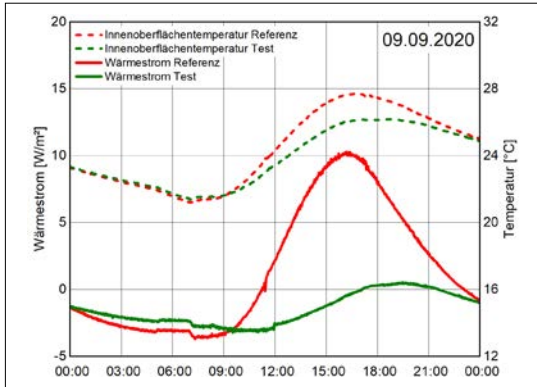


Abb. A81 Wärmeströme und Innenoberflächen-temperaturen der opaken Bauteile am 09.09.2020 (IBP)

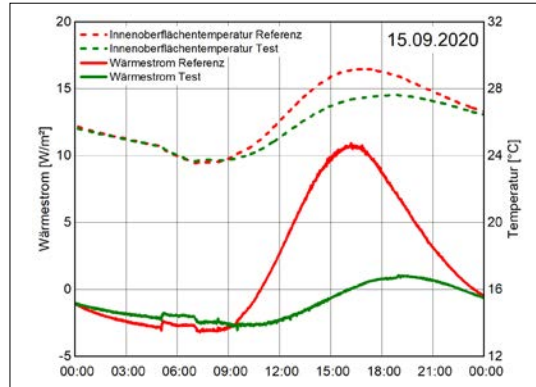


Abb. A82 Wärmeströme und Innenoberflächen-temperaturen der opaken Bauteile am 15.09.2020 (IBP)

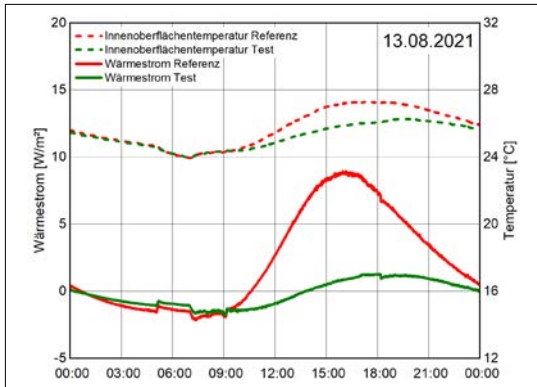


Abb. A83 Wärmeströme und Innenoberflächen-temperaturen der opaken Bauteile am 13.08.2021 (IBP)

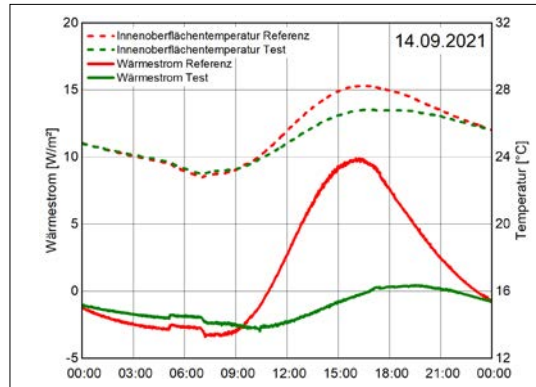


Abb. A84 Wärmeströme und Innenoberflächen-temperaturen der opaken Bauteile am 14.09.2021 (IBP)

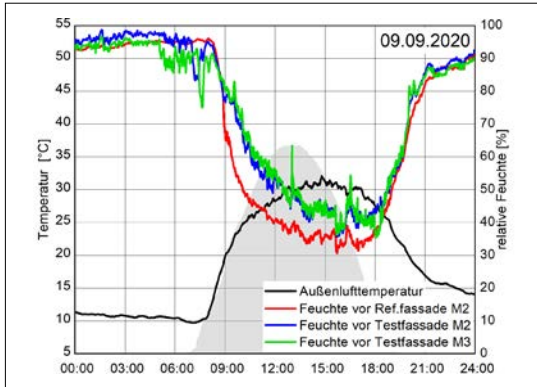


Abb. A85 Relative Luftfeuchte vor Fassade am 09.09.2020 (IBP)

