

# Schlussbericht zum Vorhaben

Thema:

**GreenPV –  
Grünfassaden und Photovoltaik. Zu Potentialen aktueller  
Fassadenlösungen zur Klimaanpassung und Klimaneutralität**

Zuwendungsempfänger:

**Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm  
Fakultät Architektur  
Institut für Energie und Gebäude - ieg**

Laufzeit:

**01.04.2021 – 31.08.2022**

Monat der Erstellung:

**Nürnberg, September 2023**



(THN-AR)

# Schlussbericht zum Vorhaben

Thema:

**GreenPV –  
Grünfassaden und Photovoltaik. Zu Potentialen aktueller  
Fassadenlösungen zur Klimaanpassung und Klimaneutralität**

Zuwendungsempfänger:

**Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm  
Fakultät Architektur  
Institut für Energie und Gebäude - ieg**

Laufzeit:

**01.04.2021 – 31.08.2022**

Monat der Erstellung:

**Nürnberg, September 2023**



**STAEDTLER**  
S T I F T U N G

## Projektpartner\*innen/ Bearbeiter\*innen

Bearbeiter

- Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm  
Fakultät Architektur (THN-AR)  
Prof. Dr.-Ing. Roland Krippner (Projektleitung)  
M.A. Architekt Boris Bott (bis 12/2021)  
Dipl.-Ing. (FH) Thomas Rothenberger  
B.A. Hannes Gsaenger  
Janik Dervedde  
Julia Geilersdorfer  
Sven Nagler
  
- Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik/  
Institut für Energie und Gebäude – ieg (THN-MB-VS/ieg)  
Prof. Dr. Wolfram Stephan  
Dipl.-Ing. (FH) Mario Franz  
Peter Bauereiß  
Klaus Maurer

Die Bearbeiter bedanken sich bei der STAEDTLER Stiftung Nürnberg und ihrem Vorsitzenden Herrn Wilhelm R. Wessels für Förderung und finanzielle Unterstützung der Projektarbeiten.

Inhaltsverzeichnis	Inhalt	
1	Ziele des Vorhabens	4
1.1	Ausgangslage	4
1.2	Projektziel	5
2	Stand Technik und Wissenschaft	6
3	Vorarbeiten	9
3.1	Masterthesis	9
3.2	GreenFaBS	9
3.2.1	Mobiler Versuchsstand Rednitzhembach (MVSR)	10
4	Experimentellen Studien	11
4.1	Kombination Grünfassade und Photovoltaik	11
4.1.1	Begrünungsvarianten	11
4.1.2	Photovoltaik und Wechselrichter	12
4.1.3	Erweiterung Messtechnik	13
4.2	Messungen am Fassadenversuchsstand	13
4.2.1	Konzeption und Integration der Messtechnik	13
4.3	Auswertung und Ausblick	14
4.3.1	Klimatische Randbedingungen	14
4.3.2	Begrünungssystem 1 – System Jakob	15
4.3.3	Begrünungssystem 2 – System Kramer	15
4.3.4	Begrünungssystem 3 – System Vertiko	17
4.4	Vergleich und Zusammenfassung der Ergebnisse	19
4.5	Weiterführende Betrachtungen / Messreihen	20
4.5.1	Zusammenfassung - Vergleich Variante 3 und Variante 4	22
5	Kontext, Fazit und Ausblick	23
6	Anhang	26
6.1	Literatur- und Internetverzeichnis	26
6.2	Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	27
6.3	Veröffentlichungen	28
6.4	Posterpräsentationen	28
6.5	Vorträge	28
6.6	Öffentlichkeitsarbeit / Transfer	29
7	Appendix	30
7.1	Pflanzpläne	30
7.2	Meßtechnik	32
7.3	Auswertung und Überblick	34
7.3.1	Begrünungssystem 1 – System Jakob / Variante 2	34
7.3.2	Begrünungssystem 2 – System Kramer / Variante 2	36
7.3.3	Begrünungssystem 3 – System Vertiko / Variante 1	38
7.3.4	Begrünungssystem 3 – System Vertiko / Variante 2	40
7.3.5	Begrünungssystem 2 – System Kramer / Variante 3	42
7.3.6	Begrünungssystem 2 – System Kramer / Variante 4	44
7.4	Umbauten / Einbausituationen	46
7.5	Öffentlichkeitsarbeit / Transfer	48

## 1 Ziele des Vorhabens

Ziele des Vorhabens

### 1.1 Ausgangslage

Die auch in Mitteleuropa bereits spürbaren Klimaveränderungen erfordern neue Konzepte in der Architektur. Der effektive Einsatz von neuartigen Materialien und Systemkombinationen leistet hier einen wichtigen Beitrag. Ein zukunftsweisender Ansatz liegt in der Kombination von Begrünungstechniken und Photovoltaik (PV) im Bereich der Fassade, da hier eine Reihe von Synergieeffekten zu erwarten sind.<sup>1</sup>

Pflanzen bieten sich als natürliches Gestaltungselement ideal für ein ökologisches Hüllflächenkonzept an. Weltweit kommen Grünfassaden in den letzten Jahren immer häufiger beim Bau moderner, energieeffizienter Gebäude zum Einsatz.<sup>2</sup> Aufgrund adiabatischer Kühlprozesse können Fassadenbegrünungen als natürliche Klimaanlage in der Stadtplanung eingesetzt werden und dem Effekt der urbanen Hitzeinseln entgegenwirken. Dabei erfüllen sie eine Vielzahl weiterer Funktionen wie natürliche Luftfilterung von Feinstaub, Aufnahme von Kohlenstoffdioxid, Schallreduzierung oder Verbesserung der winterlichen Wärmedämmeigenschaften von Fassaden.<sup>3</sup> Zudem können Temperaturen an deren Oberflächen reduziert werden. (Abb. 1)

Um den Klimawandel zu verlangsamen, ist es notwendig den Ausstoß von Treibhausgasen zu reduzieren.<sup>4</sup> Für den Gebäudebereich stellen solartechnische Systeme wichtige und leistungsfähige Bausteine einer technisch und wirtschaftlich machbaren, zu 100 % erneuerbaren Energieversorgung in Deutschland dar.<sup>5</sup> Thermische Solarkollektoren und vor allem PV-Module sind wichtige Elemente des solaren Bauens und gelten mittlerweile als selbstverständliche Bestandteile energieeffizienter Gebäude und avancierter Hüllflächenkonstruktionen.<sup>6</sup> Spürbar wird dies unter anderem durch die Förderung von Photovoltaik seitens der Politik auf kommunaler Ebene, in Form von Vorschriften. Die Stadt Amberg zum Beispiel ist die erste Stadt in Bayern, die für Neubauten in Bebauungsplänen ab 2019 eine Verpflichtung für PV-Anlagen einführt.<sup>7</sup> Bundesweite Regelungen bestehen bislang nicht, doch werden sukzessive in den Ländern seit 2022 Vorschriften zur verpflichtenden Installation zumindest von solaren Dachanlagen verabschiedet. In Bayern gilt ab 2023 eine Solardachpflicht für staatliche Gebäude; diese wird im Laufe des Jahres auf neue Nicht-Wohngebäude wie Gewerbe- und Industrie- sowie landwirtschaftlich genutzte Bauten erweitert.<sup>8</sup>

Um den Energiebedarf in dicht bebauten Städten mit steigender Stockwerkszahl decken zu können, reicht die vorhandene Dachfläche häufig nicht mehr aus, um die notwendigen Flächen für Photovoltaik vorzuhalten. Durch die zusätzliche Belegung der Fassade mit Photovoltaik können weitere Flächen aktiviert werden.

Damit rückt die solare Energiegewinnung in die Wahrnehmung der Bewohner und wird auch im Quartiersumfeld sichtbar. (Abb. 2) Um eine breite Akzeptanz in der Bevölkerung zu erreichen, ist es daher unerlässlich, die Gestaltung so vorzunehmen, dass Neubau- und Sanierungsprojekte als eine Bereicherung der gebauten Umwelt empfunden werden. Zu diesem Zweck sind in den zurückliegenden Jahren innerhalb der Kommunen eine Vielzahl von Arbeitshilfen entstanden, u. a. 2019 der Planungsleitfaden-Photovoltaik der Stadt München, welche Planern und Bauherren sensibilisieren und bei einer architektonischen Integration von Photovoltaik in die Gebäudehülle unterstützen soll. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf der optisch-ästhetischen Integration.<sup>9</sup> Wie auch der Leitfaden Bauwerkintegrierte Photovoltaik (BIPV)<sup>10</sup> eindrucksvoll zeigt, gibt es seit Jahren viele realisierte Beispiele, in denen PV-Anlagen nicht wie Fremdkörper wirken, sondern einen integralen Bestandteil des Gebäudes darstellen.

Um die solare Einstrahlung optimal zur Erzeugung von Strom zu nutzen, sind die Faktoren Ausrichtung, Modulwirkungsgrad, Sonneneinstrahlung ausschlaggebend. Eine zentrale Rolle kommt der Modulerwärmung über 25° C zu. „Mit steigender Temperatur nimmt die Effizienz von Solarzellen kontinuierlich ab, bei kristallinen Modulen bis zu einem halben Prozent pro °C.“<sup>11</sup> Die kristalline Zelltechnologie kommt mit Abstand am häufigsten zum Einsatz und reagiert am empfindlichsten auf Temperaturerhöhung, d. h. je kühler die Einbausituation, desto effizienter lässt sich Solarstrom produzieren. Erreichen die Module Temperaturen über diesem Grenzwert, kommt es zu erheblichen Einbußen des Wirkungsgrades. So kann gerade in den Sommermonaten, wo viel energiereiche Strahlung vorhanden ist, ein begrüntes Umfeld

1 vgl. Bott et al., 2017, S. 111–118

2 Herzog et al., 3/2020, S. 336-341 und Krippner, 2013, S. 7f.

3 Pfoser et al., 2013, S. 16-19

4 Vgl. u.a. vom Klimafahrplan Nürnberg 2010-2050 (06/2014) über die Zielsetzung "Klimaneutralität" der Bundesregierung für den Gebäudebestand bis 2050 (11/2015), bis zum "European Green Deal" (01/2020).

5 Henning/Palzer, 2012, S. 4f.

6 vgl. Krippner, 2016, S. 64-71

7 vgl. [https://www.solarverein-amberg.de/sfv/news\\_artikel.php?id=271](https://www.solarverein-amberg.de/sfv/news_artikel.php?id=271) <18.08.2020>

8 vgl. u.a. Solarpflicht für Bayern ab März 2023. <https://www.carmen-ev.de> [20.02.2023] <19.09.2023>

9 vgl. Krippner; Flade, 2019 [a]

10 BIPV-Initiative BW, 2022

11 Weller et al., 2009, S. 23



Abb. 1 Berlin, Institut für Physik der Humboldt Universität Berlin (2003); Augustin und Frank Architekten. Berlin (THN-AR)



Abb. 2 Nürnberg, Labenwolf-Gymnasium / Solarfassade (2018); Hochbauamt H/B, Stadt Nürnberg (THN-AR)

Ziele des Vorhabens

eine bessere „Performance“ der PV ermöglichen.<sup>12</sup>

Zentrale Zukunftsaufgaben von Architekten bestehen darin, intelligente, d. h. (mikroklimatische) Verbesserungen des Gebäudeumfelds und ressourcensparende Lösungen für ein behagliches Raumklima bei Neubauten ebenso wie in der Bestandssanierung umzusetzen. Gerade im kombinierten Einsatz von Begrünungstechniken und Photovoltaik in der Fassade eines Gebäudes liegt bisher weitgehend ungenutztes Potential.

## 1.2 Projektziel

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.<sup>13</sup> Vor diesem Hintergrund wurde das vorliegende Forschungs- und Entwicklungsvorhaben konzipiert.

Innovativ ist die Zusammenführung von zwei Fassadentechnologien, die im Bereich energieeffizienter Gebäude bisher getrennt eingesetzt werden. Es bestehen eine Reihe von Fragen bzgl. der Anordnung der Komponenten in der Fassade zur Optimierung der 'Performance' unter Berücksichtigung der jeweils spezifischen Systemanforderungen sowie zu Synergie- und Substitutionseffekten unter Beibehaltung wichtiger Funktionen wie Sonnenschutz, Tageslichtnutzung und Sichtbeziehung nach außen. Gerade in der Variation der Fassadengeometrie können zusätzliche Flächen geschaffen und trotz 'Konkurrenz' sowohl Begrünung als auch PV zur Nutzung von Synergieeffekten großflächig eingesetzt werden.

In dem Projekt sollen Zusammenwirken und Korrelationen von Fassadenbegrünung und Photovoltaik untersucht und Anforderungen der baulichen Integration beispielhaft aufgezeigt werden. Es wird eine genaue Betrachtung folgender Aspekte vorgenommen:

- Funktional: Erhöhung solarer Energiegewinne durch Vermeidung von Überhitzung unter Zuhilfenahme von Fassadenbegrünung
- Konstruktiv: Koppelung / Adaption beider Fassadensysteme zu einer stimmigen Gesamtkonstruktion

<sup>12</sup> vgl. Bott et al., 2017, S. 111–118

<sup>13</sup> vgl. BMWI, 2015, S. 2.

## 2 Stand Technik und Wissenschaft

Stand Technik und Wissenschaft

Die Verbindung von Fassadenbegrünung und PV ist kein komplett neues Arbeitsfeld für Architekten, da diese Kombination bereits in Wettbewerbsprojekten mittlerweile angedacht und auch in Gebäuden vereinzelt realisiert wurde. Beim Smart Material House "Smart ist grün", der Beitrag von zillerplus Architekten aus München zur IBA (Internationale Bauausstellung) Hamburg 2013,<sup>1</sup> sind in der Südfassade, in den auch funktional unterschiedlichen Flächenbereichen, begrünte Felder mit Solartechnik kombiniert. (Abb. 3+4) Einerseits Solarthermie gleichsam als markant akzentuiertes Traufgesims und die PV-Module als Brüstungselemente, deren dunkel glänzende Farbigekeit einen guten Kontrast zur Bepflanzung darstellt, andererseits dienen Kletterpflanzen als Verschatter und Sichtschutz für Loggien.

Im Beitrag zum Wettbewerb für den Neubau des Türkenwirtgebäudes der Universität für Bodenkultur durch Hertl Architekten mit AllesWirdGut Architekten und Fritsch Chiari & Partner ZT GmbH, Wien (2014, 2. Preis) schließt eine „Walm-Sheddach-Dachkonstruktion“ mit Dachknick und 'Traufbehang', komplett belegt mit anthrazitfarbenen Dünnschichtmodulen, den Baukörper mit einer Fassade aus vorgehängten, horizontal durchlaufenden Bepflanzungströgen ab. Die funktionale Belegung bleibt im Bereich der baulichen Subsysteme (Dach – PV und Fassade – Begrünung) klar getrennt.<sup>2</sup>

In diesen beiden Projekten zeigen sich bereits gestalterisch interessante Ansätze, jedoch wird die Kombination von Fassadenbegrünung und Photovoltaik ohne spezifischen Bezug auf die Potentiale von Kühlleistung durch Vegetation zur Leistungsverbesserung der Photovoltaik eingesetzt. (Abb. 5+6)

Diese Potentiale sind indessen bereits bei der Ausführung von Flachdächern untersucht. Es wurde festgestellt, dass teilweise und in Abhängigkeit von Witterung, Dicke der Substratschicht etc. auch leistungssteigernde Kühlungseffekte der PV-Module möglich sind:<sup>3</sup> „Die Stromproduktion wird bei kombinierten Anlagen dadurch gesteigert, dass die begrünte Oberfläche über die Verdunstung des gespeicherten Regenwassers eine Abkühlung der Panels bewirkt.“<sup>4</sup>

Auch im Bereich der Fassade sind Kühleffekte durch Begrünungen auf Photovoltaik in einem Forschungsprojekt nachgewiesen: Der im Januar 2019 gegründete Forschungsbereich „Ökologische Bautechnologien“<sup>5</sup> hat für experimentelle Studien einen 'Öko-Prüfstand' errichtet. (Abb. 7) Ziel der Forschungsaktivitäten ist es, ein multifunktionales System zu entwickeln, welches eine optimale, langlebige, kostengünstige und energieeffiziente Lösung für Neubauten sowie Bestandssanierung darstellt. Untersucht werden unter anderem die Einflüsse einer „grünen Pufferzone“ (bodengebundene Fassadenbegrünung) auf die Temperatur von Photovoltaik-Modulen.<sup>6</sup>

Im Versuchsaufbau wird zwischen vier verschiedenen Anordnungen unterschieden:

- Referenzanordnung ohne Grünfassade mit transparenten und opaken Modulen
- Referenzanordnung ohne Grünfassade ohne Photovoltaik
- kristalline Zelltechnologie mit transparenter Vorder- und Rückseite
- kristalline Zelltechnologie mit opaker Rückseite

Es wurde festgestellt, dass die Pflanzen hinter der Photovoltaik in ihrem Wachstum kaum eingeschränkt werden und grundsätzlich temperaturregulierend auf die PV-Module (1 - 4 °C) wirken. Dieser Effekt wird umso ausgeprägter, desto extremer die Temperaturen sind. Penaranda Moren und Korjenic stellen abschließend heraus, dass gerade zur Beurteilung der komplexen Schnittstelle von Photovoltaik und Fassadenbegrünung zusätzliche Forschungsarbeiten erforderlich sind.

Während der Bearbeitung des "Green-PV"-Projektes sind einige weitere Forschungsarbeiten zu der Schnittstelle Photovoltaik und Fassadenbegrünung begonnen, teilweise abgeschlossen worden.

