



Bundesinstitut
für Bau-, Stadt- und
Raumforschung

im Bundesamt für Bauwesen
und Raumordnung



BBSR-
Online-Publikation
124/2024

Strategien für klimagerechte Dachflächen

Photovoltaikanlagen und Dachbegrünung



von

Dr. Gunter Mann
Dr. Jan Kegel
Felix Mollenhauer
Rebecca Landwehr
Tobias Möllney
Malte Welling

Strategien für klimagerechte Dachflächen

Photovoltaikanlagen und Dachbegrünung

Das Projekt des Forschungsprogramms „Zukunft Bau“ wurde vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) durchgeführt.

IMPRESSUM

Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31–37
53179 Bonn

Wissenschaftliche Begleitung

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
Referat WB 2 „Instrumente zur Emissionsminderung im Gebäudebereich“
Christian Ahrens (Projektleitung)
christian.ahrens@bbr.bund.de

Autorinnen und Autoren

Bundesverband GebäudeGrün e. V. (BuGG), Berlin
Dr. Gunter Mann
gunter.mann@bugg.de
Felix Mollenhauer
felix.mollenhauer@bugg.de
Rebecca Landwehr
rebecca.landwehr@bugg.de

Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW), Berlin
Dr. Jan Kegel
jan.kegel@ioew.de
Tobias Möllney
tobias.moellney@ioew.de
Malte Welling
malte.Welling@ioew.de
unter Mitarbeit von: Peter Martin

Stand

September 2024

Gestaltung

Bundesverband GebäudeGrün e. V. (BuGG)
Rebecca Landwehr

Bildnachweis

Titelbild: Dr. Gunter Mann (BuGG)

Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Zitierweise

Mann, Gunter; Kegel, Jan; Mollenhauer, Felix; Landwehr, Rebecca; Möllney, Tobias; Welling, Malte: Strategien für klimagerechte Dachflächen: Photovoltaikanlagen und Dachbegrünung. BBSR-Online-Publikation 124/2024, Bonn. <https://doi.org/10.58007/rz47-gc07>

DOI 10.58007/rz47-gc07

ISSN 1868-0097

Bonn 2024

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	6
Abstract	8
Einführung	10
Themenfeld	10
Untersuchungsgegenstand	10
Problemstellung und Ziel	11
Stand der Forschung/Baupraxis	11
Forschungslücke/Entwicklungsbedarf	12
Übergeordnetes Ziel und Teilziele	12
Forschungsdesign	14
Projektteam und Organisation, Kooperationspartner	14
Arbeitshypothesen	14
Arbeitsschritte (AS) und Meilensteine	14
Methodischer Ansatz	14
Arbeitsschritte	16
AS1 - Analyse verschiedener Gebäudesituationen und Vorteile einer gebäudeübergreifenden Betrachtung	16
AS2 - Kategorisierung geeigneter Dachflächen und Gebäudesituationen	28
AS4 - Technische Möglichkeiten und damit verbundene wirtschaftliche Konsequenzen	44
AS5 - Entwicklung einer Bewertungsmethodik als Mikro- und Makrobetrachtung	65
AS7 – Vorschläge zur Umsetzung von Nutzungsstrategien in die Praxis und Analyse etwaiger Hemmnisse und AS8 – Lösungsansätze und Handlungsempfehlungen	83
AS9 – Materialien und Konzeption zum Aufbau eines Informationsportals	115
Ergebnisse	120
Ergebnisse AS1	120
Ergebnisse AS2	120
Ergebnisse AS4	121
Ergebnisse AS5	122
Ergebnisse AS7 und AS8	122
Ergebnisse AS9	124
Fazit und Ausblick	125
Zur Diskussion: Klimagerechte Dachflächen trotz Solardachpflichten?	127

Mitwirkende	130
Kurzbiographien	130
Verzeichnisse	132
Literaturverzeichnis	132
Abbildungsverzeichnis	145
Tabellenverzeichnis	146
Anhang	147

Kurzfassung

Die Ausgestaltung klimagerechter Dachflächen steht aktuell in einem Zwiespalt zwischen einerseits dem Potenzial zur Nutzung erneuerbarer Energien in Form von Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen) sowie andererseits dem Potenzial zur Erhaltung des Mikroklimas in Form von Gründächern und der damit verbundenen Anpassung an die Folgen des Klimawandels. Das vorliegende Gutachten setzt an dieser Stelle an mit dem Ziel, Empfehlungen und Strategien für die Ausgestaltung der Dachflächenlandschaft in Deutschland zu geben, wie diese mit PV-Anlagen, Gründächern oder deren Kombinationen (PV-Gründächer) ausgestattet werden können. Dabei sollte über das einzelne Gebäude hinaus ebenso die quartiersgerechte Dachflächengestaltung betrachtet werden.

Innerhalb einer mehrstufigen Untersuchung, Bestandsaufnahme und Empfehlung wurde der Zielkonflikt Photovoltaik und Dachbegrünung behandelt, immer unter Beachtung der Forschungsfrage, ob sich Photovoltaik und Begrünung auf Dachflächen ausschließen bzw. unter welchen Umständen und Voraussetzungen die Kombination oder eine getrennte Verlegung, vor allem im Bestandsbau, sinnvoll ist.

Im Wesentlichen bestand die Untersuchung aus drei Themenfeldern, aufgeteilt in insgesamt neun Arbeitsschritte. Im ersten Teil wurden eine umfassende Bestandsanalyse zur Thematik durchgeführt und Ansätze aufgezeigt, wie Dachflächen zukünftig für die Umsetzung mit Photovoltaik und/oder Begrünung bewertet werden können.

Bereits in der Bestandsaufnahme der Rahmenbedingungen zeigte sich die Komplexität des Themas. Mittels einer umfassenden Analyse der in Deutschland vorkommenden Gebäude- und Quartierstypen und deren Eigenschaften wurden entsprechende gebäude- und quartierspezifische Indikatoren identifiziert, die für eine Eignungswertung für PV-Anlage oder Gründach von hoher Bedeutung sind.

Hohe Dringlichkeiten von PV-Anlage bestehen auf Quartiersebene in Räumen, bei denen ein hoher Energieverbrauch (vor allem tagsüber) auf geeignete Einstrahlbedingungen trifft, wie beispielsweise bei Quartieren mit Nichtwohngebäuden (Gewerbe, Hallen, Bürogebäuden.) aber auch in Raumstrukturtypen mit überwiegender Wohnnutzung, wie Ketten- und Zeilenhochhäuser, Blockrandbebauung oder großmaßstäblicher Wohnungsbau. Gerade zu letzteren Wohnquartieren ergibt sich die Konkurrenz zum Gründach: Diese werden dringend in stark versiegelten und verdichteten Stadtraumtypen mit Wohnnutzung benötigt, um ihre positiven Wirkungen auf die Bewohnenden und die Infrastruktur mit möglichst großen Effekt ausspielen zu können. In diesen Fällen sind die Synergieeffekte des PV-Gründachs heranzuziehen, wenn die Eignungsindikatoren beider Dachnutzungstypen eingehalten werden können.

Die Eignungsindikatoren auf Gebäudeebene setzen sich aus Anforderungen an die Dachkonstruktion, das Gebäude, das Quartier und das ausgewählte Dachnutzungssystem (PV-Anlage oder Gründach) zusammen und sind teilweise ausschlaggebend für die Realisierung des jeweiligen Systems. Im Ergebnis zeigt sich, dass im Neubau als auch im Bestandsbau für PV-Anlagen 10 (von 35) Indikatoren und für Gründächer 8 (von 32) Indikatoren priorisiert betrachtet werden sollten, bevor es zum Einbau der jeweiligen Dachnutzungsanlage kommt.

Aus bereits bestehenden Unterlagen zu den technischen Möglichkeiten von PV-Dachanlagen, Gründach- und PV-Gründachsystemen wurden die wichtigsten Erkenntnisse zusammengeführt und strukturiert aufbereitet. Es offenbarte sich eine hohe Vielfalt an Systemlösungen, die es theoretisch ermöglichen, auf fast allen Dachkonstruktionen zumindest eine Form der Dachnutzung umzusetzen.

Ebenso wurden die Wirkungen der Dachnutzungstypen näher analysiert und darauf aufbauend eine Methode entwickelt, die eine Bewertung auf der Mikro- und Makroebene unterstützt. Zur Erprobung dieser Methodik wurde als Zusatzleistung ein nicht-veröffentlichungsfähiges Excel-Tool entwickelt

(“Wirk-Tool”), um die Bewertung der Wirkungen bezogen auf die Gebäude- und Quartiersebene abbilden zu können. Als wichtige Einfluss- und Entscheidungsgröße stellte sich dabei die Dachflächengröße heraus. Gerade die vielfältigen Wirkungen des Gründaches skalieren oftmals mit dieser Kenngröße. Auch bestimmt diese maßgeblich die Kosten der Dachnutzungstypen. Des Weiteren verbildlicht die Anwendung der Methodik die unterschiedlichen Wichtigkeiten der einzelnen Wirkungen in Abhängigkeit unterschiedlicher Akteursperspektiven. Während eher global wirkende Effekte wie beispielsweise der Einfluss auf die Biodiversität, die Belastung des Stromnetzes oder Temperatureffekte vorrangig im Fokus kommunaler Akteure stehen, sind es vor allem die energetisch-wirtschaftlichen Kennzahlen der Gebäudeebene, die für private Akteure von großem Interesse sind. Unter Umständen kann dies zu einem Interessenkonflikt führen, den es zukünftig verstärkt zu adressieren gilt. Gerade gekoppelte PV-Gründach Lösungen, flankiert mit geeigneten Fördermaßnahmen, können diesbezügliche eine Lösung darstellen, denn hier manifestieren sich die positiven Effekte auf allen untersuchten Wirkebenen (energetisch, betriebswirtschaftlich, regionalökonomisch, ökologisch, Lebensqualität und Gesundheit).

Aus den Analysen der vorherigen Arbeitsschritte sowie durch weitere Befragungen wurden entsprechende Hemmnisse bei der Realisierung der verschiedenen Dachnutzungstypen auf verschiedenen Ebenen erfasst und Lösungsansätze aufgezeigt, wie diese zu beheben sind. Hemmnisse bestehen auf verschiedenen Akteursebenen und sind insbesondere auf fehlendes Wissen zur Bekanntheit unterschiedlicher Dachnutzungssysteme, Gebäudeeigenschaften im Bestand sowie der fachgerechten Planung und Ausführung zurückzuführen. Für die relevantesten Akteure zur Umsetzung der Dachnutzungstypen sind daher die erarbeiteten Handlungsempfehlungen als Grundlage heranzuziehen, um die klimagerechte Umsetzung von Dachflächen aus der jeweiligen Perspektive fördern zu können. Insbesondere Bund, Verbände und systemherstellende Unternehmen sollten eine tragende Rolle übernehmen, um die bestehenden Hürden und Vorbehalte auszuräumen.

Die Ergebnisse des Gutachtens sollen zukünftig gemeinsam mit weiteren Informationen zu PV-Dächern, Gründächern und PV-Gründächern auf einer Online-Plattform bereitgestellt werden. Dafür wurden Empfehlungen für den Inhalt und die Struktur des Informationsportals gegeben.

Das Gutachten ist ein wichtiger Schritt, die verschiedenen Dachnutzungsformen zu beschreiben und einander gegenüberzustellen und Hinweise zur Überwindung von Nutzungszielkonflikten zwischen PV und Gründach zu geben. Um die im Gutachten aufgezeigten Ansätze zur klima- und standortgerechten Dachflächengestaltung mit PV-Anlagen, Gründächern oder deren Kombination weiterzuentwickeln und zu festigen, bedarf es weiterer Bemühungen und vor allem Forschungen. Neben einer vertieften Evaluation der Wirkeinflüsse besteht weiterer Bedarf bei der Digitalisierung und der Erfassung des Bestandsbaus bezüglich spezifischer Gegebenheiten, u. a. zu durchgeführten Sanierungs- bzw. Modernisierungsmaßnahmen, statischen Lastreserven und Nutzungsbedürfnissen. Mit Hilfe dieser Daten ist die Potenzialeinschätzung nochmals detaillierter und aussagekräftiger. In weiteren Arbeiten könnte sich hier ein vollentwickeltes “Wirk-Tool” als wegweisendes Analysewerkzeug für die zukünftige Gestaltung der Dachflächen in Deutschland herausstellen.

Abstract

The design of climate-friendly roof surfaces is currently caught between the potential for the use of renewable energy in the form of PV systems on the one hand and the potential for preserving the microclimate in the form of green roofs and the associated adaptation to the consequences of climate change on the other. This report starts at that point, with the aim of providing recommendations and strategies for the design of the roof surface landscape in Germany, how these can be equipped with PV systems, green roofs or their combinations (PV green roofs). In addition to the individual building, the design of the roof area to suit the neighborhood should also be considered.

Within a multi-stage investigation, inventory and recommendation, the conflicting objectives of PV and green roofs were addressed, always taking into account the research question of whether photovoltaics and green roofs are mutually exclusive or under what circumstances and conditions the combination or separate installation, especially on existing buildings, makes sense.

Essentially, the study consisted of three subject areas, divided into a total of nine work steps. In the first part, a comprehensive analysis of the current situation was carried out and approaches were identified as to how roof surfaces can be evaluated for implementation with PV and / or greenery in the future.

The complexity of the topic was already evident in the assessment of the framework conditions. Based on a comprehensive analysis of the types of buildings and neighborhoods found in Germany and their characteristics, corresponding building- and neighborhood-specific indicators were identified that are of great importance for a suitability assessment for PV systems or green roofs.

There is a high urgency for PV systems at neighborhood level in areas where high energy consumption (especially during the day) meets suitable irradiation conditions, such as in neighborhoods with non-residential buildings (commercial, halls, office buildings) but also in spatial structure types with predominantly residential use, such as chain and row high-rise buildings, perimeter block buildings or large-scale residential buildings. Especially in the last mentioned residential areas, there is competition with green roofs: these are urgently needed in heavily sealed and dense urban areas with residential use in order to maximize their positive effects on residents and infrastructure. In these cases, the synergy effects of the PV green roof should be taken into account if the suitability indicators of both types of roof use can be met.

The suitability indicators at building level are made up of requirements for the roof construction, the building, the district and the selected roof utilization system (PV system or green roof) and are partly decisive for the implementation of the respective system. The results show that 10 (out of 35) indicators for PV systems and 8 (out of 32) indicators for green roofs must be taken into account as a priority for both new and existing buildings before the respective roof usage system is installed.

The most important findings from existing documents on the technical possibilities of PV roof systems, green roofs and PV green roof systems were compiled and processed in a structured manner. This revealed a wide variety of system solutions that theoretically make it possible to implement at least one form of roof utilization on almost all roof structures.

The effects of the types of roof utilization were also analyzed in more detail and, based on this, a method was developed that supports an evaluation at the micro and macro level. To test this methodology, a non-publishable Excel tool ("impact tool") was developed as an additional service in order to be able to map the assessment of impacts at building and neighborhood level. The size of the roof area proved to be an important influencing and decision-making factor. The diverse effects of the green roof in particular often scale with this parameter. It also significantly determines the costs of the roof utilization types. Furthermore, the application of the methodology illustrates the different importance of the individual effects depending on different stakeholder perspectives. While more global effects such as

the impact on biodiversity, the load on the electricity grid or temperature effects are primarily the focus of municipal stakeholders, it is primarily the energy and economic key figures at building level that are of great interest to private stakeholders. Under certain circumstances, this can lead to a conflict of interest that needs to be addressed to a greater extent in the future. Coupled PV green roof solutions in particular, flanked by suitable funding measures, can represent a solution in this respect, as the positive effects manifest themselves here on all the impact levels examined (energy, business, regional economy, ecology, quality of life and health).

Based on the analyses of the previous work steps and further interviews, corresponding obstacles to the realization of the various types of roof use were identified at different levels and, in turn, approaches to solutions were identified as to how these can be eliminated.

Obstacles exist at various stakeholder levels and can be attributed in particular to a lack of knowledge about different roof utilization systems, building characteristics in existing buildings and professional planning and implementation. The recommendations for action developed should therefore be used as a basis for the most relevant stakeholders for the implementation of roof utilization types in order to promote the climate-friendly implementation of roof surfaces from the respective perspective. The federal government, associations and system-manufacturing companies in particular should play a leading role in overcoming existing obstacles and reservations.

In future, the results of the report are to be made available on an online information platform together with further information on PV roofs, green roofs and PV green roofs. Recommendations were provided for the content and structure of the information portal.

The report is an important step towards describing and comparing the various forms of roof utilization and providing information on overcoming conflicts of use between PV and green roofs. In order to further develop and consolidate the approaches outlined in the report for climate- and location-appropriate roof surface design with PV systems, green roofs or a combination of the two, further efforts and, above all, research are required. In addition to an in-depth evaluation of the impact influences, there is a further need for digitization and the recording of existing buildings with regard to specific conditions, including renovation or modernization measures carried out, static load reserves and usage requirements. With the assistance of this data, the assessment of potential is even more detailed and meaningful. In further work, a fully developed "impact tool" could prove to be a groundbreaking analysis tool for the future design of roof areas in Germany.

Einführung

Themenfeld

Die aktuelle Energiekrise zeigt, wie wichtig die Steigerung des Anteils der erneuerbaren Energien an der Gesamtenergieerzeugung Deutschlands ist, um die Unabhängigkeit des Energiemarktes zu wahren. Photovoltaik (PV)-Dächer bilden einen bedeutsamen Baustein der deutschen Strategie zur Energiewende im Stromsektor. Die dezentrale Stromgewinnung aus solarer Energie an Einzelgebäuden zum direkten Verbrauch vor Ort oder zur Einspeisung ins Stromnetz ist mit vielen Vorteilen verbunden und wird über entsprechende Förderinitiativen von Bund, Ländern und Kommunen unterstützt. In einigen Bundesländern, wie z. B. Baden-Württemberg, gilt für Neubauten und bei grundlegenden Dachsanierungen bereits eine Solarpflicht. Deutschlandübergreifend wurden bereits über eine generelle Verpflichtung nachgedacht, da PV-Anlagen auf Dächern eine wirkungsvolle Maßnahme für den Klimaschutz in Deutschland bilden.

Gleichzeitig werden die Folgen des Klimawandels zunehmend spürbar. In urbanen Räumen verschärft die steigende Flächenversiegelung und Nachverdichtung die Notwendigkeit zur Klimawandelanpassung. Eine steigende Anzahl an heißen Tagen, Tropennächten, Hitze- und Dürreperioden in den Sommermonaten verdeutlicht die bestehende stadtklimatische Herausforderung. Neben der Überhitzung sind zunehmend Starkregenereignisse zu beobachten, die aufgrund des begrenzten Volumens der Entwässerungseinrichtungen und des immensen Oberflächenabflusses zu Überflutungen und Schäden im Siedlungsgebiet führen können. Durch die Begrünung von Dächern kann Regenwasser zurückgehalten, Abflussspitzen vermindert und die Kanalisation entlastet werden. Zudem reduziert sich bei einem Gründach die Oberflächentemperatur und durch Verdunstung können Kühleffekte entstehen, sodass eine Dachbegrünung sowohl zur Überflutungs- als auch zur Hitzevorsorge einen Beitrag leistet. Des Weiteren dient sie als Wärmedämmmaßnahme, schützt die Gebäudehülle vor Umwelteinflüssen, fördert den Erhalt der Artenvielfalt, bindet Staub und Schadstoffe, reduziert die Lärmbelastung und verschönert das Wohnumfeld. Dachbegrünungen sind multifunktionale Klimaanpassungsmaßnahmen und werden daher verstärkt von Bund, Ländern und Kommunen gefördert.

Sowohl die Energie- als auch die Begrünungsbranche nutzen geeignete Dachflächen, sodass dort ein steigender Nutzungsdruck entsteht. Die Kombination von PV und Gründach in einem sogenannten PV-Gründach ermöglicht es, eine Konkurrenzsituation zwischen beiden Interessen zu vermeiden und die Vorteile beider Maßnahmen zu vereinen. Es bestehen verschiedene Systemlösungen zur Kombination auf dem Markt, die sich in der Baupraxis bereits bewährt haben, aber aus verschiedenen Gründen noch nicht flächendeckend zum Einsatz kommen.

Es ist ein bundesweites Ziel, den Gebäudebestand in Deutschland klimaneutral und klimagerecht umzugestalten. Die bestehenden Dachflächen bieten hierzu ein großes, aber größtenteils noch ungenutztes Flächenpotenzial für Maßnahmen zum Klimaschutz und zur Klimaanpassung. Im Sinne der Klimagerechtigkeit wird eine optimale Nutzung von Dachfläche im Kontext der jeweiligen Gebäudesituation angestrebt. Hierzu werden für Eigentum innehabende Personen sowie für die kommunale Verwaltung Erkenntnisse benötigt, welche Dachfläche für welche Dachnutzungsanlage besonders geeignet ist und in welcher Gebäudesituation für welche Dachnutzungsanlage die höhere Relevanz besteht. Die Studie will hierzu einen Beitrag leisten.

Untersuchungsgegenstand

Die Maßnahmen Dachbegrünung, PV-Anlagen und PV-Gründach bilden die Untersuchungsgegenstände dieser Arbeit. Der Fokus liegt auf dem Gebäudebestand in Deutschland und den Potenzialen bestehender Dachflächen und Quartiere zur Nachrüstung.

Problemstellung und Ziel

Mit Blick auf die Energiewende in Deutschland ist es Ziel, den Ausbau der erneuerbaren Energien zu steigern und somit auch die Installation von PV-Anlagen auf Dachflächen zur Stromerzeugung voranzutreiben. Einige Bundesländer haben erste Solardachpflichten bereits eingeführt. Gleichzeitig vereint die Begrünung von Dachflächen viele positive Wirkungen zur Hitze- und Überflutungsvorsorge sowie zum Erhalt der Artenvielfalt, sodass die Umsetzung von Dachbegrünungen deutschlandweit gefördert wird. Damit keine Konkurrenz zwischen den Maßnahmen um Dachfläche entsteht, wurden kombinierte PV-Gründachsysteme entwickelt und in der Baupraxis bereits erfolgreich umgesetzt. PV-Gründächer vereinen Klimaschutz und Klimaanpassung, sind jedoch durch die Kombination mit einem höheren finanziellen Aufwand verbunden und stellen höhere bautechnische Voraussetzungen an das Gebäude als die Einzelmaßnahmen.

Im Gebäudebestand besteht an der Gebäudehülle ein großes, größtenteils ungenutztes Flächenpotenzial für Klimaschutz- und Klimaanpassungsmaßnahmen. Zur Erreichung eines klimaneutralen und klimagerechten Gebäudebestands 2045 ist es wichtig, das Flächenpotenzial optimal zu nutzen. Die Nachrüstung von Dachbegrünung, PV-Anlagen und PV-Gründächern im Bestand ist jedoch mit vielen, teilweise unterschiedlichen Herausforderungen und Hemmnissen verbunden.

Kommunale und länderspezifische Gründach- und Solar-Potenzialkataster versuchen über die Verknüpfung ausgewählter Kriterien, insbesondere der Dachneigung mit Gebäudedaten zur Bestandsstruktur erste Aussagen zur Eignung der Dachfläche für die jeweilige Maßnahme zu treffen. Bei näherer Betrachtung zeigt sich, dass die Aussagen verhältnismäßig oberflächlich bleiben und die Eignung einer Dachfläche von einer Vielzahl von Faktoren abhängig ist. Nicht jede Dachfläche eignet sich für jede Dachnutzungsanlage und je nach Gebäudesituation variiert die Relevanz zur Umsetzung einer Maßnahme.

Stand der Forschung/Baupraxis

Dachbegrünungen werden aufgrund ihres Regenwasserrückhalts, zur Förderung der urbanen Artenvielfalt und als hitzemindernde Maßnahme verstärkt in der verbindlichen Bauleitplanung festgesetzt und über Gestaltungssatzungen gefordert. Zudem steigt die Anzahl an Städten, die über Förderprogramme einen finanziellen Anreiz zur Umsetzung von Dachbegrünungen im Bestand schaffen. Der Dachbegrünungsmarkt in Deutschland wächst. Immer mehr Städte stellen Gründach-Bestands- und Potenzialkataster auf, um die eigene Gründach-Entwicklung zu beobachten und erste Aussagen über zukünftige Begrünungsmöglichkeiten im Stadtgebiet treffen zu können.

In Deutschland weiter verbreitet sind bereits Solar-Potenzialkataster, aus denen Eigentum innehabende Personen Informationen zur Eignung ihrer Dachfläche für eine PV-Anlage erhalten können. PV-Dächer bilden einen wichtigen Baustein zur Stromgewinnung aus erneuerbaren Energien und werden aufgrund ihrer Wirtschaftlichkeit vermehrt freiwillig von Eigentum innehabenden Personen umgesetzt. Entsprechende Förderinitiativen von Bund, Ländern und Kommunen haben die Nutzung von PV-Anlagen gesteigert.

Damit die Kombination aus PV und Dachbegrünung für beide Leistungsbereiche nachhaltig funktioniert, ist eine fachgerechte Planung, Ausführung und Instandhaltung notwendig. Ebenso wichtig sind die Berücksichtigung und umfassende Information aller beteiligten Gewerke. Im Bereich der verbindlichen Bauleitplanung ist eine Festsetzung der Kombination von Dachbegrünung mit PV-Anlagen möglich. Bei einem Großteil der Festsetzungen zur Dachbegrünung wird hervorgehoben, dass sich Anlagen zur Nutzung der Solarenergie und Gründächer nicht ausschließen, sondern ergänzen. Von Kommunen gefordert wird die Umsetzung der Kombination vorrangig flächenmäßig übereinander, wobei die PV-

Module aufgeständert und in einem in der Regel auflastgehaltenen Systemaufbau über der vollflächigen extensiven Dachbegrünung angebracht werden. Alternativ ist eine flächenmäßig getrennte Kombination möglich. Hierbei werden für die Dachbegrünung oftmals höhere Schichtaufbauten gefordert, um ausgleichend zum Flächenverlust eine höhere regenwasserwirtschaftliche Wirkung und mehr Biodiversität zu schaffen. Auch in den neu ausgearbeiteten kommunalen Begrünungs- oder Freiflächengestaltungssatzungen wird das PV-Gründach bereits mitgedacht. Immer mehr kommunale Förderprogramme integrieren einen Zuschuss für die Kombination von Dachbegrünung mit PV-Anlagen, um die Mehrkosten der Installation beider Systeme abzumildern. Dabei findet die Berücksichtigung des PV-Gründachs sowohl bei energiebezogenen Klimaschutzprogrammen als auch bei begrünungsbezogenen Klimaanpassungsprogrammen statt. Möglich ist ebenfalls die Nachrüstung einer PV-Anlage auf einem bestehenden Gründach oder die nachträgliche Begrünung eines PV-Dachs. Die Umsetzbarkeit ist jedoch objektspezifisch zu prüfen. Ein kombiniertes PV-Gründach-Potenzialkataster ist bislang noch nicht bekannt.