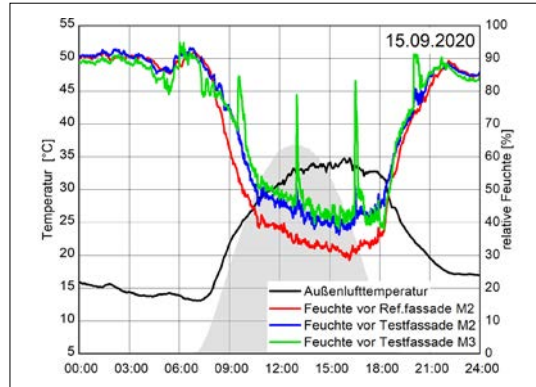


Abb. A86 Relative Luftfeuchte vor Fassade am 15.09.2020 (IBP)

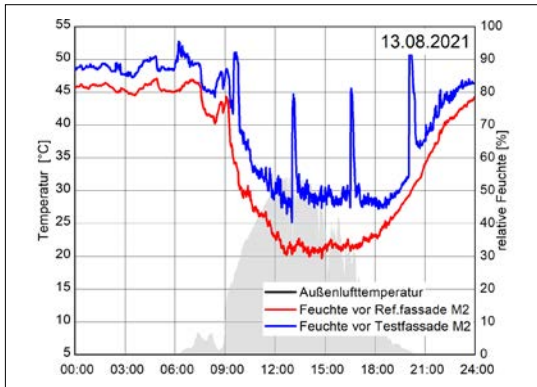


Abb. A87 Relative Luftfeuchte vor Fassade am 13.08.2021 (IBP)

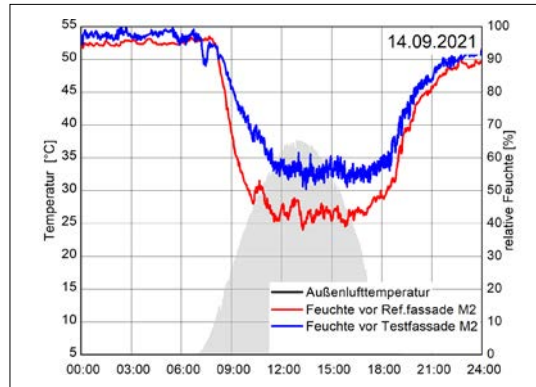


Abb. A88 Relative Luftfeuchte vor Fassade am 14.09.2021 (IBP)

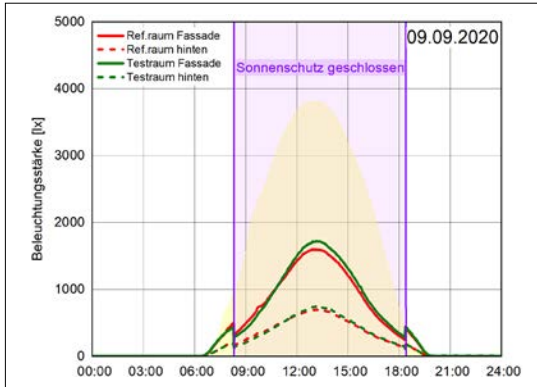


Abb. A89 Sonnenschutz und Beleuchtungsstärke (Cut-Off) am 09.09.2020 (IBP)