Das Projekt "VertiKKA. Die vertikale Klima-Klär-Anlage" (2019-2022) gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) beschäftigt sich mit der Entwicklung eines "multifunktionalen Fassadenbegrünungsmoduls", bei dem Pflanzen, Bewässerungsmanagement und Photovoltaik "neu" kombiniert werden. Gerade in der "Verbindung mit der Wiederaufbereitung und Verwendung von gering verschmutztem Haushaltsabwasser"<sup>7</sup> sind bisher ungenutzte Potentiale und eine Verbesserung der Ressourceneffizienz von Fassadenbegrünungen zu erwarten. In experimentellen Studien an der Bauhaus-Universität Weimar und der Hochschule für Wirtschaft und Umwelt Nürtingen-Geislingen (HfWU) werden sch-

1 <http://zillerplus.de/project/smart/> <07.08.2020>

2 <https://www.competitionline.com/de/beitraege/89896> <07.08.2020>

3 vgl. Krippner; Flade, 2019 [b], S. 1

4 Brenneisen, Stephan o.J.

5 <https://www.obt.tuwien.ac.at/forschung/forschungsfelder/> <19.08.2020>

6 vgl. Penaranda Moren/Korjenic, 2017, S. 364–382

7 <https://www.hfwu.de> [Fassadenbegrünung wird Klima-Kläranlage] <22.09.2023>



Abb. 3 Hamburg, IBA 2013 – Smart Material Houses / „Smart ist grün“ (2013); zillerplus Architekten und Stadtplaner, München (THN-AR)



Abb. 4 Kletterpflanzen in horizontalen Substratträgern und Brüstungen mit Dünnschicht (aSi) PV-Modulen (THN-AR)

Stand Technik und Wissenschaft

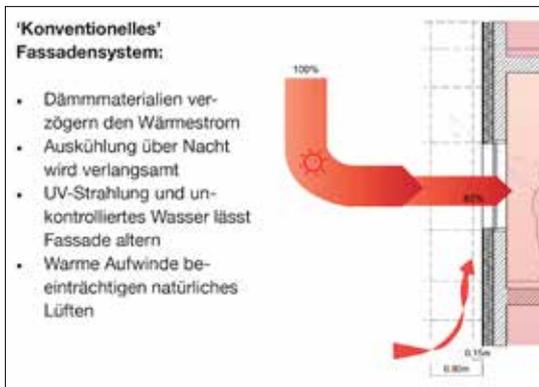


Abb. 5 ‚Konventionelles‘ Fassadensystem (THN-AR)

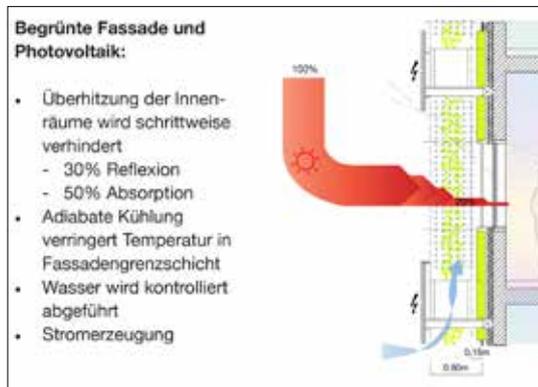


Abb. 6 Fassade mit Photovoltaik und Begrünung (THN-AR)



Abb. 7 Wien, Aufteilung der Versuchsfläche am ‚Ökoprüfstand‘ 1, 2, 3, 4 (von links nach rechts); TU Wien (Penaranda Moren/Korjenic, 2017)

male Bahnen flexibler PV-Module mit einer Zellreihe eingesetzt (Abb. 8), die geneigt in horizontalen Reihen vor der Begrünung angeordnet sind. In weiteren Versuchen bedecken abgehängte, um eine Zellreihe erweiterte Folienmodule Teilflächen der Begrünung; auch bestehen Konzepte mit vertikalen, einachsigen nachführbaren Modulen.<sup>8</sup> In dem Folgeprojekt „VertiKKA2“ (2022-2024) sollen horizontale PV-Lamellen aus Glas-Glas-Modulen eingesetzt und untersucht werden (Abb. 9). Das Projektteam erwartet durch die Kombination „höhere PV-Stromerträge durch Kühlungseffekte der Pflanzen“. Allerdings sind über Messergebnisse, die eine Ertragssteigerung belegen, bisher keine Informationen veröffentlicht worden.<sup>9</sup>

<sup>8</sup> vgl. <https://www.hfwu.de> [Fassadenbegrünung wird Klima-Kläranlage] <22.09.2023> und <https://vertikka.de/vertikka-entwicklung/funktion> <22.09.2023>

<sup>9</sup> vgl. u.a. <https://vertikka.de> <19.09.2023> und <https://www.uni-weimar.de/de/bauingenieurwesen/professuren/technologien-urbaner-stoffstromnutzung/forschung/> <19.09.2023>



Abb. 8 VertiKKA. Die vertikale Klima-Klär-Anlage (2019-2022) / Versuchsstand (Juli 2021) (www.uni-weimar.de)



Abb. 9 VertiKKA2 (2022-2024) / Versuchsstand Konzept (www.uni-weimar.de)

Stand Technik und Wissenschaft

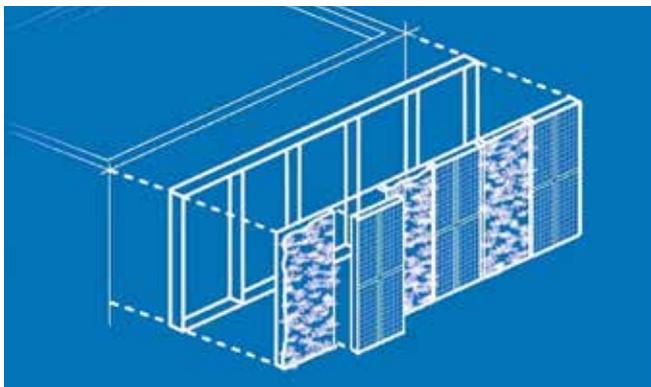


Abb. 10 greenTES - Fassadenintegration von Photovoltaik und Begrünung im vorgefertigten Holzbausystem (2021-2023) / Konzeptskizze (www.arc.ed.tum.de)

In "greenTES - Fassadenintegration von Photovoltaik und Begrünung im vorgefertigten Holzbausystem" (2021-2023)<sup>10</sup>, einem aktuellen Projekt der Technischen Universität München im Rahmen der Forschungsförderung Zukunft Bau, wird ebenfalls die Kombination von PV-Modulen und Begrünungssystemen untersucht. Der spezielle Ansatz dieses Forschungsteams ist die Integration in vorgefertigte Holzrahmenkonstruktionen auf Basis der TES Energy Facade (Timber based Element System), einem Holzbausystem für die Sanierung des Gebäudebestands. Es werden zwei verschiedene PV-Typen (Dünnschicht- und kristalline Module) in Glas-Glas-Paneelen eingesetzt und drei verschiedene Begrünungsarten: bodengebundenes Grün mit Selbstklimmer, Mischsystem mit Kletterpflanzen in Trögen sowie fassadengebundene Variante mit Pflanzrinnen. Allerdings ist in diesem Projekt geplant, die jeweiligen Fassadensysteme in einer vorgehängten hinterlüfteten Konstruktion in separaten Fassadenfeldern anzuordnen.<sup>11</sup> (Abb. 10)

International sind trotz vielfältiger Aktivitäten zu Gebäudebegrünung<sup>12</sup> keine weiteren Projekte zur Schnittstelle Begrünung und Photovoltaik bekannt. Die Forschungsarbeiten sind neben Simulationsstudien oftmals eher 'Lowtech' basiert. So werden an der University of São Paulo zum Beispiel Kletterpflanzen bzgl. des Beschattungspotenzial experimentell untersucht.<sup>13</sup> Dies verwundert nicht, da in Südamerika, beispielsweise in Brasilien und Chile, trotz der positiven Auswirkungen vertikaler Begrünungen auf das städtische Klima, insbesondere wandgebundene Systeme durchaus als Indiz für soziale Verdrängungen und Gentrifizierungsprozesse diskutiert werden.<sup>14</sup>

10 <https://www.arc.ed.tum.de/klima/cleanvelope/greentes/> <19.09.2023>

11 Vgl. Hani et al., 3/2022, S. 30–33

12 vgl. Bustamante et al. (Hrsg.), 2022

13 vgl. Bustamante et al. (Hrsg.), [Onsite Sessions] 2022, S. 474-479. Damit finden die grundlegenden experimentellen Arbeiten von Rudi Baumann, Ende der 1970er Jahre an der Gesamthochschule Kassel durchgeführt, nach 4 Jahrzehnten eine Fortsetzung. Vgl. Baumann, 1980 und Baumann, 1983,

14 Adriana Allen, Keynote speaker. 36th PLEA 2022. Santiago de Chile, Pontificia Universidad Católica de Chile, 24.11.2022

### 3 Vorarbeiten

Vorarbeiten

#### 3.1 Masterthesis

Im August 2016 sind innerhalb einer Masterthesis an der Fakultät Architektur der Technischen Hochschule Nürnberg die konzeptionellen und konstruktiven Integrationsmöglichkeiten der Kombination aus Fassadenbegrünung und Photovoltaik untersucht worden.<sup>1</sup>

Anhand eines Referenzraumes wurden quantitative Betrachtungen zu prinzipiellen Flächenbelegungen in der Fassade durchgeführt und die untersuchten Kombinationen anhand einer Bewertungsmatrix sowie mittels einfacher Netzdiagramme hinsichtlich ihrer Potentiale analysiert. Kriterien waren u. a.: Identifizierung möglichst großer Flächen für Begrünung und Photovoltaik, Berücksichtigung der spezifischen Komponentenanforderungen sowie Synergie- und Substitutionseffekte. (Abb. 11)

Ziel dieser Systematisierungsschritte war es Grundtypen herauszuarbeiten, die sowohl für Fassadenbegrünung als auch Photovoltaik größtmögliche Flächenbelegungen eröffnen, immer unter Beibehaltung wichtiger Funktionen wie Sonnenschutz, Tageslichtnutzung und Sichtbeziehung nach außen. So können durch einen hohen Pflanzenanteil Vorteile wie Feuchtspeicherefähigkeit, Staubfilter, Biodiversität und Lärmschutz genutzt werden, was zusätzlich eine bessere Kühlleistung erzeugt. Je größer die PV-Fläche, desto höhere Solarstromerträge lassen sich erzielen. Die vorteilhaften Grundtypen werden in einem nächsten Schritt miteinander zu Modellvarianten kombiniert und zeichnerisch im Maßstab 1:20 detaillierter untersucht.

Ergebnisse der Arbeit zeigen, welche enorme funktionale und gestalterische Potentiale in der Kombination von vertikaler Begrünung und Photovoltaik bestehen. Diese erstrecken sich auf Sonnen- und Wärmeschutz sowie solare Aktivierung der Fassade. Wandgebundene Pflanzensysteme besitzen eine hohe Kühlleistung und lassen sich gut vor den opaken Bereichen der Fassade montieren. Für Photovoltaik sind Hinterlüftung und die Ausrichtung zur Sonne von zentraler Bedeutung. Dies lässt sich durch die Drehung der vorgesetzten PV-Module optimieren. Für die horizontalen PV-Lamellen ist zusätzlich durch die reduzierten Temperaturen in der Einbausituation eine wirkungsvolle Hinterlüftung gegeben.<sup>2</sup>

#### 3.2 GreenFaBS

Im Verbundvorhaben „EnOB: GreenFaBS“ (02/2019 – 07/2021)<sup>3</sup> beschäftigt sich ein Team aus Fakultät Architektur und Institut für Energie und Gebäude - ieg der Technischen Hochschule Nürnberg mit dem Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Standort Holzkirchen ebenfalls mit zwei Fassadentechnologien, die im Bereich der energieeffizienten Gebäudekonditionierung bisher nur getrennt eingesetzt wurden: Grünfassaden und fassadenintegrierte dezentrale Gebäudetechnik.

Die im Rahmen einer Simulationsstudie avisierten Potentiale, dass Grünfassaden den

1 Bott, SS 2016  
 2 Bott et al., 2017, S. 116ff.  
 3 Krippner (Projektleitung), 02/2019

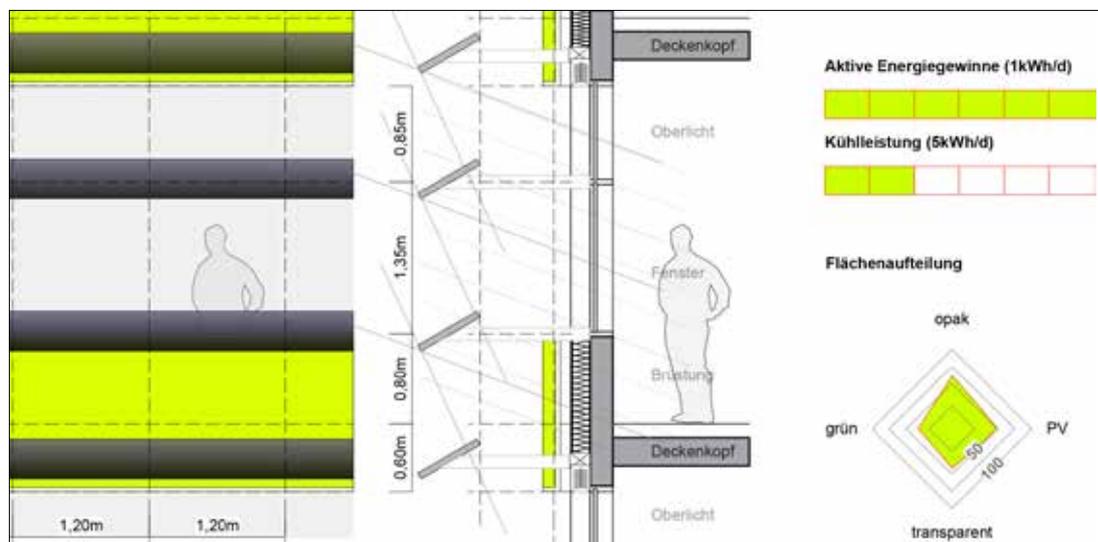


Abb. 11 Bewertungsmatrix mit Modellvariante „Fassadenbegrünung und Photovoltaik“ (Boris Bott)



Vorarbeiten

Abb. 12 Rednitzhembach, Technikum: EnOB: GreenFaBS-Versuchsstand. Referenzbüro mit DFL (links) und Aufbau mit Fassadenbegrünung und DFL (rechts) (Oktober 2019) (THN-AR)

Temperaturanstieg an Fassaden verhindern und dadurch den Kühlenergiebedarf von DFL (erheblich) senken können, konnten in dem Projekt innerhalb zweier Experimenteller Studien verifiziert werden.<sup>4</sup>

### 3.2.1 Mobiler Versuchsstand Rednitzhembach (MVSr)

Das 1995 in Betrieb gegangene Technikum Rednitzhembach der Technischen Hochschule Nürnberg bietet auf einer Fläche von ca. 300 m<sup>2</sup> Platz für interdisziplinäre FuE-Aktivitäten, vor allem aber auch sehr gute Möglichkeiten, Studierende im Rahmen von Praktika und Abschlussarbeiten praxisnah auszubilden.

Im Zuge des „GreenFaBS“-Projekts konnte das Spektrum der Forschungsmöglichkeiten am Technikum vergrößert werden. Im Außenbereich wurde ein mobiler Fassaden-Versuchsstand errichtet. (Abb. 12) Dieser Demonstrator ermöglicht es, neuartigen Ansätze und Kombinationen von Fassadentechnologien im Maßstab 1:1 zu untersuchen. Für den Versuchsstand konnte ein idealer Aufstellungsort auf einer Freifläche im westlichen Bereich des Technikums gefunden werden. Verschattungsstudien zeigen, dass hier in der wesentlichen Versuchsperiode (April bis Oktober, 8:00 – 18:00 Uhr) weitgehend keine Verschattung durch umliegende Bäume und Gebäude entsteht.<sup>5</sup> Somit eignet sich der Standort besonders für die energetische Betrachtung von Fassadensystemen im Zusammenhang mit solarer Einstrahlung.

Die Basis der Untersuchung bilden zwei identische Büroräume. Während ein Raum als Referenzgröße den ‚Stand der Technik‘ demonstriert, können im anliegenden Zwillingsraum neu entwickelte Fassadenkonzepte installiert werden. Somit wird es möglich, deren bauphysikalische Potentiale unter realen Witterungsbedingungen direkt miteinander zu vergleichen.

Der rechteckige Baukörper hat die Außenmaße 6,80 m x 2,48 m (l x b). Das Pultdach (3,91 m; 2,77 m [h1; h2]) ist mit einem Doppelstehfalzblech aus Titanzink gedeckt. Die Holzständerbauweise der Außenwände übernimmt die Lastabtragung, Aussteifung und die Dämmfunktion. Die Wärmeleitfähigkeit der Hülle entspricht der EnEV 2016.

Die opaken Wandflächen sind als vorgehängte, hinterlüftete Fassade ausgeführt. Den Abschluss nach außen bilden 6 mm starke, anthrazitfarbene HPL Platten. Pflegeleichte, weiße Holzwerkstoffplatten bilden die Oberfläche der Wände zum Innenraum. Die Außenmaße der Pfosten- und Riegelfassade betragen 2,48 m und 2,84 m (b x h). Sie besteht aus zwei Festverglasungen, einem opaken Element, in Form eines Sandwichpaneels im rechten unteren Bereich sowie einem zu öffnenden Fenster im linken oberen Bereich.

Die Lasten aus der vorgesetzten Konstruktion werden von Stahlkonsolen aufgenommen und in den Holzbau abgetragen. Modularer Aufbau und Einsatz von Verschraubungen als Befestigungsmittel ermöglichen den Austausch einzelner Komponenten. (Abb. 50-54; Kapitel 7)

Mit dem Versuchsstand am Technikum Rednitzhembach sind die wesentlichen baulichen Einrichtungen in Verbindung mit Wetterstation und hoher Ausstattung an Messtechnik für die geplanten Experimentellen Studien vorhanden.

<sup>4</sup> vgl. Krippner et al., 2/2022, S. 26–31 und Krippner, 9/2023, S. 14–17.

<sup>5</sup> Allerdings zeigt die Auswertung der Messungen mit geeigneten PV-Modulen, dass es schon ab September zu Verschattungssituationen kommen kann.

## 4 Experimentellen Studien

Experimentelle  
Studien

### 4.1 Kombination Grünfassade und Photovoltaik

#### 4.1.1 Begrünungsvarianten

Es werden insgesamt drei verschiedene Fassadenbegrünungen (wand- und bodengebundene Begrünung, Mischsystem), die ebenfalls bereits im Rahmen des Verbundvorhabens „EnOB: GreenFaBS“<sup>1</sup> angeschafft wurden, für die Projektarbeiten herangezogen: (Abb. 9)

##### *Variante 1 – Jakob Rope Systems, Ostfildern*

Bodengebundene Begrünung mit Kletterpflanzen (Abb. 13 links, 44; Kapitel 7)

Die Unterkonstruktion für das bodengebundene Begrünungssystem mit Kletterpflanzen (Amerikanische Pfeifenwinde (*Aristolochia durior*)) wird in Trog und Kletterhilfe unterschieden. Die Kletterhilfe besteht aus einer biegesteifen Rahmenkonstruktion, in die das Seilspannsystem der Firma Jakob eingebracht wird. 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.“<sup>2</sup>

##### *Variante 2 – Kramer Gartenbau, München*

Mischsystem, horizontale Wuchsebene (Abb. 13 mitte, 44+47; Kapitel 7); Pflanzplan (Abb. 27; Kapitel 7)

Beim Misch- oder auch Regalsystem der Firma Kramer werden die Pflanzen in kleine Töpfe mit integrierter Drainageschicht eingesetzt. Die 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 (Loggien, Dachterrassen).“<sup>3</sup> Über ein PE-Rohr wird das Gießwasser linear im Modul verteilt. Oberhalb der einzelnen Behältnisse sind selbsthaltende Emitter mit integriertem Druckausgleich angebracht.

##### *Variante 3 - Vertiko GmbH, Buchenbach*

Flächiges, wandgebundenes Begrünungssystem (Abb. 13 rechts); Pflanzplan (Abb. 28; Kapitel 7)

Die Living Wall Outdoor besteht aus einem „pflanzentragenden Geotextil an einer systemeigenen, hinterlüfteten, ganzflächigen und verrottungsfreien Trägerplatte mit

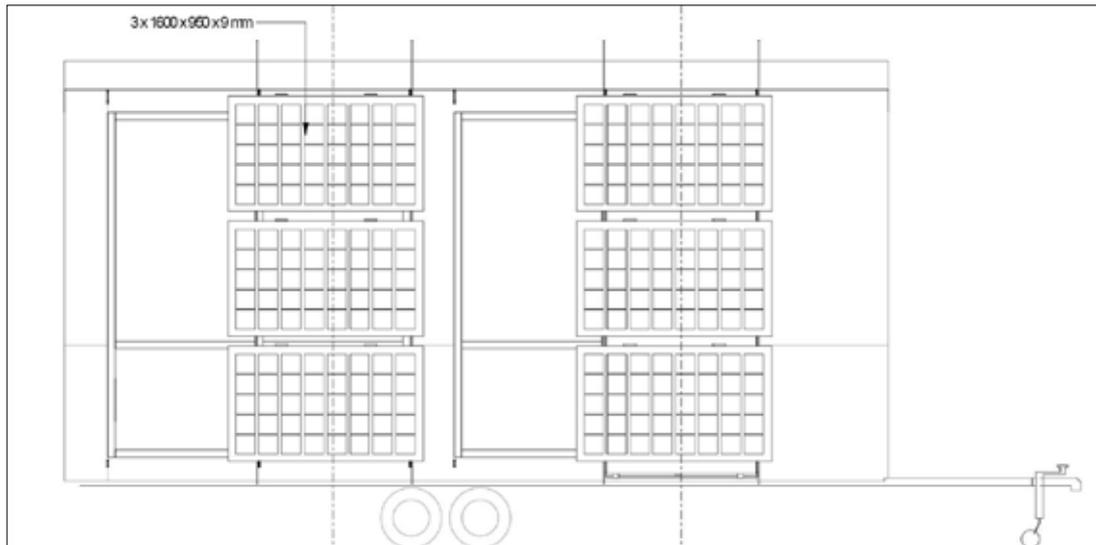
1 vgl. EnOB: GreenFaBS, 02/2022, S. 30ff.

2 Pfoser et al., 2013, S. 44

3 Pfoser et al., 2013, S. 46



Abb. 13 Rednitzhembach, Technikum / Fassaden-Versuchsstand, Begrünungssysteme (THN-AR)  
Variante 1 – Jakob GmbH, Ostfildern / Kletterpflanze (links, Juni 2022)  
Variante 2 – Kramer Gartenbau, München (mitte, Juli 2020)  
Variante 3 – Vertiko GmbH, Buchenbach (rechts Juni 2020)



Experimentelle  
Studien

Abb. 14 Fassadenversuchsstand am Technikum der THN in Rednitzhembach: Referenzfall mit Photovoltaik (links); Photovoltaik mit Fassadenbegrünung (rechts) (THN-AR)

Unterkonstruktion<sup>4</sup>. Durch Einschnitte in die obersten Textilschichten entstehen Taschen, in welche 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.“<sup>5</sup> 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 (größer 3 bar) im Leitungssystem verteilt sich das Wasser gleichmäßig.