Forschungslücke/Entwicklungsbedarf

Innerhalb des Projektes werden eine Vielzahl von Aspekten von PV-, Gründach- und PV-Gründach-Anlagen betrachtet und es sollen Anhaltspunkte für die jeweiligen Eignungsgebiete gegeben werden. Dabei ist es Ziel, einige Forschungsfragen, die derzeit auch in Bezug auf die Kombination von PV-Gründächern bestehen, zu beantworten:

- Welche Dachflächen sind für welche Nutzung (PV-, Gründach und PV-Gründach) besser geeignet?
- Gibt es Gebäudesituationen, die sich besonders gut für eine Umnutzung der Dachflächen eignen?
- Welche technischen Möglichkeiten gibt es und welche wirtschaftlichen Konsequenzen sind damit verbunden? Welche Besonderheiten ergeben sich im Bestand?
- Welche Nutzungskonkurrenzen könnten situationsbedingt entstehen?
- In welchen Fällen einer Dachsanierung sollte über eine PV-Anlage und/oder Dachbegrünung nachgedacht werden?
- Welche Rolle spielen rechtliche Aspekte, Eigentumsverhältnisse, Statik und Brandschutzanforderungen bei deiner Umnutzung der Dachfläche?
- Wie können Bewertungen für die Entscheidungsfindung vorgenommen werden (Mikro- und Makrobetrachtung)?
- Wie kann eine gebäudeübergreifende Strategie aussehen, sodass PV- und Gründächer nicht in Konkurrenz zueinander stehen?
- Wie kann die Umsetzung in der Praxis gelingen und vermehrt werden?

Übergeordnetes Ziel und Teilziele

Übergeordnetes Ziel dieses Forschungsprojektes ist es, einen Beitrag zu einem in Zukunft klimaneutralen und klimagerechten Gebäudebestand in Deutschland zu leisten. Es wird eine Strategie erarbeitet, wie ein klimaoptimiertes Miteinander von Photovoltaik und Gründächern im Gebäudebestand gelingen kann.

Im Rahmen des Projektes wird eine Bewertungsmethode entwickelt, mit deren Hilfe die aus unterschiedlichen bestehenden Gebäudesituationen und technischen Möglichkeiten Relevanz und Eignung von PV-Anlagen und Gründächern sowie PV-Gründächern für Dachflächen abgeschätzt werden kann. Neben der Betrachtung auf der Gebäudeebene werden die Bewertungsergebnisse auch auf einen größeren städtebaulichen Kontext übertragen und die optimale Nutzung von Dachflächen bundesweit

diskutiert. Ein weiteres Teilziel stellt Empfehlungen für die relevanten Akteure, wie Gebäudeeigentum innehabende Personen, Planende, Ausführende und Entscheidungstragende in der Verwaltung zur Förderung klimagerechter Dachflächen dar. Der Bericht wird mit einer Empfehlung für eine digitale Informationsseite für die Neunutzung von Dachflächen schließen, in der unter anderem die Ergebnisse aus der Studie präsentiert werden.

Forschungsdesign

Projektteam und Organisation, Kooperationspartner

Das Projektteam bestand aus dem Bundesverband GebäudeGrün e. V. (BuGG) und dem Institut für ökologische Wirtschaftsforschung GmbH (IÖW).

Arbeitshypothesen

- Nicht jede Dachfläche eignet sich zur Nachrüstung von Dachbegrünung und/oder PV.
- Bestimmte Dachflächen eignen sich eher zur Umsetzung von Dachbegrünung, andere eher zur Umsetzung von PV oder einem PV-Gründach.
- Unter Einbeziehung der Quartiersituation ergeben sich zusätzliche Anforderungen an die Nutzung von Dachflächen, die bei der Entscheidung über die Umsetzung als Dachbegrünung, PV oder einem PV-Gründach zukünftig an Gewicht gewinnen sollten.

Arbeitsschritte (AS) und Meilensteine

- AS1 – Analyse verschiedener Gebäudesituationen und Vorteile einer gebäudeübergreifenden Betrachtung
- AS2 – Kategorisierung geeigneter Dachflächen und Gebäudesituationen
- AS3 – 1. Zwischenbericht (Meilenstein)
- AS4 – Technische Möglichkeiten und damit verbundene wirtschaftliche Konsequenzen
- AS5 – Entwicklung einer Bewertungsmethodik als Mikro- und Makrobetrachtung
- AS6 – 2. Zwischenbericht (Meilenstein)
- AS7 – Vorschläge zur Umsetzung von Nutzungsstrategien in die Praxis und Analyse etwaiger Hemmnisse
- AS8 – Lösungsansätze und Handlungsempfehlungen
- AS9 – Materialien und Konzeption zum Aufbau eines Informationsportals

Methodischer Ansatz

Das Forschungsprojekt umfasste mehrere Arbeitsschritte:

AS1

- Literaturrecherche zu verschiedenen Gebäudesituationen in Deutschland mit der sich daraus ergebenden Kategorisierung und Eingrenzung (Quartiersebene)
- Stand der Bautechnik vorhandener PV- und Gründachsysteme und Ableitung von Indikatoren zur Eignung als Gründach und als PV-Dach (Gebäudeebene)

AS2

- Priorisierung der Indikatoren zur Evaluation der Wichtigkeit
- Quantitative und qualitative Bewertung der Indikatoren auf Quartiersebene zur Ermittlung der Relevanz hinsichtlich der Umsetzung von PV- und Gründächern
- Qualitative Bewertung der Indikatoren zur Eignung als PV- und Gründach auf Gebäudeebene

- Fokussierung im Projekt auf priorisierte Quartierstypen und Dachflächen (hohe Relevanz und gute Eignung)

AS4

- Literaturrecherche der vorliegenden Erkenntnisse bezüglich der technischen Möglichkeiten und Erfahrungen von PV-Anlagen, Gründächern und PV-Gründächern
- Zusammentragung der für PV-Anlagen, Gründächer und PV-Gründächer technischen und wirtschaftlichen Aspekte, deren Instandhaltungsaufwand und Vor- und Nachteile
- Diskussion der Ausweichmöglichkeit auf die Fassade

AS5

- Entwicklung von Indikatoren anhand von Literatur- und Datenrecherchen zur möglichst quantitativen Bewertung der Wirkung konkreter Dachflächen in der Ausführung als Gründach, PV-Gründach oder PV-Dach
- Umsetzung der beschriebenen Indikatoren in Form eines einfach bedienbaren Excel-Tools ("Wirk-Tool")

AS7

- Beantwortung von Fragestellungen für die verbesserte Umsetzung von Dachnutzungstypen
- Aufzeigen von Hemmnissen zur Umsetzung der Dachnutzungstypen

AS8

- Entwicklung von Lösungsansätzen für die in AS7 aufgezeigte Hemmnisse
- Erarbeitung von Handlungsempfehlungen für Akteure zur verbesserten Umsetzung von Dachnutzungstypen

AS9

- Konzeption eines Informationsportals für die Umsetzung von Dachnutzungstypen
- Eignungsprüfung bestehender Portale
- Aufbereitung der Erkenntnisse aus dem Gutachten

Arbeitsschritte

AS1 - Analyse verschiedener Gebäudesituationen und Vorteile einer gebäudeübergreifenden Betrachtung

Ziel des AS1 war es, Indikatoren auf Quartiers- und Gebäudeebene zu entwickeln, die später für die Relevanz und Eignung einer Dachfläche als PV-Dach, Gründach oder PV-Gründach herangezogen werden können. Hierzu sollten unterschiedliche städtebauliche Situationen, Gebäudenutzungen und Eigentumsstrukturen analysiert werden, um Rückschlüsse auf ihr Potenzial zur Umsetzung der genannten Dachnutzungsanlagen zu erhalten.

Art der baulichen Nutzung nach Baunutzungsverordnung (BauNVO)

Über die Baunutzungsverordnung (BauNVO) wurde die bauliche Nutzung von Grundstücken geregelt (Söfker 2022).

Es werden folgende Bauflächenarten unterschieden:

- Wohnbaufläche (W),
- Gemischte Bauflächen (M),
- Gewerbliche Bauflächen (G) und
- Sonderbauflächen (S).

Darauf aufbauend werden folgende Baugebiete differenziert:

- Kleinsiedlungsgebiete (WS),
- Reine Wohngebiete (WR),
- Allgemeine Wohngebiete (WA),
- Besondere Wohngebiete (WB),
- Dorfgebiete (MD),
- Dörfliche Wohngebiete (MDW),
- Mischgebiete (MI),
- Urbane Gebiete (MU),
- Kerngebiete (MK),
- Gewerbegebiete (GE),
- Industriegebiete (GI) und
- Sondergebiete (SO).

Die einzelnen Baugebiete werden in §§2 bis 11 BauNVO genauer beschrieben. Die Art der Bebauung ist abhängig von der spezifischen Nutzung eines Baugebiets. So dienen beispielsweise Kleinsiedlungsgebiete vorwiegend dem Wohnen und der landwirtschaftlichen Nutzung. Dementsprechend sind dort vor allem Wohngebäude mit entsprechenden Nutzgärten, landwirtschaftlichen Nebenerwerbsstellen und Gartenbaubetrieben vorzufinden. In Gewerbegebieten hingegen befinden sich die Gebäude von Gewerbebetrieben und notwendiger Infrastruktur, wie z. B. Geschäfts-, Büro- und Verwaltungsgebäude, Lagerhallen und Tankstellen. Über die bauliche Nutzung eines Stadtgebiets lassen sich bereits Erkenntnisse zur städtebaulichen Situation, Gebäudetypen und

Eigentumsstrukturen ableiten. Die Differenzierung nach BauNVO dient als Grundlage für die folgende Betrachtung der Stadtstrukturtypen.

Differenzierung in Stadtstrukturtypen

Stadtstrukturtypen fassen urbane Räume zusammen, die eine ähnliche Bebauungs-, Freiraum- und Vegetationsstruktur aufweisen. Neben ihren Bestandteilen ist auch das Anordnungsmuster, das sie bilden, von Bedeutung (Breuste et al. 2016).

Je nach Stadtstrukturtyp ergeben sich unterschiedliche Potenziale zur Umsetzung von PV-Anlagen, Dachbegrünung und PV-Gründächern. Neben der baulichen Nutzung spielen auch Faktoren wie das Baualter, die Baustruktur (Höhe, Dichte und Anordnung der Gebäude) sowie die Beschaffenheit der umliegenden Freiflächen (Versiegelung und Begrünung) eine Rolle. Für eine deutschlandweite Betrachtung von Stadtstrukturtypen bestehen verschiedene Herausforderungen. Zum einen gibt es große regionale Unterschiede aufgrund von Topografie und Bautradition. So weist ein bayerisches Dorf in einer alpinen Region eine andere Art der Bebauung auf als ein Küstendorf in Schleswig-Holstein. Die Ausprägung der Stadtstrukturtypen variiert daher von Kommune zu Kommune. Zum anderen kann der Pauschalisierungsgrad eines Stadtstrukturtyps nicht alle baulichen Details eines Einzelgebäudes oder Besonderheiten eines Siedlungsgebiets abdecken, sodass die Kategorisierung anhand ausgewählter Parameter abstrakt bleibt. Der Baubestand einer Stadt wird daher nur näherungsweise abgebildet. Die Differenzierung der Stadtstruktur in Stadtstrukturtypen ermöglicht es Kommunen jedoch, Masterpläne und großmaßstäbliche Konzepte für zukünftige Entwicklungen im Bereich der Stadt- und Landschaftsplanung systematisch und schnell zu erarbeiten.

Beispiel Stadtstrukturtypen (Flächentypen) Berlin

Als aktuelle Datengrundlage für Berlin dient die Kartierung zur „Flächennutzung und Stadtstruktur“ von 2020, die flächendeckend die reale Flächennutzung der Stadt darstellt. Unterschieden wird in Flächennutzungen der bebauten Flächen, Grün- und Freiflächen, sowie Verkehrs- und sonstige Flächen. Im Laufe der städtebaulichen Entwicklung Berlins ist eine vielschichtige Bau- und Freiraumstruktur entstanden. Es werden insgesamt 52 verschiedene Flächentypen unterschieden (vgl. Berliner Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Wohnen 2021).

Für dieses Projekt sind 34 Flächentypen der Gruppe I, II und III mit Bebauung von Interesse. Die relevanten Flächentypen werden in Tabelle A 1, Tabelle A 2 und Tabelle A 3 im Anhang dargestellt.

Energetische Stadtraumtypen

Dettmar et al. (2020) haben strukturelle und energetische Kennwerte von Stadträumen zusammengetragen und energetische Stadtraumtypen abgeleitet. Die veröffentlichten Ergebnisse basieren auf dem Forschungsprojekt UrbanReNet Phase I und II (2009–2014) sowie deren Anwendung in verschiedenen Forschungsprojekten an der TU Darmstadt (2014–2018). Zu den Zielen gehörte es, städtische Quartiere anhand verschiedener Parameter hinsichtlich ihrer energetischen Bedarfe und Energieerzeugungspotenziale zu untersuchen, um eine Basis für Konzepte zur Steigerung der Energieeffizienz zu erarbeiten. Dadurch soll ein Beitrag für eine intelligente Vernetzung bestehender Ressourcen und eine ausgeglichene Energiebilanz im Quartier geleistet werden. Die ermittelten Stadtraumtypen wurden in Steckbriefen typologisch, energetisch und auch stadtklimatisch charakterisiert.

Im Rahmen des Forschungsprojekts UrbanReNet konnten für den deutschen Gebäudebestand 25 energetische Stadtraumtypen (EST) erfasst werden. Diese teilen sich ein in Siedlungs-, Straßen- und Freiräume und werden ergänzt durch 23 energetische Einzelmaßnahmen (EE), wie Schwimmbäder und Schulen.

Für diese Studie stehen zehn EST der Siedlungsräume inklusive deren Untertypen im Fokus, sie dienen als Grundlage für die weiteren Untersuchungen. Die EST werden entsprechend Dettmar et al. (2020) im Folgenden näher definiert.

Energetische Stadtraumtypen mit überwiegender Wohnnutzung

EST1 – kleinteilige, freistehende Wohnbebauung niedriger bis mittlerer Geschossigkeit

Der EST1 ist geprägt von 1–3-geschossiger Wohnbebauung mit Ein- und Mehrfamilienhäusern in offener Einzel- oder Doppelhausbauweise. Eine weitere Differenzierung erfolgt in EST1a, bestehend aus Ein- und Zweifamilienhäusern sowie EST1b, bestehend aus Mehrfamilienhäusern. Die Parzellierung der Grundstücke ist kleinteilig und die Einwohnerdichte gering. Die Bebauung orientiert sich an einem dichten und regelmäßigen Straßennetz. Straßenseitig sind PKW-Parkplätze, Carports und Vorgärten zu finden, während sich hinter dem Wohngebäude der Hausgarten mit Nebengebäuden wie Gartenhäusern befindet. Der Versiegelungsgrad ist niedrig, die Bebauungsdichte gering und der Begrünungsanteil hoch. Die sommerliche Überwärmung fällt dementsprechend gering aus.

EST2 – Reihenhausbebauung

Der EST2 ist gekennzeichnet durch reine Wohnnutzung mit Reihenhausbebauung. Die 3–5-geschossigen Einfamilienhäuser sind aneinandergereiht, müssen aber nicht in einer Baulinie liegen. Die Fassaden sind durch die Eigentümern innehabenden Personen oftmals unterschiedlich ausgebildet. Im Verhältnis zu EST1 ist die Parzellierung kleinteiliger und die Gebäudegrundfläche geringer, sodass die Bebauungsdichte zunimmt. Im vorderen Bereich der Parzelle befindet sich die Vorgartenzone und im hinteren ein nicht einsehbarer Hausgarten. Die Erschließung erfolgt über Anliegerstraßen und schmale Gartenwege. Der Versiegelungsgrad ist niedrig und der Begrünungsanteil hoch. Durch die kleinere Parzellierung sind die Hausgärten jedoch kleiner und oftmals strukturärmer als bei der freistehenden Wohnbebauung. Wie EST1 gehört EST2 zu den stadtklimatisch weniger belasteten Stadträumen.

EST3 – Zeilenbebauung niedriger bis mittlerer Geschossigkeit

Der EST3 zeichnet sich durch reine Wohnnutzung mit 4–6-geschossiger Zeilenbebauung aus. Es handelt sich um zeilenförmige Mehrfamilienhäuser, die in größeren Abständen zueinander angeordnet sind und zusammenhängende Nutzungseinheiten bilden. Eigentümern innehabende Personen sind meist Genossenschaften und Wohnungsbaugesellschaften. Das Straßen- und Wegesystem führt grobmaschig durch den halböffentlichen Freiraum und wird von parallel anliegenden Parkplätzen flankiert. Die Baualterklasse der meisten Zeilenbebauungen liegt in der Nachkriegszeit (1948–1958). Die zusammenhängende Außenanlage wird gemeinschaftlich genutzt, ist jedoch häufig durch monotone Rasenflächen mit Gehölzbeständen geprägt. Eine höhere Baumasse und große, verdichtete Parkplatzflächen führen im Sommer punktuell zu einer stärkeren Überwärmung als bei EST1 und EST2 bei.

EST4 – Großmaßstäbliche Wohnbebauung hoher Geschossigkeit

Der EST4 besteht aus großmaßstäblichen, unregelmäßig und weitläufig angeordneten 7–16-geschossigen Mehrfamilienhäusern mit Flachdächern. Eine weitere Differenzierung erfolgt in EST4a Ketten- und Zeilenhochhäuser sowie EST4b Punkthochhäuser. Die Nutzung ist überwiegend dem Wohnen zuzuordnen. Die Baukörper verteilen sich in einer weitläufig begrünten Freifläche von teilweise mehreren Hektar, die mit Fußwegen, Spielplätzen und weiteren Freiraumnutzungen ausgestattet ist. An die Zufahrtsstraßen sind große Parkplatzflächen angegliedert. Großwohnsiedlungen wurden überwiegend in den 1960er, 1970er und 1980er Jahren an Rändern von Groß- und Mittelstädten als eigenständige Siedlungen errichtet. Wie bei EST3 führen die großen Parkplatzflächen und die hohe Baumasse zu einer stärkeren Ausprägung des Wärmeinseleffekts im Sommer, der vor allem im Bereich der Erschließungsstraßen zu einer thermischen Belastung beiträgt.

EST5 – Blockrandbebauung

Der EST5 ist geprägt von 3–6-geschossigen Mehrfamilienhäusern in oftmals geschlossener Bauweise als Blockrandbebauung. Es überwiegt die Wohnnutzung, im Erdgeschoss können jedoch Gewerbe- und Büroflächen vorhanden sein. In der Regel grenzen die Gebäude direkt an den Gehweg, in manchen Quartieren sind repräsentative Vorgärten zu finden. Im Blockinneren liegen Höfe, die gartenähnlich oder auch versiegelt gestaltet sein können. Zum Teil befinden sich dort untergeordnete 1-geschossige Gebäude wie Garagen und Werkstätten. Die straßenseitigen Fassaden sind je nach Baualtersklasse reich ornamentiert und pro Gebäude individuell gestaltet. Zum Hof sind die Fassaden häufig schlicht und funktional ausgebildet. Die Dachlandschaft ist mit Gauben, Erkern, Vor- und Rücksprüngen sowie Brandwandüberständen sehr differenziert. Während EST1 bis 4 über einen hohen Freiflächenanteil verfügen, ist dies bei der Blockrandbebauung nicht der Fall. Die dichte Bebauung, der hohe Versiegelungsgrad und der geringe Grünflächenanteil führen zu einer starken Überwärmung und hohen thermischen Belastung im Sommer.

Energetische Stadtraumtypen mit überwiegender Mischnutzung

EST6 – dörfliche Bebauung

Der EST6 ist gekennzeichnet durch eine gewachsene, dichte und heterogene Bebauung aus freistehenden oder über Höfe verbundenen 1,5–2,5-geschossigen Ein- und Mehrfamilienhäusern, die in offener oder geschlossener Bauweise entlang der Straßen stehen. Das Straßennetz besteht aus einer Hauptstraße mit abzweigenden Nebenstraßen. Heute ist die Wohnnutzung vorherrschend, während früher auch landwirtschaftliche Nutzung bestimmend war, sodass EST6 von Wohn- und Wirtschaftsgebäuden geprägt ist. Die Bebauungsstruktur findet sich vor allem im ländlichen Raum. Der Dorfkern weist eine hohe Bebauungsdichte mit geringem Freiflächenanteil auf, der sich zum Siedlungsrand auflockert und in den EST1 übergeht. Aufgrund von umliegenden land- und forstwirtschaftlichen Flächen und der geringen Siedlungsgröße (meist unter 5.000 Einwohner) von dörflicher Bebauung weist EST6 keinen ausgeprägten Wärmeinseleffekt auf.

EST7 – historische Altstadtbebauung

Der EST7 zeichnet sich durch eine gewachsene, dichte Bebauung aus 2,5–6-geschossigen Mehrfamilienhäusern aus, die entlang von engen Gassen und Straßen geschlossene Baulinien bilden. Im Stadtraum ist eine Mischnutzung aus Wohnen, Einzelhandel und Gastronomie sowie öffentlichen Einrichtungen und Büroflächen zu finden. Viele Gebäude sind Fachwerkbauten und stammen überwiegend aus der Baualtersklasse vor 1918, weshalb sie heute größtenteils unter Denkmal- oder Ensembleschutz stehen. Die Dachlandschaft wird durch Gauben, Erker und Schornsteine bestimmt. Der Stadtraum ist kleinteilig und heterogen parzelliert. Plätze und Hinterhöfe bilden versiegelte Freiflächen, wohingegen öffentliche Grünflächen selten sind. Durch die hohe bauliche Dichte, den hohen Versiegelungsgrad, die fehlenden Grünflächen und die innerstädtische Lage ist die stadtklimatische Belastung in EST7 in den Sommermonaten sehr hoch.

EST8 – Innenstadtbebauung Großstadt

Der EST8 beschreibt das urbane Zentrum von Großstädten, das sich durch eine hohe Bebauungsdichte und großmaßstäbliche Gebäude in geschlossener Bauweise auszeichnet. Eine weitere Differenzierung erfolgt in EST8a Innenstadtbebauung Mittelstadt sowie EST8b Innenstadtbebauung Kleinstadt. Mit zunehmender Stadtgröße steigt gegenüber dem Wohnen der Anteil der Nutzung im Gewerbe-, Handel- und Dienstleistungsbereich (GHD). Grünstrukturen finden sich häufig nur als flankierende Baumpflanzungen. Durch einen Versiegelungsgrad von annähernd 100%, die großen Baumassen und die zentrale Lage bildet die Innenstadt den stärksten Wärmeinseleffekt aus.

EST9 – Geschäfts-, Büro- und Verwaltungsgebiet

Der EST9 besteht aus einer Mischung von 5–10-geschossigen, freistehenden Büro- und Verwaltungsgebäuden sowie Hallen- und Sonderbauten niedriger Geschossigkeit. Es finden sich Gebäude unterschiedlicher Baualtersklassen und Anordnungsformen, sodass der Stadtraum heterogen und ungegliedert wirkt. Die Erschließung erfolgt durch ein Netz aus Nebenstraßen, die durch Baumpflanzungen flankiert werden. Im Außenraum sind große Parkplatzflächen vorhanden, die zu einem Versiegelungsgrad von ca. 70% führen. Unversiegelte Bereiche sind relativ strukturarm mit Rasenflächen und niedrigen Gehölzen bewachsen. Straßenseitige Grünflächen können repräsentativ gestaltet sein. Die Parzellengröße ist verhältnismäßig groß. Der EST9 ist typischerweise am Stadtrand zu finden. Die stadtklimatische Belastung kann im Sommer bei hoher Versiegelung ausgeprägt sein, ist jedoch aufgrund der Randlage und der stärkeren Durchgrünung geringer als bei der Innenstadtbebauung.

Energetische Stadtraumtypen mit überwiegender Büro- und gewerblicher Nutzung

EST10 – Gewerbegebiet

Der EST10 ist geprägt von 1-geschossigen Hallenbauten und 2–3-geschossigen Büro- und Verwaltungsgebäude. Großmaßstäbliche Lager-, Vertriebs- und Produktionshallen sind vorherrschend. Eine weitere Differenzierung erfolgt in EST10a hallenförmige Gewerbebauten sowie EST10b zeilenförmige Gewerbebauten. Die Parzellengröße kann je nach GHD-Betrieb stark variieren. Die Gebäudefassaden sind in der Regel funktional reduziert ausgebildet. Gewerbegebiete befinden sich häufig an gut erschlossenen Verkehrsknotenpunkten (Autobahn, Bahngleise, Schifffahrtswege) und sind durch ein großmaschiges Straßennetz gegliedert. Die Freiflächen werden als Stellplätze sowie Lager- und Rangierflächen genutzt, sodass der durchschnittliche Versiegelungsgrad bei 80% liegt. Unversiegelte Bereiche werden zumeist als pflegeextensive Rasen- oder Wiesenflächen ausgebildet. Baumpflanzungen finden sich im Straßenraum. Aufgrund der höheren Versiegelung und dem geringeren Grünanteil trägt der EST10 stärker zum Wärmeinseleffekt bei als der EST9.