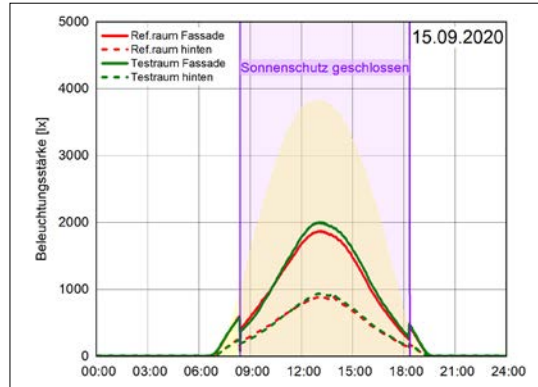


Abb. A90 Sonnenschutz und Beleuchtungsstärke (Cut-Off) am 15.09.2020 (IBP)

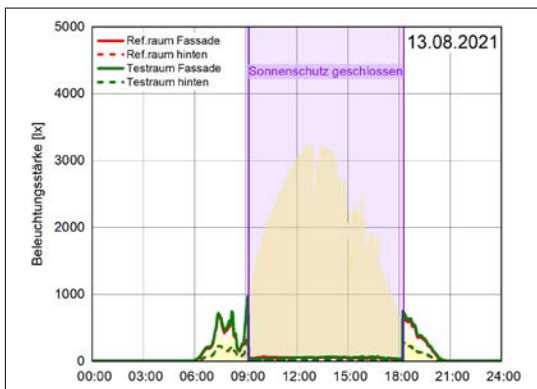


Abb. A91 Sonnenschutz und Beleuchtungsstärke (Lamellen senkrecht, vollständig geschlossen) am 13.08.2021 (IBP)

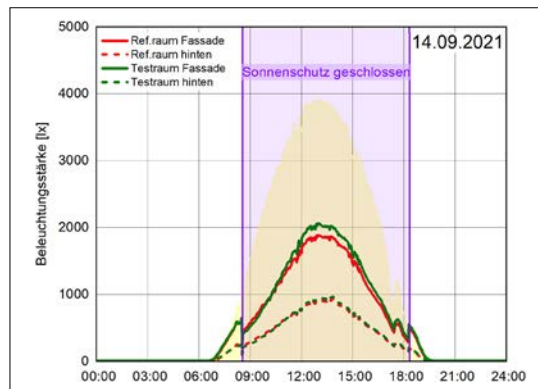


Abb. A92 Sonnenschutz und Beleuchtungsstärke (Cut-Off) am 14.09.2021 (IBP)

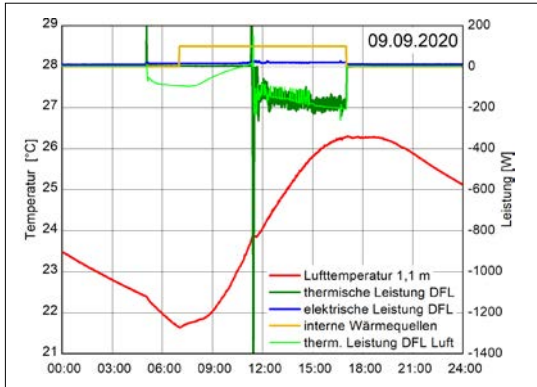


Abb. A93 Dezentrale Fassadenlüftungsgeräte – Referenzraum 09.09.2020 (IBP)

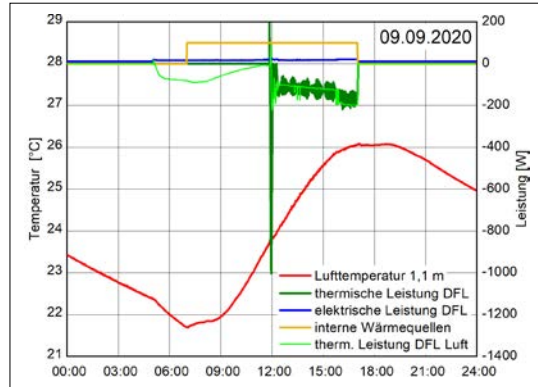


Abb. A94 Dezentrale Fassadenlüftungsgeräte – Testraum 09.09.2020 (IBP)