#### 4.1.2 Photovoltaik und Wechselrichter

Am Versuchsstand (Abb. 14+15) kommen PV-Module des Anbieters aleo solar GmbH, Prenzlau zum Einsatz. Das Produkt „Elegante 200W“ eignet sich für den Einbau in die Fassade.<sup>6</sup> Durch die rahmenlose Konstruktion und die transparente Rückabdeckung wird ausreichend Sonneneinstrahlung für die dahinter angeordneten Pflanzmodule sichergestellt. Das Modul basiert auf monokristalliner Zell-Technologie, welche sich durch einen hohen Wirkungsgrad als auch einer hohen Temperaturempfindlichkeit auszeichnet.

Die Module besitzen die Temperaturkoeffizienten:

- ISC  $\alpha$  (Kurzschlussstrom) +0,05 %/K
- UOC  $\beta$  (Leerlaufspannung) -0,29 $\alpha$  %/K
- PMPP  $\gamma$  (Leistung) %/K] %/K

Wichtig ist hierbei der Koeffizient PMPP, der die Abnahme des PV-Ertrags in Abhängigkeit der Modultemperatur beschreibt.

Bei einer angenommenen Modultemperatur von 60 °C, ergibt sich eine Differenz von 35 °C im Vergleich zu den Laborbedingungen. Daraus lässt sich ein Leistungsverlust von 14 % allein durch die Temperatur errechnen. Mit einer Reduktion der Modultemperatur durch ein begrüntes Umfeld gegenüber dem Referenzfall könnte sich die Effizienz steigern.

Um den von den PV-Modulen erzeugten Gleichstrom in Wechselstrom umwandeln zu können, werden Wechselrichter benötigt. Zum Einsatz kommen hierbei Micro-Wechselrichter der Firma AEconversion aus Bad Sassendorf vom Typ INV500-90. Die maximale PV-Leistung beträgt 700 W bei einer AC-Leistung von 480 W und einem max. Wirkungsgrad von 95 %.

Der Ansatz zielt auf Synergieeffekte durch die Nutzung der jeweils positiven Eigenschaften beider Fassadensysteme: die Photovoltaik als hochentwickelte, technische Komponente und wesentlicher Baustein einer dezentralen, gebäudenahen Energieversorgung, der vertikale Garten zur Verbesserung des wohnungsnahen Umfelds mit den Potentialen zur passiven

4 Pfoser et al., 2013, S. 50

5 Pfoser et al., 2013, S. 50

6 vgl. DIN 18008-3:2013-07, S. 5



Experimentelle Studien

Abb. 15 Fassadenversuchsstand mit PV-Modulen – bodengebundenes System Jakob (Kletterpflanze) / Variante 1 (August 2021) (THN-AR)

Kühlung. Es stellt sich die Frage inwieweit solare Erträge durch die Reduktion der PV-Modultemperatur mittels passiver Kühleffekte von Fassadenbegrünungssystemen gesteigert werden können. Darüber hinaus können Aussagen hinsichtlich der Raumtemperaturen in den Innenräumen (Nutzerkomfort) getroffen werden.

#### 4.1.3 Erweiterung Messtechnik

Zusätzliche für die Untersuchung benötigte Sensorik erforderte Anpassungen am Versuchsstand bzw. Schaltschrank sowie innerhalb der Aufzeichnungssoftware. Zur Bestimmung des PV-Ertrags wurden zwei elektronische Energiezähler der Firma Gossen Metrawatt vom Typ Energymid EM 2289 zur bereits vorhandenen Messtechnik installiert. Die restliche für diese Versuchsreihen benötigte Messtechnik war bereits aus dem Vorgängerprojekt GreenFaBS<sup>7</sup> vorhanden. Dabei musste lediglich die Sensorik zur Bestimmung der Oberflächentemperaturen von der Fassade des Versuchsstands entfernt und auf der Rückseite der PV-Module neu angebracht werden.

### 4.2 Messungen am Fassadenversuchsstand

#### 4.2.1 Konzeption und Integration der Messtechnik

Zur Beurteilung der Auswirkungen auf die Ertragssteigerung der PV-Module aufgrund der Verdunstungskühlung von unterschiedlichen Begrünungssystemen werden verschiedene Messreihen durchgeführt. Abb. 15 zeigt den Fassadenversuchsstand in Rednitzhembach; der unbegrünte Referenzfall befindet sich im linken Bereich und der Raum mit dem vor der Fassade installiertem Begrünungssystem im rechten Bereich der Versuchsanordnung.

Innerhalb der experimentellen Studien wird der Abstand der PV-Module zu den Begrünungssystemen variiert; dabei sind die jeweiligen PV-Module immer senkrecht, parallel zur Fassadenbekleidung angebracht (Anstellwinkel: 0°). Untersucht werden ein geringerer und ein größerer Abstand. Der geringe Abstand (Variante 1) stellt hierbei den minimal möglichen Abstand zwischen PV-Modulen und Pflanzen dar; der größere Abstand (Variante 2) soll eine bessere Zugänglichkeit zur Begrünung ermöglichen.

- Variante 1 - Abstand Rückseite PV-Modul zum Begrünungssystem (vertikale Achse):
  - Jakob: 33 cm zur Achse des Begrünungssystems (Befestigungsgitter) (Abb. 16)
  - Kramer: 33 cm zur Achse des Begrünungssystems (Befestigungsgitter) / 15 cm zur Vorderkante der Pflanztöpfe
  - Vertiko: 32 cm zur Befestigungsplatte des Begrünungssystems
- Variante 2 - Abstand Rückseite PV-Modul zum Begrünungssystem (vertikale Achse):
  - Jakob: 52 cm zur Achse des Begrünungssystems (Befestigungsgitter) (Abb. 17)
  - Kramer: 52 cm zur Achse des Begrünungssystems (Befestigungsgitter) / 34 cm zur Vorderkante der Pflanztöpfe
  - Vertiko: 51 cm zur Befestigungsplatte des Begrünungssystems

<sup>7</sup> vgl. EnOB: GreenFaBS, 02/2022, S. 28ff.



Abb. 16 Seitenansicht des Systems der Firma Jakob – kleiner Abstand (August 2021) (THN-AR)



Abb. 17 Seitenansicht des Systems der Firma Jakob – großer Abstand (Juni 2022) (THN-AR)

Experimentelle  
Studien

Die Witterungsrandbedingungen werden mit Hilfe einer Wetterstation am Versuchsstand erfasst (Abb. 29; Kapitel 7). Hierbei werden die Außenlufttemperatur, die Außenluftfeuchte, der Luftdruck, die Windrichtung, die Windgeschwindigkeit sowie solare Einstrahlung auf die Horizontale und auf die senkrechte Südfassade aufgezeichnet.

Um den Einfluss der Fassadenbegrünung auf die Leistungsfähigkeit der PV-Module zu ermitteln, ist weitere Messtechnik im Außen- sowie Innenbereich (Pyranometer zur Bestimmung der solaren Einstrahlung hinter den Begrünungssystemen, Oberflächentemperaturfühler, Lufttemperaturfühler mit Strahlungsschutz, Globe-Thermometer) des Versuchsstands vorgesehen (Abb. 30 bis Abb. 34; Kapitel 7). Die Oberflächentemperaturfühler sind jeweils mittig auf der Rückseite der PV-Module angebracht. Die Lufttemperaturfühler im Außenbereich messen die Lufttemperatur zwischen PV-Modul und Fassade. Im Fall mit Begrünungssystem wird hierbei die Lufttemperatur zwischen PV-Modul und Begrünungssystem bzw. Fassade aufgezeichnet. Ebenso werden die Raumlufttemperaturen in den beiden innenliegenden Versuchsräumen gemessen. Die Globe-Thermometer dienen hierbei zur Erfassung der Strahlungstemperaturen in den beiden Versuchsräumen.

Weiterhin wird der Ertrag der PV-Module mit Hilfe eines elektronischen Energiezählers für den Referenzfall sowie für den Fall mit Begrünungssystem ermittelt. (Abb. 35; Kapitel 7).<sup>8</sup>

Die Messungen wurden von Anfang Mai 2022 bis Ende Juli 2022 mit einem Messintervall von jeweils fünf Minuten mit Hilfe eines Mittelwertfilters durchgeführt. Jedes Begrünungssystem wurde insgesamt an sechs aufeinanderfolgenden Tagen vermessen. Beginn bzw. Ende der Messreihen ist jeweils um 0.00 Uhr des entsprechenden Tages:

1. Bodengebundenes System der Firma Jakob
  - a. Variante 1: 10. Mai 2022 bis 15. Mai 2022: geringer Abstand
  - b. Variante 2: 13. Juni 2022 plus 22. Juni 2022 bis 26. Juni 2022: großer Abstand
2. Misch-System der Firma Kramer
  - a. Variante 1: 05. Juli 2022 bis 10. Juli 2022: geringer Abstand
  - b. Variante 2: 28. Juni 2022 bis 03. Juli 2022: großer Abstand
3. Wandgebundenes System der Firma Vertiko
  - a. Variante 1: 12. Juli 2022 bis 17. Juli 2022: geringer Abstand
  - b. Variante 2: 26. Juli 2022 bis 31. Juli 2022: großer Abstand

## 4.3 Auswertung und Ausblick

### 4.3.1 Klimatische Randbedingungen

Die Summe der solaren Einstrahlung (Abb. 18) befindet sich in einem Bereich von 13,7 kWh/m<sup>2</sup> bis 21,6 kWh/m<sup>2</sup>. Die mittlere Außentemperatur beläuft sich auf Werte zwischen 19,0 °C und 22,4 °C, dies entspricht einer Außentemperatur im Bereich von 7,0 °C bis 34,9 °C.

Weiterhin ergeben sich Sonnenstunden (solare Einstrahlung größer 120 W/m<sup>2</sup>) zwischen 38,3 h bis 52,1 h je untersuchter Variante. Die klimatischen Randbedingungen während der einzelnen Versuchsreihen zeigen ähnliche Werte.

<sup>8</sup> Eine Übersicht (Tab. 7; Kapitel 7) zeigt detailliert die für die Messungen eingesetzten Messgeräte.

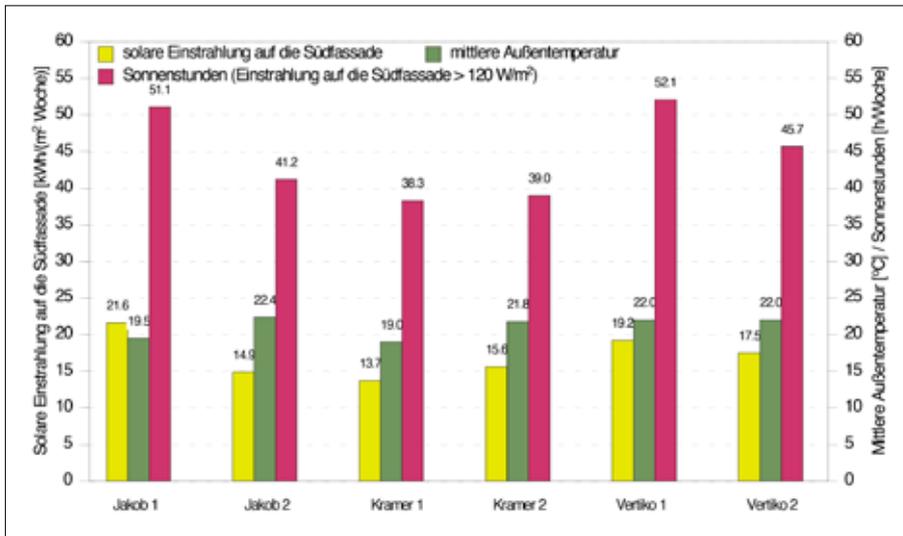


Abb. 18 Summe der solaren Einstrahlung auf die Südfassade, die mittlere Außentemperatur sowie die Anzahl der Sonnenstunden, wenn die solare Einstrahlung auf die Südfassade einen Wert von 120 Wh/m<sup>2</sup> übersteigt, während der einzelnen Messreihen (THN-ieg)

### 4.3.2 Begrünungssystem 1 – System Jakob

#### Variante 1: Geringer Abstand der PV-Module zum Begrünungssystem

Beispielhaft ist der Verlauf der mittleren Oberflächentemperatur auf der Rückseite der PV-Module für den unbegrünten und begrünenden Fall sowie die Differenz der Oberflächentemperatur zwischen unbegrünten und begrünenden für das System Jakob für den kleineren Abstand zwischen PV-Modul und Begrünungssystem dargestellt. (Abb. 19) Werte größer null bedeuten, dass die Oberflächentemperatur auf der unbegrünten Seite größer ist als auf der begrünenden.

Den Verlauf des PV-Ertrags für den unbegrünten bzw. begrünenden Fall sowie dessen Differenz zeigt Abb. 20. Ist diese Differenz größer null, so wird auf der begrünenden Seite mehr Strom durch die Photovoltaikanlage erzeugt.

Exemplarisch sind die Verläufe für einen Tag (15.05.2022) erfasst. (Abb. 21) Hier kann man erkennen, dass es zu Beginn des Tages zwischen 8.45 und 9.15 Uhr zu einer Verschattung der PV-Module auf der unbegrünenden Seite durch die PV-Module der begrünenden Seite kommt. Die Situation tritt in jeder Versuchsreihe morgens an sonnigen Tagen auf. Dieser und ähnliche Effekte sind bei der Auswertung der PV-Erträge nicht berücksichtigt und werden herausgerechnet.

Das Begrünungssystem mit der Kletterpflanze führt zu einer Verminderung der Oberflächentemperaturen auf der Rückseite der PV-Module maximal um etwa 1,3 K und im Mittel um ca. 0,4 K. (Abb. 19) Die Lufttemperaturen im Spalt unterscheiden sich nur geringfügig zwischen den beiden Fällen. Die empfundenen Raumtemperaturen sind im begrünenden Fall im Mittel um ca. 0,6 K und im Maximum um etwa 0,9 K geringer.

Betrachtet man die PV-Erträge unter Nichtberücksichtigung der Messbereiche mit Eigenverschattung der beiden Versuchsanordnungen, so sind in der Summe über den Betrachtungszeitraum keine Unterschiede zu erkennen, d. h. das Begrünungssystem führt zu keiner Erhöhung des PV-Ertrags. (Tab. 1+2)

#### Variante 2: Großer Abstand der PV-Module zum Begrünungssystem

Auch ein größerer Abstand zwischen PV-Modul und Begrünungssystem führt zu ähnlichen Ergebnissen. Ein Unterschied hinsichtlich des PV-Ertrags ist ebenfalls nicht feststellbar. Die Oberflächentemperaturen (maximal 2,2 K, durchschnittlich 0,4 K) sowie die empfundenen Raumtemperaturen (maximal 0,9 K, durchschnittlich 0,6 K) zeigen hingegen eine Verminderung durch das Begrünungssystem. Hinsichtlich der Lufttemperaturen im Spalt ist ebenso kaum ein Unterschied festzustellen. (Abb. 36+37 und Tab. 8+9; Kapitel 7)

### 4.3.3 Begrünungssystem 2 – System Kramer

#### Variante 1: Geringer Abstand der PV-Module zum Begrünungssystem

Durch das System Kramer kommt es bei einem geringen Abstand zu einer Steigerung des PV-Ertrags von etwa 0,5 %. Gegenüber dem System Jakob mit Kletterpflanze führt dies

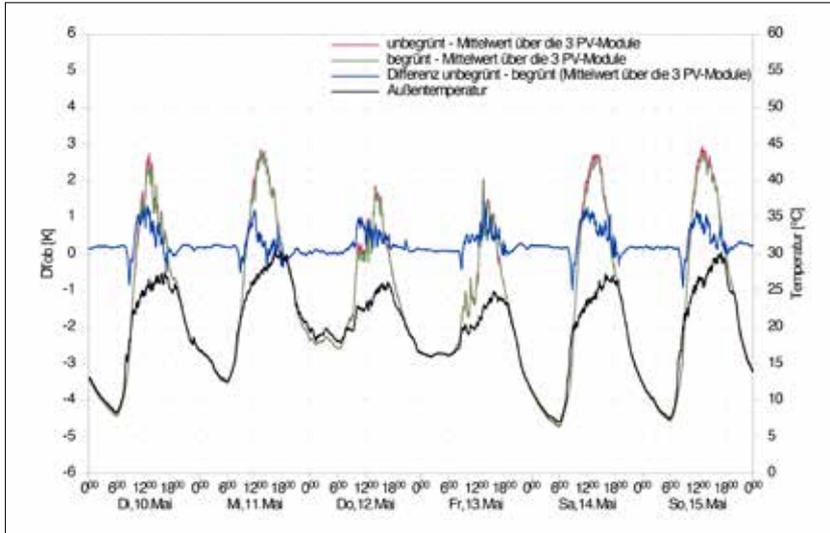


Abb. 19 Verlauf der mittleren Oberflächentemperatur auf der Rückseite der PV-Module für den unbegrünten sowie begrünten Fall und deren Temperaturdifferenz – Variante 1 Jakob (THN-ieg)

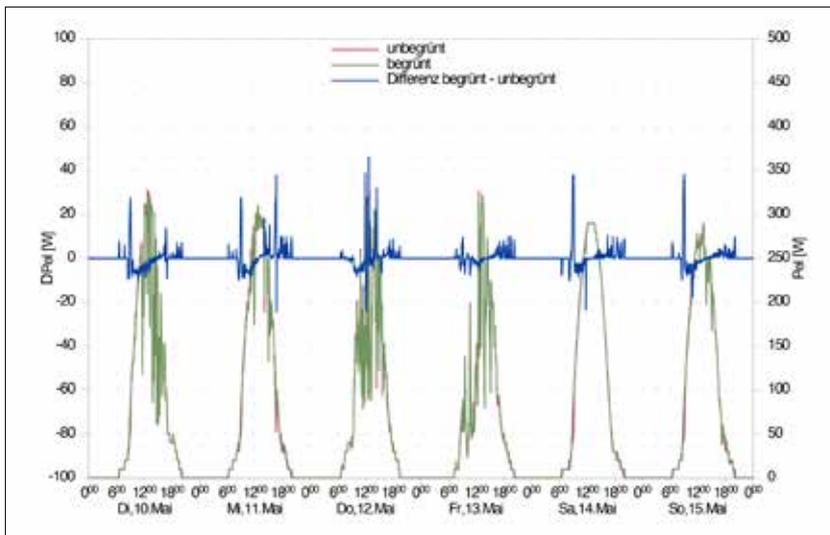


Abb. 20 Verlauf des PV-Ertrags für unbegrünten sowie begrünten Fall und dessen Differenz – Variante 1 Jakob (THN-ieg)

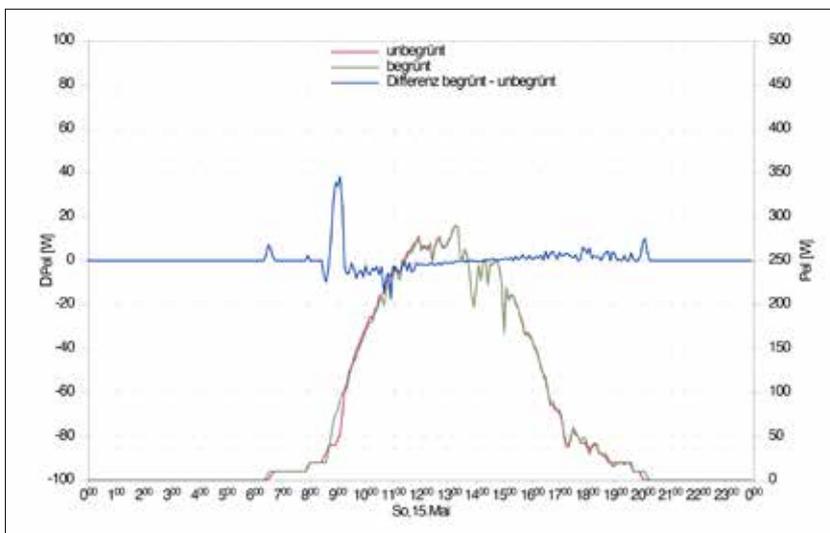


Abb. 21 Verlauf des PV-Ertrags für unbegrünten sowie begrünten Fall und dessen Differenz für einen ausgewählten Tag – Variante 1 Jakob (THN-ieg)

		Minimum	Mittelwert	Maximum
$P_{el,PV}$ [W]	unbegrünt	0	69	328
	begrünt	0	69	323
$T_{Oberfläche,m}$ [°C]	unbegrünt	6,6	28,1	44,6
	begrünt	6,4	27,7	43,8
$T_{Luft,Spalt}$ [°C]	unbegrünt	6,7	22,6	31,4
	begrünt	7,1	22,7	31,1
$T_{Operativ}$ [°C]	unbegrünt	17,3	22,8	28,0
	begrünt	17,0	22,2	27,1

Tab. 1 Minimum, Mittelwert sowie Maximum des PV-Ertrags, der mittleren Oberflächentemperatur auf der Rückseite der PV-Module, der Lufttemperatur im Spalt zwischen PV-Modul und Fassade bzw. Begrünungssystem und der empfundenen Raumtemperatur in den Versuchsräumen – Variante 1 Jakob (THN-ieg)

- $P_{el,PV}$ : PV-Ertrag
- $T_{Oberfläche,m}$ : mittlere Oberflächentemperatur auf der Rückseite der PV-Module
- $T_{Luft,Spalt}$ : Lufttemperatur im Spalt zwischen PV-Modul und Fassade (unbegrünt) bzw. Begrünungssystem (begrünt)
- $T_{Operativ}$ : empfundene Raumtemperatur in den Versuchsräumen

		Summe [kWh]	Absolute Differenz [Wh]	Relative Differenz [%]
$W_{el,PV}$	unbegrünt	9,77	-	-
	begrünt	9,77	0	0

Tab. 2 Aufsummierte PV-Erträge (Energienmengen) für beide Fälle im Betrachtungszeitraum – Variante 1 Jakob (THN-ieg)

- $W_{el,PV}$ : PV-Ertrag

zu einer stärkeren Abminderung der betrachteten Temperaturen, d. h. eine Reduktion der Oberflächentemperaturen im Mittel um etwa 1,2 K und maximal um ca. 3,8 K. Die Lufttemperaturen im Spalt verringern sich durch das System Kramer um bis zu 1,6 K und die empfundenen Raumtemperaturen um ca. 1,4 K im Maximum. (Abb. 22+23 und Tab. 3+4)

*Variante 2: Großer Abstand der PV-Module zum Begrünungssystem*

Ein größerer Abstand liefert eine Steigerung des PV-Ertrags von etwa 0,2 %. Hierbei führt das Begrünungssystem zu einer Abminderung der Oberflächentemperaturen im Mittel um etwa 1,0 K und maximal um ca. 4,0 K. Die Lufttemperaturen im Spalt reduzieren sich in diesem Fall um bis zu 1,2 K. Die empfundenen Raumtemperaturen lassen sich durch das zusätzliche Begrünungssystem um maximal 1,2 K abmindern.