Kategorisierung von Gebäudetypen

Gebäudetypen können grundsätzlich anhand ihrer Nutzung in Wohngebäude und Nichtwohngebäude unterteilt werden. Bei den Nichtwohngebäuden wird zusätzlich zwischen beheizt und unbeheizt unterschieden. Wohngebäude sind in den Stadtraumtypen mit überwiegender Wohnnutzung (EST1–5) oder Mischnutzung (EST6–8) zu finden. Nichtwohngebäude stehen hingegen vor allem in Stadtraumtypen mit überwiegender Büro- und gewerblicher Nutzung (EST9-10) sowie Mischnutzung (EST6–8).

Wohngebäude

Das Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU) hat 2015 im Rahmen der EU-Projekte TABULA - Typology Approach for Building Stock Energy Assessment und EPISCOPE - Energy Performance Indicator Tracking Schemes for the Continuous Optimisation of Refurbishment Processes in European Housing Stocks eine Veröffentlichung zur deutschen Wohngebäudetypologie herausgebracht. Darin werden beispielhaft Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden dargestellt.

Das Bauen unterliegt einem fortwährenden Prozess der Anpassung und Weiterentwicklung. Die Einführung neuer Techniken, neuer Materialien und neuer Richtlinien aber auch Änderungen bezüglich Nutzungsanforderungen und Ästhetik haben in Deutschland zu einem heterogenen Gebäudebestand geführt, der sich auch in den Wohngebäuden widerspiegelt. Der historisch gewachsene Wohngebäudebestand lässt sich anhand verschiedener Parameter kategorisieren und anhand summierter typischer Eigenschaften in Gebäudetypen einteilen. Zu diesen Parametern gehören u. a. Gebäudealter, Gebäudegeometrie, Gebäudegröße, Anteil einzelner Bauflächen (Dach, Fassade, Geschossflächen, Fenster) am Gesamtgebäude, Neben- und Nachbargebäude und Schutzbestimmungen (Denkmal, Ensemble). Die Charakterisierung eines Gebäudetyps bezieht sich auf ein generiertes „Durchschnittsgebäude“ (Loga et al. 2015). In der Veröffentlichung wurde der deutsche Wohngebäudebestand anhand seiner energierelevanten Merkmale nach Baualtersklassen und Größenklassen in einer Haustypenmatrix dargestellt.

Die Größenklassen teilen sich ein in:

- Einfamilienhaus (EFH): Freistehende Wohngebäude mit 1 bis 2 Wohnungen,
- Reihenhauses (RH): Wohngebäude mit 1 bis 2 Wohnungen als Doppelhaus, gereihtes Haus oder sonstiger Gebäudetyp,
- Mehrfamilienhaus (MFH): Wohngebäude mit 3 bis 12 Wohnungen,
- Großes Mehrfamilienhaus (GMH): Wohngebäude mit 13 oder mehr Wohnungen und
- Hochhaus (HH)

Die Baualtersklassen orientieren sich an elf Bau-Epochen (bezeichnet als Baualtersklassen A – K), die sich durch verschiedene Merkmale auszeichnen.

Die Gebäudetypen werden innerhalb der Baualtersklassen in Basis- und Subtypen gegliedert. Jedes deutsche Wohngebäude kann einem von 39 Basis-Typen zugeordnet werden, die Typologie bildet jedoch nur ein grobes Raster zur Einordnung. Die Subtypen beschreiben Sonderfälle, die in bestimmten Regionen vorkommen oder baukonstruktive Alternativen darstellen. Hierzu gehören beispielsweise das Schwarzwaldhaus und das Fachwerkhaus.

Mit dem Zensus 2010 konnten Gebäude- und Wohnungszählungen für Gebäudetypen bis zur Baualtersklasse J (Gebäude bis Baujahr 2009) durchgeführt werden. Diese Datengrundlage bietet die Möglichkeit, Aussagen zur Häufigkeit einzelner Gebäudetypen in Deutschland zu treffen. Zum Zensusstichtag am 09.05.2011 konnte ein Bestand von ca. 18.368.000 Wohngebäuden mit ca. 39.432.000 Wohnungen und einer Wohnfläche von ca. 3,575 Mrd. m² festgestellt werden. Stand Mai 2011 nahmen

die EFH mit 55% den höchsten Anteil am deutschen Wohngebäudebestand ein, gefolgt von RH mit 28%, MFH mit 17% und GMH mit 1%. Eine andere Reihenfolge ergibt sich bei der Betrachtung der Anzahl von Wohnungen. Hier haben die MFH mit 42% den höchsten Anteil, gefolgt von EFH mit 31%, RH mit 15% und GMH mit 12%. Den höchsten Anteil an der Gesamtwohnfläche in Deutschland haben wieder die EFH mit 41%, während MFH bei 33%, RH bei 18% und GMH bei 8% liegen.

Geordnet nach Baualtersklassen (BK) ist der Wohngebäudebestand in Deutschland wie folgt aufgeteilt: BK A (bis 1860) 3%, BK B (1860–1918) 11%, BK C (1919–1948) 12%, BK D (1949–1957) 9%, BK E (1958–1968) 15%, BK F (1969–1978) 14%, BK G (1979–1983) 7%, BK H (1984–1994) 12%, BK I (1995–2001) 11% und BK J (2002–2009) 7%. Dabei zeigt sich, dass zwischen 1958 und 1987 (BK E und F) das größte Bauvolumen im Gebäudebestand entstanden ist.

In Bezug auf die Dachtypen bei Altbauten, die bis Baujahr 1978 definiert werden, kann festgehalten werden, dass diese zu 91,3% als Steildächer und zu 8,7% als Flachdächer ausgebildet wurden.

Nichtwohngebäude

Das ehemalige Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) hat in einer Online-Publikation aus dem Jahr 2013 die Ergebnisse des ZukunftBau-Projektes „Systematische Datenanalyse im Bereich der Nichtwohngebäude-Erfassung und Quantifizierung von Energieeinspar- und CO₂-Minderungspotenzialen“ veröffentlicht. Ziel war es, Kenntnisse über den Umfang, die Struktur und die Veränderungsdynamik im Gebäudebestand mit dem Fokus auf Nichtwohngebäude zu ermitteln. Dabei wurde eine Typologie der Nichtwohngebäude entwickelt, um ihren Anteil am Bestand und ihre energetischen Qualitäten sowie Energieeinsparpotenziale abzuschätzen (vgl. BMVBS 2013).

Nichtwohngebäude sind sehr heterogen und unterscheiden sich zunächst anhand ihrer Nutzung sowie gebäudespezifisch nach Gebäudegeometrie, Bauweise und Baualter. Für die Typologie der beheizten Nichtwohngebäude wurden anhand von Daten aus Katasterinformationssystemen (Geobasisdaten aus ALK und ALKIS) acht Nutzungsklassen 1. Ordnung herausgestellt, die sich wiederum in 23 Klassen 2. Ordnung unterteilen. In einer weiteren Nutzungsklasse wurden die unbeheizten Nichtwohngebäude in folgende vier Klassen 2. Ordnung differenziert: Gebäude für Land- und Forstwirtschaft, der technischen Erschließung/Infrastruktur, der verkehrlichen Erschließung/Infrastruktur und sonstige Nichtwohngebäude. Diese sind aus energetischer Sicht jedoch weniger betrachtungsrelevant.

Für die Bundesländer Baden-Württemberg, Brandenburg, Bremen und Sachsen-Anhalt konnten aufgrund der geeigneten Datenlage mengenmäßige Abschätzungen zum Bestand an Nichtwohngebäuden getroffen werden. In den vier Bundesländern konnte ein Bestand von insgesamt 9.734.839 Gebäuden mit einer Gesamtfläche von 1.174.355.786 m² ermittelt werden. Davon fallen 46,89% des Gebäudebestands auf Wohn-, Heimgebäude sowie Wochenendhäuser (nicht EnEV-relevante Gebäude), 6,41% auf beheizte Nichtwohngebäude sowie 46,70% auf unbeheizte Nichtwohngebäude. Bezogen auf die Fläche haben die nicht EnEV-relevanten Gebäude mit 46,32% den größten Anteil, gefolgt von unbeheizten Nichtwohngebäuden mit 31,79% und den beheizten Nichtwohngebäuden mit 21,89%.

Insgesamt konnten 623.811 Gebäude als beheizte Nichtwohngebäude definiert werden mit einer Gebäudegrundfläche von insgesamt 257,1 Mio. m². Bezogen auf die Gebäudegrundfläche bildet die Nutzungsklasse der Gewerbe- und Industriegebäude mit 55% den höchsten Anteil, gefolgt von Handels- und Dienstleistungsgebäuden mit 14%, Büro- und Verwaltungsgebäuden mit 9% sowie Bildungsgebäuden mit 8%. Es wird geschätzt, dass der Gesamtbestand an beheizten Nichtwohngebäuden in Deutschland bei ca. drei Millionen Objekten liegt.

Neuere Daten des Projekts ENOB:dataNWG, welches sich um eine bundesweite Typologie der Nichtwohngebäude bemühte, weisen eine Gesamtanzahl gebäudeenergiegesetzrelevanter Nichtwohngebäude von ca. 2 Mio. mit einer geschätzten Bruttogeschossfläche von 3,5 Mrd. m² aus

(Hörner et al. 2022). Im Verhältnis zur aus 2010 ermittelten Wohnfläche (3,575 Mrd. m²) entspricht dies annähernd einem Verhältnis von 50 zu 50 Prozent des Flächenanteils.

Ableitung von Indikatoren zur Relevanz und dem Potenzial von PV-Anlagen, Gründächern und PV-Gründächern (Quartiersebene)

Aus den Recherchen zu Stadtstruktur- und Gebäudetypen konnten auf Quartiersebene folgende Indikatoren abgeleitet werden, die einen Einfluss auf das Potenzial und die Relevanz hinsichtlich der Umsetzung von PV-Anlagen, Gründächern und PV-Gründächern haben.

Kumulierte Dachfläche

Die kumulierte Dachfläche zeigt das Flächenpotenzial eines Quartiers an. Je höher, desto mehr Fläche steht zur Umsetzung von PV-Anlagen, Gründächern oder PV-Gründächern theoretisch zur Verfügung. Messbar wird dieser Indikator über die durchschnittliche Gebäudegrundfläche in Quadratmetern und die Anzahl der Gebäude pro Hektar eines Quartiers.

Mittlere Dachfläche

Über die mittlere Dachfläche kann eine Aussage zum wirtschaftlichen Potenzial für ein Gründach und im geringeren Maße auch für ein PV-Dach getroffen werden, denn die spezifischen Herstellungskosten pro Quadratmeter oder pro Kilowattpeak steigen bei kleinen Flächen. Messbar wird dieser Indikator über die durchschnittliche Gebäudegrundfläche in Quadratmetern.

Bevölkerungsdichte

Der Indikator Bevölkerungsdichte ist insbesondere aus energetischer Sicht zur Abschätzung des Energieverbrauchs wichtig, der wiederum zur Ermittlung des Bedarfs an Energieerzeugungskapazitäten hinzugezogen wird. Denn je höher die Bevölkerungsdichte in einem Quartier ist, desto höher ist der Energieverbrauch und der Bedarf an Energieerzeugung vor Ort, aber desto geringer ist das Verhältnis von Dachfläche zu Einwohnerzahl. Eine hohe Bevölkerungsdichte erhöht zudem aufgrund hoher Betroffenheit die Notwendigkeit von Klimaanpassungsmaßnahmen zur Hitze- und Überflutungsvorsorge und somit die Notwendigkeit zur Begrünung. Gemessen wird dieser Indikator über die Einwohnerzahl pro Quadratmeter.

Quartiernutzung (energetisch)

Je nach Quartiersnutzung ergeben sich unterschiedliche Energieverbrauchsprofile, bei denen Energieerzeugung und Energieverbrauch optimal aufeinander abzustimmen sind. Hierbei wird generell nach Wohnquartier, Mischquartier sowie Büro- und Gewerbegebiet unterschieden. Während das Verbrauchsprofil von Wohnquartieren typische Morgens- und Abendspitzen aufweist, sind bei Büro- und Gewerbegebieten tagsüber hohe Energieverbräuche zu beobachten. Letztere verfügen daher über ein großes Potenzial für den vor-Ort Verbrauch auch durch Sektorkopplung. Grundsätzlich ist ein hoher vor-Ort Verbrauch erstrebenswert, um das Stromnetz zu entlasten. Für die Dachbegrünung hat dieser Indikator keine Aussagekraft. Er wird qualitativ bewertet.

Quartiernutzung (Ökosystemdienstleistungen)

Je nach Quartiersnutzung ist die Notwendigkeit von Grün mit seinen positiven Wirkungen auf den Menschen (Erholung, Kühlung, Luftreinigung, Ästhetik) verschieden. Je länger und je mehr Menschen sich in einem Quartier aufhalten, desto mehr Grünfläche sollte vorhanden sein. Besonders in Quartieren mit Wohnnutzung besteht zur Steigerung der Lebensqualität und für eine gesunde Erholung eine hohe Notwendigkeit für Grünstrukturen. In Gewerbequartieren spielen die Ökosystemdienstleistungen von

Grün für den Menschen hingegen eine untergeordnete Rolle. In Büro- und Mischgebieten steigert Grün die Arbeitsqualität. Für PV-Anlagen hat dieser Indikator keine Aussagekraft. Er wird qualitativ bewertet.

Versiegelungsgrad

Mit einem hohen Versiegelungsgrad steigt die stadtklimatische Hitzebelastung im Sommer und nimmt die Entwässerungsproblematik zu. Zudem fehlen Grünflächen, die die Belastung und Problematik abmildern sowie Lebensraum für Flora und Fauna bieten. Zur Steigerung der Resilienz eines Quartiers vor den Folgen des Klimawandels und zur Förderung der urbanen Artenvielfalt sind bei hohem Versiegelungsgrad Klimaanpassungsmaßnahmen wie die Dachbegrünung notwendig. Gleichzeitig ermöglichen große versiegelte Flächen wie Parkplätze die Nachrüstung mit PV. Messbar wird dieser Indikator als Anteil in Prozent von der Gesamtfläche eines Quartiers.

Freiflächenanteil

Der Freiflächenanteil gibt an, wie viel Fläche eines Quartiers unbebaut ist. Hierzu zählen sowohl versiegelte als auch unversiegelte Flächen. Je geringer der Freiflächenanteil, desto größer ist der Druck, Grün und PV am Gebäude umzusetzen, da in der Fläche kein Platz für andere Begrünungsformen wie Bäume oder andere energetische Maßnahmen besteht. Messbar wird dieser Indikator als Anteil in Prozent von der Gesamtfläche eines Quartiers.

Baualter

Über das Baualter eines Quartiers kann eine Abschätzung zur baulichen Substanz abgegeben werden. So ist bei jüngeren Baualtersklassen der energetische Standard oftmals besser und somit der Energieverbrauch geringer. Zudem können zum Teil pauschalisierte Aussagen zu Dachkonstruktionen und Dachformen getroffen werden, die Einfluss auf die Eignung der Dachfläche hinsichtlich der Umsetzung eines PV-Dachs, Gründachs oder PV-Gründachs haben. Außerdem kann das Baualter auf mögliche Denkmalschutzbestimmungen hinweisen. Angegeben wird das Baualter nach Baualtersklassen in Jahren. Der Indikator wird qualitativ bewertet.

Eigentumsstruktur

Je nach Eigentumsstruktur unterscheiden sich Investitionsbereitschaft und -motivation. Da die öffentliche Hand oftmals eine Vorreiterrolle für ihre Gebäude übernimmt, besteht eine hohe Durchsetzbarkeit von Klimaschutz- und Klimaanpassungsmaßnahmen. Bei einer kleinteiligen, privaten Eigentumsstruktur sind Investitionsentscheidungen aufgrund umfangreicher Absprachen und unterschiedlicher Interessen oftmals erschwert. Zudem ist das Investitionsvolumen im privaten Bereich begrenzt. Im Gewerbebereich besteht hingegen ein größeres Investitionsvolumen. Ausschlaggebend für die Investitionsbereitschaft ist häufig der Wirtschaftlichkeitsaspekt. Gerade bei stromintensiven Betrieben besteht ein hohes Umsetzungspotenzial bezüglich PV. Für die Umsetzung von Dachbegrünung braucht es häufig eine intensive Beratungs- und Aufklärungsarbeit sowie attraktive Förderangebote.

Ableitung von Indikatoren zur Eignung als PV-Dach, Gründach und PV-Gründach (Gebäudeebene)

Zuerst wurde eine wertfreie Findung aller Indikatoren, die für die Installation bzw. Eignung einer PV-Anlage, eines Gründaches und anschließend auch eines PV-Gründaches erforderlich sind, durchgeführt. Dies umfasste eine allgemeine Literaturrecherche, die Sichtung bestehender Solar- und Gründachpotenzialkataster sowie das Einbringen eigener Erfahrungswerte.

Anhand der ermittelten Indikatoren wurde jeweils aus Sicht der Photovoltaik als auch aus Sicht der Gründachinstallation geprüft, ob sie Anforderungen an die Statik, die Dachkonstruktion, das Gebäude, das Quartier oder das ausgewählte System (PV-Anlage/PV-Ertrag oder Gründach) stellen.

Des Weiteren wurden erste Bewertungskriterien für die einzelnen Indikatoren festgelegt und detailliert beschrieben, wie die Wichtung dieser zu erfolgen hat, um daraus ihren Einfluss auf die Eignung darzustellen.

Zusammengefasst stellten sich nach dieser Vorgehensweise insgesamt 37 Indikatoren heraus, davon 35 Indikatoren auf Seiten der PV-Anlage und 32 Indikatoren für die Installation eines Gründaches, mit größtenteils Ähnlichkeiten aber auch Unterschieden. Sie sind in Tabelle 1 dargestellt. Die Indikatoren „Neigung“, „Ausrichtung“, „Fläche“ und „Dachaufbauten“ müssen dabei sowohl aus technologiespezifischer als auch dachkonstruktiver Sicht betrachtet werden.

Tabelle 1

Indikatoren auf Gebäudeebene für PV-Anlagen und Gründächer

Indikator	PV-Anlage	Gründach
Indikatoren Technologiespezifisch		
Neigung	X	X
Ausrichtung	X	X
Flächengröße	X	X
Dachaufbauten	X	X
Dacheindeckung	X	
Brandschutz	X	X
Verschattung	X	X
Indikatoren Dach		
Statische Lastreserven	X	X
Dacheindeckung / Dachabdichtung	X	X

Indikator	PV-Anlage	Gründach
Wurzelfestigkeit		X
Dachkonstruktion	X	X
Art des Daches	X	X
Neigung	X	X
Ausrichtung	X	X
Fläche	X	X
Dachaufbauten	X	X
Indikatoren Gebäude		
Standort	X	X
Höhe	X	X
Nutzung	X	X
Energieverbrauch	X	
Eigentumsstruktur	X	X
Alter	X	X
Elektronische Anlagen	X	X
Installationsort Wechselrichter	X	
Zugang zur Dachfläche	X	X
Anforderungen Absturzsicherung	X	X
Anforderung Entwässerung		X
Anforderung Brandschutz	X	

Indikator	PV-Anlage	Gründach
Anforderung Blitzschutz	X	X
Anforderung Denkmalschutz	X	X
Indikatoren Quartier		
Art	X	X
Nutzung	X	X
Energieverbrauch des Quartiers	X	
Jährlicher Niederschlag	X	X
Thermische Belastung	X	X
Eigenumsstruktur	X	X
Anforderungen Denkmalschutz	X	X

Quelle: Bundeverband GebäudeGrün e. V. 2023

AS2 - Kategorisierung geeigneter Dachflächen und Gebäudesituationen

In AS 2 erfolgte die Zusammenstellung und Bewertung der verschiedenen Quartiers- und Gebäudesituationen unter zur Hilfenahme der in AS 1 entwickelten Indikatoren. Dabei bestand das Ziel darin, sofern möglich, besonders vorteilhafte Situationen zu identifizieren, die optimale Bedingungen für die Kombination von Grün- und Photovoltaikdächern bieten. Zur Ermittlung der dafür erforderlichen Daten wurden in Excel Lösungswege erstellt. Um die nachträglich präsentierten Ergebnisse nachvollziehen zu können sind die entsprechenden Excel-Tabellen „Anhang_Bewertung-Indikatoren-auf-Quartiersebene“ und „Anhang_Bewertung-Indikatoren-auf-Gebäudeebene“ im Anhang zu finden.

Priorisierung der Indikatoren auf Quartiersebene

Je nachdem, ob ein Gründach oder eine PV-Anlage umgesetzt werden soll, ergibt sich hinsichtlich der Indikatoren auf Quartiersebene eine unterschiedliche Wichtung. Zudem hat nicht jeder Indikator denselben Stellenwert, um die Relevanz und das Potenzial eines Quartiers abzuschätzen. Daher wurde mittels einer Stufenbewertung festgelegt, wie entscheidend der jeweilige Indikator ist (siehe Tabelle 2).

Folgende Stufenbewertung wurde herangezogen:

- 1 – Hohe Priorität
- 2 – Mittlere Priorität
- 3 – Niedrige Priorität
- 5 – Keine Priorität

Tabelle 2

Priorisierung der Indikatoren auf Quartiersebene für PV-Anlagen und Gründächer

Indikator	Priorisierung PV-Anlage	Priorisierung Gründach
Kumulierte Dachfläche im Quartier	1	1
Mittlere Dachflächengröße	2	2
Bevölkerungsdichte	2	2
Quartiersnutzung (energetisch)	1	5
Quartiersnutzung (Ökosystemdienstleistung)	5	1
Versiegelungsgrad	3	2
Freiflächenanteil	2	1
Baualter	2	2
Eigentumsstruktur	2	2

Quelle: Bundeverband GebäudeGrün e. V. 2023

Quantitative Bewertung der Indikatoren auf Quartiersebene

Als Grundlage für die qualitative Bewertung der Indikatoren auf Quartiersebene wurden zunächst quantitative Kennwerte aus der Veröffentlichung von Dettmar et al. (2020) zu den einzelnen EST zusammengetragen. Diese ermöglichen einen Vergleich zwischen den EST, jedoch waren nicht zu jedem EST alle Kennwerte gegeben. Folgende Kennwerte wurden betrachtet:

- Grundflächenzahl (GRZ),
- Geschossflächenzahl (GFZ),
- Gebäudegrundfläche (m²),
- Anzahl Gebäude pro Hektar,
- Gebäudetyp (%),
- Anzahl Einwohner pro Hektar,
- Dachfläche (m²) pro Einwohner,
- Nutzung GHD (%),
- Nutzung Wohnen (%),
- Versiegelungsgrad (%),
- Von Versiegelungsgrad anteilig überbaut (%),
- Von überbaut anteilig beheizt (%),
- Freiflächenanteil (%) und
- von Freiflächenanteil anteilig begrünt (%).

Im nächsten Schritt wurden die Kennwerte entsprechend ihrer Aussagekraft den Indikatoren zugeordnet. So kann die Gebäudegrundfläche zur Abschätzung der mittleren Dachflächengröße herangezogen werden. Zusammen mit dem Kennwert Anzahl Gebäude pro Hektar ist eine Aussage zur kumulierten Dachfläche des Quartiers möglich. Die Bevölkerungsdichte wird in Anzahl Einwohner pro Hektar gemessen. Die Quartiersnutzung (energetisch und Ökosystemdienstleistung) wird anhand der Nutzungsform bewertet. Die Indikatoren Versiegelungsgrad und Freiflächenanteil entsprechen den gleichnamigen Kennwerten in Prozent. Zur Eigentumsstruktur können die Kennwerte Gebäudetyp und Dachfläche pro Einwohner Aussagen treffen. Das Baualter wird entsprechend der Entstehungszeit eines Quartiers bewertet, sofern hierzu eindeutige Angaben möglich sind.

Qualitative Bewertung der Indikatoren auf Quartiersebene

Im Anschluss an die quantitative Bewertung folgt die qualitative Bewertung der Indikatoren auf Quartiersebene. Diese teilt sich in drei Stufen:

- 1 – hoch / gut geeignet
- 2 – mittel
- 3 – gering

Dementsprechend wurden die einschlägigen Kennwerte zu den Indikatoren aus der quantitativen Bewertung in drei Bereiche geteilt und den drei Stufen zugeordnet. Aus Indikator und EST ergibt sich eine qualitative Bewertungsmatrix. Diese Grundmatrix wurde im weiteren Arbeitsverlauf für die PV-Anlage und für das Gründach entsprechend der vorangegangenen Priorisierung gewichtet. Der Wichtungsfaktor ergibt sich aus der Umkehrung der Priorisierung. Pro EST wird zum Schluss eine Summe aus allen Indikatoren gebildet, die das Potenzial und die Relevanz eines Quartiers zur Dachbegrünung

oder zur Installation von PV-Anlagen abbilden. Je niedriger die Summe, desto höher ist die Dringlichkeit. Besteht sowohl bei PV als auch beim Gründach eine hohe Dringlichkeit, sollte die Kombination als PV-Gründach angestrebt werden.

Ergebnisse Wichtung PV-Anlagen

Bei der Wichtung für PV-Anlagen wurden alle Indikatoren bis auf die Quartiersnutzung (Ökosystemdienstleistung) einbezogen. Es ergeben sich für die einzelnen EST Summen zwischen 23 und 39. Wie sich der Tabelle 3 entnehmen lässt, erhalten insbesondere die EST mit überwiegender Büro- und gewerblicher Nutzung eine hohe Dringlichkeit eine PV-Anlage zu installieren.