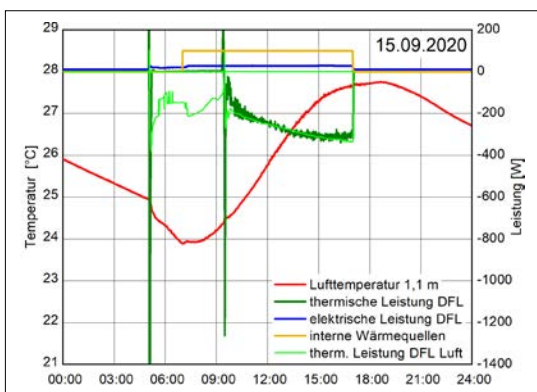


Abb. A95 Dezentrale Fassadenlüftungsgeräte – Referenzraum 15.09.2020 (IBP)

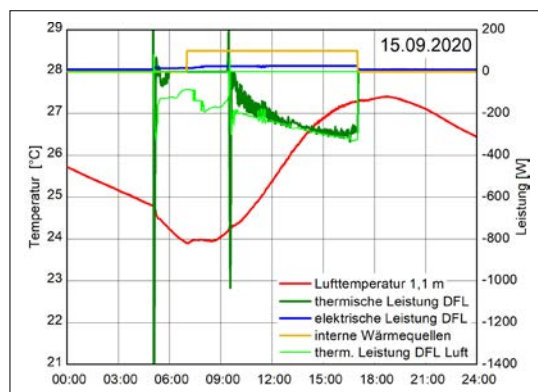


Abb. A96 Dezentrale Fassadenlüftungsgeräte – Testraum 15.09.2020 (IBP)

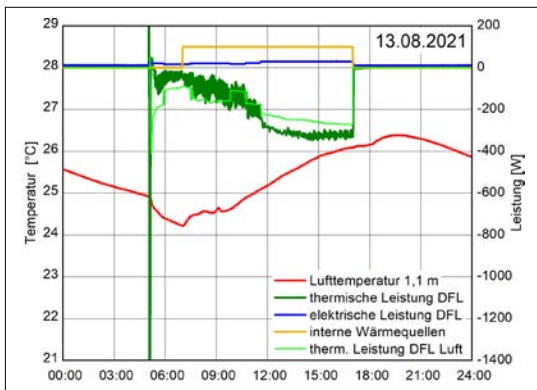


Abb. A97 Dezentrale Fassadenlüftungsgeräte – Referenzraum 13.08.2021 (IBP)

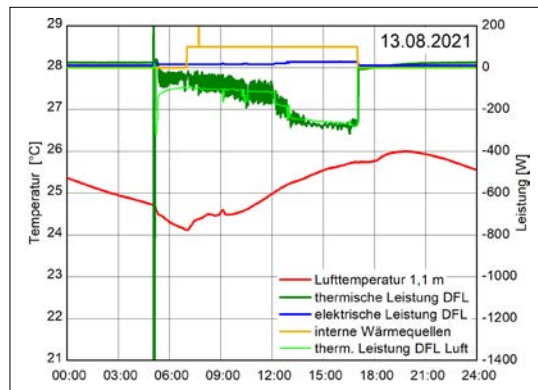


Abb. A98 Dezentrale Fassadenlüftungsgeräte – Testraum 13.08.2021 (IBP)

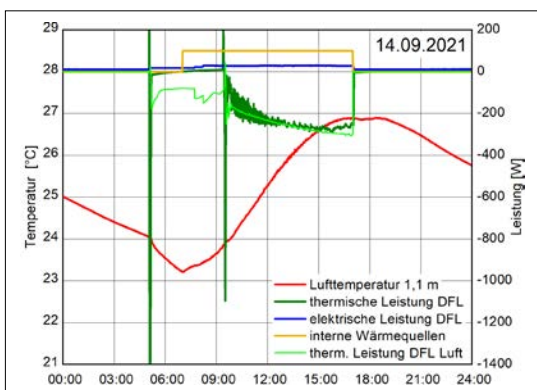


Abb. A99 Dezentrale Fassadenlüftungsgeräte – Referenzraum 14.09.2021 (IBP)