Der Abstand der PV-Module zur Begrünung hinsichtlich der Stromerzeugung spielt letztlich auch bei diesem System keine signifikante Rolle. (Abb. 38+39 und Tab. 10+1; Kapitel 7)

**4.3.4 Begrünungssystem 3 – System Vertiko**

*Variante 1: Geringer Abstand der PV-Module zum Begrünungssystem*

Auch beim wandgebundenen System Vertiko konnte mit etwa 0,1 % kein nennenswerter PV-Mehrertrag durch die Begrünung festgestellt werden. Die Oberflächentemperaturen auf der Rückseite der PV-Module senken sich maximal um ca. 2,4 K und durchschnittlich um etwa 0,9 K ab. Die empfundenen Raumtemperaturen reduzieren sich im Maximum um etwa 1,0 K und die Lufttemperaturen im Spalt um ca. 0,6 K. (Abb. 40+41 und Tab. 12+13; Kapitel 7)

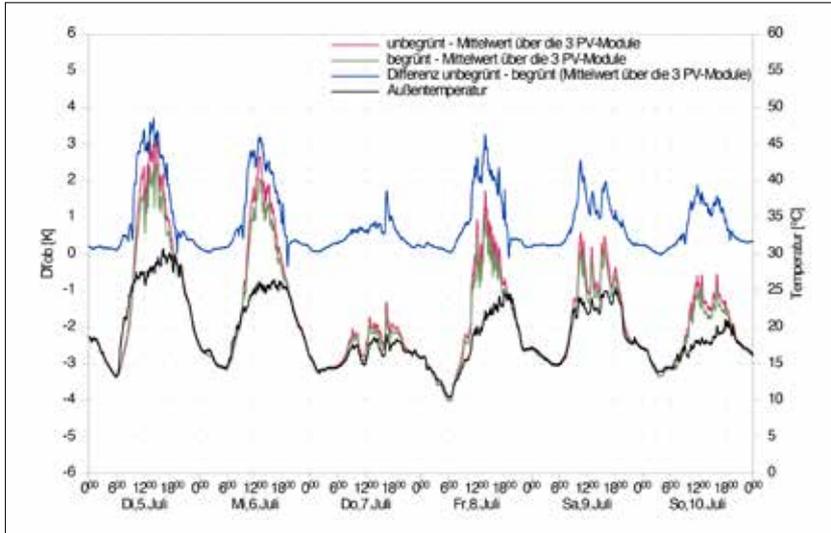


Abb. 22 Verlauf der mittleren Oberflächentemperatur auf der Rückseite der PV-Module für den unbegrünten sowie begrüntem Fall und deren Temperaturdifferenz – Variante 1 Kramer (THN-ieg)

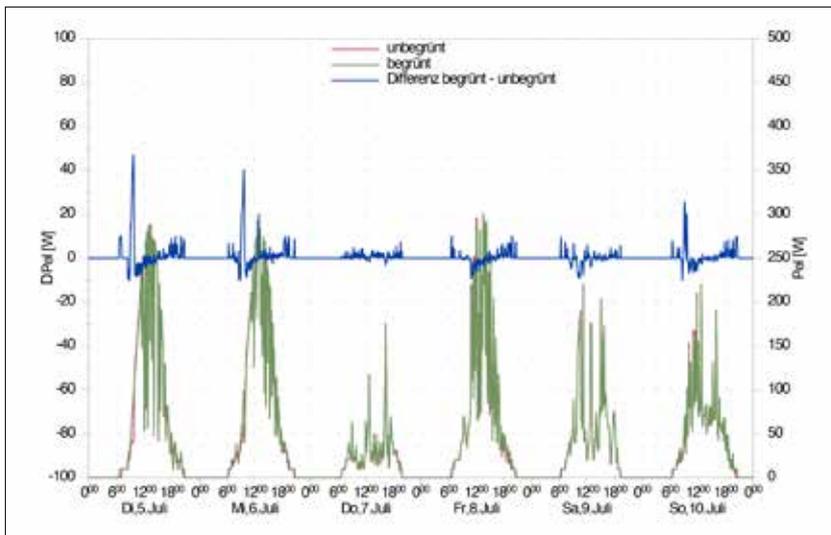


Abb. 23 Verlauf des PV-Ertrags für den unbegrünten sowie begrüntem Fall und dessen Differenz – Variante 1 Kramer (THN-ieg)

		Summe [kWh]	Absolute Differenz [Wh]	Relative Differenz [%]
$W_{el,PV}$	unbegrünt	6,07	-	-
	begrünt	6,10	33	0,5

Tab. 3 Aufsummierte PV-Erträge (Energienmengen) für beide Fälle im Betrachtungszeitraum – Variante 1 Kramer (THN-ieg)

$W_{el,PV}$ : PV-Ertrag

		Minimum	Mittelwert	Maximum
$P_{el,PV}$ [W]	unbegrünt	0	43	300
	begrünt	0	43	300
$T_{Oberfläche,m}$ [°C]	unbegrünt	9,9	24,5	45,6
	begrünt	9,9	23,3	42,2
$T_{Luft,Spalt}$ [°C]	unbegrünt	10,3	20,8	32,9
	begrünt	11,1	20,6	31,3
$T_{Operativ}$ [°C]	unbegrünt	18,0	23,6	30,4
	begrünt	17,8	22,9	29,0

Tab. 4 Minimum, Mittelwert sowie Maximum des PV-Ertrags, der mittleren Oberflächentemperatur auf der Rückseite der PV-Module, der Lufttemperatur im Spalt zwischen PV-Modul und Fassade bzw. Begrünungssystem und der empfundenen Raumtemperatur in den Versuchsräumen – Variante 1 Kramer (THN-ieg)

- $P_{el,PV}$ : PV-Ertrag
- $T_{Oberfläche,m}$ : mittlere Oberflächentemperatur auf der Rückseite der PV-Module
- $T_{Luft,Spalt}$ : Lufttemperatur im Spalt zwischen PV-Modul und Fassade (unbegrünt) bzw. Begrünungssystem (begrünt)
- $T_{Operativ}$ : empfundene Raumtemperatur in den Versuchsräumen

#### Variante 2: Großer Abstand der PV-Module zum Begrünungssystem

Betrachtet man die Messergebnisse für die Variante mit größerem Abstand, so lässt sich lediglich ein PV-Mehrertrag von ca. 0,3 % feststellen. Die Oberflächentemperaturen im begrünten Aufbau reduzieren sich im Schnitt um etwa 1,0 K und maximal um ca. 3,3 K durch die Begrünung. Die Lufttemperaturen im Spalt sind im Schnitt um etwa 0,3 K und maximal um etwa 1,2 K geringer als ohne Begrünungssystem. Die empfundenen Raumtemperaturen sind mit Begrünung im Schnitt ungefähr 1,1 K geringer und im Maximum um ca. 1,1 K. (Abb. 42+43 und Tab. 14+15; Kapitel 7) Die im Vergleich geringeren Raumtemperaturen resultieren aus geringeren Wärmelasten aufgrund des Begrünungssystems. Dies wiederum bedeutet einen geringeren Kühlenergiebedarf des Raumes hinter der begrünten Fassade.

#### 4.4 Vergleich und Zusammenfassung der Ergebnisse

Durch die Begrünungssysteme lassen sich die Oberflächentemperaturen auf der Rückseite der PV-Module im Maximum um bis zu 4,0 K (System Kramer, großer Abstand) absenken. Es zeigt sich, dass das Mischsystem Kramer sowie das wandgebundene System Vertiko eine größere Reduzierung der Oberflächentemperaturen bewirken, als das bodengebundene System Jakob mit Kletterpflanze. Dies ist auf den zusätzlichen Kühleffekt durch das feuchte Substrat (Kramer) bzw. das durchfeuchtete Geotextil (Vertiko) zurückzuführen. Bei allen Systemen lässt sich ein Einfluss des Abstands der PV-Module zum Begrünungssystem auf die Oberflächentemperatur erkennen. So bewirkt hier ein größerer Abstand zumindest eine etwas stärkere Abminderung der maximalen Oberflächentemperaturen. (Tab. 5) Die maximalen Temperaturen sind jedoch stark von den zum Messzeitpunkt vorliegenden klimatischen Bedingungen abhängig; so führen höhere Außentemperaturen zu einer höheren Temperaturdifferenz der Maximalwerte.

Die einzelnen Begrünungssysteme führen auch zu einer Abminderung der Lufttemperaturen zwischen den PV-Modulen und den Begrünungssystemen im Vergleich zum unbegrünten Referenzfall. Es zeigt sich auch hier, dass die beiden Systeme Kramer (maximal bis zu 1,6 K) und Vertiko (maximal bis zu 1,2 K) eine größere Reduzierung bewirken als das System Jakob (maximal bis zu 0,3 K). Damit bestätigt sich auch, dass die PV-Module den Hitzestress der Pflanzen reduzieren. Während der Messungen im Sommer 2022 und 2023 konnten bei beiden Versuchsvarianten auch nahezu keine negativen Auswirkungen auf den Wuchs festgestellt werden, trotz der starken Abkoppelung vom Umgebungsklima.

Die zusätzlich installierten Begrünungssysteme führen auch zu einer Reduzierung der empfundenen Raumtemperaturen für alle sechs untersuchten Varianten. Auch hier lässt

Experimentelle Studien

		Jakob		Kramer		Vertiko	
		1	2	1	2	1	2
DeltaT <sub>Oberfläche</sub> [K]	durchschnittlich	0,4	0,4	1,2	1,0	0,9	1,0
	maximal	1,3	2,2	3,8	4,0	2,4	3,3

Tab. 5 Differenz der Oberflächentemperaturen auf der Rückseite der PV-Module durch die jeweiligen Begrünungssysteme zwischen dem unbegrünten Referenzfall und dem begrünten Fall (THN-ieg)

DeltaT<sub>Oberfläche</sub>: Oberflächentemperaturdifferenz auf der Rückseite der PV-Module zwischen dem unbegrünten Referenzfall und dem begrünten Fall

		Jakob		Kramer		Vertiko	
		1	2	1	2	1	2
Eta <sub>el,PV</sub> [%]	unbegrünt	46,1	45,0	45,9	44,4	45,8	46,4
	begrünt	46,1	45,0	46,2	44,5	45,8	46,5

Tab. 6 Relativer PV-Ertrag in Abhängigkeit der solaren Einstrahlung auf die Südfassade (THN-ieg)

Eta<sub>el,PV</sub>: relativer PV-Ertrag in Abhängigkeit von der solaren Einstrahlung auf die Südfassade

sich ein geringfügig größerer Einfluss bei den Systemen Kramer und Vertiko beobachten. Im Durchschnitt können die Raumtemperaturen durch die Begrünungssysteme um bis zu 1,1 K (System Vertiko) abgesenkt werden. Der Abstand der PV-Module zum Begrünungssystem spielt hier keine wesentliche Rolle.

Dennoch lassen sich lediglich geringfügige PV-Mehrerträge durch die jeweiligen Begrünungssysteme feststellen. Den Höchstwert liefert das System Kramer mit geringem Abstand zwischen Modulen und Fassadenbegrünung mit einer Steigerung von etwa 0,5 %. Die gemessenen Werte sind so gering, dass sich diese innerhalb des Messfehlers der Messsensorik befinden. D. h., die jeweiligen Begrünungssysteme können zwar die Oberflächentemperaturen auf der Rückseite der PV-Module in einem gewissen Maß absenken, aber das hat jedoch keinen größeren Einfluss auf die erzielbaren PV-Erträge. Auch unterschiedliche Abstände zwischen PV-Modul und Begrünungssystem zeigen keinen wesentlichen Einfluss bzgl. einer PV-Mehrertragssteigerung.

Um die PV-Erträge der einzelnen Versuchsreihen besser miteinander vergleichen zu können werden die einzelnen durch die PV-Anlagen erzielten Energien durch die solare Einstrahlung auf die Südfassade geteilt. Wie bereits erwähnt lassen sich lediglich geringfügige PV-Mehrerträge durch die jeweiligen Begrünungssysteme erkennen. (Tab. 6)

#### 4.5 Weiterführende Betrachtungen / Messreihen

Im August und September 2023 fanden weitere Messungen am Versuchsstand in Rednitzhembach statt. Hierbei erfolgte eine Variation des Anstellwinkels der PV-Module auf der begrünten Seite, die PV-Module auf der unbegrünten Seite blieben in der Senkrechten (Anstellwinkel 0 °).

Bei diesen Betrachtungen wurden im Einzelnen die nachstehenden Messreihen durchgeführt:

4. Misch-System der Firma Kramer:
  - a. Variante 3: 19. August 2023 bis 24. August 2023: großer Abstand der PV-Module zum Begrünungssystem, PV-Anstellwinkel begrünte Seite gegen die Senkrechte: 30 ° (Abb. 25; Kapitel 5)
  - b. Variante 4: 13. September 2023 bis 18. September 2023: großer Abstand der PV-Module zum Begrünungssystem, PV-Anstellwinkel begrünte Seite gegen die Senkrechte: 7,5 ° (Abb. 26; Kapitel 5)

	Solare Einstrahlung auf die Südfassade [kWh/m <sup>2</sup> ]	Mittlere Außentemperatur [°C]	Anzahl der Sonnenstunden (solare Einstrahlung auf die Südfassade > 120 W/m <sup>2</sup> ) [h]
Kramer - Variante 3	24,4	26,0	52
Kramer - Variante 4	13,7	19,2	37

Tab. 7 Summe der solaren Einstrahlung auf die Südfassade, mittlere Außentemperatur sowie die Anzahl der Sonnenstunden (solare Einstrahlung auf die Südfassade größer 120 W/m<sup>2</sup>) während der weiterführenden Betrachtungen (THN-ieg)

### Klimatische Randbedingungen

Die Summe der solaren Einstrahlung auf die Südfassade beträgt 13,7 kWh/m<sup>2</sup> bzw. 24,4 kWh/m<sup>2</sup>; die mittlere Außentemperatur erreicht Werte von 19,2 °C und 26,0 °C. Weiterhin werden Sonnenstunden (solare Einstrahlung auf die Südfassade größer 120 W/m<sup>2</sup>) von 37 h und 52 h ermittelt. (Tab. 7)

#### *Variante 3: Großer Abstand der PV-Module zum Begrünungssystem und Anstellwinkel PV-Module auf der begrünten Seite von 30 °*

Aufgrund des Ausfalls mehrerer Oberflächentempersensoren kurz nach Beginn der Messperiode können keine Aussagen hinsichtlich der Temperaturentwicklung an den PV-Modulen getroffen werden.

Die Messergebnisse zeigen, dass Sonnenhöhenwinkeln von 30 ° und größer (für diese Messperiode von ca. 10.35 Uhr bis 16.55 Uhr) zu einer Eigenverschattung der PV-Module auf der begrünten Seite führen. Daraus resultiert ein erheblicher Einbruch im PV-Ertrag; dies bedeutet etwa 40,0 % weniger Ertrag gegenüber dem Referenzfall im Betrachtungszeitraum. Auch zeigt sich, dass es bei bestimmten Sonnenständen, vor allem am späten Nachmittag, zu einer stärkeren Erwärmung des Luftspalts zwischen PV-Modul und Begrünung durch direkte Sonneneinstrahlung kommt. Somit entsteht eine höhere lokale maximale Lufttemperatur; im Mittel ist die Lufttemperatur im Spalt auf der begrünten Seite dennoch um etwa 0,9 K geringer. Die operativen Raumtemperaturen hinter der begrünten Fassade sind im Schnitt um ca. 0,8 K und maximal um etwa 1,5 K geringer als die Temperaturen im Referenzraum. (Abb. 44+45 und Tab. 18+19; Kapitel 7)

#### *Variante 4: Großer Abstand der PV-Module zum Begrünungssystem und Anstellwinkel PV-Module auf der begrünten Seite von 7,5 °*

Betrachtet man die Messergebnisse (Abb. 46 und v. a. Abb. 47; Kapitel 7), so ist zu erkennen, dass es aufgrund der örtlichen Bebauung (Technikum) und Bepflanzung (Bäume) in der Umgebung des Versuchsstands und wegen den in der Messperiode auftretenden Sonnenständen zu Teilverschattungen auf allen PV-Modulen kommen kann. Dies betrifft vor allem die Vormittagsstunden zwischen etwa 9.30 Uhr und 11.50 Uhr sowie die späten Nachmittagsstunden zwischen ca. 15.55 Uhr und 17.15 Uhr. Daher werden hinsichtlich der Auswertung der PV-Erträge diese beiden Zeiträume nicht berücksichtigt.

Unter diesen Bedingungen lässt sich ein PV-Mehrertrag von ca. 10,8 % feststellen. Die Oberflächentemperaturen fallen im Schnitt um etwa 0,5 K und maximal um ca. 0,9 K durch die Begrünung niedriger aus. Diese liegen hier unterhalb der ermittelten Werte von 2022 für das System Kramer bei einem Anstellwinkel von 0 ° und gleichem Abstand zum Begrünungssystem (im Mittel 1,0 K, im Maximum 4,0 K). Hier ist aber zu berücksichtigen, dass die Oberflächentemperaturdifferenzen auf den PV-Modulen zwischen unbegrünter und begrünter Fassade auch von den klimatischen Randbedingungen abhängig sind. Höhere Außentemperaturen und eine höhere solare Einstrahlung führen zu höheren Temperaturdifferenzen. Dies gilt auch für die Lufttemperaturen im Spalt zwischen PV-Modul und Begrünungssystem bzw. Fassade und für die operativen Raumtemperaturen. Die Lufttemperaturen im Spalt liegen im Schnitt um etwa 1,0 K und im Maximum um etwa 0,2 K unter denen ohne Begrünungssystem. Die empfundenen Raumtemperaturen sind mit Begrünung im Schnitt ungefähr 0,5 K geringer als ohne und im Maximum um ca. 0,9 K.