Die höchste Dringlichkeit erhält das Gewerbegebiet und die Ketten- und Zeilenhochhäuser. Die niedrigste Dringlichkeit liegt bei kleinteiliger, freistehender Wohnbebauung niedriger bis mittlerer Geschossigkeit und Ein-/Zweifamilienhäusern. Das bedeutet jedoch nicht, dass PV-Anlagen auf Ein- und Zweifamilienhäusern keine Relevanz haben. Die hohe Anzahl dieser Gebäudearten bietet große PV-Potenziale. Durch die verhältnismäßig kleinen und oftmals stärker geneigten Flächen der Gebäude lassen sich diese Potenziale durch die PV z. T. leichter erschließen als mittels Gründächern. Verglichen mit anderen energetischen Stadtraumtypen besteht jedoch eine niedrige Dringlichkeit, welche im Quartier eher in Bereichen mit höheren Verbräuchen gesehen wird.

Tabelle 3
Ergebnisse der Wichtung zu PV-Anlagen (qualitative Bewertung)

Summe (Dringlichkeit absteigend)	Energetischer Stadtraumtyp (Nutzung)
23	Gewerbegebiet (Gewerbe), Ketten- und Zeilenhochhäuser (Wohnen)
25	Geschäfts-, Büro- und Verwaltungsgebiet (Gewerbe)
26	Hallenförmige und zeilenförmige Gewerbebauten (Gewerbe)
27	Innenstadtbebauung Großstadt und Mittelstadt (Mischnutzung)
30	Blockrandbebauung (Wohnen)
31	Großmaßstäbliche Wohnbebauung hoher Geschossigkeit, Punkthochhäuser (Wohnen)
32	Zeilenbebauung niedriger bis mittlerer Geschossigkeit (Wohnen)
34	Historische Altstadtbebauung, Innenstadtbebauung Kleinstadt (Mischnutzung)
35	Reihenhausbebauung (Wohnen)
36	Mehrfamilienhäuser (Wohnen)
37	Dörfliche Bebauung (Mischnutzung)

Summe (Dringlichkeit absteigend)	Energetischer Stadtraumtyp (Nutzung)
39	kleinteilige, freistehende Wohnbebauung niedriger bis mittlerer Geschossigkeit, Ein-/Zweifamilienhäuser (Wohnen)

Quelle: Bundeverband GebäudeGrün e. V. 2023

Ergebnisse Wichtung Gründach

Bei der Wichtung für Gründächer wurde der Indikator Quartiersnutzung (energetisch) nicht berücksichtigt. Es ergeben sich für die einzelnen EST Summen zwischen 24 und 37. Die höchste Relevanz erhalten mit Abstand die Ketten- und Zeilenhochhäuser. Die niedrigste Dringlichkeit liegt bei der Innenstadtbebauung einer Kleinstadt. Wie sich der Tabelle 4 entnehmen lässt, erhalten insbesondere die EST mit überwiegender Wohnnutzung und Mehrfamiliengebäude eine hohe Dringlichkeit für ein Gründach.

Tabelle 4
Ergebnisse der Wichtung zu Gründächern (qualitative Bewertung)

Summe (Dringlichkeit absteigend)	Energetischer Stadtraumtyp (Nutzung)
24	Ketten- und Zeilenhochhäuser (Wohnen)
29	Blockrandbebauung (Wohnen)
30	Zeilenbebauung niedriger bis mittlerer Geschossigkeit (Wohnen) Gewerbegebiet, hallenförmige und zeilenförmige Gewerbebauten (Gewerbe)
32	Großmaßstäbliche Wohnbebauung hoher Geschossigkeit, Punkthochhäuser (Wohnen)
33	Reihenhausbebauung (Wohnen), Dörfliche Bebauung, Innenstadtbebauung Mittelstadt und Großstadt (Mischnutzung), Geschäfts-, Büro- und Verwaltungsgebiet (Gewerbe)
34	kleinteilige, freistehende Wohnbebauung niedriger bis mittlerer Geschossigkeit, Ein-/Zweifamilienhäuser, Mehrfamilienhäuser (Wohnen), historische Altstadtbebauung (Mischnutzung)
37	Innenstadtbebauung Kleinstadt (Mischnutzung)

Quelle: Bundeverband GebäudeGrün e. V. 2023

Aussage für die Kombination als PV-Gründach

Der EST für Ketten- und Zeilenhochhäuser hat sich sowohl im Zusammenhang mit Photovoltaikanlagen als auch in Bezug auf Gründächer als äußerst bedeutsam erwiesen, sodass hier eine Kombination als PV-Gründach besonders empfohlen wird. Auch der EST Gewerbegebiet mit seinen Untertypen hallenförmige und zeilenförmige Gewerbebauten sowie die Blockrandbebauung wird bei beiden Maßnahmen als eher relevant eingeschätzt, sodass die Umsetzung eines PV-Gründachs in Betracht gezogen werden sollte.

Die detaillierte Bewertung auf Quartiersebene kann der angehängten Excel-Tabelle „Priorisierung Struktur- und Quartierstypen_02.12.2022“ entnommen werden.

Priorisierung der Indikatoren auf Gebäudeebene

Nicht allen Indikatoren aus Tabelle 1 kommt bezüglich der Installation einer Dachnutzungsanlage ein gleich hoher Stellenwert zu tragen. So wurde im nächsten Schritt mittels einer Stufenbewertung festgelegt, wie entscheidend die jeweilige Betrachtungsgröße zur Feststellung der Eignung als PV-Anlage oder Gründach ist. Die detaillierte Bewertung auf Gebäudeebene kann der angehängten Excel-Tabelle „Anhang_Bewertung-Indikatoren-auf-Gebäudeebene“ entnommen werden.

Die Bewertung erfolgt in Stufen, von 1 (Hohe Priorität), 2 (Mittlere Priorität), 3 (Niedrige Priorität) bis 5 (Keine Priorität).

Bei der Planung einer Photovoltaikanlage wurden 10 der insgesamt 35 Indikatoren identifiziert, die vorrangig auf ihre Eignung hin überprüft werden sollten. Diese sind „Statische Belastung des Daches“, „Dacheindeckung / Dachabdichtung“, „Verschattung durch umliegende Strukturen“, „Dachaufbauten (Technologie spez.)“, „Neigung der PV-Anlage“, „Ausrichtung der PV-Anlage“, „Höhe des Gebäudes“, „Eigentumsstruktur“, „Elektrische Anlagen im Gebäude“ und „Nutzungsprofil des Solarstroms“.

Beim Gründach sind 8 der 32 Indikatoren von entscheidender Bedeutung zur Ermittlung der Eignung eines Daches für eine nachträgliche Begrünung. Diese sind „Neigung des Daches“, „Statische Belastung des Daches“, „Dacheindeckung / Dachabdichtung“, „Wurzelfestigkeit“, „Anforderung Entwässerung“, „Eigentumsstruktur“, „Zugang zur Dachfläche“ und „Anforderungen Absturzsicherung“.

Weitere objektspezifisch relevante Indikatoren können ein bestehender Denkmalschutz sowie die vorhandenen Blitzschutzeinrichtungen und Anforderungen an den Brandschutz und Absturzsicherung (bei PV-Anlagen) sein.

Zur Gesamtprüfung der Eignung hinsichtlich eines PV-Gründachs müssen alle relevanten Indikatoren aus PV-Anlage und Gründach mit hoher Priorität untersucht werden. Die Anforderungen dieser Kriterien spielen ebenfalls eine entscheidende Rolle dabei, ob und in welchem Ausmaß die Realisierung eines PV-Gründachs möglich ist.

Die nachfolgende detaillierte Beschreibung der baulichen Indikatoren des Daches, der technologiespezifischen Indikatoren und gebäude- und quartierspezifischen Indikatoren soll gleichzeitig als Vorlage für eine mögliche Reihenfolge zur Prüfung eines Objektes für eine nachträgliche Installation einer PV-Anlage und / oder Dachbegrünung dienen. Dafür wurden zur Vereinfachung dieser Vorgehensweise einige der oben genannten Indikatoren zusammengefasst.

Bauliche Indikatoren des Daches

Dachneigung

Über die Dachform und dessen Neigung kann eine erste aussagekräftige Differenzierung zur Umsetzung einer PV-Anlage oder eines Gründaches getroffen werden. Während für PV-Anlagen die Dachform in den meisten Fällen eher unerheblich ist, stellt sie für Gründächer mit zunehmender Neigung ein erhebliches Kriterium hinsichtlich der Materialverlagerung dar. Unterschieden werden in Deutschland vor allem fünf verschiedenen Dachvarianten Flachdach, Satteldach, Pultdach, Walmdach und Tonnendach.

Weitere Dachformen, wie Scheddach, Mansarddach, Krüppelwalmdach, Zeltdach oder Schleppdach, werden innerhalb der Studie nicht betrachtet, da die Kriterien an diese Varianten ähnlich sind zu den relevanten schräggeneigten Dacharten und gleichzeitig die Häufigkeit des Vorkommens dieser Formen für die Bewertung unerheblich sind.

Flachdach

Flachdächer lassen sich insbesondere im modernen Mehrfamilienhausbau und im Gewerbebau vorfinden und eignen sich hervorragend für den Einsatz klimagerechter Nutzungen in verschiedenen Varianten. Lediglich auflastgehaltene PV-Gründachsysteme sind für den Einsatz von nur 0–5° Neigung vorgesehen. Bis hin zu 10° Neigung lassen sich PV-Anlagen und Gründächer als separate Systeme in verschiedenen Möglichkeiten verwenden. Vor allem Gründächer bieten hier großes Potenzial öffentlich begehbbare Dachflächen zu gestalten.

Schrägdächer

Eine der am häufigsten vorkommenden Dacharten ist das Schrägdach, zumeist in Satteldachform. In Deutschland wurde diese Konstruktion schon vor 1859 bei typischen Wohnhäusern verwendet. Bedingt ist dies durch seine einfache und dennoch ausreichend stabile Bauweise aus zwei sich gegenüberliegenden Dachschrägen, die sich an der Oberkannte, dem Dachfirst, treffen.

Bis zu einer Neigung der Dachschrägen von 45° lassen sich sowohl Lösungen für PV-Anlagen als auch extensive Dachbegrünungen finden. Für Neigungen mit mehr als 45° sollte mit einer passenden Unterkonstruktion die Ausrichtung zur Sonne für die PV-Module optimiert werden. Dachbegrünungen werden aufgrund der Materialverlagerung nicht mehr empfohlen.

Für die Bewertung des Indikators lässt sich die Neigung des Daches in Grad heranziehen. Eine detaillierte Erläuterung und Eignungsbewertung der Parameter wird in Tabelle A 4 im Anhang beschrieben.

Statische Belastung

Das Auf- oder Anbringen einer PV-Anlage (Module und Unterkonstruktion), eines Gründaches (Gründachaufbau inklusive Vegetation) oder die Kombination aus beiden Systemen ist immer eine zusätzliche statische Belastung für das Dach bzw. das Gebäude. Das Eigengewicht der Anlage stellt dabei eine ständige Last dar, die fortwährend vom Dach abgetragen werden muss. Darüber hinaus ergeben sich zusätzliche Lasten durch die Einflüsse des Wetters. Hier sind vorrangig Schnee- und Windlasten (Windsog und Winddruck) zu nennen. Von entscheidender Bedeutung für die Größe dieser Lasten sind die geografische Position, die Höhe des Gebäudes und die Form des Daches. Die statische Belastung ist zum einen abhängig von den Wind- und Schneelastzonen und zum anderen steigen die Lasten mit der Gebäudehöhe. Das zur Berechnung geltende Verfahren ist in der DIN 1055 geregelt und bezieht alle wirkenden Lasten mit ein (Zapfe 2010). So haben sich über die letzten Jahre Erfahrungswerte ergeben, die einen ersten Anhaltspunkt zur Abschätzung der erforderlichen statischen Reserven zulassen. Die Bewertung des Indikators geschieht über die statischen Lastreserven des Daches.

Ballastierung bei PV-Anlage

Die Lasten einer PV-Anlage ergeben sich aus den genutzten Aufständersystemen und deren Befestigung sowie den PV-Modulen. Für die PV-Anlage sind folgende statische Lastreserven erforderlich (vgl. LENA 2018):

- Schrägdach = ca. 16–24kg/m²
- Flachdach ohne Dachdurchdringung = ca. 7–12kg/m²
- Flachdach mit Dachdurchdringung ca. 18–30kg/m²
- Flachdach mit Montage-Wanne = je nach Gebäudehöhe ca. 30–120kg/m²

Ballastierung bei Gründächern

Die Ballastierung durch Gründächer entsteht durch die unterschiedlichen Schichten des Gründachaufbaus und deren Wasserspeicherung. Die Dimensionierung der Substratschicht und der Dränageschicht bestimmen vorwiegend das Gewicht des Dachbegrünungssystems. In speziellen Fällen,

wenn das Gebäude sehr hoch ist oder sich in einem windsoggefährdeten Bereich befindet, werden möglicherweise zusätzliche Ballastierungsmaßnahmen gegen Verwehung erforderlich, die eine noch höhere Lastreserve erfordern.

Für eine Gründachanlage sind im Regelfall folgende statische Lastreserven erforderlich:

- Leichtbauweise (wassergesättigt): 30–60kg/m²
- Extensivbegrünung 7–9 cm (wassergesättigt): 80–100kg/m²
- Extensivbegrünung 10–12 cm (wassergesättigt): 100–120kg/m²
- Extensivbegrünung 13–15 cm (wassergesättigt): 120– 180kg/m²

Ballastierung bei PV-Gründächern

Für eine PV-Gründachanlage sind die Lasten vergleichbar zu denen einer auflastgehaltenen PV-Anlage, wobei die Ballastierung die Begrünung darstellt. Die ständigen Lasten ergeben sich aus dem Gründachaufbau, der Vegetationsform, der auflastgehaltenen Unterkonstruktion und dem PV-Modul:

Gründachsystem für PV-Gründach

- Extensivbegrünung 8 cm (wassergesättigt): 80–100kg/m²
- Extensivbegrünung 10 cm (wassergesättigt): 100–120kg/m²

PV-Anlage für PV-Gründach

- PV-Modul ca. 10kg/m²
- Auflastgehaltene Unterkonstruktion 10–20kg/m²

Eine detaillierte Erläuterung und Eignungsbewertung der Parameter wird in Tabelle A 5 im Anhang beschrieben.

Dacheindeckung / Wurzelschutz

Dacheindeckung bei Nutzung von PV-Anlagen

Die Dachhaut und die Dachkonstruktion stellen das Bindeglied zwischen der PV-Anlage und dem Gebäude dar. Je nach Art der Dacheindeckung und -ausführung sind die Installationsmöglichkeiten für die PV-Anlage verschieden. Am verbreitetsten (nach Anzahl installierter Anlagen) ist die Installation auf schrägen Ziegeldächern, die als gut geeignet bewertet werden kann. In der Regel wird die Unterkonstruktion bzw. sogenannte Dachhaken direkt mit der Dachkonstruktion verschraubt (z. B. Sparren und Pfetten). Bei sachgemäßer Ausführung wird der dazu hochgenommene Dachziegel nach dem Verschrauben an die gleiche Position gesetzt, sodass i.d.R. wenig Komplikationen in Punkto Dichtigkeit auftreten. Bei anderen Dacheindeckungen kann sich dies durchaus schwieriger gestalten. Denn bei Bitumen- oder Metaldächern besteht eine Möglichkeit zur Installation einer PV-Anlage in der Durchdringung der Dachhaut und dem anschließenden Verschrauben auf der Dachkonstruktion. Die durchdrungenen Stellen müssen nachträglich abgedichtet werden, was sehr hohe Ansprüche an die Ausführung und die zu verwendenden Materialien stellt. Oftmals wird daher bei diesen Dachtypen auf andere Befestigungsvarianten zurückgegriffen. Bei bituminösen Abdichtungen, die sich häufig auf Flachdächern finden, können z. B. Auflastmontagesysteme zur Anwendung kommen, wodurch jedoch zusätzliche ständige Lasten entstehen. Zur Vermeidung einer Dachdurchdringung ist bei Metaldächern eine Montage mittels Falzklemmen oft anzutreffen, wobei bei dieser Installationsvariante besonderes Augenmerk auf die Montage dieser Verbindungselemente gelegt werden muss. Durch Unterschiede in der thermischen Ausdehnung der Dachhaut und des Montagesystems kann es zu Längenverschiebungen von einigen Zentimetern kommen, was bei einer zu starren Verbindung beider Komponenten zu starken mechanischen Beanspruchung bis zur Dachbeschädigung führen kann

(Hoferichter 2010). Im weitesten Sinne ungeeignet für die Installation von PV-Anlagen sind Asbestdächer. Die Überbauung dieser belasteten Dächer ist nicht zulässig (Märtel 2023).

Dacheindeckung bei Nutzung von Gründächern und PV-Gründächern

Für Gründächer und auflastgehaltene PV-Gründächer gelten grundsätzlich die gleichen Bedingungen zur Dacheindeckung bzw. Dachkonstruktion. Sie sind nur für Bitumen- oder Kunststoffbahnen zur Aufbringung geeignet. Gemäß den allgemein anerkannten Regeln der Technik ist unter Dachbegrünungen eine wurzelfeste Abdichtung oder eine zusätzliche Maßnahme als Wurzelschutz erforderlich. Die Prüfung eines Produktes kann durch das FLL-„Verfahren zur Untersuchung der Wurzelfestigkeit von Bahnen und Beschichtungen für Dachbegrünungen“ oder die DIN EN 13 948 „Bestimmungen des Widerstandes gegen Durchwurzelung von Bitumen-, Kunststoff oder Elastomerbahnen für Dachabdichtungen“ geschehen (Schenk et al. 2021).

Deutschlandweit wurden bereits zahlreiche Flachdächer mit Kies belegt. Eine Änderung zu Gründächern sollte hierbei das Ziel sein. Kiesdächer verfügen über Lastreserven, mit denen sich zumindest eine extensive Dachbegrünung realisieren lässt. Die Kiesschicht muss abgetragen und mit Dachbegrünungssubstrat ersetzt werden. Gleichzeitig muss überprüft werden, dass die vorhandene Abdichtung wurzelfest ist.

Die Installation auf Ziegel- oder Schindeldächer ist mit Dachbegrünungssystemen nicht möglich. Bei einer Sanierung müsste überprüft werden, ob die bestehende Eindeckung mit dem Dachbegrünungssystem inklusive Abdichtung getauscht werden könnte. Von einem hohen Aufwand muss ausgegangen werden.

Die Begrünung von Asbestdächern ist nicht zulässig.

Eine detaillierte Erläuterung und Eignungsbewertung der Parameter wird in Tabelle A 6 im Anhang beschrieben.

Technologiespezifische Indikatoren

Dachaufbauten / Verschattung

Vor allem für die Planung, die Montage als auch den Betrieb einer PV-Anlage oder PV-Gründachanlage können Dachaufbauten eine relevante Rolle spielen. Finden sich auf einer Dachfläche viele Aufbauten durch andere Dach- oder Gebäudenutzungen (z. B. Attika, Schornsteine, Entlüftungen, Gauben etc.) können nur Teilflächen mit PV belegt werden. Dies ist zum einen durch die Abmessungen der PV-Module und der sich damit ergebenden geometrischen Restriktionen und zum anderen durch die Verschattung der PV-Anlage durch die Dachaufbauten und andere örtliche Strukturen bedingt. Letzterer Punkt tritt dabei nicht nur durch die Dachaufbauten auf, sondern kann auch durch andere Objekte in der Strahlungsachse Sonne – PV-Anlage (z. B. hohe Gebäude oder Bäume) zustande kommen. Durch die geringen Abstände zwischen Dachaufbauten und PV-Anlage können sich aber Verschattungssituationen von verhältnismäßig langer Dauer ergeben. In erster Linie wird dadurch der Solarertrag negativ beeinflusst. In sehr ungünstigen Fällen (diesen kann i.d.R. durch eine entsprechende Anlagenplanung unter Einsatz entsprechender Module und/oder Modul-Optimierern/Wechselrichtern entgegengewirkt werden) können Verschattungen jedoch auch zu physikalischen Schäden der Solarzellen führen (z. B. Hotspots). Da die Höhe des Ertragsverlusts auch maßgeblich von der Anlagenplanung und -ausführung abhängt, können die tatsächlichen Einbußen variieren. Generell skalieren die Verluste – bei gleicher Anlagenausführung – jedoch mit der Anzahl an Schattenwürfen und der Beschattungsdauer. Somit können als Abschätzung der Verluste die Menge an Dachaufbauten und die Häufigkeit der Verschattung Indikatoren für die Eignung des Daches als PV-Dach oder PV-Gründach darstellen.

Auf Gründächer haben Dachaufbauten dagegen zunächst keinen direkten Einfluss. Gründächer können so angelegt werden, dass die Aufbauten und deren Verschattung die Vegetationsentwicklung nicht beeinträchtigen. Im Fall von starken Verschattungen sollten die Saatgut- oder Pflanzmischungen auf dem Dach angepasst werden. Das einzige Ausschlusskriterium für ein Gründach wäre ein übermäßig hoher Anteil an Dachaufbauten, wodurch der Einbau eines Gründaches aufgrund von des hohen Flächenverlusts nicht mehr sinnvoll wäre.

Eine detaillierte Erläuterung und Eignungsbewertung der Parameter werden in Tabelle A 7 und Tabelle A 8 im Anhang beschrieben.

Neigung und Ausrichtung der PV-Anlagen

Sowohl die Neigung als auch die Ausrichtung einer PV-Anlage sind maßgebend für den späteren Solarertrag. Bei Schrägdächern sind beide Indikatoren oftmals baulich vorgegeben und eine PV-Anlage wird dachparallel installiert (Ausrichtung und Neigung entsprechen der Dachfläche). Bei Flachdächern kann die Ausrichtung und Neigung hingegen mehr oder weniger frei gewählt werden (andere Dachnutzungen und -aufbauten müssen beachtet werden). Der höchste Solarertrag wird in Deutschland klassischerweise mit einer Südausrichtung und einer Neigung von ca. 30° erzielt werden (Quaschnig 2013). Wird der Anstellwinkel der Module bei einer nach Süden ausgerichteten Anlage verändert, minimiert sich der Ertrag zwischen 10% (0° - horizontal) und 30% (90° - senkrecht). Verändert sich die Ausrichtung bei gleichbleibendem Neigungswinkel (beispielhaft 30°) so sind die Einbußen bei einer Ost-West-Ausrichtung ca. 15%. Eine detaillierte Erläuterung und Eignungsbewertung der Parameter zur Ausrichtung und Neigung der PV-Anlage wird in Tabelle A 9 und Tabelle A 10 im Anhang beschrieben.

Dabei ist anzumerken, dass sich diese grobe Einteilung auf die Ausstattung der Anlage mit (Standard-)Modulen beziehen, die ihren Solarertrag nur über die Modulvorderseite generieren. Werden bifaziale Solarmodule verwendet, generiert die Rückseite zusätzlich Strom – es lassen sich also höhere Erträge verglichen mit Standardmodulen erreichen. Dabei spielt vor allem auch der Untergrund und dessen Reflektivität eine entscheidende Rolle für potenzielle Erträge. Die bifaziale Technologie ermöglicht auch höhere Freiheitsgrade bezüglich der Neigung und Ausrichtung von PV-Anlagen. So liegt beispielsweise

der optimale Anstellwinkel für diese Module um ca. 20% höher als der für Standardmodule geltende optimale Anstellwinkel am jeweiligen Ort (Frontini et al. 2019). Ebenso eignen sich bifaziale Module besonders gut für senkrecht aufgeständerte Anlagen in Ost-West Ausrichtung. Gerade für Flachdächer und kombinierte PV-Gründach-Lösungen können diese Module besonders interessant sein.

Entwässerungskonzept des Daches

Entwässerungseinrichtungen bestehender Dachflächen sind so dimensioniert, dass sie das Überschusswasser möglichst kontrolliert und schnellstmöglich in die Kanalisation ableiten können. Die Installation einer PV-Anlage hat i.d.R. keinen Einfluss auf die vorhandene Entwässerung. Es ist jedoch wichtig sicherzustellen, dass keine Entwässerungseinrichtung, wie beispielsweise ein Dachablauf, so abgedeckt wird, dass ihre Inspektion nicht mehr möglich ist. Durch die nachträgliche Begrünung ändert sich der Wasserhaushalt auf der Dachfläche, allerdings nicht zum negativen, sondern vielmehr zur Entlastung der bestehenden Entwässerungsleitungen. Der Gründachschichtenaufbau kann - abhängig von seiner Dimensionierung - ankommendes Regenwasser zwischenspeichern und zu Teilen zeitverzögert von der Dachfläche ableiten und verdunsten. Dies trägt in der Regel dazu bei, dass keine zusätzlichen Entwässerungsvorrichtungen auf dem Dach benötigt werden. In einigen Fällen kann es zu einer Anpassung des Entwässerungskonzeptes mit der Erneuerung der Dachfläche kommen. Für Flachdächer könnte die Ausbildung zum Retentionsdach gewollt sein, oder Flachdachabläufe werden neu geplant. Bei Schrägdächern könnten Modernisierungsmaßnahmen erforderlich sein.

Eine detaillierte Erläuterung und Eignungsbewertung der Parameter wird in Tabelle A 11 im Anhang beschrieben.

Gebäudehöhe (Windlast und Brandschutz)

Gebäudehöhe bei Nutzung von PV-Anlagen

Die Gebäudehöhe steht nicht in direktem Bezug zur Eignung eines Gebäudes zur Ausstattung mit einer PV-Anlage oder eines PV-Gründaches. Sie ist eher maßgebend für andere wichtige Indikatoren, die sich daraus ergeben. Neben der Windlast und der zugehörigen Lastberechnung, die sich in Abhängigkeit der Gebäudehöhe ändert, ist hier vor allem auch der Brandschutz zu nennen. Gerade für die Nachrüstung einer PV-Anlage auf Hochhäusern (nach Musterbauverordnung > 22 m; Sonderbauten) ist die Errichtung genehmigungspflichtig und die zuständige Bauaufsichtsbehörde muss das Vorhaben prüfen – auch in Bezug auf die geltenden Brandschutzaufgaben (Sander 2022). Die ggf. verschärften Anforderungen an die verbauten Komponenten und die Belegungsmöglichkeiten des Daches (z. B. Abstand zu Dachaufbauten, Außen- und Brandwänden) werden durch die jeweilige Landesbauordnung geregelt. Bei Gebäuden niedrigerer Höhe sind PV-Anlagen i.d.R. genehmigungsfrei (die jeweiligen Landesbauordnungen können in Bezug auf die genauen Bestimmungen abweichen, daher immer prüfen). Nichtsdestotrotz sind die Vorschriften des Baurechts auch bei solchen Anlagen einzuhalten (z. B. Abstand zu Dachaufbauten, Außen- und Brandwänden). Bezüglich des Brandschutzes ist noch anzumerken, dass die Installation eines DC-Trennschalters ggf. notwendig ist, wenn die Wechselrichter nicht in unmittelbarer Nähe zu den PV-Modulen installiert werden können (z. B. auf dem Dach/im Dachstuhl etc.). Müssen die Wechselrichter beispielsweise in der Nähe des Hausanschlusses installiert werden, befinden sich auch im Brandfall nach dem Freischalten des Gebäudes durch die Feuerwehr noch spannungsführende DC-Leitungen im Gebäude. Durch die Betätigung des DC-Trennschalters wird auch dieser Leitungsabschnitt freigeschaltet und die Gefahr eines elektrischen Schlages für die Feuerwehr minimiert.