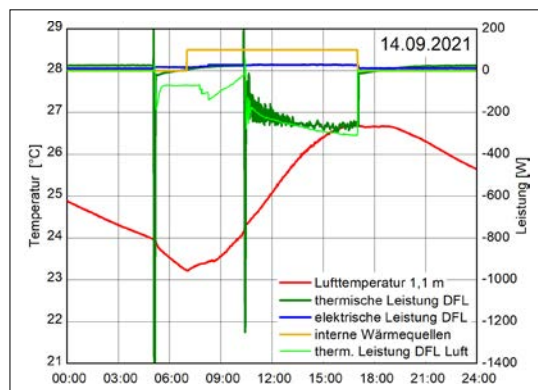


Abb. A100 Dezentrale Fassadenlüftungsgeräte – Testraum 14.09.2021 (IBP)

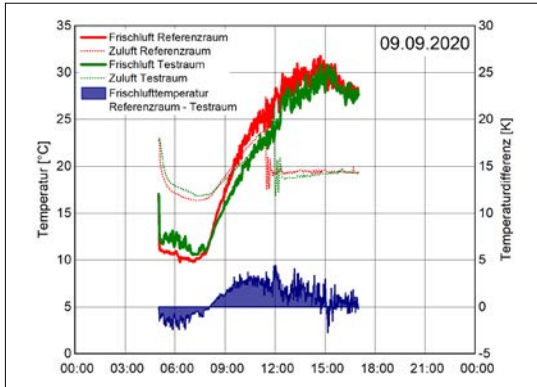


Abb. A101 Ansaug- bzw. Frischluft- und Zulufttemperatur am 09.09.2020 (IBP)

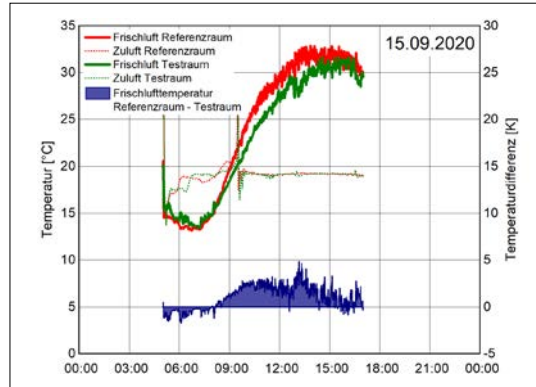


Abb. A102 Ansaug- bzw. Frischluft- und Zulufttemperatur am 15.09.2020 (IBP)

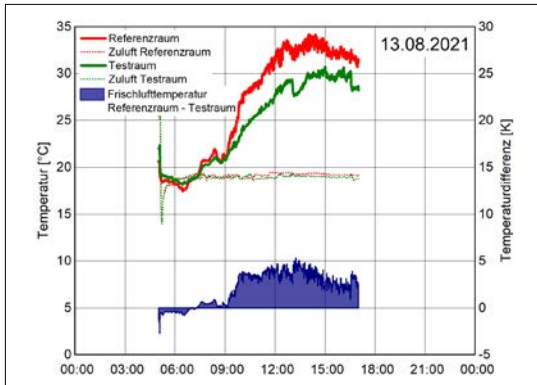


Abb. A103 Ansaug- bzw. Frischluft- und Zulufttemperatur am 13.08.2021 (IBP)

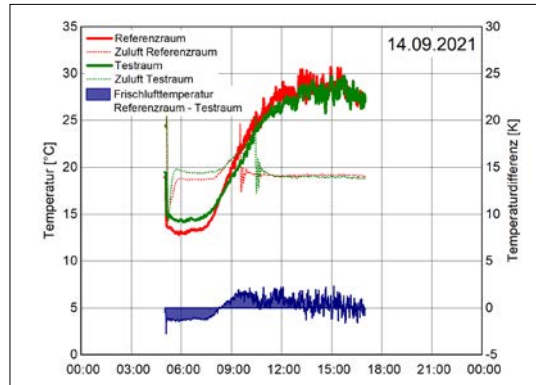


Abb. A104 Ansaug- bzw. Frischluft- und Zulufttemperatur am 14.09.2021 (IBP)