Auch bei dieser Variante kommt es bei bestimmten Sonnenständen zu einer stärkeren Erwärmung des Luftspalts zwischen PV-Modul und Begrünung durch direkte Sonneneinstrahlung. Gegenüber dem größeren Anstellwinkel in der vorangegangenen Variante fällt diese jedoch geringer aus. (Abb. 48 und Tab. 20+21; Kapitel 7)

		Kramer	
		3	4
Eta <sub>el,PV</sub> [%]	unbegrünt	41,9	45,2
	begrünt	25,1	50,0

Tab. 8 Relativer PV-Ertrag in Abhängigkeit der solaren Einstrahlung auf die Südfassade (THN-ieg)

Eta<sub>el,PV</sub>: relativer PV-Ertrag in Abhängigkeit von der solaren Einstrahlung auf die Südfassade

#### 4.5.1 Zusammenfassung - Vergleich Variante 3 und Variante 4

Um die PV-Erträge der einzelnen Versuchsreihen wiederum besser miteinander vergleichen zu können werden die einzelnen durch die PV-Anlagen erzeugten Energien durch die solare Einstrahlung auf die Südfassade zum Zeitpunkt der Messungen geteilt. (Tab. 8)

Wie bereits erwähnt lassen sich nur für den geringeren Anstellwinkel PV-Mehrerträge erkennen. Durch die häufige Eigenverschattung bei höheren Sonnenständen bei größerem Anstellwinkel resultiert ein erheblicher Einbruch hinsichtlich des PV-Ertrags bei dieser Variante. Hier wäre im Normalfall eine wesentliche Ertragssteigerung aufgrund des Anstellwinkels zu erwarten. Trotz der Verschattung der PV-Module durch die Umgebungsbebauung (Bäume, Technikum etc.) während den Messungen hinsichtlich Variante 4 im September lässt sich ein Mehrertrag um etwa 11 %, der vor allem auf den Anstellwinkel auf der begrünten Seite zurückzuführen ist, feststellen.

Die operativen Raumtemperaturen hinter der begrünten Fassade sind im Schnitt um ca. 0,5 K bis 0,8 K und maximal um etwa 0,9 K bis 1,5 K geringer als die Temperaturen im Referenzraum.

## 5 Kontext, Fazit und Ausblick

Kontext, Fazit und  
Ausblick

Die im vorhergehenden Kapitel dokumentierten Ergebnisse der experimentellen Studien zur Schnittstelle Begrünung und Photovoltaik in der Fassade decken sich letztlich mit Forschungen zum Solargründach. Zwischen 2007 und 2021 thematisieren eine Reihe insbesondere auch internationaler Projekte diese Kombination im Bereich der Flachdächer. Allerdings ist zu konstatieren, dass in den veröffentlichten Berichten auch sehr unterschiedliche Kennzahlen dokumentiert sind.

In 14 publizierten Arbeiten müssen zum einen experimentelle Untersuchungen und theoretische Abschätzungen unterschieden werden. Neben dem Vergleich mit verschiedenen Flachdachoberflächen (schwarzer Untergrund/ Bitumen bzw. weißer Untergrund/ Kies oder Beton) sind geographische Besonderheiten von Bedeutung. Die Projekte verteilen sich auf Europa, Asien und Nord- bzw. Südamerika mit jeweils unterschiedlichen Klimazonen (gemäßigt, feucht/subtropisch, tropisch) und lokalen Besonderheiten, wie Strahlung, Temperatur, Wind und Niederschläge. Ferner beeinflussen Art und Aufbau des Gründaches, Pflanzenwahl sowie der Abstand der Photovoltaik zur Begrünung die Ergebnisse. Darüber hinaus sind die PV-Module sehr unterschiedlich aufgebaut, variieren die Zelltypen und der eingesetzte Wechselrichter. Nicht zuletzt entscheidend sind solargeometrische Parameter des Paneels, wie Exposition, Neigung, Verschattung und auch Einflüsse aus der Umgebung (z. B. Reflektionen). Auch ist festzustellen, dass die Versuchsdauer höchst unterschiedlich bemessen ist; diese reicht von mehreren Monaten bis zu 3 Jahren.

Daher verwundert es nicht, dass bei einem kursorisch durchgeführten Vergleich<sup>1</sup> enorme Unterschiede in den bilanzierten Ertragssteigerungen festzustellen sind. Deren Spanne liegt bei erstaunlichen 0,08 bis 17 %. Lässt man die Untersuchung mit den höchsten ausgewiesenen Potential außer acht, bleibt immer noch eine Differenz zwischen 0,08 bis 8,3 %. Betrachtet man ausschließlich experimentelle Versuchsreihen (9 Arbeiten) verringert sich der Bereich auf 0,5 bis 6 %, was auch einem Vergleich der Untersuchungen in gemäßigttem Klima (2007 und 2016, 6 Arbeiten) entspricht.

In einer aktuellen Ausgabe der BuGG-Fachinformation „Positive Wirkungen von Gebäudebegrünungen“<sup>2</sup> wird vor allem auf Untersuchungen der Firma ZinCo verwiesen, die anhand von Messwerten im Jahr 2010 Unterschiede von Modultemperaturen über Bitumendach und Begrünung von „durchschnittlich 8 K“ eine Ertragssteigerung von 4 % errechnen. Dies ist umso bemerkenswerter, da die Module eher steil, etwa zwischen 30 ° und 40 ° geneigt, aufgestellt sind.<sup>3</sup> Demgegenüber hat man bei umfangreichen Untersuchungen in Winterthur, in der Nordostschweiz, festgestellt, dass diese Kühleffekte bei deutlich niedrigeren Neigungswinkeln (15 ° und 20 °) sehr gering ausfallen. Innerhalb des Zeitraums von anderthalb Jahren (10/2014 – 05/2016) bilanzierte das Forscherteam, dass „der Temperaturunterschied der Photovoltaik Module der 13 Testflächen sich im Bereich von  $\pm 1.8$  °C befindet. Daraus lässt sich über den Temperaturkoeffizienten für kristalline Zellen eine Ertragssteigerung von  $\pm 0.7$  % errechnen. Diese Verbesserung liegt innerhalb der Toleranzgrenze für Energiemengenmessung von 1,2%.“<sup>4</sup>

Untersuchungen zur Kombination in der Fassade sind indessen, wie in Kapitel 2 dargestellt, noch ein recht neues Forschungsthema. Im Kontext der Arbeiten zum Solargründach lassen sich die Ergebnisse des „GreenPV“-Projektes besser einordnen, ist doch zusätzlich davon auszugehen, dass die Verdunstleistung einer horizontal angeordneten Begrünung höher ist als bei einer Anordnung der Pflanzen in der Vertikalen.

Bestätigt werden die Erfahrungen von Penaranda Moren und Korjenic, die in ihrer Versuchsanordnung mit Kletterpflanzen über das Jahr „einen positiven Einfluss auf die Temperatur des PV-Moduls“ feststellen. Eine Temperaturdifferenz („Absenkung der PV-Betriebstemperatur im Jahresverlauf“) wird bei den Höchstwerten (im Sommer) zwischen 2 °C und 4 °C genannt, bei Durchschnittswerten zwischen 1 °C und 2 °C.<sup>5</sup> Im Vergleich mit den Messungen am Fassadenversuchsstand (Anordnung von Begrünung zum PV-Modul: Begrünungssystem 1 – Jakob (Kletterpflanze), Variante 2: Großer Abstand) werden in Rednitzhembach jedoch niedrigere Oberflächentemperaturen gemessen. (Tab. 5; Kapitel 4)

Betrachtet man nun den sogenannten Temperatur-Koeffizienten, der angibt, wie sich die Leistung eines PV-Moduls „pro Kelvin Abweichung von der Standard-Test-Temperatur von 25 °C“ ändert, kann man Ertragssteigerungen abschätzen. „Dieser Koeffizient ist produktabhängig und liegt in einer Größenordnung von etwa 0,5 %/K“<sup>6</sup>, d. h. bei einer Differenz von durchschnittlich 1,5 K, wie dies Penaranda Moren und Korjenic bilanzieren, könnte eine höhere Leistung von  $0,5 \text{ \%}/\text{K} \times 1,5 \text{ K} = 0,75 \text{ \%}$  betragen. Auch hier liegt die leicht verbesserte Ertragssteigerung innerhalb der Toleranzen bei energietechnischen Messungen. Demgegenüber konnten bei den Versuchen mit Kletterpflanzen in Rednitzhembach hinsichtlich der

1 vgl. Krippner, 20.10.2022

2 Mann et al., 1/2023 [S. 15]

3 <https://www.zinco.de/solarmessung> <13.09.2022>.

4 Baumann, 2016

5 vgl. Penaranda Moren/Korjenic, 2017, S. 364 und 381

6 <https://www.zinco.de/solarmessung> <13.09.2022>



Abb. 24 Visualisierung Fassadenkonzept Begrünung mit Photovoltaik am Beispiel des Verwaltungsbaus von SUN in Nürnberg (August 2016) (Boris Bott)

aufsummierten PV-Erträge (Energienmengen) im Betrachtungszeitraum (zwischen 10. Mai 2022 und 26. Juni 2022) keine Ertragsteigerungen festgestellt werden.

Bezüglich der Schnittstelle Grünfassaden und Photovoltaik ist jedoch ein anderer Aspekt von zentraler Bedeutung: Die im Stadtraum wirksame Verdunstungsleistung der Pflanzen in der Vertikalen. In seinem Vortrag "PV und Gründach passt das zusammen? Ja! ..." wies Andreas Dreisiebner im Rahmen des BuGG-Fachkongresses „Solar-Gründach“ daraufhin, dass bei einer dichten und flachen Belegung mit Photovoltaik-Modulen über einem begrünten Flachdach die Evapotranspiration deutlich eingeschränkt ist und damit die Kühlleistung zur Reduzierung von städtischen Hitzeinseln stark reduziert wird.

In Winterthur begann man in 2017 bereits mit bifacialen Photovoltaik-Modulen auf einem Gründach zu experimentieren. Dabei zeigt sich in der umfangreichen Untersuchung zwischen einer "vertikalen bifazialen Testanlage mit Ost-West-Ausrichtung und der monofazialen, nach Süden ausgerichteten Referenz", dass bei zusätzlicher Verwendung von "silberlaubigen Pflanzen und hellem Substrat" eine deutliche "Ertragssteigerung von 17 % im Vergleich zu einer Standardbegrünung des Daches" möglich ist.<sup>8</sup>

Auf begrünte Fassaden lassen sich derartige Kombinationen mit Photovoltaik nur bedingt übertragen.<sup>9</sup> Allerdings bestehen hinsichtlich der Anordnung und Ausbildung der beiden Fassadensysteme vielfältige Möglichkeiten. (Abb. 55–66; Kapitel 7) Der Abstand der PV-Module zur Begrünung kann bis zu einer raumhaltigen Fassade erweitert werden und durch die Neigung der Photovoltaik werden Zugänglichkeit sowie Verdunstungsleistung verbessert und durch die optimierte Exposition des Moduls zur Sonne sollten auch Ertragssteigerungen zu realisieren sein. (Abb. 24)

Die Gestaltung der Lagebeziehungen zwischen Photovoltaik und Grünfassade konnte letztlich im Rahmen der Projektarbeiten nur in ersten grundsätzlichen Überlegungen betrachtet werden. Aus verschiedenen Beispielaufbauten der drei Begrünungssysteme wurden in Ergänzung noch Versuchsaufbauten mit zwei verschiedenen Neigungswinkeln der PV-Module untersucht. Aufgrund der 'besseren Performance' ist dabei das Begrünungssystem 2 – Kramer / Variante 2: Großer Abstand der PV-Module zur Begrünung eingesetzt worden.

Hinsichtlich der auch für das Erscheinungsbild zu dokumentierenden Veränderungen entschied man sich für eine stärker ausgestellte Variante (in Anlehnung an die in Mitteleuropa optimale Ausrichtung bei südorientierten Gebäuden) und eine vergleichsweise nur flächeneigenen Variante, die den flächigen Charakter der ursprünglichen vertikalen Anordnung nuanciert erweitert. (Abb. 25+26, 48+49; Kapitel 7)

Die Ergebnisse bestätigen für den flacheren Anstellwinkel höhere Erträge (im Betrachtungszeitraum etwa 11 %) gegenüber der vertikalen Anordnung. Die stärkere Neigung mit der 30° Variante führte indessen aufgrund der spezifischen Einbaubedingungen am Versuchsstand zusätzlich zu Eigenverschattungen bei den PV-Modulen und damit zu signifikanten Ertrags-einbußen. Ein optimierter Aufbau (Modulabstand und/oder -neigung) lässt hier jedoch deutliche Mehrerträge gegenüber einem Einbau in der Senkrechten erwarten.

<sup>7</sup> vgl. Dreisiebner, 21.10.2022

<sup>8</sup> Baumann et al., 2018, o. S.

<sup>9</sup> Es gibt noch keine derartige Anordnungen; das Büro Boltshauser Architekten AG schlägt aber beim Hochhaus H1 Zwhatt-Areal in Zürich (2019-2023) eine Fassade vor, bei der Photovoltaik-Module nahezu horizontal als Sonnenschutzelemente jeweils oberhalb der Balkon-/Loggienbereiche angeordnet sind. vgl. <https://boltshauser.info/projekt/hochhaus-h1-zwhatt-areal/> <21.09.2023>



Abb. 25 Fassadenversuchsstand mit geneigten PV-Modulen (30 °) – System Kramer / Variante 2 (August 2023) (THN-AR)



Abb. 26 Fassadenversuchsstand mit geneigten PV-Modulen (7,5 °) – System Kramer / Variante 2 (September 2023) (THN-AR)

Kontext, Fazit und Ausblick

Noch immer scheuen Planer:innen im Fassadenbereich sowohl den Einsatz von Begrünung (insbesondere wandgebundener Systeme) als auch den von Photovoltaik, begründet häufig durch deren hohen Komplexitätsgrad und der mitunter schwierigen Koordination der Gewerke. Aber angesichts der gesellschaftlichen Herausforderungen von Energiewende und Klimaanpassungsstrategien gewinnen beide Techniken enorm an Relevanz und gerade ihre Kombinationsmöglichkeiten eröffnen ein zusätzliches Spektrum von positiven Effekten.

Die technisch plausibel verfügbaren Flächen für gebäudeintegrierte Solartechnik in Deutschland sind enorm. Dieses Potenzial gilt es sowohl effizient als auch gestalterisch ansprechend zu nutzen. Dazu ist es erforderlich, die Bandbreite der einsetzbaren Techniken sowie deren Kombinationsmöglichkeiten kontinuierlich zu erweitern. Hier leistet das "GreenPV"-Projekt wichtige Grundlagenarbeit, da über die Umsetzung eines praxisnahen Versuchsaufbaus eine technische Machbarkeit aufgezeigt wurde, auch wenn keine Ertragssteigerungen für die Photovoltaik ermittelt werden konnten.

Gleichwohl bleiben die substanziellen wichtigen Beiträge und positiven Effekte beider Systeme davon unberührt. So lässt sich mit Fassadenbegrünungen beispielsweise das Raumklima durch Verschattungs- und Verdunstungskühleffekte beeinflussen. In der Winterperiode wirken sich immergrüne, winterfeste Begrünungssysteme, aufgrund der zusätzlichen Dämmwirkung, positiv auf den Heizenergiebedarf aus. Weiterhin leisten die Pflanzen einen Beitrag zur Luftfilterung durch Aufnahme von Staub und Schmutz aus der Umgebungsluft, wird CO<sub>2</sub> gebunden und zusätzlich Sauerstoff geliefert. Die Lebensdauer der Fassade kann durch Schutz vor Schlagregen und UV-Einstrahlung erhöht werden sowie der Schallschutz verbessert werden. Und für die gebäudeintegrierte Stromerzeugung mit erneuerbarer Energie stellen Fassaden funktional und gestalterisch wichtige Flächenpotentiale dar.

Ergebnisse einer durchgeführten thermisch-energetischen Gebäudesimulation im "GreenFaBS"-Projekt zeigen, dass eine vollflächig – geschosshoch, ein Fassadenraster – installierte Begrünung einen größeren Effekt aufweist als ein nur im Brüstungsbereich vorgesehene System. Jedoch fällt diese Wirkung hinsichtlich des Energiebedarfs im Wesentlichen gering aus. So führt eine großflächig begrünte Fassade zu einem um 4 % geringeren Kühlenergiebedarf. Dies eröffnet bei der Planung von Funktionsflächen in der Fassade – unter den gegebenen Rahmenbedingungen wie dem U-Wert der Konstruktion – gewisse Freiheitsgrade. So steht einer Reduzierung der Begrünungsfläche von einem geschosshohen Fassadenfeld auf den Brüstungsbereich um etwa zwei Drittel ein vergleichsweise geringer Kühlenergiemehrbedarf gegenüber.<sup>10</sup> (Abb. 64–66; Kapitel 7)

Diese Flächen können zusätzlich für den Einsatz von Photovoltaikmodulen genutzt werden. Bei flächenparalleler Anordnung sind auch Fragen der Zugänglichkeit für die regelmäßige Pflege von Pflanzen und Wartung der Systemtechnik zu berücksichtigen. Ebenfalls nimmt der positive Einfluss der Kühlleistung der Begrünung auf den gebäudenahen Außenraum bei einem großflächigen PV-Einsatz in der Fassade ab.

Angesichts der anstehenden zentralen Aufgaben im Baubereich, gleichermaßen bei Neubauten und in der Bestandssanierung, ist das Thema der Fassadenkonkurrenz bedeutsam: Welche Flächen benötigen die verschiedenen Schnittstellen beziehungsweise Plus-Nutzungen, um den Anteil beider Fassadentechniken zu optimieren? Daher gilt es die Entwicklung von multifunktionalen Energiefassaden, insbesondere auf Basis der vorgehängten hinterlüfteten Fassade (VHF), um Begrünungstechniken zu erweitern. Ziel erster Konzepte und Kooperationen ist eine Art Fassaden-Baukasten, um die Potenziale künftiger Lösungen effektiver auf die jeweiligen standortspezifischen Besonderheiten abstimmen zu können.

<sup>10</sup> vgl. EnOB: GreenFaBS, 02/2022, S. 51f.