Auch wenn alle Anlagen unabhängig von ihrer Gebäudehöhe brandsicher auszuführen sind, können die Anforderungen und das zusätzliche Genehmigungsverfahren als Hemmnis in Bezug auf den PV-Ausbau auf Hochhäusern gelten. Daher sind Gebäude geringere Höhen vor dem Hintergrund der Potenzialerschließung als geeigneter anzusehen.

Gebäudehöhe bei Nutzung von Gründächern

Mit zunehmender Höhe des Gebäudes sollten zunächst Verwehsicherheitsberechnungen durchgeführt werden. Auf deren Grundlage sind möglicherweise zusätzliche Sicherungsmaßnahmen in Form von größeren Kiesstreifen, Vegetationsmatten oder Erosionsschutzplatten gegen Windsog auf dem Gründach vorzunehmen. Ebenso müssen auflastgehaltene PV-Gründachmontagesysteme ausreichend gegen Verwehung gesichert sein. Dafür werden vorab Lastberechnungen erforderlich.

Auf den Brandschutz bei Dachbegrünungen hat die Höhe des Gebäudes keinen Einfluss. Intensive Dachbegrünung gilt als „Harte Bedachung“, d. h. als widerstandsfähig gegen Flugfeuer und strahlende Wärme. Für extensive Dachbegrünungen sind spezielle Kriterien notwendig, die erfüllt werden müssen, damit das Dach als brandsicher gilt (Lösken et al. 2018). Diese sind:

- ein maximal organischer Anteil von 20% innerhalb der Vegetationstragschicht,
- eine Vegetationstragschicht von min. 30 mm,
- dass Gebäudeabschlusswände, Brandwände oder Wände, die anstelle von Brandwänden zulässig sind, in Abständen von maximal 40 m mindestens 0,3 m über das Dach geführt werden müssen,
- dass ein Abstandsstreifen aus Kies oder Platten von mindestens 0,5 m Breite gegenüber Öffnungen in der Dachfläche oder aufgehenden Wänden mit Fenstern auszubilden ist, sobald sich deren Brüstung weniger als 0,8 m oberhalb der Vegetationstragschicht befindet und
- dass bei einander giebelständigen Gebäuden im Bereich der Traufe ein in der Horizontalen gemessener 1 m breiter Streifen unbegrünt bleiben muss und mit Oberflächenschutz aus nichtbrennbaren Baustoffen versehen sein muss.

Eine detaillierte Erläuterung und Eignungswertung der Parameter Gebäudehöhe und Brandschutz wird in Tabelle A 12 und Tabelle A 13 im Anhang beschrieben.

Gebäude- und quartiersspezifische Indikatoren

Eigentumsstruktur / Gebäudetyp

Die Nutzung von Gebäuden und die damit einhergehenden Eigentumsverhältnisse variieren erheblich. In gewissem Maße leiten sich daraus verbundene Potenziale von PV-Anlagen oder Gründächern auf Gebäudedächern ab. Mehrfamilienhäuser gerade auch größerer Bauart mit mehreren Mietparteien können hier als Beispiel zur Symbolisierung der Wirkungen gelten: Während das technische Potenzial an Dachflächen dieser Gebäude in Deutschland sehr groß ist, ist die Verbreitung von PV-Anlagen oder Grünanlagen verhältnismäßig gering. Unterschiedliche Interessen spielen hierbei eine entscheidende Rolle. Während Mietende häufig durchaus Interesse an der Installation einer Anlage haben, sind sie i.d.R. nicht die Investierenden. Diese Rolle fällt oftmals den Eigentum innehabenden Personen zu, die mit der Installation der Anlage zwar die Immobilie aufwerten, aus der Investition aber nur geringfügig profitieren können bzw. sich mit technischen, regulatorischen und ökonomischen Hemmnissen konfrontiert sehen (Aretz et al. 2022a). Noch komplizierter wird es, wenn innerhalb eines Mehrfamilienhauses (ggf. auch Reihenhauses) mehrere Eigentum innehabende Personen bestehen. In diesen Fällen müssen alle Eigentümerinnen und Eigentümer einer Installation zustimmen.

Bei anderen Gebäudetypen (z. B. Einfamilienhäusern oder Industriebauten) sind die Rollenverteilungen oftmals verschieden. Hier ist die Entscheidungsstruktur homogener und die Interessen an der Investition in eine Anlage entfällt oftmals auf die Eigentum innehabenden Personen.

Eine besondere Gebäudekategorie bilden Bauten der öffentlichen Hand, wo es z. T. genaue Vorgaben zur Ausgestaltung der Dachflächen mit Solarenergie- (einschließlich Solarthermie-Anlagen) oder Gründachnutzung gibt. Die Einführung von Vorschriften zur Installation von Solar- oder Gründächern in einigen Bundesländern und Kommunen erhöht zwar den Druck, insbesondere auf die Seite der Eigentümerinnen und Eigentümer, löst jedoch nicht zwangsläufig mögliche Interessenkonflikte, die aufgrund der Eigentumsstruktur auftreten können.

Eine detaillierte Erläuterung und Eignungsbewertung der Parameter wird in Tabelle A 14 im Anhang beschrieben.

Nutzungsprofil des Solarstroms

Ein Vorteil der Photovoltaik ist es, dass die Energie lokal erzeugt und verbraucht werden kann. Da seit einigen Jahren die PV-Stromgestehungskosten unterhalb der Strombezugskosten (Netzstrom) liegen, lohnt es sich auch betriebswirtschaftlich den PV-Strom vor Ort zu nutzen. Insofern die Installation einer PV-Anlage nicht einen Mehrverbrauch an Energie im Gebäude nach sich zieht (Kegel et al. 2022), kann durch eine hohe Gleichzeitigkeit an Erzeugung und Verbrauch auch das Stromnetz entlastet werden. Gerade in Städten bieten sich hier große Potenziale, da in größeren Gebäuden oftmals ein hoher Verbrauch auf eine relativ kleine Dachfläche und damit Stromerzeugung trifft und somit der Eigenverbrauch des PV-Stroms hoch ist. Das Erzeugungsprofil kann zum einen über die Ausrichtung und Neigung an das Verbrauchsprofil angepasst werden. Zum anderen bietet aber gerade auch die Kopplung mit weiteren Energiewende-Technologien (z. B. Batteriespeicher, E-Mobilität, Wärmepumpe) die Möglichkeit, den Eigenverbrauch an Solarstrom sinnvoll zu erhöhen. Darüber hinaus ist aber auch das individuelle Lastprofil von Gebäuden und auch einzelnen Verbrauchern entscheidend. So zeichnen sich Quartiere mit einer Mischnutzung von Wohnen und Gewerbe häufig durch ein z. T. besser angepasstes Verbrauchsprofil aus und zeigen ggf. weniger auffällige Lastspitzen wie es in reinen Wohnquartieren z. B. morgens und abends der Fall ist, wo i.d.R. eine geringere PV-Erzeugung vorherrscht. Dies gilt in besonderem Maße auch für Industriebetriebe, die häufig tagsüber einen hohen Lastgang aufweisen – zu Zeiten also, an denen auch eine hohe Erzeugung vorherrscht. Erweitert man daher die Betrachtungsweise von der Gebäude- auf die Quartiersebene (wobei der Begriff „Quartier“ schwierig zu definieren ist), ergeben sich möglicherweise Synergien bezüglich der Gleichzeitigkeit. Jedoch sind die politischen

Rahmenbedingungen derzeit nicht auf einen breiten Ansatz des „energy sharings“ ausgelegt (Aretz et al. 2022b). Auch ist darauf hinzuweisen, dass eine kleinere Auslegung der PV-Anlage auf Grund hoher Eigenverbrauchsquoten aus Klimaschutzsicht nicht zuträglich ist, da dadurch wichtige Kapazitäten ungenutzt bleiben, die an anderer Stelle wichtig zur Dekarbonisierung sind (z. B. Industriebetriebe mit hohem Strombedarf). Daher geht dieser Indikator davon aus, dass die zur Verfügung stehenden Flächenpotenziale auch immer ausgeschöpft werden und sich die Eignung lediglich durch die Gleichzeitigkeit des Erzeugungs- und Lastprofils ergibt.

Eine detaillierte Erläuterung und Eignungsbewertung der Parameter wird in Tabelle A 15 im Anhang beschrieben.

Denkmalschutz

Aufgabe des Denkmalschutzes ist u. a. die Bewahrung und Pflege von Kulturdenkmälern für kommende Generationen. Das Denkmalschutzgesetz eines Bundeslandes bildet die gesetzliche Grundlage. Ziel des Denkmalschutzes ist es, die maßgeblichen Eigenschaften eines Kulturdenkmals zu erhalten und gleichzeitig eine zeitgemäße Nutzung zu ermöglichen. Die Landesämter für Denkmalpflege führen öffentlich einsichtige Listen der Kulturdenkmäler eines jeden Bundeslandes. Bei Gebäuden, die als Kulturdenkmal im Sinne des Denkmalschutzgesetzes eingestuft sind, ist bei geplanten baulichen Veränderungen der Nachweis einer denkmalschutzrechtlichen Genehmigung zu erbringen. Zu diesen baulichen Veränderungen gehört u. a. die Dachbegrünung sowie das Aufbringen von PV-Anlagen. Grundsätzlich ist eine nachträgliche Installation der gewünschten Anlagen von denkmalgeschützten Gebäuden möglich. Es handelt sich jedoch immer um Einzelfallentscheidungen der zuständigen Denkmalschutzbehörde. Eine frühe Absprache mit der verantwortlichen Denkmalschutzbehörde im Vorfeld der Planung ist daher wichtig, um Mehrkosten zu vermeiden und Planungssicherheit zu erhalten.

Eine detaillierte Erläuterung und Eignungsbewertung der Parameter wird in Tabelle A 16 im Anhang beschrieben.

Zugang zur Dachfläche

Ein angemessener Zugang zur Dachfläche hat im Rahmen der Herstellung, Veränderung und Instandhaltung der PV- oder Gründachanlage vorhanden zu sein. Zur Installation der geplanten Anlage müssen deren Komponenten – die zum Teil sperrig ausfallen können – sicher auf die Dachfläche transportiert werden. Gerade bei größeren Anlagen kann eine gut zugängliche Dachfläche die Installationskosten minimieren. Eine Option besteht darin, einen ausreichend großen Dachausstieg in Verbindung mit einem Aufzug im Gebäude zu installieren. Weiterhin sind auch die Einrüstung des Gebäudes oder die Anlieferung auf die Dachfläche mittels Kranfahrzeug denkbar. Dies erfordert jedoch geeignete Voraussetzungen im Quartier (z. B. Rangierbarkeit vor dem Gebäude). Es sollten jedoch nur wenig Gebäude/Quartierssituationen vorzufinden sein, wo der Zugang zur Dachfläche ein ernsthaftes Problem darstellt. Enge Altstadtquartiere können diesbezüglich problematisch sein. Für diesen Indikator gilt: je einfacher der Zugang zur Dachfläche gestaltet ist, desto besser ist eine Eignung für die Installation einer PV- oder/und Gründachanlage.

Zugänge zum Dach sind möglichst über ausreichend dimensionierte Dachausstiege oder außenliegende Leitern (Feuerleiter / Fluchtleiter) herzustellen. Diese sollten den Zu- und Abtransport für Materialien gewährleisten. Alternativ können temporäre Gerüste, Hubsteiger und niedrigen Höhen Anstelleitern verwendet werden. Eine detaillierte Erläuterung und Eignungsbewertung der Parameter wird in Tabelle A 17 im Anhang beschrieben.

Absturzsicherung

Absturzsicherungsmaßnahmen werden bei allen Nutzungstypen des Daches erforderlich. Zu diesen zählen öffentlich Begehnisse, die Nutzung der Dachfläche als Fluchtweg oder auch Instandhaltungsmaßnahmen darauf installierter Anlagen, wie PV-Anlagen oder Dachbegrünungen.

Ab 2 Meter Gebäudehöhe ist im Regelfall eine Absturzsicherung notwendig. (Mann/Mollenhauer 2020a).

Während der Bauphase ist ein Kollektivschutz (Gerüst oder Geländer) erforderlich. Jegliches Arbeiten auf dem Dach ohne kollektive Schutzeinrichtungen darf grundsätzlich nur von qualifiziertem und geschultem Personal durchgeführt werden.

Je nach Nutzungstyp des Daches müssen bestimmte Arten der Absturzsicherung vorhanden sein. Dazu gehören fest montierte oder auflastgehaltene Geländer oder Persönliche Schutzausrüstung gegen Absturz (PSAgA) in Form von Einzelanschlagpunkten, Seil- oder Schienensysteme.

Öffentlich genutzte Dächer als Dachgarten, Terrassen, usw. benötigen grundsätzlich ortsfeste Umwehrungen (z. B. Geländer), die unter Beachtung der Landesbauordnungen (Nutzung, Holmabstände, Gesamthöhe, usw.) einzusetzen sind.

Werden Flachdächer mit einer PV-Anlage, extensiven Dachbegrünung oder ein PV-Gründach ausgestattet, reicht eine PSAgA mit dauerhaft befestigten Anschlagpunkten oder linearen Anschlagvorrichtungen aus (Mann/Mollenhauer 2020a).

Für geneigte Dächer (ab 5° Dachneigung) müssen objektbezogen zugelassene Lösungen zum Einsatz kommen, z. B. über Sicherungshaken.

Eine detaillierte Erläuterung und Eignungsbewertung der Parameter wird in Tabelle A 18 im Anhang beschrieben.

Blitzschutz

Zur Schadensvermeidung der Anlagen ist ein Blitzschutz erforderlich. Die Fangeinrichtungen (z. B. Fangstange, Fangmasten oder gespannte Seile), Erdungsanlagen (Fundamenterder, Erdringleitungen oder Tiefenerdungen) sowie die Ableitungen zur Verbindung der beiden Systeme sind entsprechend der jeweiligen für das Gebäude festgelegten Blitzschutzklassen (I–IV) zu installieren und werden vor allem an besonders gefährdeten Bereichen des Daches, wie Dachkanten oder in der Nähe von Dachaufbauten, montiert.

Alle PV-Anlagenelemente müssen innerhalb der äußeren Blitzschutzanlage liegen. Auf eventuelle Kollisionen mit der PV-Aufständigung oder der elektrischen Leitungen ist zu achten. Hinsichtlich des Blitzschutzes bei begrünten Dächern sind keine grundsätzlichen Änderungen notwendig. Jedoch ist durch ausreichende Instandhaltungsmaßnahmen darauf zu achten, dass durch den Pflanzenwuchs keine Beschädigungen der Blitzschutzanlage auftreten.

Die nachträgliche Änderung von äußeren Blitzschutzanlagen ist i.d.R. möglich. Es gelten neben den Gesetzen (z. B. Landesbauordnungen, Sonderbauvorschriften für Krankenhäuser, Hochhäuser, Versammlungs- und Verkaufsstätten), und Verordnungen (z. B. Technische Regeln für Betriebssicherheit - TRBS) insbesondere die Regeln der Blitzschutz-Normenreihe DIN EN 62305 (VDE 0185-305) (Mann/Mollenhauer 2020a; Witzel 2016).

Eine detaillierte Erläuterung und Eignungsbewertung der Parameter wird in Tabelle A 19 im Anhang beschrieben.

Zustand der elektrischen Bestandsanlagen

Soll eine PV-Anlage auf einem begrünten oder unbegrünten Dach installiert werden, ist diese nach den gängigen Regeln der Technik anzuschließen und in die bestehenden elektrischen Anlagen des Gebäudes einzubinden. Durch diese Maßnahmen kann auch der Bestandsschutz elektrischer Anlagen erlöschen, was eine Ertüchtigung nach sich zieht. Dies ist vor allem bei älteren Gebäuden der Fall und führt nicht selten zu erheblichen Mehrkosten. Im Umkehrschluss ist dies auch häufig ein Hemmnis zur Installation einer PV-Anlage im Allgemeinen und bei Mieterstromvorhaben im Speziellen (Aretz et al. 2022a). Durch die verhältnismäßig aufwendigen Abrechnungsmethoden werden bei Mieterstromprojekten oftmals noch zusätzliche Zähler und Schaltschränke benötigt, was die Kosten noch zusätzlich nach oben treibt. Da aber gerade bei diesen Gebäudetypen große Solarpotenziale schlummern, fördern erste Bundesländer die Mehrkosten im Zuge der Ertüchtigung der elektrischen Anlagen, wie beispielsweise das Land Berlin (vgl. SenWEB Berlin 2022). Auch wenn der Indikator „Zustand der elektrischen Bestandsanlagen“ keine direkte Aussage zur Eignung eines Gebäudes/Daches für die Errichtung einer PV-Anlage bedeutet, gibt er doch in gewissem Maße einen Anhaltspunkt zu einem nicht zu vernachlässigenden Hemmnis. Das Alter des Gebäudes kann hier zwar auf den Zustand der elektrischen Bestandsanlage hinweisen, pauschalisieren lassen sich etwaige Mehrkosten jedoch nicht. Ist beispielsweise eine neue Zählerschranksetzung vorgeschrieben, ist es oftmals auch eine Platzfrage diesen sachgerecht zu installieren. Dieses Problem kann sowohl bei alten und neuen elektrischen Hausanlagen auftreten.

Eine detaillierte Erläuterung und Eignungsbewertung der Parameter wird in Tabelle A 20 im Anhang beschrieben.

AS4 - Technische Möglichkeiten und damit verbundene wirtschaftliche Konsequenzen

In diesem Arbeitsschritt wurden alle für die Studie relevanten Informationen zu Gründächern, PV-Anlagen sowie PV-Gründächern in Bezug auf deren Vor- und Nachteile, technische Umsetzung, Wirtschaftlichkeit und Instandhaltung erfasst.

Gründach

Wirkungen

Gründächer vereinen eine Vielzahl an positiven Effekten.

Eines der Hauptargumente für Dachbegrünungen betrifft deren Retentionsleitung. Dachbegrünungen können je nach Ausführung große Mengen an Niederschlagswasser zurückhalten, das anschließend zur Verdunstung, und damit zur Kühlung der näheren Umgebung, zur Verfügung steht oder zeitverzögert wieder abgeleitet wird. Es ist anzumerken, dass die Kühlfunktion von verschiedenen Parametern, wie beispielsweise dem Wassergehalt im Begrünungsaufbau und Art der Vegetation abhängt. Jahreszeitliche Schwankungen beeinflussen somit den Kühlungseffekt durch das Gründach.

Nichtsdestotrotz sind Gründächer eine wichtige Maßnahme um das Schwammstadtprinzip zu fördern. Extensivbegrünungen sind in der Lage zwischen 60 und 90% des Gesamtniederschlags im Jahr aufzunehmen. Intensivbegrünungen speichern bis zu 99% des Niederschlagswassers (Köhler et al. 2012). In großflächigem Maßstab können sie so besonders bei Starkregenereignissen wirksam sein und vor einer Überlastung der Kanalisation schützen. Gleichzeitig können die Maßnahmen, die zur nachhaltigen Regenwasserbewirtschaftung beitragen, innerhalb der Abwassersatzung für eine Gebührenreduktion der Niederschlagswasserbeseitigung genutzt werden.

Gründächer können die Biodiversität in der Stadt deutlich erhöhen. Je nach Begrünungsart und Ausdehnung der begrünten Fläche sind eine große Vielfalt an Pflanzenarten möglich. Mit diesen bieten sich vor allem für Insekten zusätzliche Lebensräume. Die eingesetzten Pflanzen sorgen zudem durch Ihre CO₂- und Schadstoffbindung für eine verbesserte Luftqualität.

Energieeinsparungen sind ebenso möglich. Die zusätzliche Dämmung durch die Dachbegrünungsaufbauten kann im Winter dazu führen, dass Heizenergie gespart wird. Im Sommer kann aufgrund des kühlenden Effektes der Einsatz von Klimageräten verringert werden. Je größer dabei der Schichtaufbau der Begrünung ist, umso höher ist nicht nur der Dämmwert, sondern auch die Lärmreduktion.

Insbesondere die schichtstärkere Intensivbegrünung (Dachgarten) bildet mit Blick auf die Nachverdichtung der Städte und dem steigenden Verlust an innerstädtischen Frei- und Grünflächen ein großes Potenzial als Erholungs- und Freizeitfläche. Sie kommt dem ebenerdigen Garten nahe und kann auch als Spiel- und Sportplatzfläche oder zur gärtnerischen Betätigung genutzt werden. Die gestalterischen Möglichkeiten auf Gründächern sind, solange die statischen Voraussetzungen vorliegen, der mit gewachsener Erde gleichzusetzen. Dachbegrünungen werten das Wohnumfeld auf, sorgen für Gemeinschaftsbildung und Mieterzufriedenheit und verbessern somit die Lebensbedingungen in immer dichter besiedelten Städten.

Nicht zuletzt schützen Dachbegrünungen die darunter liegenden Dachabdichtungen vor extremen Witterungseinflüssen, wie Hagel- und Starkniederschlägen und Stürmen, sowie thermischen Belastungen und UV-Strahlung. Gegenüber konventionellen, unbegrünten Dächern, welche nach etwa 20 bis 30 Jahren einer Sanierung bedürfen, beläuft sich die Lebensdauer der Dachabdichtung unter Dachbegrünungen auf mindestens 30 bis 40 Jahre (vgl. BBSR, 2017). Die Haltbarkeit der Abdichtung durch die Dachbegrünung wird also deutlich verlängert. Es ist sogar anzunehmen, dass eine

fachgerechte Instandhaltung des Gründaches die Lebensdauer der Dachabdichtung noch über den genannten Zeitpunkt verschieben kann.

In Arbeitsschritt 5 wird auf einige der genannten Aspekte detailliert eingegangen.

Allgemeiner Gründachschichtaufbau

Dachbegrünungen werden in einschichtiger oder mehrschichtiger Bauweise umgesetzt. Der etablierte Aufbau ist dabei Letzterer, der Mehrschichtaufbau. Während alle Schichten innerhalb des einschichtigen Aufbaus zusammengefasst werden, bilden sich bei der mehrschichtigen Bauweise die Funktionen „Dränage“ und „Vegetationstragschicht“ als zwei durch ein Filtervlies getrennte Schichten aus (vgl. Abbildung 1). Somit sind effektivere Möglichkeiten bei der Wasserspeicherung und Ableitung gegeben. Die Dränageschicht kann sowohl als Schüttgut oder Festkörperdränage eingebaut werden.

Mit dem mehrschichtigen Aufbau lassen sich extensive und intensive Dachbegrünungen bis zu einer Aufbauhöhe von etwa 35 Zentimeter realisieren. Für Substratstärken, die darüber hinausgehen (z. B. bei Tiefgaragendächern) ist ein weiteres Untersubstrat notwendig, welches keine organischen Anteile beinhaltet.

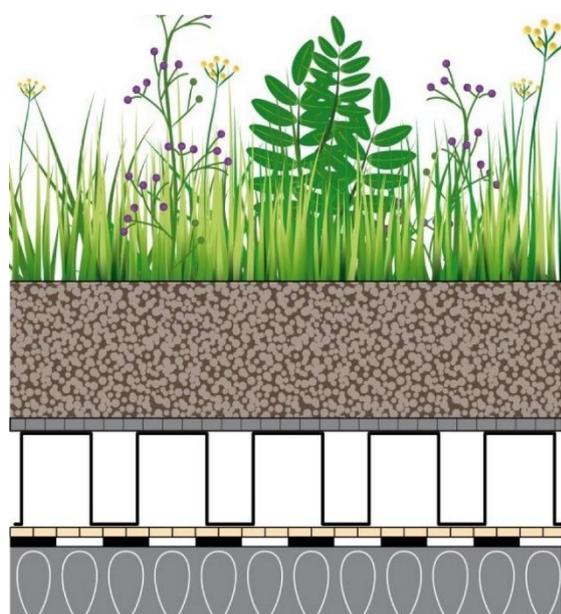
Aufbauend auf ...

- einer geeigneten Dachunterkonstruktion mit ausreichender Tragfähigkeit und
- einer wurzelfesten Dachabdichtung bzw. Wurzelschutzbahn

... sieht der typische (mehrschichtige) Begrünungsaufbau von unten nach oben wie folgt aus:

- Schutzlage zum Schutz der Dachabdichtung vor mechanischer Beschädigung,
- Dränageschicht zur Speicherung und Ableitung des Niederschlagswassers,
- Filterschicht zur Verhinderung des Einschlämmens von Feinanteilen,
- Vegetationstragschicht zur Verwurzelung der Pflanzen und
- Vegetation.

Abbildung 1
Gründachschichtaufbau mehrschichtig



Quelle: Bundesverband GebäudeGrün e. V.

Gründachsysteme: Klassische Lösungen

Dachbegrünungen lassen sich in zwei klassische Arten unterteilen, in die Extensivbegrünung und in die Intensivbegrünung. Das resultiert maßgebend aus dem Pflegeaufwand. Zudem sind extensive Begrünungen nicht direkt für den Menschen nutzbare Flächen und intensive Begrünungen sorgen wiederum für begeh- und nutzbare Bereiche auf dem Dach. Beide Begrünungsformen verfügen über verschiedene Unterkategorien, die je nach Begrünungsziel angewendet werden.