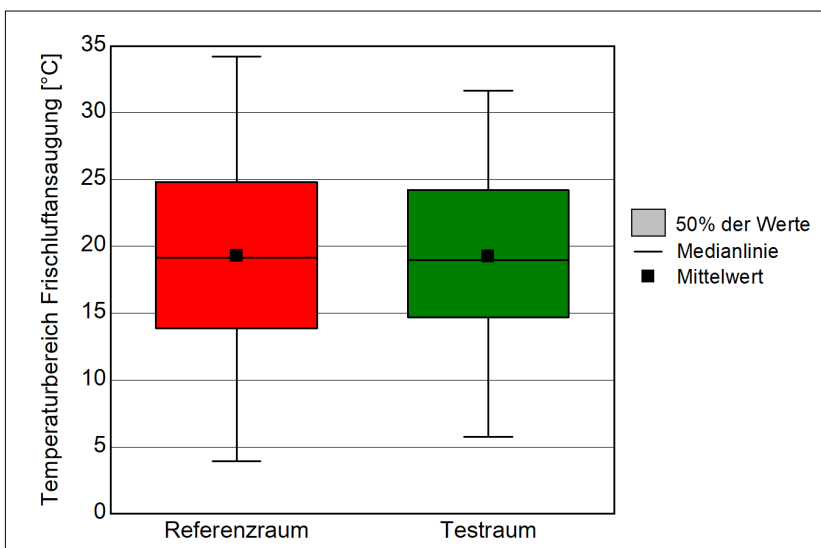


Abb. A105 Box-Plot-Darstellung der Frischlufttemperaturen an beiden Dezentrale Fassadenlüftungsgeräten im gesamten Auswertungszeitraum (44 d) (IBP)

A4 GreenFaBS-Workshop mit externen Fachleuten, Teilnehmer

Appendix

Am Mittwoch, 05.05.2021 (10:00 bis 12:30 Uhr) wurde in Form eines ZOOM-Meetings ein Workshop mit externen Fachleuten durchgeführt. Ziel war es, die bisherigen Projekteinschätzungen und -ergebnisse mit einschlägigen Fachleuten zu diskutieren.

Gäste waren

- Prof. Dipl.-Ing. Thomas Auer Technische Universität München, Lehrstuhl für Gebäude-technologie und klimagerechtes Bauen/ Transsolar Energietechnik GmbH, Stuttgart
- Dipl.-Ing. MBA Daniela Bock Grosser-Seeger & Partner, Nürnberg/ Grünclusiv e.V., Nürnberg
- Jürgen Eppel LWG – Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau/ Institut für Stadtgrün und Landschaftsbau (ISL), Veitshöchheim
- Annick Feit Verticalgreendesign (VGD) GmbH, Berlin
- Daniel Herzog, M.Sc. Technische Universität München, Lehrstuhl für Bauphysik
- Brigitte Keßler Landeshauptstadt München, Baureferat Gartenbau/ Planung und Neubau/ Schul- und Sportbau
- Dipl.-Ing. Doris Laase Projektträger Jülich/ Energiesystem: Nutzung/ Fachbereich Energieeffizienz in Gebäuden (ESN1)
- Kilian Lingen Vertiko GmbH, Buchenbach-Himmelreich
- Anja Morgenroth Stadt Nürnberg, Hochbauamt/ Abt. Zentrale Aufgaben/ Sachgebiet Kommunales Energiemanagement und Bauphysik
- Martin Wollenweber Landeshauptstadt München, Baureferat Gartenbau/ Planung und Neubau/ Schul- und Sportbau