## 6 Anhang

Anhang

### 6.1 Literatur- und Internetverzeichnis

- Baumann, Rudi: Pflanzliche Verschattungselemente an der Gebäudeoberfläche als Massnahme zur Reduzierung der Strahlungsbelastung unter sommerlichen Bedingungen - „Pullover“. Dissertation. Kassel 1980.
- Baumann, Rudi: Begrünte Architektur. Bauen und Gestalten mit Kletterpflanzen. München 1983
- Baumann, Thomas et al.: Performance Analysis of PV Green Roof Systems. [5CO.14.3]. In: 32nd EU PVSEC [European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition]. Munich, 20-24 June 2016. Proceedings. München 2016, o. S.
- Baumann, Thomas et al.: Performance Analysis of Vertically Mounted Bifacial PV Modules on Green Roof System. [6AO.9.4]: 35th EU PVSEC [European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition]. Brussels, Square Brussels Meeting Centre, 24 - 28 September 2018. Proceedings. München: WIP-Renewable Energies, 2018, o. S.
- BIPV-Initiative BW: Leitfaden Bauwerkintegrierte Photovoltaik (BIPV). Hrsg. v.: Initiative für Bauwerkintegrierte PV-Anlagen (BIPV) Baden-Württemberg. Stuttgart, 2022. <https://bipv-bw.de> <19.09.2023>.
- Bott, Boris: Fassadenbegrünung und Photovoltaik in der Bestandssanierung am Beispiel des Verwaltungsbaus von SUN. Masterthesis an der Fakultät Architektur, Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm, SS 2016. Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Roland Krippner, Prof. Dipl.-Ing. Hartmut Fuchs. Die Arbeit wurde im Dezember 2016 mit dem Innovationspreis Erneuerbare Energien (1. Preis) der Frank Seuling Stiftung ausgezeichnet.
- Bott, Boris; Krippner, Roland; Fuchs, Hartmut: Fassadenbegrünung und Photovoltaik am Beispiel des Verwaltungsbaus von SUN. Posterpräsentation. In: Tagungsband zum 9. Forum „Bauwerkintegrierte Photovoltaik“. Kloster Banz/Bad Staffelstein, 07. März 2017. Regensburg 2017, S. 111–118.
- Brenneisen, Stephan: Naturschutz auf Dachbegrünungen in Verbindung mit Solaranlagen. Hrsg. v.: Baudepartement Basel-Stadt. Informationsblatt. Basel, o. J.
- Bustamante, Waldo et al. (Hrsg.): 36th PLEA 2022. Will Cities Survive? The future of sustainable buildings and urbanism in the age of emergency. Santiago de Chile, November 23 - 25, 2022. Book of Proceedings / Onsite and Online Sessions. Santiago de Chile, 2022
- BWMI - Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Energieeffizienzstrategie Gebäude. Wege zu einem nahezu klimaneutralen Gebäudebestand. Kurzfassung. Berlin 2015.
- DIN 18008-3:2013-07, Glas im Bauwesen – Bemessungs- und Konstruktionsregeln, Teil 3: Punktförmig gelagerte Verglasungen. Berlin, 2013.
- Dreisiebner, Andreas: PV und Gründach passt das zusammen? Ja! ... Veranstaltung: BuGG-Fachkongress „Solar-Gründach“. Bundesverband GebäudeGrün e. V. (BuGG). Berlin, Mercure Hotel MOA Berlin, 21.10.2022.
- EnOB: GreenFaBS – Einsatz von Grünfassaden zur Reduzierung des Kühlenergiebedarfs fassadenintegrierter dezentraler Gebäudetechnik in Schul- und Verwaltungsgebäuden. (02/2019 – 07/2021). Förderkennzeichen: 03ET1636A. Förderung: BMWi – Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Berlin. Abschlussbericht. Nürnberg, 02/2022. <https://www.tib.eu> [GreenFaBS] <01.11.2022>.
- Hani, Christine; Faßbender, Elisabeth; Suttner, Elisabeth: Vorgefertigte Holzbau-Fassaden. Photovoltaik und Begrünung. In: Quartier. Fachmagazin für urbanen Wohnungsbau, 3 [Sonderausgabe „Klimaoptimierter Städtebau“]/2022, S. 30–33.
- Henning, Hans-Martin; Palzer, Andreas: 100 % Erneuerbare Energien für Strom und Wärme in Deutschland. Freiburg 2012
- Herzog, Thomas; Krippner, Roland; Lang, Werner (Hrsg.): Fassaden Atlas. Edition Detail. München: Institut für Internationale Architektur-Dokumentation, 3/2020.
- Krippner, Roland: Innovative Fassadenlösungen für energieeffiziente Gebäude. In: 19. Internationales Holzbau-Forum (IHF 2013). Hrsg. v.: forum-holzbau, Biel/Bienne. Tagungsband. Biel/Bienne 2013, S. 1–11.
- Krippner, Roland (Hrsg.): Gebäudeintegrierte Solartechnik. Architektur gestalten mit Photovoltaik und Solarthermie. Detail green books. München 2016
- Krippner, Roland: Integration von Solaranlagen. In: Krippner (Hrsg.): Gebäudeintegrierte Solartechnik. München 2016, S. 64–71
- Krippner, Roland: Ertragssteigerung von Photovoltaikanlagen durch die Kombination mit Dachbegrünung. Zusammenfassung verschiedener Untersuchungen. BuGG-Fachkon-

- gress „Solar-Gründach“. Bundesverband GebäudeGrün e. V. (BuGG). Berlin, Mercure Hotel MOA Berlin, 20.10.2022.
- Krippner, Roland (Projektleitung): EnOB: GreenFaBS – Einsatz von Grünfassaden zur Reduzierung des Kühlenergiebedarfs fassadenintegrierter dezentraler Gebäudetechnik (Schul- und Verwaltungsgebäude) (02/2019 bis 07/2021). Förderkennzeichen: 03ET1636A, 03ET1636B. <https://www.th-nuernberg.de/fakultaeten/ar/forschung/konstruktion-und-technik/abgeschlossene-forschungsprojekte/enob-greenfabs/<24.09.2022>>
- Krippner, Roland; Egelhaaf, Hans-Joachim: Strom aus der Wand. Photovoltaik in Büro- und Gewerbebauten integrieren: Die „Solarfabrik der Zukunft“ in Nürnberg forscht an druckbaren Solarzellen. In: wim – Wirtschaft in Mittelfranken, 10/2019, S. 22–25
- Krippner, Roland; Flade, Fabian: Optisch-ästhetische Integration. In: Photovoltaik-Planungsleitfaden. Internetdokument. München 2019 [a].
- Krippner, Roland; Flade, Fabian: PV-Anlagen und Dachbegrünung. In: Photovoltaik-Planungsleitfaden. Internetdokument. München 2019 [b].
- Krippner, Roland; Flade, Fabian: OPV-Façades – Students design concepts of multi-functional solar façades. EuroSun 2020. 13th International Conference on Solar Energy for Building & Industry. Posterpräsentation. Athens [Virtual], September 1st - 3rd 2020 [a].
- Krippner, Roland; Flade, Fabian: Cleanvelope – PV and Building Greening. Students Design Concepts of Refurbishments in Nuremburg. 37th EU PVSEC [European Photovoltaic Solar Energy Conference]. Posterpräsentation. Lisbon [online], 07 - 11 September 2020 [b].
- Krippner, Roland; Franz, Mario; Schade, Almuth; Sinnesbichler, Herbert; Stephan, Wolfram; Bott, Boris: Reduzierung des Kühlenergiebedarfs dezentraler Fassadenlüftung. Fassadenbegrünung und Gebäudetechnik. In: GebäudeGrün. Dach Fassade Raum Grün, 2/2022, S. 26–31.
- Köhler, Manfred: Handbuch Bauwerksbegrünung. Planung - Konstruktion - Ausführung. Köln 2012
- Mann, Gunter; Mollenhauer, Felix; Westerholt, Daniel: Positive Wirkungen von Gebäudebegrünungen (Dach-, Fassaden- und Innenraumbegrünung). Zusammenstellung von Zahlen, Daten, Fakten aus verschiedenen Untersuchungen. Hrsg. v.: BuGG Bundesverband GebäudeGrün e. V. BuGG-Fachinformation. Berlin, 1/2023
- Penaranda Moren, María Soledad; Korjenic, Azra: Green buffer space influences on the temperature of photovoltaic modules. Multifunctional system: Building greening and photovoltaic. In: Energy and Buildings, Volume 146, April/2017, S. 364–382.
- Pfoser, Nicole, et al.: Gebäude Begrünung Energie. Potenziale und Wechselwirkungen. Kurzbericht. Bearbeitung / Redaktion: Johannes Schreiner; Carlos Unten Kanashiro. Forschungsbericht. 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.
- Photovoltaik-Planungsleitfaden. Hrsg. v.: Landeshauptstadt München, Referat für Gesundheit und Umwelt. Internetdokument. München 2019. [https://www.muenchen.de \[Photovoltaik-Planungsleitfaden\] <23.09.2020>](https://www.muenchen.de [Photovoltaik-Planungsleitfaden] <23.09.2020>)
- Reichmann, Brigitte: Konzepte der Regenwasserbewirtschaftung. Gebäudebegrünung, Gebäudekühlung. Leitfaden für Planung, Bau, Betrieb und Wartung. (Hrsg.): Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin. Berlin 2010
- Scherzinger, Simon: Thermische Auswirkungen von Fassadenbegrünung auf die Urban Canopy Layer. Bachelorarbeit. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg. Prof. Dr. Helmut Mayer. Meteorologisches Institut. Freiburg 2012
- Weller, Bernhard; Hemmerle, Claudia; Jakubetz, Sven; Unnewehr, Stefan: Photovoltaik. Technik, Gestaltung, Konstruktion. Detail Praxis. München 2009.

## 6.2 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

- Titelbild; Abb. 1, 2, 3, 4, 5, 6, 12, 13, 15, 16, 17, 25, 26, 27, 28, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 69, 70  
Zeichnungen: Abb. 14, 55 bis 66  
Technische Hochschule Nürnberg, Fakultät Architektur
- Abb. 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48  
Technische Hochschule Nürnberg, Institut für Energie und Gebäude – ieg

- Abb. 7  
Penaranda Moren/Korjenic, 2017, S. 125
- Abb. 8, 9  
Bauhaus-Universität Weimar, Professur Technologien urbaner Stoffstromnutzungen:  
[https://twitter.com/RE\\_Stadt/status/1417031693458976768](https://twitter.com/RE_Stadt/status/1417031693458976768) <19.09.2023> und <https://www.uni-weimar.de/projekte/transform/> <19.09.2023>
- Abb. 10  
Technische Universität München, Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimage-  
rechtes Bauen:  
<https://www.arc.ed.tum.de/klima/cleanvelope/greentes/> <19.09.2023>
- Abb. 11, 24  
Boris Bott
- Abb. 67, 68  
Alexandra Huber, Büro Marlene Mortler MdEP
- Abb. 71, 72  
Robert Gerner, Schwabacher Tagblatt
- Tab. 1 bis 21  
Technische Hochschule Nürnberg, Institut für Energie und Gebäude – ieg

### 6.3 Veröffentlichungen

- Krippner, Roland: Grün-blaue Kombi vorhängen. PV und Fassadenbegrünung. [Fachwissen Fassade]. In: Gebäude Energieberater, 1/2023, S. 54–57.
- Krippner, Roland: Photovoltaik und Fassadenbegrünung. Über Potentiale aktueller Lösungen zur Klimaanpassung und -neutralität. In: 37. PV-Symposium / BIPV-Forum. Freiburg i.Br.: Messe Freiburg & online, 21. - 23. Juni 2022. Tagungsband. Pforzheim: Conexio GmbH, 2022, S. 431-441.

### 6.4 Posterpräsentationen

- Krippner, Roland, Franz, Mario: GreenPV (04/2021 – 08/2022). Grünfassaden und Photovoltaik. Zu Potentialen aktueller Fassadenlösungen zur Klimaanpassung und Klimaneutralität [Fassung II, 10/2023].
- Ausstellung "Transformationen im Bauen". Organisation: Technische Hochschule Nürnberg / Fakultät Architektur. Nürnberg, Offenes Büro Stadtplanungsamt. Ausstellung 11. bis 27. Oktober 2023 und 11. Lange Nacht der Wissenschaften Samstag, 21. Oktober 2023
- Krippner, Roland, Bott, Boris: GreenPV (04/2021 – 08/2022). Grünfassaden und Photovoltaik. Zu Potentialen aktueller Fassadenlösungen zur Klimaanpassung und Klimaneutralität. [Fassung I, 11/2021]
- Ausstellung "Transformationen im Bauen". Organisation: Technische Hochschule Nürnberg / Fakultät Architektur. Nürnberg, Offenes Büro Stadtplanungsamt. Ausstellung 11. bis 27. Oktober 2023 und 11. Lange Nacht der Wissenschaften Samstag, 21. Oktober 2023
  - Consumenta Nürnberg. Organisation: Technische Hochschule Nürnberg / Hochschulkommunikation + Fakultät Architektur. Nürnberg, Messezentrum Nürnberg / Halle 1 "TH Nürnberg meets Consumenta 2022", 26. bis 30. Oktober 2022.
  - Lange Nacht der Wissenschaften 2022. Organisation: Technische Hochschule Nürnberg / Fakultät Architektur. Nürnberg, Bahnhofstraße 90, Foyer, Ausstellung 21. Mai bis 01. Juni 2022.
  - BuGG-Tag der Forschung & Lehre 2022. Organisation: BuGG Bundesverband GebäudeGrün e. V. Stuttgart, 10. Mai 2022.
  - Bundeskongress Gebäudegrün 2021. Organisation: BuGG Bundesverband GebäudeGrün e. V. Online-Veranstaltung, 23. und 24. November 2021.

### 6.5 Vorträge

- Krippner, Roland: Pflanzen und Photovoltaik – Regionale Flora und dezentrale Stromerzeugung in der Vertikalen. Veranstaltung: 2. Lerncamp 2022. Organisation: Dürer-Gymnasium Nürnberg. Ipsheim, Jugendbildungsstätte Burg Hoheneck, 22.09.2022.
- Krippner, Roland: Fassadengrün plus – Regionale Flora und Gebäude-/Solartechnik in der Vertikalen. Veranstaltung: Green Thursday. Organisation: Verein zur Förderung

innovativer Kulturarbeit e.V. mit Kulturbüro Muggenhof und SustainNable Conference. Nürnberg, Kulturwerkstatt Auf AEG - Kulturbüro Muggenhof, 21.07.2022.

Anhang

Krippner, Roland: Forschungsprojekt GreenPV - Grünfassaden und Photovoltaik. Veranstaltung: 37. PV-Symposium 2022 / BIPV-Forum 2022. Session: Hotspot Integrierte PV. Organisation: Conexio-PSE GmbH, Pforzheim. Freiburg im Breisgau, Messe Freiburg / Konferenzraum 9, 22.06.2022.

Krippner, Roland: Einführung GreenPlus – Architektur und (Lehr-)Forschung (für Klimaneutralität). Veranstaltung: Die Lange Nacht der Wissenschaften 2022. Organisation: Kultur Idee GmbH. Nürnberg, Technische Hochschule Nürnberg / Fakultät Architektur, Bahnhofstraße 90, Raum BB.002, 21.05.2022.

Stephan, Wolfram: Vom Experiment zum Modell über Messungen und Gebäudesimulation. Veranstaltung: Die Lange Nacht der Wissenschaften 2022. Organisation: Kultur Idee GmbH. Nürnberg, Technische Hochschule Nürnberg / Fakultät Architektur, Bahnhofstraße 90, Raum BB.002, 21.05.2022.

Krippner, Roland: Begrünte Fassaden und 'Plus-Nutzungen' – Zu Potentialen von System-Kombinationen in der Vertikalen. Vorstellung der Forschungsprojekte EnOB: Green-FaBS, GreenPV und GreenFaCe. Veranstaltung: BuGG-Tag der Forschung und Lehre Gebäudegrün. Organisation: Bundesverband GebäudeGrün e. V. (BuGG), Berlin. Stuttgart, Maritim Hotel Stuttgart, 10.05.2022.

## 6.6 Öffentlichkeitsarbeit / Transfer

MDEP - Marlene Mortler, Europabüro Mittelfranken (09.08.2022) (Abb. 67+68; Kapitel 7)

Pressemeldung vom 24.08.2022

Fassadenlösungen für mehr Klimaneutralität. Marlene Mortler, Mitglied des Europäischen Parlaments, besichtigt Versuchsstand der TH Nürnberg  
<https://www.th-nuernberg.de/news/4697-fassadenloesungen-fuer-mehr/>

Pressemitteilung vom 09.09.2022

Geniale Forschung in Rednitzhembach - Marlene Mortler besuchte Versuchsstand der Technischen Hochschule am Technikum  
<https://marlenemortler.de/geniale-forschung-rednitzhembach-marlene-mortler-besuchte-versuchsstand-der-technischen-hochschule>

TH Nürnberg meets Consumenta 2022! Umwelt und Nachhaltigkeit. (26.10. bis 30.10.2022) (Abb. 69+70; Kapitel 7)

Pressemeldung vom 25.10.2022

TH Nürnberg meets Consumenta 2022

<https://www.th-nuernberg.de/pressemitteilung/4736-th-nuernberg-meets-consume/>

Gemeinderat Rednitzhembach (17.07.2023) (Abb. 71+72; Kapitel 7)

Gerner, Robert: Mehr Grün an der Fassade. Forschung. Wie es in den Städten in Hitzesommern erträglich(er) bleibt. In: Schwabacher Tagblatt [Nürnberg Nachrichten], 16.08.2023, S. 30.

7 Appendix

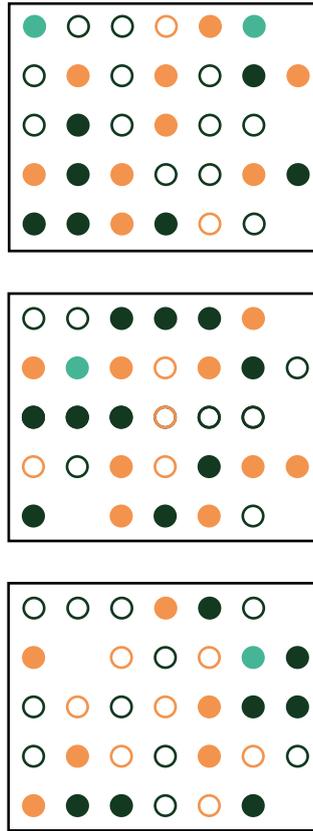
Appendix

7.1 Pflanzpläne



	Bergenia codifolia Herzblättrige Bergenie	23
	Geranium magnificum Balkan-Storchschnabel	6
	Heucera micrantha Rotblättriges Silberglöckchen	33
	Pennisetum alopecuroides Lampenputzergas	6
	Stachy byzantina Woll-Ziest	(1)
	Teucrium chamaedrys Edel-Gamander	5
	Sumpf-Storch-Schnabel	21
	Heuchera villosa Purpurglöckchen	6
	Carex morowii Japanische Segge	3
	Herzblatt Schaumblüte	1

Abb. 27 Fassadenversuchsstand – Variante 2: Kramer, München (Oktober 2021) mit Pflanzplan (THN-AR)



Appendix

	Bergenia codifolia Herzblättrige Bergenie	24
	Geranium macrorrhizum Balkan-Storch-Schnabel	24
	Stachy byzantina Woll-Ziest	4
	Carex morowii Japanische Segge	13
	Heuchera villosa Purpurglöckchen	30

Abb. 28 Fassadenversuchsstand – Variante 3: Vertiko GmbH, Buchenbach (Oktober 2021)  
mit Pflanzplan (THN-AR)

## 7.2 Meßtechnik

## Appendix

Bezeichnung		Messgröße	Messbereich	Genauigkeit
Wetterstation Typ WENTO- IND Lambrecht	Thermo- meter	Lufttemperatur [°C]	-30 °C - +70 °C	±0,8 K
	Hygro- meter	Relative Luftfeuchte [%]	0 % - 100 %	±3 % (10 % - 90 %) ±4 % (0 % - 100 %)
	Anemo- meter	Windgeschwin- digkeit [m/s]	0,3 m/s - 75 m/s	±2 %
	Wind- fahne	Windrichtung [°]	0 ° - 360 °	±1 °
	Barometer	Luftdruck [hPa]	600 hPa - 1.100 hPa	±2 hPa
Pyranometer Typ SKS 1110 Driesen + Kern GmbH		Solarstrahlung [W/m <sup>2</sup> ]	0 W/m <sup>2</sup> - 5.000 W/m <sup>2</sup>	< 3 %, max. 5 %
Hygrothermogeber Typ 907021 inkl. Strahlungsschutz Jumo		Lufttemperatur [°C]	-40 °C - +80 °C	±0,2 K
		Relative Luftfeuchte [%]	0 % - 100 %	±2 %
Oberflächentemperatur- fühler Typ PT 1000 Klasse B		Oberflächen- temperatur [°C]	0 °C - +70 °C	±0,2 K + max. 3 % v. Endwert
Globe-Thermometer / Strahlungsfühler Typ PT 1000 Klasse B		Strahlungs- temperatur [°C]	0 °C - +40 °C	±0,2 K + max. 3 % v. Endwert
Elektronischer Energiezähler Typ Energymid EM 2289 Gossen Metrawatt		Wirkleistung der PV-Module [W]	0 kW – 50 kW	1 % ± 1 D

 Tab. 9 Übersicht der am Versuchsstand in Rednitzhembach installierten Mess-  
technik (THN-ieg)



Abb. 29 Wetterstation mit den Pyranometern zur Messung der solaren Einstrahlung (THN-ieg)



Abb. 30 Pyranometer zur Messung der solaren Einstrahlung auf die Senkrechte hinter den Begrünungssystemen (THN-ieg)



Abb. 31 Hydrothermogeber mit Strahlungsschutz zur Messung der Lufttemperatur hinter den PV-Modulen (begrünt) (THN-ieg)