Extensivbegrünung

Die häufigste und bekannteste Form der Dachbegrünung ist die Extensivbegrünung. Sie ähnelt von ihrem Erscheinungsbild natürlichen, ungenutzten Freiflächen. Diese Dachbegrünungsvariante zielt darauf ab, begrünte und nicht begehbar ausgeglichene Flächen auf dem Dach zu bieten.

Extensivbegrünung können einschichtig oder mehrschichtig ausgeführt werden und lassen sich sowohl auf flachen als auch auf geneigten Dächern bis etwa 45° Neigung umsetzen.

Die Schichtstärken sind vergleichsweise niedrig gehalten und liegen je nach Begrünungsziel und vorhanden statischen Bedingungen zwischen 5 bis 18 cm. Je höher die Vegetationstragschicht ausgebildet wird, desto größer ist zwar das Gewicht des Gründachaufbaus, allerdings wird damit auch ein höheres Retentionsvolumen und eine größere Pflanzenvielfalt geboten.

Zumeist werden bei Extensivbegrünungen niedrigwüchsige, trockenresistente Pflanzen verwendet, die sich auch ohne intensivere Pflege selbst erhalten können. Abhängig der Höhe des Gründachaufbaus werden unterschiedliche Vegetationsformen unterschieden, die in Tabelle A 21 im Anhang detailliert beschrieben sind.

Intensivbegrünung

Anders als bei extensiven Begrünungen ist die Absicht bei Intensivbegrünungen eine Nutzung der Dachfläche für den Menschen zu schaffen. Je nach Nutzungsziel werden dafür verschiedene Begrünungsvarianten verwendet, die nachfolgend und in Tabelle A 22 im Anhang detailliert beschrieben sind.

Typische Intensivbegrünung

Unter einer intensiven Dachbegrünung versteht sich häufig eine Art der Nutzung. Treffend ist der Begriff „Dachgarten“. Entsprechend der Ausbildungsform, d. h. der Höhe der Vegetationstragschicht, können mehrjährigen Stauden, Gehölze oder Bäumen gepflanzt werden. Die Schichtstärke beginnt bei etwa 25 cm und kann bis zu 200 cm betragen. Demnach sind intensive Dachbegrünungen im Regelfall nur auf Flachdächern und Tiefgaragen möglich.

Sie werden häufig als außenliegende Nutzfläche und erweiterter Aufenthaltsraum geplant und unterliegen damit hohen Anforderungen an die Bau- und Vegetationstechnik. Lässt die Statik es zu, sind die Gestaltungs- und Nutzungsmöglichkeiten nahezu unbegrenzt. Auch Verkehrsflächen in Form von Wegen, Terrassen bis hin zu Fahrbelägen sind in Kombination mit Intensivbegrünungen umsetzbar.

Rasendach

Ziel eines Rasendaches ist die Generierung einer Fläche für Spiel- und Sportplatzmöglichkeiten und damit einer intensiven Nutzung der Dachfläche.

Damit sich eine Rasenfläche ausbilden kann sind etwa 20–30 cm eines speziellen Dachsubstrates erforderlich. Je nach vorgesehener Nutzung der Rasenflächen sind nun gemäß den FLL-Dachbegrünungsrichtlinien beispielsweise die Regel-Saatgut-Mischungen „Gebrauchsrasen-Trockenlagen“, „Gebrauchsrasen Spielrasen“ oder „Parkplatzrasen“ nach den FLL-„Regel-Saatgut-Mischungen Rasen - RSM Rasen“ einzubringen.

Um die dauerhafte Wasserversorgung sicherzustellen, muss eine fest installierte Bewässerungseinrichtung eingebaut werden.

Tiefgaragendach

Tiefgaragendächer können oft mit ebenerdigen Gärten gleichgesetzt werden. Gewünscht sind meist stark nutzbare Flächen, die als Ausgleich der verlorengegangenen unbebauten Fläche dienen. Die Vegetationstragschicht wird daher meist hoch ausgebracht, womit eine hohe Pflanzenvielfalt gegeben wird. Ab einer Substratstärke von 35 cm wird ein weiteres Untersubstrat erforderlich. Die Statik ermöglicht meist, dass sie auch als Verkehrsfläche für Fahrzeuge fundieren können. Für große Sträucher und kleine Bäume sind Schichtstärken zwischen 60 und 100 cm notwendig. Hohe Bäume benötigen etwa eine Durchwurzelungsschicht von 150–200 cm. Um dies zu gewährleisten können für die Bäume Pflanzgruben oder Pflanzringe geschaffen werden.

Gründachsysteme: Zielgerichtete, besondere Lösungen

Unter zielgerichtete, besondere Lösungen werden Dachbegrünungen verstanden, die bestimmte Funktionen erfüllen sollen, die über eine standartmäßige Nutzung der Dachbegrünung hinausgehen. Tabelle A 23 im Anhang fasst die wesentlichen Fakten ergänzend zusammen.

Schräg- und Steildachbegrünung

Steildächer können durch erfahrene Fachbetriebe bis etwa 45 ° Dachneigung begrünt werden, sind jedoch eine besondere Herausforderung bei der Herstellung und damit ebenso kostenaufwändiger als Flachdachbegrünungen. Nach den FLL-Richtlinien sind bei einer Dachneigung von über 10–15 ° konstruktive Maßnahmen zur Schubsicherung vorzunehmen, um zu verhindern, dass der Gründachaufbau ins Rutschen kommt. Wichtig dabei ist die Verwendung bewährter, verwitterungsbeständiger und statisch belastbarer Schubsicherungssysteme. Holzkonstruktionen sind ungeeignet, da sie früher oder später verwittern. Oftmals werden Kunststoffelemente verwendet, die unterseitig Hohlräume zur Wasserableitung und oberseitig Mulden haben, die das Substrat aufnehmen und eine gute Verzahnung und damit Schubsicherung darstellen. Die komplette Schublast des Begrünungsaufbaus wird hierbei allerdings auf den Traufbalken abgeleitet, was bei dessen Dimensionierung im Vorfeld zu beachten ist. Die Vegetationsaufbringung erfolgt durch vorkonfektionierte Vegetationsmatten. Bei Schrägdächern können sich an einem Objekt je nach Gebäudelage und Dachexposition unterschiedliche Vegetationsformen ausbilden. Ggf. kann in niederschlagsarmen Regionen bei dünnenschichtigen Steildachbegrünungen eine automatische Bewässerung notwendig sein.

Biodiversitätsgründach

Ziel dieser Gründachsonderlösung ist die Steigerung der Biodiversität, zunächst auf dem Dach und bei großflächiger Anlage innerhalb der ganzen Stadt. Dies geschieht vor allem durch eine hohe Struktur- und Pflanzenvielfalt, wodurch mehr Lebensräume für Insekten und Bodentiere geboten werden.

Typische Biodiversitätsdächer sind als erweiterte extensive Dachbegrünungen mit partieller Anordnung verschiedener Biodiversitätsbausteine zu verstehen. Das sind beispielsweise Substratanhügelungen mit Sträuchern als Rückzugsbereiche, Totholz als Nisthilfen, Steine als Verstecke, Sandlinsen als Mikrohabitate oder Wasserflächen als Vogel- und Insektentränke.

Um die dauerhafte Funktion der Begrünung zu gewährleisten ist eine fachgerechte Pflege unbedingt erforderlich. In erster Linie soll die biologische Vielfalt erhalten und gefördert werden. Insbesondere invasive Arten sollten daher entfernt werden.

Bei der Planung ist primär die Verwehsicherheit am Standort zu beachten. Sind die Windkräfte zu hoch, sollten nur Maßnahmen zur Steigerung der Biodiversität eingebracht werden, die nicht verwehen können.

Retentionsdach

Bei einem begrünten Retentionsdach wird innerhalb der Dränageschicht ein temporärer oder dauerhafter Wasseranstau geschaffen. Dadurch wird das so schon enorme Rückhaltevolumen einer Dachbegrünung nochmals mit bis zu 140 l/m² gesteigert. Somit können bis zu 99% des Niederschlagswasser zurückgehalten werden. Das Wasser wird dann einerseits in der Vegetationstragschicht und zusätzlich in der Retentionsschicht gespeichert und steht damit dem Begrünungsaufbau zur Verdunstung zu Verfügung.

Über ein Anstaelement, die sogenannte Drossel, lässt sich die maximale Abflussspende einstellen und gedrosselt über mehrere Stunden und Tage ableiten. Eine der Herausforderungen stellt dabei die Berechnung des Abflussverhaltens des Begrünungsaufbaus und dessen Abflussbeiwerts unter Berücksichtigung der örtlichen Niederschläge dar. Weitere Planungskriterien, die an diesen Gründachtyp gestellt werden, sind ein gefälleloses Dach und die höheren statischen Erfordernisse.

Urban-Farming-Dach

Urban-Farming auf dem Dach wird auf verschiedene Art und Weise betrieben. Vom kleinen bewirtschafteten Dachgarten einer Privatperson bis hin zur erwerbsgartenbauähnlichen Dachnutzung ist fast alles vorstellbar.

Durch die Verlagerung der Produktionsstätten in die Stadt werden nicht nur Transportwege gespart und ein weiterer Beitrag zum Klimaschutz geleistet, sondern Obst- und Gemüseanbau wird erlebbar und fördert neben der gesunden und bewussten Ernährung auch das Miteinander.

Unter einem Urban-Farming-Dach versteht sich grundsätzlich eine intensive Dachnutzung, auf der Obst bzw. Gemüse angebaut wird. Obwohl der Begrünungsaufbau der klassischen Intensivbegrünung ähnelt, wird für das Urban-Farming-Dach ein spezielles Substrat benötigt, welches das Wachstum der Nutzpflanzen unterstützt.

Die verwendbaren Obst- und Gemüsesorten werden durch die örtlich bedingte Flächenlast und die Bewässerungsstrategie bestimmt. Viele verschiedene Nahrungsmittel wurden bereits erfolgreich auf einem dieser Dächer geerntet. Zu den auf einem Urban-Farming-Dach unbedenklichen anzubauenden Nutzpflanzen zählen u. a. Karotten, Kopfsalat, Tomaten, Zucchini, viele Kräutersorten, Beerensträucher und kleine Obstbäume.

Kostenzusammenstellung

Alle ermittelten Kosten aus Tabelle A 21, Tabelle A 22 und Tabelle A 23 im Anhang beruhen auf Abfragen bei ausführenden Betrieben mit Fokus auf Dachbegrünungen. Dennoch kann es objektbezogen und inflationsbedingt zu Abweichungen der Herstellungs- und Instandhaltungskosten kommen. Nachfolgende Parameter wirken sich auf die Einbaukosten eines Gründachs aus:

- Größe der Dachfläche,
- Zugänglichkeit,
- Planungsaufwand,
- Transportwege,
- Zusammensetzung des Gründachaufbaus,
- Schichtstärke des Gründachaufbaus und
- ggf. weitere zielorientierte Strukturen (z. B. Verkehrsnutzung, Bäume, Spielplätze etc.).

Die laufenden Kosten für das Gründach ergeben sich aus Pflege und Wartungsmaßnahmen des genutzten Systems.

Instandhaltung (Pflege und Wartung)

Eine fachgerechte und regelmäßige Pflege und Wartung der Dachbegrünung ist für ein langfristiges Überleben der Vegetation sicherzustellen.

Für Extensivbegrünungen ist die Pflege und Wartung ein- bis zweimal jährlich durchzuführen. Bei Intensivbegrünungen wird die Häufigkeit der Instandhaltung anhand des gewünschten Erscheinungsbildes und der Nutzung festgelegt und liegt bei etwa 4 bis 10 Instandhaltungsgängen pro Jahr.

Instandhaltungsmaßnahmen für Dachbegrünungen

Die nachfolgenden Pflegemaßnahmen gelten zunächst für extensive Dachbegrünungen. Anschließend werden zusätzliche bzw. intensivere Pflegemaßnahmen der weiteren Dachbegrünungsformen genannt.

- Unerwünschten Bewuchs entfernen, d. h. nicht gepflanzte Gehölze (z. B. Birken, Kiefern, Pappeln, Weiden) und invasive Arten,
- Schnittgut, Laub und Unrat entfernen,
- Kiesstreifen und Plattenbeläge von Bewuchs freihalten,
- im Bedarfsfall Düngen, Richtwert: 5 g N/m² pro Jahr mit Langzeitdünger,
- Wässern im Bedarfsfall,
- Mähen und Entnahme Mahdgut,
- Fehlstellen nachsäen oder pflanzen,
- Substrat bei Erosion nachfüllen,
- Pflanzenschutz,
- Rand- und Sicherheitsstreifen sowie Plattenbeläge freihalten,
- Entwässerungseinrichtungen säubern,
- Blick in den Kontrollschacht, ggf. Unrat entfernen und
- Bewässerungsanlage (sofern vorhanden) kontrollieren und Funktion prüfen.

Zusätzliche bzw. intensivere Instandhaltungsmaßnahmen von Intensivbegrünungen

- Schnitтарbeiten,
- Mähen und/oder Mulchen,
- Winterschutzmaßnahmen, z. B. automatische Bewässerung abstellen, Wasserleitungen entleeren und Wasseranstau absenken und
- Verankerungen überprüfen und nachziehen.

Zusätzliche bzw. intensivere Instandhaltungsmaßnahmen von Rasendächern

- Mähen mit Rasenmäher bzw. Freischneider,
- Mähgut entfernen,
- Laub und Unrat beseitigen,
- Nachsäen im Bedarfsfall,
- Vertikutieren, aerifizieren, besanden und
- Bewässerungsanlage kontrollieren und Funktion prüfen.

Zusätzliche bzw. intensivere Instandhaltungsmaßnahmen von Biodiversitäts Gründächern

- Unerwünschten Bewuchs entfernen (Gehölze, invasive Arten),
- Mähen im Bedarfsfall und
- Nisthilfen kontrollieren, reinigen und ggf. austauschen.

Zusätzliche bzw. intensivere Instandhaltungsmaßnahmen von Retentionsdächern

- Wasseranstau im Bedarfsfall absenken und
- Drosselablauf prüfen und ggf. reinigen.

Zusätzliche bzw. intensivere Instandhaltungsmaßnahmen von Urban-Farming-Dächern

- Einjährige Obst- und Gemüsesorten per Hand entfernen und
- Substrat im Bedarfsfall (teilweise) austauschen.

PV-Anlage

Wirkungen

Ziel einer Photovoltaikanlage ist die Gewinnung von Strom auf eine klimafreundliche Art. Mit der Nutzung der Sonnenenergie zur Stromerzeugung wird die CO₂-Treibhausgas-Emission im Vergleich zu anderen Energiequellen (z. B. Kohle) deutlich reduziert, womit ein wichtiger Beitrag zum Klimaschutz geleistet wird.

Der erzeugte Strom kann je nach Bedarf für den Eigenverbrauch oder zur Einspeisung in das öffentliche Stromnetz genutzt werden. Ersteres lohnt sich zumeist mehr, da einerseits der Stromerzeugende durch die Eigennutzung selbst von der Anlage profitiert und die Stromkosten senken kann, gleichzeitig werden die örtlichen Stromnetze dadurch entlastet.

Der genaue Ertrag einer PV-Anlage wird in Arbeitsschritt 5 (AS5) beschrieben.

PV-Dachsysteme

Entsprechend der Dachneigung kommen für Schrägdächer und Flachdächer jeweils verschiedene Lösungen zum Einsatz. Diese sind nachstehend bezüglich ihrer technischen Umsetzung und Vor- und Nachteile beschrieben.

Ein tabellarischer Vergleich, wie bei den Gründachsystemen, wurde bei den PV-Dachsystemen nicht durchgeführt, da die Systeme einerseits in Abhängigkeit des Untergrunds die Verwendung einer PV-Anlage ermöglichen sollen, und andererseits bezüglich der Kosten der verschiedenen Systeme keine allgemein gültigen Werte ermittelt werden konnten.

PV-Dachsysteme für Schrägdächer

Bei PV-Dachsystemen für Schrägdächer wird grundsätzlich zwischen Indach- und Aufdachanlagen unterschieden. Alle Varianten lassen sowohl eine Süd- als auch Ost-West-Verlegung zu.

Indachanlagen

Hierbei handelt es sich um bauwerksintegrierte PV-Anlagen. Diese Systeme ersetzen andere Deckenelemente, wie beispielsweise Ziegel, und übernehmen deren Funktion (Spilker et al. 2019). Zusätzliche Modul-Montagesysteme können vermieden werden. Um den Höchstertrag zu gewährleisten, sollte die Dachfläche bzw. das Gebäude optimal ausgerichtet sein, anderenfalls ist mit Ertragseinbußen zu rechnen.

Aufdachanlagen

PV-Aufdachanlagen werden oberhalb der verschiedenen Deckenelemente montiert. Diese können in Abhängigkeit der Dachneigung und Zielsetzung parallel oder aufgeständert angeordnet werden. Während bei Parallelmontagen zumeist keine Einwirkungen auf Schnee- und Windlasten zu befürchten sind, müssen diese bei aufgeständerter Bauweise mitbedacht werden. Letztere hat dagegen den Vorteil, dass sie entsprechend der Einstrahlung auf das Dach ausgerichtet werden kann.

Die Befestigung erfolgt je nach Dachkonstruktion und Deckenelement direkt oder indirekt.

Bei einer direkten mechanischen Befestigung wird das Montagesystem mittels geeigneter Befestigungselemente in der Tragkonstruktion des Daches verankert, wodurch die Lasten über das Tragsystem des Daches abgetragen werden. Allerdings beeinträchtigt dies die Funktionssicherheit des Dachaufbaus, da die Deckenelemente und gegebenenfalls weitere Schichten, wie Dämmung oder Dampfsperre durchdrungen werden müssen. Die indirekte Befestigung vermeidet dieses Problem, indem die PV-Anlage nur an den Deckenelementen oder der obersten Schicht installiert wird. Die Lasten werden so über das Deckenelement und der jeweilig geeigneten Befestigung in die Unterkonstruktion

weitergeführt (Spilker et al. 2019). Dennoch ist anzumerken, dass jede Durchdringung ein Schadpotenzial mit sich bringt. Die Installation sollte deshalb nur von professionellen Betrieben durchgeführt werden.

Herstellende Firmen für PV-Montagesysteme unterscheiden zumeist zwischen Unterkonstruktionen für Metaldächer und Ziegeldächer. Einige systemherstellende Unternehmen bieten jedoch auch Baukasten-Systeme an, bei denen aus verschiedenen Elementen sowohl Lösungen für Metall- wie auch Ziegeldächer zusammengestellt werden. Diese Systeme sind jedoch aufgrund der verschiedenen Bauteile und Zusammensetzungen häufig teurer als Standardlösungen.

PV-Schrägdachsysteme für Metaldächer

Zu den Metaldächern zählen Trapezblech-, Wellformblech, Sandwichblech- und Falzblechdächer. Für die aufgezählten Dachtypen sind passende Lösungen zur Befestigung einer PV-Anlage auf dem Markt vorhanden. Sehr häufig geschieht dies über Schienensysteme und einer Direktbefestigung der Schienen mit Stockschrauben im Dach. Für Falzblechdächer existieren zudem Lösungen mittels Klemmen, damit das Blech nicht durchdrungen werden muss. Spilker et al. (2019) beschreibt die Lösungen für die verschiedenen Dachformen detailliert und zeigt diese anhand von Längs- und Querschnitten auf.

PV-Schrägdachsysteme für Ziegeldächer

Ziegeldächern stehen an dieser Stelle für Dacheindeckungen mit Tonziegel, Pfannenziegel und Betonziegel. Die Befestigung bei Ziegeldächern erfolgt in der Regel über Dachhaken oder Formelemente.

Ein Dachhaken verläuft zwischen zwei Dachziegelreihen und wird in der Dachlattung verschraubt, wodurch gewährleistet wird, dass die Modultragschienen ohne größeren Mehraufwand mit der tragenden Konstruktion des Daches verbunden werden. Zur Einbringung der Dachhaken ist häufig eine Bearbeitung der Dachziegel erforderlich, die bei nicht fachgerechter Ausführung die Regendichtigkeit einschränkt und dadurch für ein erhöhtes Schadpotenzial sorgen kann. Vorteile des Systems liegen vor allem in einer schnellen Montage, einer guten Hinterlüftung und Anpassbarkeit der PV-Anlage an die Dachfläche.

Durch den Einsatz von Formelementen aus Metall oder Kunststoff können einzelne Ziegel ersetzt werden. Die Regensicherheit wird dadurch nicht eingeschränkt, da die vorhandenen Dachziegel nicht bearbeitet werden müssen. Allerdings werden genau wie die Dachhaken auch die „Ersatzziegel“ direkt in den Dachsparren verankert. Neben einer guten Hinterlüftung bietet diese Lösung zumeist eine hohe Belastbarkeit der Anlage. Die Formelemente sorgen für eine optische Aufwertung der PV-Aufdachanlage, sind jedoch deutlich kostenintensiver. Spilker et al. (2019).

Die Befestigung mit Dachhaken und Formelementen wird in Silker et al. (2019) umfangreich beschrieben und anhand von Schnitten demonstriert.

PV-Dachsysteme für Flachdächer

Im Vergleich zu Schrägdächern (Pult- oder Satteldächern) lässt sich die PV-Anlage auf Flachdächern besser entsprechend der örtlichen Bedingungen ausrichten.

Bei PV-Anlagen auf Flachdächern wird zunächst zwischen zwei grundsätzlichen Montagesystemen unterschieden: Parallelmontage und der aufgeständerten Montage. Für beide Systeme bestehen verschiedene Befestigungsmöglichkeiten mittels einer direkten Verankerung in der Dachhaut oder einer Ballastierung.

Die Wahl der Befestigung hängt zumeist von der maximal zulässigen Auflast ab. Ballastierte Systeme sind aufgrund der vermiedenen Dachdurchdringung zu empfehlen.

Parallelverlegung

Die Parallelmontage gewährleistet einen horizontalen, bzw. parallel ausgerichteten Einbau der PV-Module zur Dachoberfläche. Aufgrund ihrer Konstruktion haben sie zumeist keine Auswirkungen auf die Schnee- und Windlasten des Gebäudes. Um unter anderem die Einsicht auf die Anlage zu vermeiden, haben die Module i.d.R. wenig Abstand zur Dachkonstruktion. So wird oftmals auch die Verlegung bei denkmalgeschützten Gebäuden möglich (Zöller et al. 2016).

Aufgeständerte Verlegung

Die aufgeständerte Bauweise wird am häufigsten genutzt, da die PV-Anlage unabhängig der Gebäudeausrichtung entsprechend verlegt und geneigt werden können. Durch die bessere Hinterlüftung können die PV-Module zudem höhere Erträge erzielen.

Die Mindestneigung für Aufständersysteme sollte 5° betragen, Neigungen von 15° sind jedoch empfehlenswert, um den Selbstreinigungseffekt der PV-Module zu gewährleisten.

Aufständersysteme benötigen größere Reihenabstände, damit Verschattungen zwischen den Modulreihen vermieden werden können. Dies begünstigt jedoch, dass ausreichend Raum für Wartungsarbeiten an der PV-Anlage geschaffen wird.

Es sollte beachtet werden, dass aufgeständerte PV-Anlagen aufgrund des erhöhten Materialbedarfs und des zusätzlichen Schutzes vor Windbelastung in der Regel schwerer sind.

In Schneereichen gebieten könnten außerdem Punktlasten durch abrutschenden Schnee in den Bereichen zwischen Modulreihen entstehen.

Soll die PV-Anlage nur auf der obersten Schicht des Daches aufgestellt werden, muss häufig eine indirekte Befestigung über Punktballastierung (z. B. Betonsteine) oder Flächenballastierung (z. B. Kies oder Begrünung) zum Einsatz kommen (Zöller et al. 2016).

Aufgeständertes PV-Dachsystem mit direkter Befestigung

Am statisch sichersten ist die direkte Befestigung der PV-Anlage, bei der die Montagesysteme über geeignete Befestigungsmittel mit der vorhandenen Tragkonstruktion des Daches verbunden werden. Dachabdichtung, Dämmung und Dampfsperre werden bei der Maßnahme durchstoßen, weshalb die Eindichtung gemäß den Fachregeln des Dachdeckerhandwerks erfolgen muss. Bewährte Eindichtungssysteme für die Befestigungselemente sind beispielsweise Manschetten oder Flüssigkunststoffe. Dennoch muss berücksichtigt werden, dass es bei statischen Verbindungen durch die Dämmebene zu Wärmebrücken kommt, die wiederum zu Wärmeverlusten und möglicherweise bei Leichtdächern zu Problemen mit Tauwasser führen können. Für Stahlbetondecken trifft dies zumeist nicht zu.

Die Träger für das Montagesystem können bis auf 50 cm Höhe dimensioniert werden, um die Dachabdichtung ohne Entfernung der PV-Anlage zu warten oder, sofern erforderlich, zu erneuern. Bei einer fachgerechten Montage können diese Systeme der Lebenserwartung des Gebäudes entsprechen.

Jedoch wird neben des höheren Schadpotenzials auch aufgrund der erhöhten Kosten für Planung und Ausführung der Systeme häufig auf deren Anwendung verzichtet.

Eine Alternative mit geringerem Schadpotenzial stellt die indirekte Befestigung durch eine Verklebung oder Verschweißung des Montagesystems mit der Abdichtung dar, um das PV-System durch die Dachhaut lagesicher zu halten. Der Einsatz dieser Systeme ist nur mit einer bauaufsichtlichen Zulassung des DIBt möglich (Zöller et al. 2016).

Die direkten Befestigungsmöglichkeiten werden in Zöller et al. (2016) im Detail beschrieben und anhand von Schnitten dargestellt.

Aufgeständertes PV-Dachsystem mit indirekter Befestigung, Ballastierung

Erfahrungsgemäß wird diese Form der Montagesysteme für PV-Anlagen am häufigsten genutzt. Je nach Ertragsziel oder der Standortverhältnisse sollten die Anlagen in Südausrichtung mit circa 30 ° Neigung oder Ost-West-Ausrichtung mit etwa 15 ° Modulneigung aufgestellt und mit systemgeeigneten Mitteln ballastiert werden.

Eine sehr häufig genutzte Form sind spezielle ballastminimierte, bzw. „aerodynamische“ Systeme, die flacher auf der Dachhaut verlegt sind. Dadurch wird zwar weniger Spitzenleistung erzielt, der PV-Anlage wird jedoch ebenso eine geringere Windangriffsfläche geboten, wodurch reduzierte Auflasten zur Lagesicherung erforderlich werden. Zur Kosteneinsparung erfolgt die Auflage der Systeme oft mit Lastverteilerplatten aus Betonsteinen, welche auf Bautenschutzmatten aufgelegt werden. Das erzeugt Punktlasten, weshalb ein ausreichend druckstabiler Dachaufbau (Abdichtung und Dämmung) erforderlich ist.

Um die Last möglichst über das Dach zu verteilen, können alternativ Wannensysteme genutzt werden. Diese erhalten im Inneren eine Ballastierung mit Kies oder Betonplatten. Jedoch wird die Kontrolle der eingebrachten Last nach Anschluss der PV-Module erschwert. Zusätzlich muss eine entsprechende Entwässerung der Wannens gewährleistet werden (Zöller et al. 2016).

Hinweis: In der Praxis werden häufig die hier beschriebenen aufgeständerte PV-Dachsysteme für Gründächer genutzt. Erfahrungsgemäß eignet sich die Kombination nicht, da es zumeist zum Überwuchs der Vegetation auf die PV-Anlage kommt. Auch die Instandhaltung der gesamten Anlage aus Gründach und PV wird deutlich erschwert. Damit die kombinierte Dachnutzung dauerhaft funktioniert, sind bestimmte Bedingungen zu erfüllen. Diese sind weiter unten beschrieben.

Zöller et al. (2016) zeigt die ballastierten Lösungen auf und stellt Schnitte zur Verfügung.

Kostenzusammenstellung PV-Anlage

Im Rahmen der Studie konnten keine Kostenrichtwerte der einzelnen Systeme erfasst werden. Zwar wurde bei herstellenden Firmen erfragt, welche Kosten in Abhängigkeit der Größe entstehen, jedoch ist dies aufgrund der starken objektspezifischen Planungen von PV-Anlagen nicht möglich. Nachfolgende Parameter wirken sich auf die Kosten einer PV-Anlage aus:

- Größe der PV-Anlage,
- Untergund der PV-Anlage,
- Zugänglichkeit,
- Planungsaufwand,
- Transportwege,
- PV-Module,
- Wechselrichter,
- Montagesystem und Montagekomponenten,
- AC-Verkabelung,
- Montageaufwand AC (Installation und Verkabelung vom Wechselrichter abgehend; Anschluss an und ggf. Ertüchtigung von bestehender Elektroinstallation,
- DC-Verkabelung,
- Montageaufwand DC (Installation und Verkabelung der Module bis zum Wechselrichter),
- Datenleitungen,

- Serviceleistungen (z. B. Anmeldung beim Netzbetreibenden),
- ggf. Schutzeinrichtungen (Blitzschutz, Not-Aus Schalter, Überspannungsschutz; Absturzsicherung etc.) und
- Ersatzkosten (z. B. Wechselrichtertausch).

Die laufenden Kosten für die PV-Anlage ergeben sich aus Instandhaltung, Wartung, Betrieb und Versicherung und liegen bei etwa 1 bis 2% der Investitionskosten pro Jahr. Die Kosten werden in Arbeitsschritt 5 (AS5) unter dem Abschnitt "Laufende Kosten" detailliert beschrieben.

Instandhaltung

Obgleich PV-Anlagen vergleichsweise wartungsarm sind, sollten die verschiedenen technischen Bauteile der PV-Anlage sowie des Daches in regelmäßigen Abständen kontrolliert werden.

Instandhaltungsmaßnahmen PV-Module

- Entfernung Verschmutzung durch Laub, Blütenreste, Moos, Staub, oder Tierreste und
- Schadprüfungen nach Unwetter (Sturm oder Hagel).

Instandhaltungsmaßnahmen Montagesystem

- Standfestigkeit des Montagesystems,
- Kontrolle der Vollständigkeit aller Materialien, da sich gegebenenfalls durch Windeintrag Teile (z. B. Metallverbindungen, Windleitbleche, Ballastierung) lösen können und
- Kontrolle der Dachhaut auf Schäden durch die PV-Anlage.

Instandhaltungsmaßnahmen Kabel und Leitung

- Kontrolle auf eindringende Feuchtigkeit und
- Kontrolle auf äußere Schäden, z. B. Schmorstellen, Tierbisse.

Instandhaltungsmaßnahmen Wechselrichter

- Kontrolle der Steckverbindungen,
- Prüfung der technischen Leistungsfähigkeit und
- Aktualisierung der Software.

Instandhaltungsmaßnahmen Blitzschutz

- Prüfung Überspannungsableiter und
- Prüfung Zähler- und Verteilerkästen.

PV-Gründach

Wirkungen

Dachbegrünungen und PV-Anlagen haben, wie angeführt, eine ganze Reihe an positiven Wirkungen. Das PV-Gründach vereint bis zu einem gewissen Anteil die Effekte dieser beiden Dachnutzungen. Bestimmte Wirkungen fallen dabei besonders ins Gewicht. Werden auflastgehaltene PV-Gründachsysteme verwendet, ergeben sich zudem noch weitere Vorteile.

Die PV-Modulleistung hängt unter anderem von der Umgebungstemperatur ab. Die Leistung nimmt mit der Aufheizung des PV-Moduls ab, dadurch erfolgt eine Minderung der Leistung im Vergleich zur Nennleistung. Verschiedene wissenschaftliche Untersuchungen belegen, dass durch die Verdunstungsleistungen von Dachbegrünungen Kühleffekte entstehen können, welche dazu beitragen, die Aufheizung der PV-Module zu mindern. Die Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit von Photovoltaik-Anlagen in Kombination mit Dachbegrünungen zeigen eine mehr oder weniger deutlich positive Auswirkung auf die Ertragssteigerung. Ein genauer Wert bzw. eine Verallgemeinerung der Ertragssteigerung lässt sich aus den Untersuchungen allerdings nicht ableiten, da objektbezogen verschiedene Faktoren (wie z. B. Lage, Gebäudehöhe, Modulverlegung, Windeinflüsse) eine Rolle spielen (Mann/Mollenhauer 2020b).

Bei typischen auflastgehaltenen Systemen zur Kombination von Dachbegrünung und PV-Anlage sind Dachdurchdringungen oder sonstige Eingriffe in die Dachabdichtung und Gebäudesubstanz nicht erforderlich. Damit können längerfristig kostenaufwändige und schadensanfällige Dachabdichtungsarbeiten vermieden werden. Durch die gleichmäßige Lastverteilung des Substrates, entfallen außerdem Punktlasten (z. B. durch Betonplatten), wie sie oft bei herkömmlichen Montagesystemen für PV-Anlagen entstehen.

Als weiteres Argument für PV-Gründächer spricht deren Strukturvielfalt. Die PV-Module bringen durch ihre Verschattungen partiell verschiedene Licht- und Feuchtigkeitsverhältnisse und damit weitere Mikrohabitate auf das Dach. Das fördert die Artenvielfalt (Biodiversität) auf dem Dach.

Allgemeiner PV-Gründachschichtaufbau

Außer bei nachträglich aufgestellten PV-Anlagen wird bei den auflastgehaltenen Systemen für PV-Gründächer das Montagesystem durch die Auflast des Gründachaufbaus stand- und verwehssicher auf dem Dach gehalten. Wie in Abbildung 2 dargestellt, sieht der grundsätzliche Aufbau von auflastgehaltenen PV-Gründächern oberhalb einer geeigneten Dachkonstruktion mit wurzelfester Dachabdichtung wie folgt aus:

- Schutzlage (9), um die Dachabdichtung vor mechanischen Beschädigungen zu bewahren.
- Als Grundelement für PV-Gründächer dient in der Regel eine Basisplatte zur Verfüllung und Lastaufnahme (6). Diese Basisplatte hat meist sowohl Drän- als auch Wasserspeicherfunktionen und liegt je nach Planung auf der Schutzlage der Dachabdichtung oder auf dem Filtervlies der Dränschicht. Sie wird mit Substrat verfüllt, wodurch das PV-Aufständersystem seine Standfestigkeit erhält. Die zu erbringende Mindestauflast (= Substrathöhe) wird objektspezifisch vorgegeben.
- Eine durchgehende, störungsfreie Entwässerung muss sichergestellt sein – entweder durch die Basisplatte selbst oder eine darunter liegende Dränageschicht (8).
- Vegetation mit niedrigwüchsigen Arten (4)
- Auf der Basisplatte ist das Montagesystem mit dem benötigten Neigungswinkel befestigt (3).

- Verkabelungen und weitere Technik (Befestigung, Kabelkanäle) sollten so ausgeführt werden, dass sie eine Instandhaltung nicht erschweren und auch durch den Einsatz von Heckenschere, Motorsense usw. nicht zerstört werden (2).
- Das Gesamtsystem ist durch Modultragschienen miteinander verbunden. Die PV-Module werden auf die Modultragschienen aufgelegt und durch Modulklemmen gehalten (1).

Abbildung 2

Typischer Aufbau eines auflastgehaltenen PV-Gründachs



Quelle: Bundesverband GebäudeGrün e. V.

PV-Gründachsysteme

Da PV-Gründächer als wichtiges Instrument zur Vereinheitlichung von Klimaschutz (PV-Anlage) und Klimaanpassung (Gründach) zunehmend anerkannt werden, entwickeln beide Branchen (Dachbegrünung und PV) passende Lösungen, um für verschiedene Einsatzzwecke optimale Ergebnisse zu erzielen. Zum derzeitigen Stand lassen sich drei verschiedene Varianten voneinander abgrenzen. Dabei ist auffällig, dass keiner der Lösungen eine Dachneigung von über 6° zulässt. In Tabelle A 24 im Anhang erfolgt ein Vergleich der Systeme.

Aufständigung, grühdachintegriert, 5–45°

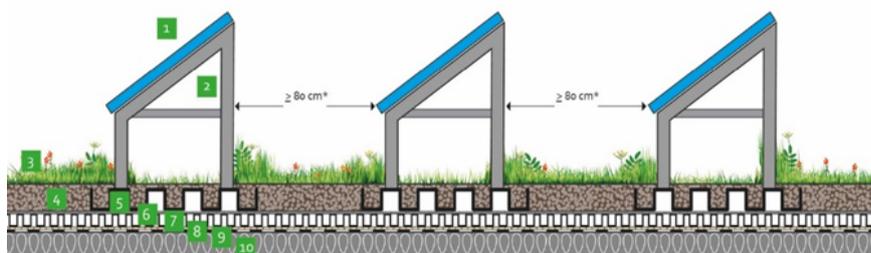
Die aufgeständerte, grühdachintegrierte Bauweise mit Neigungen von 5–45° ist die am häufigsten vorkommende Art der PV-Grühdachsysteme. Die Neigung der PV-Module wird abhängig der Standortbedingungen gewählt.

Damit keine gegenseitige Verschattung der Module auftritt, muss der Modulreihenabstand bei einer Südverlegung in Abhängigkeit vom geografischen Breitengrad, Modulhöhe und Aufständigungswinkel ausreichend groß gewählt werden. Je nördlicher sich das Dach befindet, umso höher sind die Modulreihenabstände. Ein Reihenabstand bei einer Südverlegung von 80 cm ist für eine fachgerechte Instandhaltung ausreichend (vgl. Abbildung 3), aus Gründen der gegenseitigen Verschattung durch die Module können jedoch objektabhängig größere Reihenabstände erforderlich sein.

Bei der Ost-West-Verlegung werden die einzelnen Reihen mit PV-Modulen abwechselnd in Richtung Osten und Westen verlegt. Somit treffen immer die Ober- bzw. Unterkanten der Modulreihen

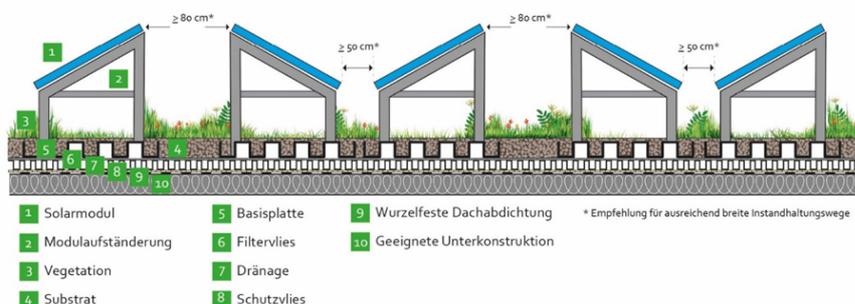
aufeinander. Es ist darauf zu achten, dass die Gänge zwischen den Modulen breit genug für die Instandhaltung von Gründach und PV-Anlage sind und liegendebleibener Schnee zwischen die Modulreihen rutschen kann. Empfohlen wird eine Breite von mindestens 50 cm an der Unterkante und mindestens 80 cm an der Oberkante der Modulreihen (vgl. Abbildung 4).

Abbildung 3
Aufgeständerte, grühdachintegrierte Südverlegung



Quelle: Bundesverband GebäudeGrün e. V.

Abbildung 4
Aufgeständerte, grühdachintegrierte Ost-Westverlegung

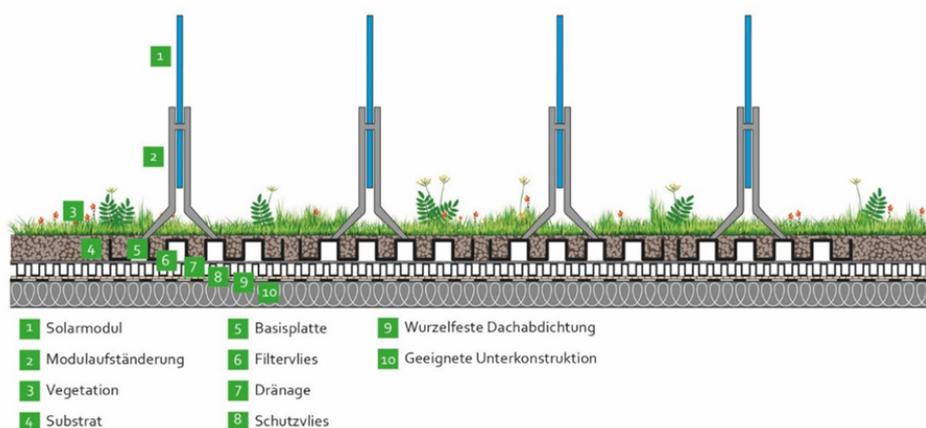


Quelle: Bundesverband GebäudeGrün e. V.

Aufständering, grühdachintegriert, 90°

Die Entwicklung schreitet auch bei den PV-Modulen weiter voran und mittlerweile werden zunehmend bifaziale Module verwendet, die von beiden Seiten einfallendes Licht in elektrische Energie umwandeln können. Daraus wurden für das PV-Grühdach optimale Unterkonstruktionen entwickelt, bei denen die Module senkrecht aufgeständert werden (vgl. Abbildung 5). Dies bringt die Vorteile mit sich, dass die Abstände zwischen den Modulreihen verringert werden können und gleichzeitig genügend Platz für die Vegetation als auch die Instandhaltung der Anlage zur Verfügung steht. Die Montage erfolgt in der Regel in Ost-West-Verlegung, ist aber auch in Süd-Verlegung vorstellbar.

Abbildung 5
Aufgeständerte, grühdachintegrierte Vertikalverlegung



Quelle: Bundesverband GebäudeGrün e. V.

Aufständerung, aufgestellt, 10–20°

Aufgestellte Aufständerungen eignen sich vor allem bei bereits bestehenden Gründächern, bei denen nachträglich eine PV-Anlage installiert werden soll. Das Montagesystem wird dabei auf die Vegetationstragschicht der Dachbegrünung gestellt und mit Punktlasten ballastiert (vgl. Abbildung 6). Die Funktion der beiden Systeme PV-Anlage und Dachbegrünung muss weiterhin sichergestellt sein. Insbesondere die Vegetation darf die Aufständerung nicht überwachsen, daher ist auf einen ausreichenden Abstand zwischen Modulunterkante und Substrat zu achten. Die Verlegung kann in Süd- und Ost-West-Ausrichtung durchgeführt werden.

Abbildung 6
Aufgeständerte, nachträglich aufgestellte Verlegung (Bundesverband GebäudeGrün e. V.)



Quelle: Bundesverband GebäudeGrün e. V.

Kostenzusammenstellung

Die Herstellungskosten eines PV-Grühdachsystems ergeben sich aus den gemeinsamen Kosten eines extensiven Gründachs und einer auflastgehaltenen PV-Anlage. Alle ermittelten Kosten aus der Tabelle A 24 im Anhang beruhen auf Abfragen bei ausführenden Betrieben mit Fokus auf Dachbegrünungen und inkludieren die Kosten für das Gründach zusammen mit der PV-Aufständerung. Kosten für die PV-Module sowie weiteren Aufwendungen für die PV-Anlage sind nicht mit enthalten. Objektbezogen und

inflationbedingt kann es zu Abweichungen der Herstellungs- und Instandhaltungskosten kommen. Nachfolgende Parameter wirken sich auf die Kosten eines PV-Gründachs aus:

Größe der Dachfläche,

- Zugänglichkeit,
- Planungsaufwand,
- Transportwege,
- Zusammensetzung des Gründachaufbau,
- Schichtstärke des Gründachaufbaus,
- PV-Module,
- Wechselrichter,
- Montagesystem und Montagekomponenten,
- AC-Verkabelung,
- Montageaufwand AC (Installation und Verkabelung vom Wechselrichter abgehend; Anschluss an und ggf. Ertüchtigung von bestehender Elektroinstallation,
- DC-Verkabelung,
- Montageaufwand DC (Installation und Verkabelung der Module bis zum Wechselrichter),
- Datenleitungen,
- Serviceleistungen (z. B. Anmeldung beim Netzbetreibenden),
- Ggf. Schutzeinrichtungen (Blitzschutz, Not-Aus Schalter, Überspannungsschutz; Absturzsicherung etc.) und
- Ersatzkosten (z. B. Wechselrichtertausch).

Die laufenden Kosten für das PV-Gründach ergeben sich aus Instandhaltung, Wartung, Betrieb und Versicherung der PV-Anlage und aus den Pflege- und Wartungsmaßnahmen des genutzten Gründachsystems.

Vergleich der Dachnutzungen

Für die weitere Betrachtung im Arbeitsschritt 5 (AS5) wurde für jede Art der Dachnutzung (Gründach, PV-Anlage und PV-Gründach) das für die Studie relevanteste System begutachtet:

- PV-Anlage, für Schräg- und Flachdach,
- Extensive Dachbegrünung mit einem Gründachaufbau von 10–12 cm und
- PV-Gründachanlage mit gründachintegrierten Montagesystem für Modulneigungen von 0–45°

Ein Vergleich der Systeme ist in Tabelle 5 enthalten.

Tabelle 5
Vergleich PV-Anlage, Gründach, PV-Gründach

Dachnutzungstyp	PV-Anlage	Extensive Dachbegrünung	PV-Gründach
Höhe Gründachaufbau [cm]	/	10–12 cm	8–10 cm
Modulneigung	5–45°	/	5–45°
Dachneigung	0–45°	0–45°	0–5°
Instandhaltungsaufwand*	++	+++	++++
Maximal-Gewicht [kg/m ²] (im wassergesättigten Zustand)	ca. 20–30	ca. 100–120	ca. 110–170
Wurzelfeste Dachabdichtung erforderlich	nein	ja	ja
Vorteile	Erneuerbare Energiegewinnung. Geringe Lasten.	Schutz der Dachhaut. Regenwasserrückhalt. Verdunstungskühlung. Steigerung der Artenvielfalt. Lärminderung. Energieeinsparung. Wohnumfeldverbesserung durch höheren Grünanteil.	Erneuerbare Energiegewinnung. Schutz der Dachhaut. Regenwasserrückhalt. Verdunstungskühlung. Steigerung der Artenvielfalt. Lärminderung. Energieeinsparung.

Dachnutzungstyp	PV-Anlage	Extensive Dachbegrünung	PV-Gründach
			Wohnumfeldverbesserung durch höheren Grünanteil.
Nachteile	Keine sonstigen positiven Wirkungen. Ungeschützte Dachhaut.	Keine erneuerbare Energiegewinnung. Erhöhte Lasten.	Weniger PV-Anteil. Erhöhte Lasten. Höhere Kosten für PV-Anlage durch mehr Materialaufwand.
Haltbarkeit Dachabdichtung	20–30 Jahre	> 40 Jahre	> 40 Jahre
Wirkungen*			
PV-Ertrag	+++++	/	++++
Verbesserung des Stadtklimas	/	++/+++	++
Regenwasserrückhalt	/	++	++
Förderung der Biodiversität	/	++/+++	+++
Lärminderung	/	++	++
Zusätzliche Nutz- und Freizeitflächen	/	+ / ++	+
Energieeinsparungen (Dämmwirkung + Kühleffekte)	/	++	++
Schutz der Gebäudehülle	/	++++	++++
Gestaltungselement	/	++	+
Kostenrichtwerte in €/m² (netto), PV-Anlage mit PV-Modulen gemäß Berechnung AS 5			
Einbaukosten 20 m²	ca. 397	ca. 90	ca. 575–601

Dachnutzungstyp	PV-Anlage	Extensive Dachbegrünung	PV-Gründach
Instandhaltungskosten €/m ² /a	ca. 8,30	ca. 10,90	ca. 25–31
Einbaukosten 50 m²	ca. 343	ca. 67	ca. 473–493
Instandhaltungskosten €/m ² /a	ca. 4	ca. 7,30	ca. 14–17
Einbaukosten 100 m²	ca. 307	ca. 54	ca. 406–424
Instandhaltungskosten €/m ² /a	ca. 3,5	ca. 5,40	ca. 10–11
Einbaukosten 500 m²	ca. 237	ca. 32	ca. 282–296
Instandhaltungskosten €/m ² /a	ca. 3,5	ca. 2,70	ca. 6–7
Einbaukosten 1.000 m²	ca. 211	ca. 26	ca. 240–253
Instandhaltungskosten €/m ² /a	ca. 3,5	ca. 2	ca. 6–7

* + = niedrig => +++++ = hoch; / = keine Wirkung (Beruht auf eigener Einschätzung / Erfahrung)

Quelle: Bundeverband GebäudeGrün e. V. 2023

PV-Grünfassade als Alternative

Werden die Bedingungen für eine jeweilige Dachnutzung mit PV, Begrünung oder der Kombi-Lösung nicht erfüllt, sollte über eine Ausweichmöglichkeit an die Gebäudefassade nachgedacht werden.

Ähnlich wie bei PV-Gründächern können auch Fassadenbegrünungen mit PV-Anlagen kombiniert werden. Bei dieser Kombination sind ebenso Kühleffekte (auf und hinter den PV-Module und auf der Fassadenfläche) feststellbar (Korjenic et al. 2019). Die Vorteile, die diese Systeme bieten, liegen besonders im Winterhalbjahr, da keine Schneebelastung auftritt und der Neigungswinkel zur Sonne im Gegensatz zum Dach während dieser Zeit besser ist. Gleichzeitig schützen die Module die Begrünung vor Witterungseinflüssen.

Für die Lösung einer PV-Grünfassade müssen die Bedingungen sowohl für die PV-Anlage als auch die Fassadenbegrünung stimmen. Damit diese dauerhaft funktioniert sind neben der typischen Planungsparameter für PV-Fassaden und Fassadenbegrünungen, weitere Faktoren bei Planung und Ausführung zu beachten:

- Vermeidung der Verschattung der Module durch Objekte im nahen Umfeld der Anlage,
- Vermeidung von Überwuchs der PV-Module durch die Pflanzen,
- Vermeidung von zu starker Verschattung der Fassadenbegrünung durch die PV-Anlage, um das Pflanzenwachstum sicherzustellen,
- Zugänglichkeit zur Fassadenbegrünung und PV-Anlage für die Instandhaltung,
- Regelmäßige und fachgerechte Instandhaltung und
- Rechtzeitige Abstimmung der Gewerke.

Aufgrund der Komplexität ist mit erhöhten Kosten für die Herstellung und Instandhaltung des Gesamtsystems im Gegensatz zu PV-Gründächern zu rechnen. Zum aktuellen Zeitpunkt wird an dieser Lösung geforscht (Veser 2020). Es existieren keine marktgängigen Produkte.

AS5 - Entwicklung einer Bewertungsmethodik als Mikro- und Makrobetrachtung

Zielstellung

Die möglichst effiziente Nutzung von Dachflächen sollte zukünftig vermehrt aus multiplen Perspektiven gedacht werden. Stehen gegenwärtig vor allem techno-ökonomische Zielstellungen im Vordergrund, ist es sinnvoll ökologische, soziale, energetische und ökonomische Aspekte bei der Eignung einer Dachfläche stärker als Gesamtes zu betrachten. Zukünftige Analysen, Bewertungen und Dimensionierungen von Dachflächen und ihren Ausgestaltungsmöglichkeiten sollten dabei die Wirkungen mitbetrachten, die sich auf all diesen Ebenen einstellen.

Wichtig ist dabei zum einen der Blick auf das Gebäude an sich (Mikroperspektive). Zum anderen sollte aber auch der übergreifende Kontext, wie beispielsweise die Quartiersumgebung einbezogen werden (Makroperspektive). Diese Unterscheidung bietet die Möglichkeit, die Blickwinkel diverser Akteure abbilden zu können, die mit unterschiedlichen Ansprüchen und Wichtungen an die Bewertung einer Ausgestaltungsmöglichkeit einer geeigneten Dachfläche herantreten.