Abb. 32 Hydrothermogeber mit Strahlungsschutz zur Messung der Lufttemperatur hinter den PV-Modulen (unbegrünt) (THN-ieg)



Abb. 33 Hydrothermogeber mit Strahlungsschutz zur Messung der Raumlufttemperatur sowie Globe- Thermometer (THN-ieg)



Abb. 34 Oberflächentemperaturfühler an Rückseite der PV-Module (gelb umrandet) (THN-ieg)



Abb. 35 Energiezähler der Firma Gossen Metrawatt (THN-ieg)

### 7.3 Auswertung und Überblick

Appendix

#### 7.3.1 Begrünungssystem 1 – System Jakob / Variante 2

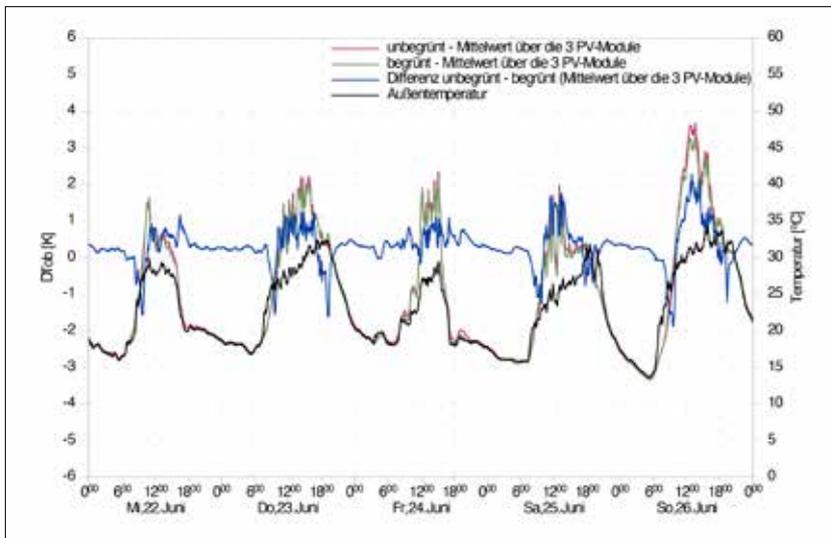


Abb. 36 Verlauf der mittleren Oberflächentemperatur auf der Rückseite der PV-Module für den unbegrünten sowie begrünten Fall und deren Temperaturdifferenz – Variante 2 Jakob (THN-ieg)

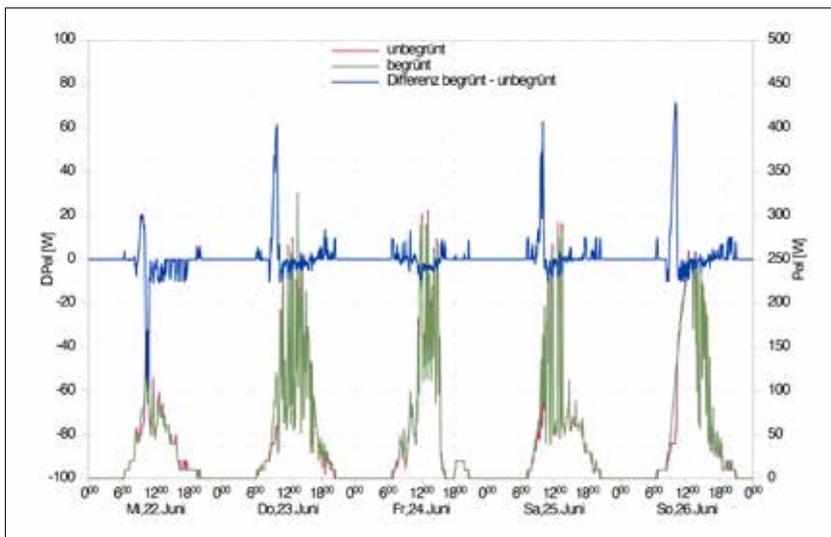


Abb. 37 Verlauf des PV-Ertrags für den unbegrünten sowie begrünten Fall und dessen Differenz – Variante 2 Jakob (THN-ieg)

		Minimum	Mittelwert	Maximum
$P_{el,PV}$ [W]	unbegrünt	0	43	325
	begrünt	0	43	322
$T_{Oberfläche,m}$ [°C]	unbegrünt	13,6	28,0	48,4
	begrünt	13,4	27,6	46,7
$T_{Luft,Spalt}$ [°C]	unbegrünt	13,6	24,2	36,0
	begrünt	14,1	24,6	36,0
$T_{Operativ}$ [°C]	unbegrünt	22,0	25,8	31,2
	begrünt	21,7	25,2	30,3

Tab. 10 Minimum, Mittelwert sowie Maximum des PV-Ertrags, der mittleren Oberflächentemperatur auf der Rückseite der PV-Module, der Lufttemperatur im Spalt zwischen PV-Modul und Fassade bzw. Begrünungssystem und der empfundenen Raumtemperatur in den Versuchsräumen – Variante 2 Jakob (THN-ieg)

- $P_{el,PV}$ : PV-Ertrag
- $T_{Oberfläche,m}$ : mittlere Oberflächentemperatur auf der Rückseite der PV-Module
- $T_{Luft,Spalt}$ : Lufttemperatur im Spalt zwischen PV-Modul und Fassade (unbegrünt) bzw. Begrünungssystem (begrünt)
- $T_{Operativ}$ : empfundene Raumtemperatur in den Versuchsräumen

		Summe [kWh]	Absolute Differenz [Wh]	Relative Differenz [%]
$W_{el,PV}$	unbegrünt	5,89	-	-
	begrünt	5,90	0	0

Tab. 11 PV-Ertrag im Betrachtungszeitraum – Variante 2 Jakob (THN-ieg)

- $W_{el,PV}$ : PV-Ertrag

7.3.2 Begrünungssystem 2 – System Kramer / Variante 2

Appendix

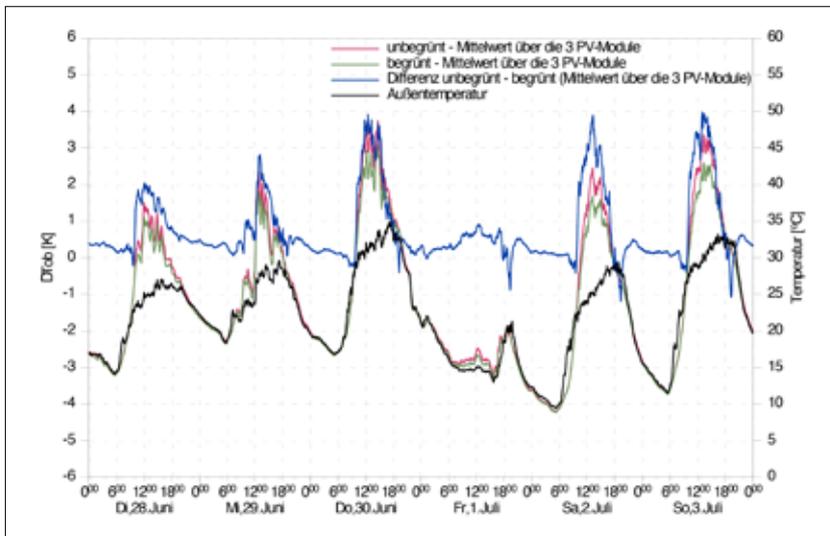


Abb. 38 Verlauf der mittleren Oberflächentemperatur auf der Rückseite der PV-Module für den unbegrünten sowie begrünenden Fall und deren Temperaturdifferenz – Variante 2 Kramer (THN-ieg)

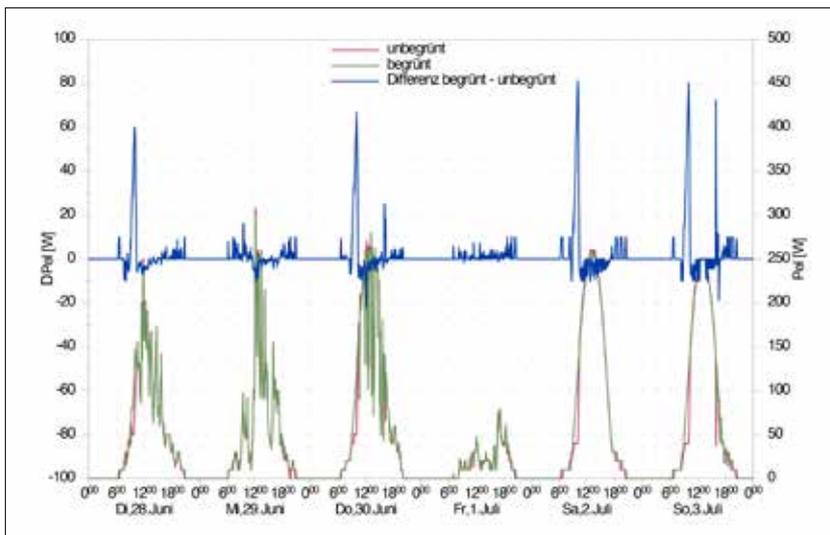


Abb. 39 Verlauf des PV-Ertrags für den unbegrünten sowie begrünenden Fall und dessen Differenz – Variante 2 Kramer (THN-ieg)

		Minimum	Mittelwert	Maximum
$P_{el,PV}$ [W]	unbegrünt	0	47	307
	begrünt	0	47	297
$T_{Oberfläche,m}$ [°C]	unbegrünt	9,1	27,8	48,7
	begrünt	9,0	26,8	45,3
$T_{Luft,Spalt}$ [°C]	unbegrünt	9,4	23,9	36,0
	begrünt	9,8	23,7	34,8
$T_{Operativ}$ [°C]	unbegrünt	17,4	25,5	32,8
	begrünt	17,1	24,8	31,6

Tab. 12 Minimum, Mittelwert sowie Maximum des PV-Ertrags, der mittleren Oberflächentemperatur auf der Rückseite der PV-Module, der Lufttemperatur im Spalt zwischen PV-Modul und Fassade bzw. Begrünungssystem und der empfundenen Raumtemperatur in den Versuchsräumen – Variante 2 Kramer (THN-ieg)

- $P_{el,PV}$ : PV-Ertrag
- $T_{Oberfläche,m}$ : mittlere Oberflächentemperatur auf der Rückseite der PV-Module
- $T_{Luft,Spalt}$ : Lufttemperatur im Spalt zwischen PV-Modul und Fassade (unbegrünt) bzw. Begrünungssystem (begrünt)
- $T_{Operativ}$ : empfundene Raumtemperatur in den Versuchsräumen

		Summe [kWh]	Absolute Differenz [Wh]	Relative Differenz [%]
$W_{el,PV}$	unbegrünt	6,40	-	-
	begrünt	6,42	13	0,2

Tab. 13 PV-Ertrag im Betrachtungszeitraum – Variante 2 Kramer (THN-ieg)

- $W_{el,PV}$ : PV-Ertrag

7.3.3 Begrünungssystem 3 – System Vertiko / Variante 1

Appendix

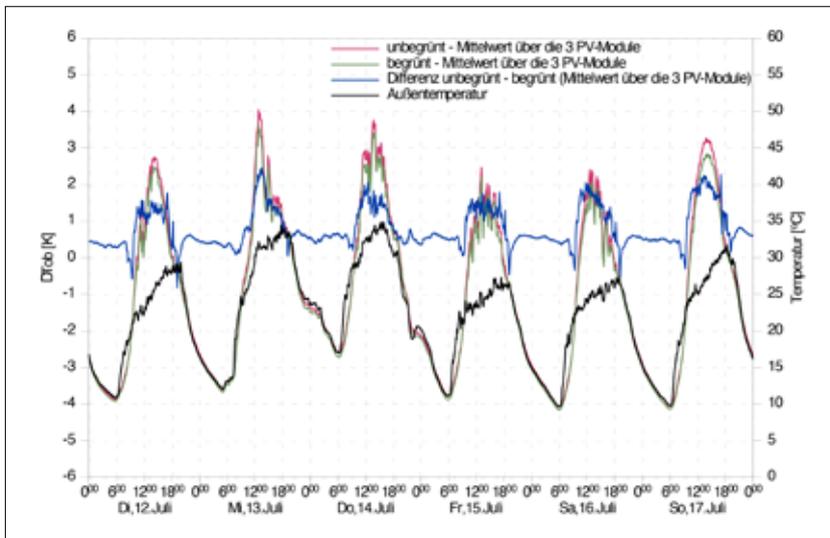


Abb. 40 Verlauf der mittleren Oberflächentemperatur auf der Rückseite der PV-Module für den unbegrünten sowie begrüntem Fall und deren Temperaturdifferenz – Variante 1 Vertiko (THN-ieg)

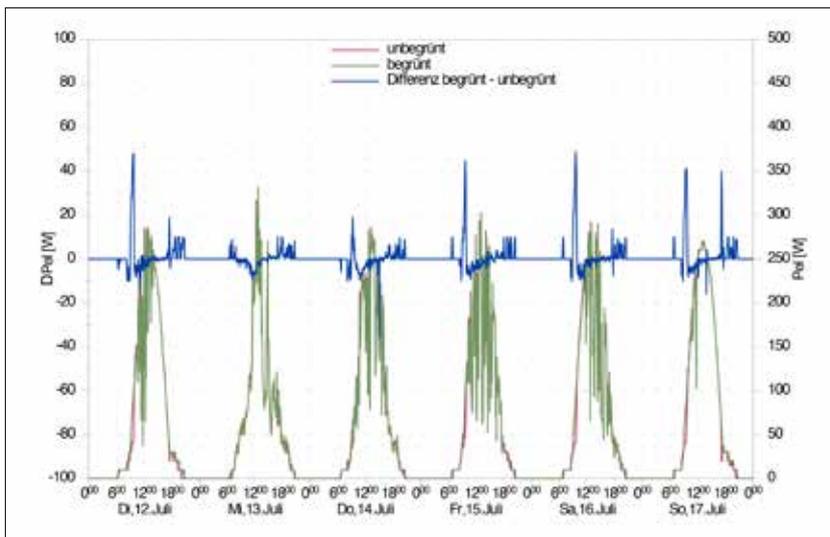


Abb. 41 Verlauf des PV-Ertrags für den unbegrünten sowie begrüntem Fall und dessen Differenz – Variante 1 Vertiko (THN-ieg)

		Minimum	Mittelwert	Maximum
$P_{el,PV}$ [W]	unbegrünt	0	60	331
	begrünt	0	60	330
$T_{Oberfläche,m}$ [°C]	unbegrünt	9,7	29,9	50,2
	begrünt	9,2	29,0	48,1
$T_{Luft,Spalt}$ [°C]	unbegrünt	9,7	25,3	37,0
	begrünt	10,1	24,7	36,4
$T_{Operativ}$ [°C]	unbegrünt	18,6	25,0	32,3
	begrünt	18,4	24,2	31,3

Tab. 14 Minimum, Mittelwert sowie Maximum des PV-Ertrags, der mittleren Oberflächentemperatur auf der Rückseite der PV-Module, der Lufttemperatur im Spalt zwischen PV-Modul und Fassade bzw. Begrünungssystem und der empfundenen Raumtemperatur in den Versuchsräumen – Variante 1 Vertiko (THN-ieg)

$P_{el,PV}$ : PV-Ertrag  
 $T_{Oberfläche,m}$ : mittlere Oberflächentemperatur auf der Rückseite der PV-Module  
 $T_{Luft,Spalt}$ : Lufttemperatur im Spalt zwischen PV-Modul und Fassade (unbegrünt) bzw. Begrünungssystem (begrünt)  
 $T_{Operativ}$ : empfundene Raumtemperatur in den Versuchsräumen

		Summe [kWh]	Absolute Differenz [Wh]	Relative Differenz [%]
$W_{el,PV}$	unbegrünt	8,43	-	-
	begrünt	8,44	5	0,1

Tab. 15 PV-Ertrag im Betrachtungszeitraum – Variante 1 Vertiko (THN-ieg)

$W_{el,PV}$ : PV-Ertrag

7.3.4 Begrünungssystem 3 – System Vertiko / Variante 2

Appendix

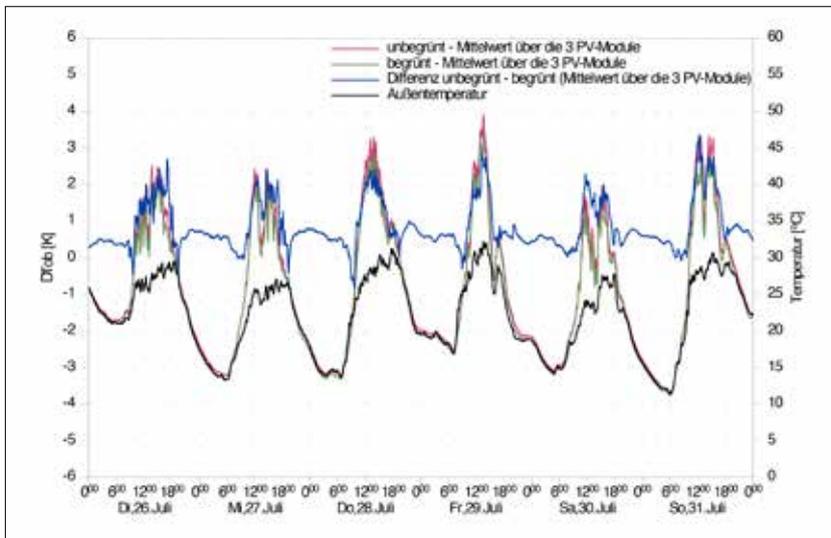


Abb. 42 Verlauf der mittleren Oberflächentemperatur auf der Rückseite der PV-Module für den unbegrünten sowie begrünenden Fall und deren Temperaturdifferenz – Variante 2 Vertiko (THN-ieg)

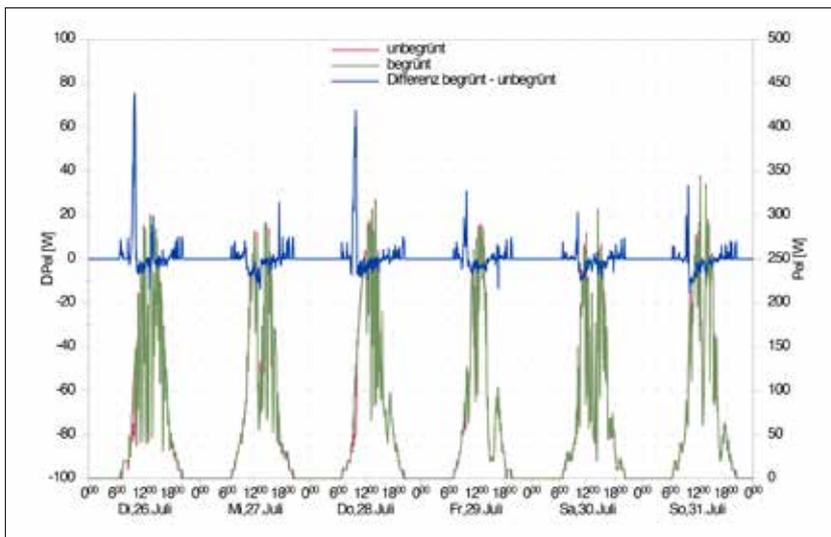


Abb. 43 Verlauf des PV-Ertrags für den unbegrünten sowie begrünenden Fall und dessen Differenz – Variante 2 Vertiko (THN-ieg)

		Minimum	Mittelwert	Maximum
$P_{el,PV}$ [W]	unbegrünt	0	55	345
	begrünt	0	55	341
$T_{Oberfläche,m}$ [°C]	unbegrünt	11,6	30,1	49,5
	begrünt	11,2	29,1	46,9
$T_{Luft,Spalt}$ [°C]	unbegrünt	11,3	25,1	34,9
	begrünt	11,5	24,8	33,7
$T_{Operativ}$ [°C]	unbegrünt	22,3	30,2	37,3
	begrünt	22,0	29,1	36,2

Tab. 16 Minimum, Mittelwert sowie Maximum des PV-Ertrags, der mittleren Oberflächentemperatur auf der Rückseite der PV-Module, der Lufttemperatur im Spalt zwischen PV-Modul und Fassade bzw. Begrünungssystem und der empfundenen Raumtemperatur in den Versuchsräumen – Variante 2 Vertiko (THN-ieg)

- $P_{el,PV}$ : PV-Ertrag
- $T_{Oberfläche,m}$ : mittlere Oberflächentemperatur auf der Rückseite der PV-Module
- $T_{Luft,Spalt}$ : Lufttemperatur im Spalt zwischen PV-Modul und Fassade (unbegrünt) bzw. Begrünungssystem (begrünt)
- $T_{Operativ}$ : empfundene Raumtemperatur in den Versuchsräumen

		Summe [kWh]	Absolute Differenz [Wh]	Relative Differenz [%]
$W_{el,PV}$	unbegrünt	7,85	-	-
	begrünt	7,87	24	0,3

Tab. 17 PV-Ertrag im Betrachtungszeitraum – Variante 2 Vertiko (THN-ieg)

- $W_{el,PV}$ : PV-Ertrag

7.3.5 Begrünungssystem 2 – System Kramer / Variante 3

Appendix

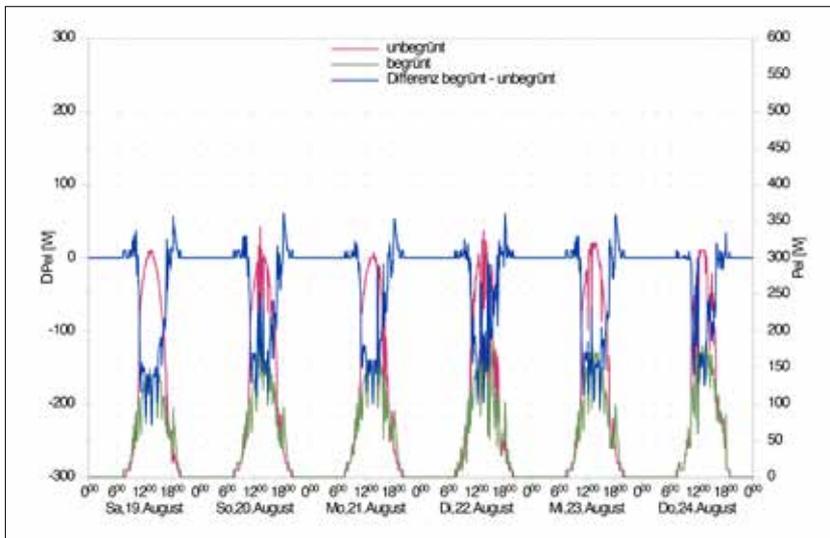


Abb. 44 Verlauf des PV-Ertrags für den unbegrünten sowie begrüntem Fall und dessen Differenz für die gesamte Messperiode – Variante 3 Kramer (THN-ieg)

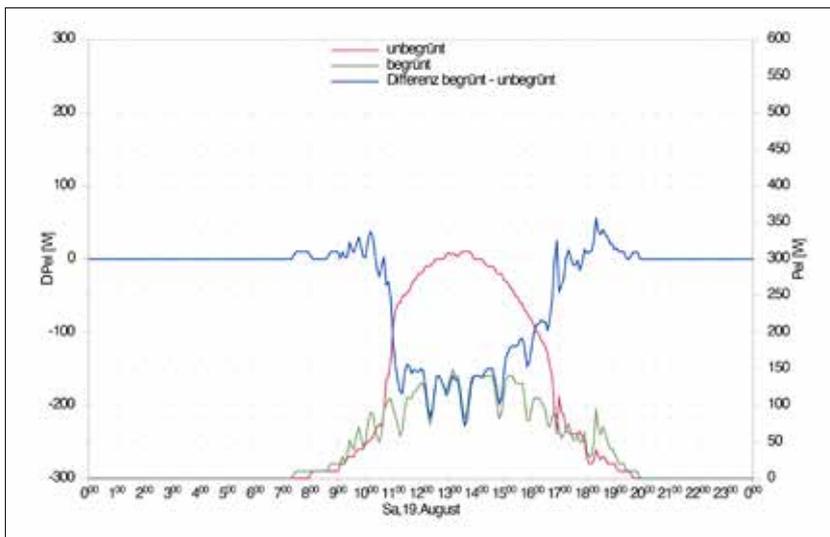


Abb. 45 Verlauf des PV-Ertrags für den unbegrünten sowie begrüntem Fall und dessen Differenz für einen Tag – Variante 3 Kramer (THN-ieg)

		Minimum	Mittelwert	Maximum
$P_{el,PV}$ [W]	unbegrünt	0	71	341
	begrünt	0	43	208
$T_{Oberfläche,m}$ [°C]	unbegrünt	-	-	-
	begrünt	-	-	-
$T_{Luft,Spalt}$ [°C]	unbegrünt	14,9	30,4	39,4
	begrünt	14,8	29,5	43,0
$T_{Operativ}$ [°C]	unbegrünt	23,9	29,5	34,6
	begrünt	23,7	28,7	33,1

Tab. 18 Minimum, Mittelwert sowie Maximum des PV-Ertrags, der mittleren Oberflächentemperatur auf der Rückseite der PV-Module, der Lufttemperatur im Spalt zwischen PV-Modul und Fassade bzw. Begrünungssystem und der empfundenen Raumtemperatur in den Versuchsräumen – Variante 3 Kramer (THN-ieg)

- $P_{el,PV}$ : PV-Ertrag
- $T_{Oberfläche,m}$ : mittlere Oberflächentemperatur auf der Rückseite der PV-Module
- $T_{Luft,Spalt}$ : Lufttemperatur im Spalt zwischen PV-Modul und Fassade (unbegrünt) bzw. Begrünungssystem (begrünt)
- $T_{Operativ}$ : empfundene Raumtemperatur in den Versuchsräumen

		Summe [kWh]	Absolute Differenz [Wh]	Relative Differenz [%]
$W_{el,PV}$	unbegrünt	10,21	-	-
	begrünt	6,13	-4.085	-40,0

Tab. 19 PV-Ertrag im Betrachtungszeitraum – Variante 3 Kramer (THN-ieg)

- $W_{el,PV}$ : PV-Ertrag

7.3.6 Begrünungssystem 2 – System Kramer / Variante 4

Appendix

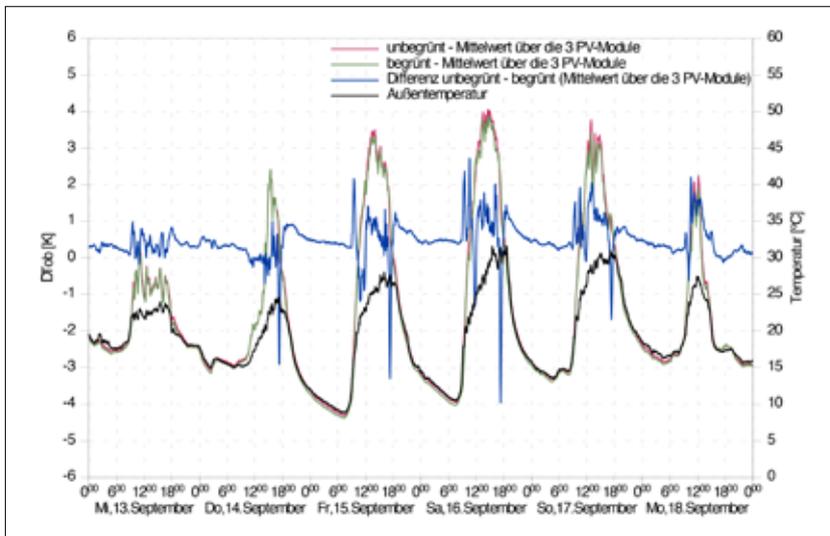


Abb. 46 Verlauf der mittleren Oberflächentemperatur auf der Rückseite der PV-Module für den unbegrünten sowie begrüntem Fall und deren Temperaturdifferenz – Variante 4 Kramer (THN-ieg)

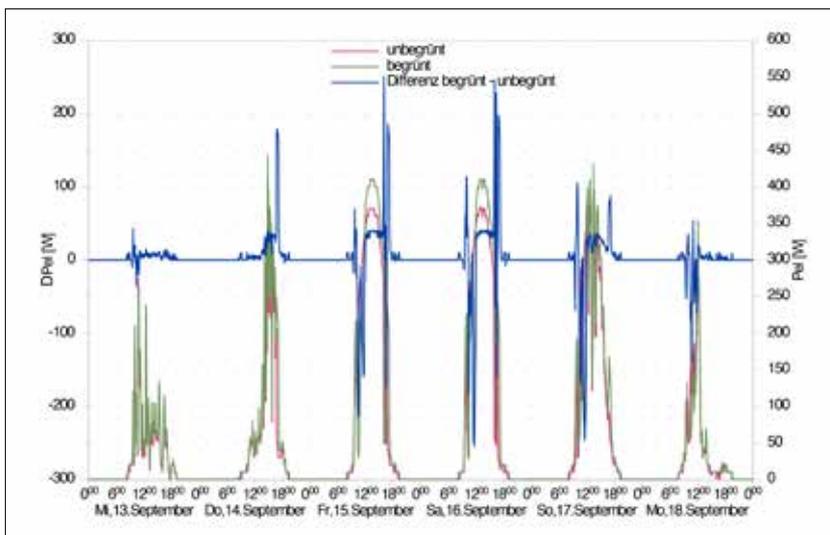


Abb. 47 Verlauf des PV-Ertrags für den unbegrünten sowie begrüntem Fall und dessen Differenz für die gesamte Messperiode – Variante 4 Kramer (THN-ieg)

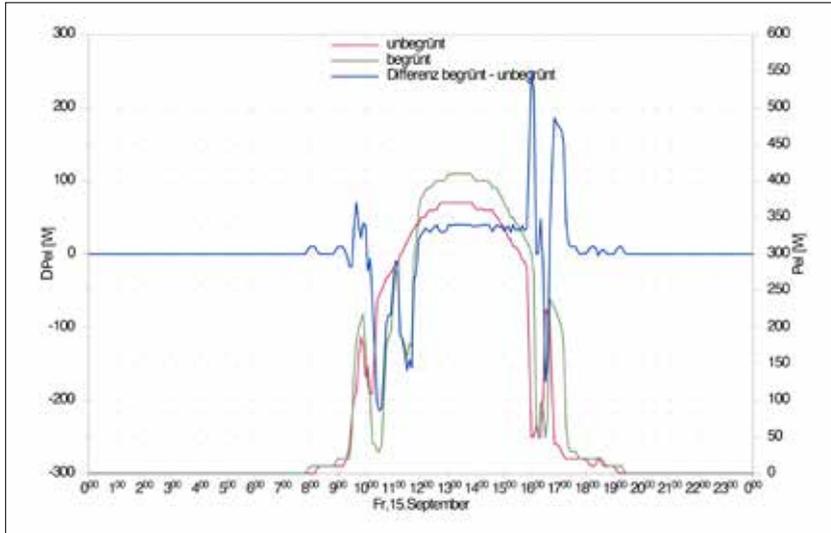


Abb. 48 Verlauf des PV-Ertrags für den unbegrünten sowie begrüntem Fall und dessen Differenz für einen Tag – Variante 4 Kramer (THN-ieg)

		Minimum	Mittelwert	Maximum
$P_{el,PV}$ [W]	unbegrünt	0	48	404
	begrünt	0	53	444
$T_{Oberfläche,m}$ [°C]	unbegrünt	8,5	28,9	50,2
	begrünt	8,2	28,4	49,3
$T_{Luft,Spalt}$ [°C]	unbegrünt	8,7	23,1	33,8
	begrünt	8,6	22,1	33,6
$T_{Operativ}$ [°C]	unbegrünt	16,4	22,7	28,7
	begrünt	16,3	22,2	27,6

Tab. 20 Minimum, Mittelwert sowie Maximum des PV-Ertrags, der mittleren Oberflächentemperatur auf der Rückseite der PV-Module, der Lufttemperatur im Spalt zwischen PV-Modul und Fassade bzw. Begrünungssystem und der empfundenen Raumtemperatur in den Versuchsräumen – Variante 4 Kramer (THN-ieg)

- $P_{el,PV}$ : PV-Ertrag
- $T_{Oberfläche,m}$ : mittlere Oberflächentemperatur auf der Rückseite der PV-Module
- $T_{Luft,Spalt}$ : Lufttemperatur im Spalt zwischen PV-Modul und Fassade (unbegrünt) bzw. Begrünungssystem (begrünt)
- $T_{Operativ}$ : empfundene Raumtemperatur in den Versuchsräumen

		Summe [kWh]	Absolute Differenz [Wh]	Relative Differenz [%]
$W_{el,PV}$	unbegrünt	6,17	-	-
	begrünt	6,84	668	10,8

Tab. 21 PV-Ertrag im Betrachtungszeitraum – Variante 4 Kramer (THN-ieg)

- $W_{el,PV}$ : PV-Ertrag

7.4 Umbauten / Einbausituationen

Appendix



Abb. 49 Translozierung von Variante 1 Jacob mit Radlader (Juni 2022) (THN-AR)



Abb. 50 Montage eines Moduls von Variante 2 Kramer (Juni 2022) (THN-AR)



Abb. 51 Montage unteres PV-Modul vor Variante 2 Kramer (Juni 2022) (THN-AR)



Abb. 52 Montage oberes PV-Modul vor Variante 2 Kramer (Juni 2022) (THN-AR)



Abb. 53 Montage oberes geneigtes PV-Modul (30°) vor Variante 2 Kramer (August 2023) (THN-AR)



Abb. 54 Montage mittleres geneigtes PV-Modul (7,5°) vor Variante 2 Kramer (September 2023) (THN-AR)

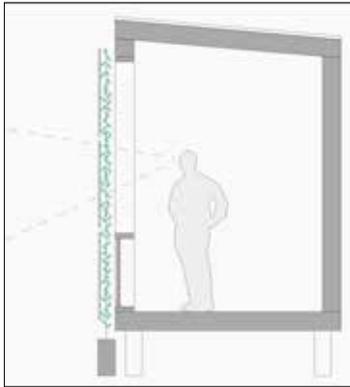


Abb. 55 Variante 1 – Winkel 0°  
Abstand 0,15 m

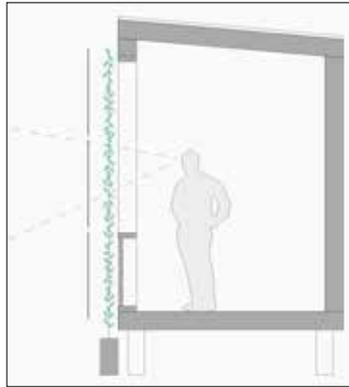


Abb. 56 Variante 1 – Winkel 0°  
Abstand 0,30 m

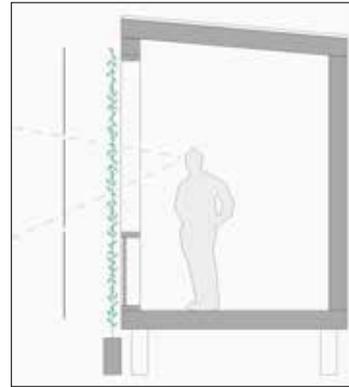


Abb. 57 Variante 1 – Winkel 0°  
Abstand 0,60 m

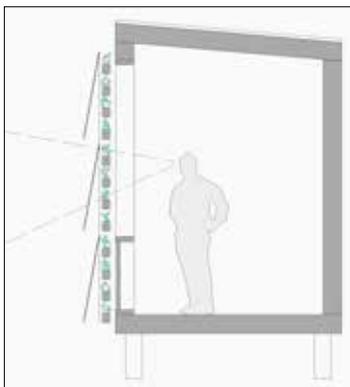


Abb. 61 Variante 2 – Winkel 10°  
Abstand 0,15 m

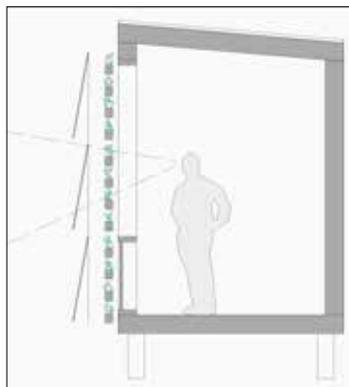


Abb. 62 Variante 2 – Winkel 10°  
Abstand 0,30 m

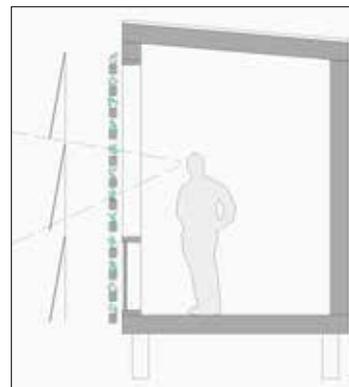


Abb. 63 Variante 2 – Winkel 10°  
Abstand 0,60 m

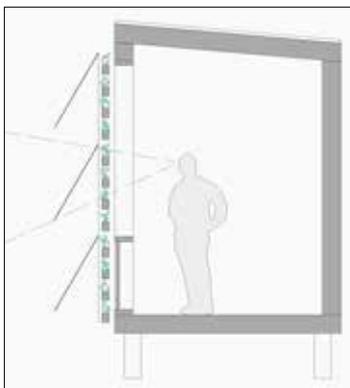


Abb. 58 Variante 2 – Winkel 30°  
Abstand 0,15 m

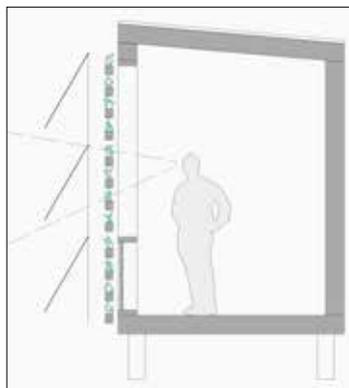


Abb. 59 Variante 2 – Winkel 30°  
Abstand 0,30 m

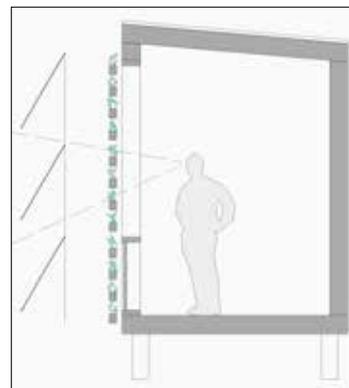


Abb. 60 Variante 2 – Winkel 30°  
Abstand 0,60 m

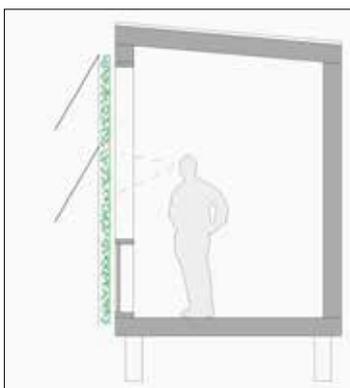


Abb. 64 Variante 3 – s. Abb. 53  
PV 2/3 Fassadenfeld



Abb. 65 Variante 3 – s. Abb. 54  
PV 2/3 Fassadenfeld

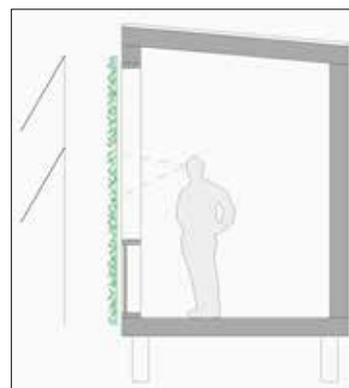


Abb. 66 Variante 3 – s. Abb. 55°  
PV 2/3 Fassadenfeld

7.5 Öffentlichkeitsarbeit / Transfer

Appendix



Abb. 67 Marlene Mortler, Mitglied des Europäischen Parlaments, besichtigt Versuchsstand der TH Nürnberg (09.08.2022) (Alexandra Huber)



Abb. 68 Marlene Mortler, Mitglied des Europäischen Parlaments, besichtigt Versuchsstand der TH Nürnberg (09.08.2022) (Alexandra Huber)



Abb. 69 Stand "GreenFaBS und "GreenPV" im Rahmen von TH Nürnberg meets Consumenta 2022 (26. bis 30.10.2022) (THN-AR)



Abb. 70 Stand "GreenFaBS und "GreenPV" im Rahmen von TH Nürnberg meets Consumenta 2022 (26. bis 30.10.2022) (THN-AR)



Abb. 71 Gemeinderat Rednitzhembach informiert sich am Versuchsstand in Rednitzhembach (17.07.2023) (Robert Gerner)



Abb. 72 Gemeinderat Rednitzhembach informiert sich am Versuchsstand in Rednitzhembach (17.07.2023) (Robert Gerner)