Bisher mangelt es jedoch an einer geeigneten Methodik, die einen Vergleich der unterschiedlichen Ausgestaltungsmöglichkeiten einer Dachfläche generell ermöglicht. Eine solche Methodik sollte die unterschiedlichsten Wirkungen verschiedener Ausgestaltungsmöglichkeit objektiv abschätzen und gegenüberstellen. Die eigentliche Bewertung der geeignetsten Ausgestaltung bestimmter Dachflächen kann dann auf Grundlage dieser Wirkanalyse aus der jeweiligen Akteursperspektive geschehen.

Die im Rahmen dieser Studie erarbeitete Methodik versucht daher nicht, eine Eignungsempfehlung für einzelne Ausgestaltungsmöglichkeiten zu geben. Vielmehr erarbeitet sie eine Wirkanalyse, die den Akteuren eine eigenständige Eignungsabschätzung ermöglichen soll.

Methodischer Ansatz

Als ersten Schritt definiert die Methodik Wirkindikatoren, die die einzelnen Wirkungen erfassbar machen. Diese orientieren sich zum Teil an den Indikatoren, die in AS1 - Analyse verschiedener Gebäudesituationen und Vorteile einer gebäudeübergreifenden Betrachtung entwickelt wurden. Während die zuvor entwickelten Indikatoren jedoch eine Mischung aus Eignung, Dringlichkeit und Wirkung erfassen, heben alle hier beschriebenen Indikatoren ausschließlich auf die Wirkung ab und werden im Folgenden daher als „Wirkindikatoren“ bezeichnet. In einem zweiten Schritt werden die Wirkindikatoren quantifiziert, wobei der Detailgrad der Bewertung unterschiedlich gestaltet werden kann – von einfachen Abschätzungen bis hin zu genauen Simulationen für bestimmte Wirkindikatoren. Die vorliegende Arbeit kann nur einen Überblick über die Möglichkeiten und Detailgrade liefern und zeigt in Detailerläuterungen zu den Wirkindikatoren im Anhang wenn immer möglich auf, mit welchen tiefergehenden Analysen die jeweilige Wirkabschätzung genauer gestaltet werden kann. Diese Vorgehensweise hat das Ziel, unterschiedlichen Akteuren eine Hilfestellung zur einfachen Wirkungsabschätzung über einen breiten Bereich an Wirkungsebenen zu bieten. Daher wird für jeden der aufbereiteten Wirkindikatoren eine einfache Methodik zur Wirkungsabschätzung skizziert. Als erster Ansatz ist dies zur Erarbeitung eines Konzepts, welches eine möglichst ganzheitliche Bewertung von PV und Gründächern beschreibt, ausreichend. Ein höherer Detailgrad bei der Quantifizierung der Indikatoren wäre mit höherem Aufwand und weitergehenden Simulationen und Experimenten möglich. Das grundlegende Konzept der Methodik bliebe davon jedoch unberührt.

Um die Vergleichbarkeit zwischen den Ausgestaltungsmöglichkeiten sicherzustellen, müssen die Wirkungen auf eine indikatorenspezifische Referenz bezogen werden. Anhand dieser Referenz können die berechneten Wirkungen der unterschiedlichen Ausgestaltungsmöglichkeiten miteinander verglichen werden. Das Finden einer indikatorspezifischen Referenz ist auf Grund der vielen Freiheitsgrade und

unterschiedlichen (Akteurs)Perspektiven mitunter schwierig und bietet Potenzial zur Weiterentwicklung der Methodik (siehe auch detaillierte Dokumentation der Wirkindikatoren im Anhang).

Die vorliegende Methodik listet die einzelnen Wirkindikatoren und zugehörige Bewertung ohne Wichtung zwischen den einzelnen Indikatoren auf. Dies ermöglicht eine wertungsfreie Darstellung für die Perspektiven unterschiedlichster Akteure. Die Wirkungsabschätzung produziert für die meisten Wirkindikatoren ein quantitatives Ergebnis, welches in eine vergleichbare Skala von 0 bis 5 überführt wird.

In den folgenden Abschnitten wird näher auf die Wirkindikatoren eingegangen. Zunächst leitet eine kurze Übersicht zu den evaluierten Wirkindikatoren, der jeweiligen Referenz und der indikatorspezifischen Bewertung in die Thematik ein. Danach werden die Wirkindikatoren – unterteilt in deren Wirkbereiche (Mikro- und Makroebene), mit dem Fokus auf die Nutzbarmachung für die Methodik erläutert. Diese Erläuterungen sind explizit kurz gehalten. Für eine ausführliche Erläuterung relevanter Studienergebnisse sei auf den Anhang verwiesen. Dort befindet sich neben einer ausführlicheren Dokumentation mit weitergehenden Literaturhinweisen und Erläuterungen zu allen Wirkindikatoren auch die Beschreibung einer konkreten Implementierung in Form eines Excel-Tools.

Untersuchte Wirkindikatoren und verwendete Referenzen

Ein Kernelement der Methodik stellen die indikatorspezifischen Referenzen dar. Das Finden einer solchen Referenz ist dabei auch abhängig von der jeweiligen (Akteurs)Perspektive, wie folgendes Beispiel verdeutlichen soll: der Effekt der CO₂-Speicherung durch ein (PV-)Gründach ist maßgeblich von dessen Größe bzw. der nutzbaren Dachfläche abhängig. Durch Dachaufbauten etc. kann diese Fläche im Verhältnis zur Gesamtdachfläche klein ausfallen. Eine Perspektive – und damit eine Referenz – würde die bei dem Objekt nutzbare Dachfläche (also abzgl. Dachaufbauten etc.) mit einem Objekt mit gleicher Gesamtdachfläche aber ohne jegliche Dachaufbauten (ideal = Referenz) vergleichen. Wird eine solche Referenz gewählt erfolgt damit auch gleichzeitig ein Vergleich zu anderen Objekten, was z. B. sinnvoll für die großangelegte Planung von Stadtquartieren sein kann. Anders gestaltet sich die Perspektive wenn für die CO₂-Speicherung die Wirkung unterschiedlicher Ausgestaltungsmöglichkeiten nur auf die nutzbare Dachfläche des Objekts bezogen wird. So wird die CO₂-Speicherung durch das (PV-)Gründach bei konstanter nutzbarer Fläche vornehmlich durch den Aufbau des (PV-)Gründaches und das Pflanzenwachstum bestimmt. Die höchste Wirkung würde sich demnach mit einem Dachgarten erzielen lassen, der jedoch auf Grund fehlender Lastreserven nur in wenigen Fällen realisiert werden kann. Daher mag für die Fragestellung, welche Ausgestaltungsmöglichkeit für die CO₂-Speicherung am geeignetsten ist, eher eine fixe Bewertungsskala hilfreich sein, bei der die Wirkung eines gängigen extensiven Gründachaufbaus (als eine der hier betrachteten Vergleichsvarianten) am höchsten bewertet wird und somit die Referenz für den Vergleich der anderen Varianten bildet. Diese Referenz spiegelt daher eher die Sicht auf ein individuelles Gebäude wider, bei dem sich beispielsweise die Eigentümerin nach den Wirkungen der unterschiedlichen Ausgestaltungsmöglichkeiten auf der gegebenen Dachfläche des Gebäudes fragt. Für die Weiterentwicklung der hier beschriebenen Methodik wäre es daher wünschenswert, die Referenz je nach Perspektive anpassen zu können, um so auch diese Unterschiede in der Bewertung darstellen zu können. Eine Übersicht zu den evaluierten Indikatoren, der jeweils verwendeten Referenz und darauf angewandte Bewertungsschema findet sich in Tabelle 6. Daran anschließend werden die Wirkindikatoren genauer beschrieben. Weitere Details sind im Anhang erläutert.

Tabelle 6
Übersicht der Indikatoren und (soweit vorhanden) indikatorspezifischen Referenzen und im „Wirk-Tool“ verwendeten Bewertungsschemata.

Wirkindikator	Referenz	Bewertung
PV-Ertrag pro kWp	Gleichgroße (in kWp), 30° Süd ausgerichtete PV-Anlage ohne Verschattung	Verhältnis aus Ertrag der Anlage zur Referenz (5 = 100–95%, 4 = 95–87,5%, 3 = 87,5–80%, 2 = 80–70%, danach 15% Abstufung)
PV-Ertrag pro m ²	Max. Belegung mit einer Dachparallelen Anlage	Verhältnis aus Ertrag der Anlage zur Referenz (5 = 100–95%, 4 = 95–85%, danach Abstufung in 20%-Schritten)
Eigenverbrauch	Keine Referenz an sich – muss im Zusammenspiel mit der „Einspeisung“ betrachtet werden.	Je höher der Eigenverbrauch, desto höher die Wertung (5 = 100–80%, danach Abstufung in 20%-Schritten), jedoch umso geringer die Einspeisung.
Einspeisung	Keine Referenz an sich – muss im Zusammenspiel mit dem „Eigenverbrauch“ betrachtet werden.	Je höher die Einspeisung, desto höher die Wertung (5 = 100–80%, danach Abstufung in 20%-Schritten), jedoch umso geringer der Eigenverbrauch.
Dämmwirkung	Max. Dämmeffizienz durch Begrünung bei den TABULA Gebäudegrundtypen (34,2%)	Je höher die Reduktion, desto höher die Wertung (5 = 28–34,2%, danach Abstufung in 6,2%-Schritten)
Vermiedener Kühlbedarf	Nur qualitative Abschätzung.	Basierend auf der Literaturrecherche wird die Wirkung mit einer fixen Skala abgeschätzt (5 = Gründach, 4 = PV-Gründach, 1 = PV-Dach)
LCOE	Haushaltsstrompreis (33 Cent/kWh)	LCOE im Verhältnis zur Referenz (5 = 75–82,5%, danach aufsteigend in 7,5%-Schritten)
Investitionen pro m ²	Investitionskosten für die hier max. betrachtete Dachfläche (1450 m ²)	Verhältnis aus Investitionskosten der untersuchten Dachfläche zur Referenz (5 bis 3: Abstufung in 10% ab 100%; 2 = 70–50%, 1 = 50–30%, 0 = 30–0%)

Wirkindikator	Referenz	Bewertung
Laufende Kosten der Ausführung pro m ²	Laufende Kosten für die hier max. betrachtete Dachfläche (1450 m ²)	Verhältnis aus laufenden Kosten der untersuchten Dachfläche zur Referenz (5 bis 3 Abstufung in 10% ab 100%; 2 = 70–50%, 1 = 50–30%, 0 = 30–0%)
Einnahmen Einspeisung	Keine Referenz an sich – muss im Zusammenspiel mit den „Einsparungen durch den Eigenverbrauch“ betrachtet werden.	Die Bewertung wird durch den Wirkindikator „Einspeisung“ vorgegeben.
Einsparungen Eigenverbrauch	Keine Referenz an sich – muss im Zusammenspiel mit den Einnahmen durch die „Einnahmen für die Einspeisung“ betrachtet werden.	Die Bewertung wird durch den Wirkindikator „Eigenverbrauch“ vorgegeben.
Einsparungen Niederschlagsgebühr	Max. Gebührenreduktion aus verschiedenen Kommunen = 100%	Je höher die Reduktion, desto höher die Wertung (Quintils berechnet mit Mittelwert und Standardabweichung)
Lärminderung	Nur qualitative Abschätzung.	Basierend auf der Literaturrecherche wird die Wirkung mit einer fixen Skala abgeschätzt (4 = Gründach, 0 = PV-Dach, 3 = PV-Gründach Ost-West Ausrichtung, 5 = PV-Gründach Südausrichtung)
Dachtemperaturminderung	Dichte städtische Konfiguration	Je höher die Minderung, desto höher die Wertung (5 = 100–90%, danach Abstufung in 20%-Schritten bis 0 = 10–0%)
Vor-Ort Verbrauch im Quartier	Der jährliche Ertrag der PV-Anlage	Verhältnis aus dem nicht im Quartier verbrauchten PV-Strom zur Referenz (5 = 0 bis 5%, danach Abstufung in 5% Schritten bis 2, 1 = 20 bis 30%, 0 = 30% und kleiner)
THG durch Herstellung	Nur qualitative Abschätzung.	Basierend auf der Literaturrecherche wird die Wirkung mit einer fixen Skala abgeschätzt (5 = Gründach,

Wirkindikator	Referenz	Bewertung
		0 = PV-Dach, 2 = PV-Gründach Ost-West Ausrichtung, 3 = PV-Gründach Südausrichtung)
THG-Senke	Ausführung der Dachfläche in der effizientesten Variante	Verhältnis der CO ₂ -Bindung pro m ² begrünter Fläche zur Bindung pro m ² der effizientesten Dachvariante (5 = 100–80%, 4 = 80–60%, 3 = 60–40%, 2 = 40–20%, 1 = 20–10%, 0 = 10–0%)
Luftschadstoffbindung	Bindungsleistung der effektivsten Dachalternative, LAI=2	Verhältnis der LSS-Bindung pro m ² begrünter Fläche zur Bindung pro m ² , wäre dieselbe Dachfläche als reines Gründach ausgeführt (5 = 100–80%, 4 = 80–60%, 3 = 60–40%, 2 = 40–20%, 1 = 20–10%, 0 = 10–0%)
Wasserrückhalt (Starkregenereignis)	Dachfläche mit gleicher Größe und Dachneigung = < 5°, Aufbaudicke > 10 cm, Abflussbeiwert = 0,4	Je mehr der Rückhalt, desto höher die Wertung (5 = 100–90%, danach Abstufung in 20%-Schritten bis 0 = 10–0%)
Wasserrückhalt (Jahresniederschlag)	Gleichgroße, Dachneigung = < 5°, Aufbaudicke > 10 cm, Abflussbeiwert = 0,2	Je mehr der Rückhalt, desto höher die Wertung (5 = 100–90%; danach Abstufung in 20%-Schritten bis 0 = 10–0%)
Biodiversität	Nur qualitative Abschätzung.	Basierend auf der Literaturrecherche wird die Wirkung mit einer fixen Skala abgeschätzt (5 = Gründach, 4 = PV-Gründach, 0 = PV-Dach)
Wertschöpfung (einmalige Investitionen)	Ausführung der Dachfläche in der Variante mit der höchsten Wertschöpfung	Verhältnis der Wertschöpfung zur effizientesten Dachvariante (5 = 100–80%, 4 = 80–60%, 3 = 60–40%, 2 = 40–20%, 1 = 20–10%, 0 = 10–0%)
Wertschöpfung (jährliche Instandhaltung)	Ausführung der Dachfläche in der Variante mit der höchsten Wertschöpfung	Verhältnis der Wertschöpfung zur effizientesten Dachvariante (5 = 100–80%, 4 = 80–60%, 3 = 60–40%,

Wirkindikator	Referenz	Bewertung
Arbeitsproduktivität	Nur qualitative Abschätzung.	2 = 40–20%, 1 = 20–10%, 0 = 10–0%) Basierend auf der Literaturrecherche wird die Wirkung mit einer fixen Skala abgeschätzt (5 = Gründach, 4 = PV-Gründach, 1 = PV-Dach)
Temperaturminderung im Quartier	Dach gleicher Größe und Aufbaus in einer dichten städtischen Konfiguration, niedrige Gebäude	Je höher die Minderung, desto höher die Wertung (5 = 100–90%, danach Abstufung in 20%-Schritten bis 0 = 10–0%)
Einfluss auf die Gesundheit	Nur qualitative Abschätzung.	Basierend auf der Literaturrecherche wird die Wirkung mit einem Durchschnitt des Luftschadstoffrückhalts, der Quartierstemperaturminderung und des vermiedenen Kühlbedarfs abgeschätzt.

Quelle: Institut für ökologische Wirtschaftsforschung GmbH 2023

Wirkindikatoren der Mikroebene

PV-Ertrag und Ertragssteigerung

Der Wirkindikator „PV-Ertrag“ – aufgliedert in eine leistungsspezifische und eine flächenspezifische Komponente – soll bewerten, wie hoch der PV-Ertrag für eine zu untersuchende Dachfläche im Vergleich zu einer idealen Referenz ausfällt. Dabei kann der reale PV-Ertrag über die zur Verfügung stehende Leistung der Anlage (leistungsspezifischer Ertrag in kWh/kWp) oder dachflächenbezogen verglichen werden (flächenspezifischer Ertrag in kWh/m²Dachfläche).

Der tatsächliche PV-Ertrag wird dabei unter anderem von der Ausrichtung, der Neigung und der Verschattung der Anlage beeinflusst. Bauliche Gegebenheiten wie Entrauchungen und Antennen beeinflussen zudem die nutzbare Fläche. Die Einflüsse auf und die Berechnung des PV-Ertrags sind im Anhang näher erläutert.

Das Verhältnis aus idealem PV-Ertrag (Leistungsspezifisch: bestmögliche Einstrahlbedingungen bei gleicher PV-Größe (kWp); Flächenspezifisch: volle Flächennutzung mittels dachparalleler Ausführung) und realem Ertrag gibt somit eine Aussage über die Performance der PV-Anlage unter den durch das Gebäude gegebenen Bedingungen.

Für die willkürliche Bewertungsskala entspricht jeweils ein realer Ertrag von 95 bis 100% des idealen Ertrags der höchsten Wertung. Danach erfolgt je nach Bezugsgröße (Leistung oder Fläche) eine individuelle Abstufung, um den unterschiedlich stark wirkenden Einflüssen gerecht zu werden (z. B.

geringe Ertragsverluste durch Neigungsunterschiede vs. flächenbezogen größere Unterschiede zwischen dachparalleler und aufgeständerter Ausführung der PV-Anlage).

Bei PV-Gründächern stellt sich zudem die Frage, inwiefern der PV-Ertrag durch den Einfluss der Dachbegrünung beeinflusst wird. Verglichen mit herkömmlichen Dachbedeckungen spielen hier verschiedene Einflüsse eine Rolle: das Rückstrahlverhalten der Dachbedeckung, die Temperaturentwicklung auf der Dachfläche und die Ablagerung/Bindung von Schmutzpartikeln sind die vermutlich wichtigsten Größen in diesem Zusammenhang. Bisher gibt es viele Studien zu den Ertragssteigerungen durch PV-Gründächer, aber nur wenige wurden unter Klimabedingungen durchgeführt, die für Deutschland repräsentativ sind. Im Allgemeinen kann in Deutschland von einer leistungssteigernden Wirkung durch das Gründach ausgegangen werden, wobei die Studienlage diesbezüglich noch uneindeutig im Hinblick auf die Ertragssteigerung ist (siehe weitere Ausführungen im Anhang). Das liegt unter anderem an den vielen Einflüssen, die auf effektive Ertragsänderung einwirken. Neben der geografischen Lage sind auch die Gebäudeumgebung, die Dacheindeckung, die bauliche Ausführung der Anlage, die gewählte Modultechnologie und die Ausführung des Gründaches wichtige Einflüsse. Auf Grund dieser Komplexität wird die Beeinflussung des Wirkindikator „PV-Ertrag“ generisch – also unabhängig der z. B. makro- und mikroklimatischen Gegebenheiten – betrachtet (zusammenfassend aus den relevanten Studien): Es wird davon ausgegangen, dass der Ertrag eines PV-Gründaches um ca. 1,5% bei einem bestehenden „weißen“ Dach (z. B. Kies) bzw. 3% bei einem bestehenden „schwarzen“ Dach (z. B. Bitumen) gegenüber einer identischen PV-Anlage erhöht ist.

Einspeisung und Eigenverbrauch

Der PV-Ertrag kann unterschiedlich genutzt werden. Während rein physikalisch der Bedarf vor Ort immer zuerst möglichst umfassend durch die Photovoltaikanlage bedient wird, ergeben sich durch unterschiedliche Betreibermodelle und regulatorische Grenzen verschiedene Anlagenkonfigurationen und Abrechnungsvarianten (z. B. Volleinspeisung, Überschusseinspeisung, Direktvermarktung, Ausschreibung). Die Wirkindikatoren „Einspeisung“ und „Eigenverbrauch“ sollen eine Orientierung bieten, wie sich der erzeugte Strom der PV-Anlage verteilt. Diese Kenntnis über diese Aufteilung erlaubt es, die Sinnhaftigkeit bestimmter Betreibermodelle abzuschätzen, da sich für eigenverbrauchten und eingespeisten Strom unterschiedliche wirtschaftliche Kenngrößen ergeben können.

Zur genauen Berechnung der Anteile bedarf es der Kenntnis der Erzeuger- und Verbrauchsprofile. Diese bestimmen die Gleichzeitigkeit und damit, wieviel im Gebäude verbraucht werden kann und wieviel als Überschuss zurück ins Netz fließen muss. Neben der Ausführung der PV-Anlage (Leistung, Neigung, Ausrichtung) beeinflusst vor allem die Nutzung des Gebäudes (z. B. Wohnen, Gewerbe, Verwaltung etc.) die Gleichzeitigkeit.

Die Direktverbrauchsquote, also der Anteil an erzeugtem PV-Strom, der direkt im Gebäude verbraucht wird, kann anhand der PV-Leistung und des Stromverbrauchs des Gebäudes abgeschätzt werden (siehe detaillierte Ausführungen im Anhang). Daraus ergibt sich sodann die Bewertung des Wirkindikator „Eigenverbrauch“, wobei ein 80–100 prozentiger Eigenverbrauch eine 5 in der Bewertung ergibt (in 20%-Schritten fällt die Bewertung dann mit der Direktverbrauchsquote). Die „Einspeisung“ entspricht dementsprechend der Differenz zwischen PV-Ertrag und Direktverbrauch und wird in ähnlicher Weise bewertet (80–100 prozentige Einspeisung = 5; danach in 20%-Schritten abfallend).

Dämmwirkung

Wird auf ein bestehendes Dach eine PV-Anlage, ein Gründach oder ein PV-Gründach installiert, so ändert sich dadurch die Wärmeübertragung durch das Dach. Gerade bei Gründächern kann sich dadurch eine

zusätzliche Dämmwirkung einstellen, die den Heizenergiebedarf des Gebäudes verringern kann. Der Indikator „Dämmwirkung“ bewertet inwiefern eine Maßnahme die Wärmeverluste durch das Dach verringert. Er bezieht sich dabei großteils auf die TABULA Gebäudetypologie (Loga et al. 2012), bei der unter Annahme eines U-Wertes für die Dachbegrünung (Gründach: U-Wert = 5 W/m²K; PV-Gründach = 6 W/m²K – es wird also eine leicht negative Korrelation des U-Werts mit der Substratdicke angenommen) eine Wärmeeinsparung errechnet wird. Diese wird sodann mit der maximalen Dämmwirkung innerhalb der Gebäudetypologie (= am schlechtesten gedämmtes Dach) ins Verhältnis gesetzt und für die willkürliche Bewertung herangezogen (5 = 28-34,2%, danach Abstufung in 6,2%-Schritten). Für diesen Wirkindikator werden zusätzliche Dämmmaßnahmen während der Installation des Gründaches nicht betrachtet. Es werden also immer die größten Wirkungen bewertet. Jedoch ist darauf hinzuweisen, dass zusätzliche Dämmmaßnahmen durch rechtliche Vorgaben erforderlich werden können. Wenn beispielsweise die Installation eines Gründachs im Rahmen einer Sanierung eines ungedämmten Daches geschieht, muss auch eine Dämmung nach dem Mindeststandard des Gebäudeenergiegesetzes geschehen. In diesem Fall mindert sich die Dämmwirkung des Gründaches.

Auch bei diesem Indikator wirken viele Einflussfaktoren und die Studienlage – gerade auch in Bezug auf den Einfluss einer PV-Anlage – ist noch gering (siehe auch vertiefende Betrachtung im Anhang). Nichtsdestotrotz seien einige wichtige Einflussgrößen erwähnt. Die bereits angesprochenen baulichen Eigenschaften des Daches sind naturgemäß ausschlaggebend für die Dämmwirkung und den damit insgesamt beeinflussten Heizwärmebedarf des Gebäudes. Bei einem Dach, welches nach den derzeit gültigen Anforderungen nach dem Gebäudeenergiegesetz gedämmt ist, sind die Wärmeverluste beispielsweise sehr gering. Die zusätzliche Dämmwirkung durch ein Gründach verbessert den Heizenergiebedarfs des Gebäudes dann nur noch wenig. Darüber hinaus sind auch geografische und klimatische Einflüsse von Wichtigkeit, die sich z. B. auf den Feuchtigkeitsgehalt im Substrat auswirken und so effektiv den U-Wert des Gründaches zeitlich ändern. Ebenso ändert sich durch jegliche Form der Dachbebauung die solare Strahlungsbilanz des Daches. Dadurch wirken z. T. gegensätzliche Effekte wie beispielsweise geringere solare Strahlungsgewinne vs. Dämmwirkung des zusätzlichen Dachaufbaus. Diese sehr komplexen Zusammenhänge können in eine übergeordnete abschätzende Betrachtung der Wirkungen nur schwer aufgenommen werden, da dies zu einer Einzelfallbetrachtung führen würde.

Bei reinen PV-Anlagen kann man nicht von einer eigentlichen Dämmwirkung sprechen. Jedoch verändern sich die Strahlungsbilanz durch die Absorption der Solarstrahlung und die Abschattung der darunter befindlichen Dachfläche. Auch blockieren PV-Anlagen zumindest für einige Spektralanteile im Infrarot-Bereich den radiativen Strahlungsaustausch zwischen Himmel und Dachhaut. Diese Effekte wirken sich auf die Wärmebilanz des Gebäudes aus, sind aber wiederum abhängig von vielen Einflüssen (energetischer Zustand, Neigung und Ausrichtung der PV-Anlage, Abstände zur Dachhaut). Da sich durch die Ausführungsvariante in Kombination mit der Unkenntnis über die genauen thermischen Eigenschaften des Daches große Unsicherheiten ergeben, wird der Einfluss der PV auf die Wärmebilanz nicht betrachtet.

Vermiedener Kühlbedarf (passive Kühlung)

Vor dem Hintergrund zunehmend heißerer Sommer und einer bisher sehr eingeschränkten Verbreitung von Klimaanlage in Wohngebäuden ist die passive Kühlungsleistung ein relevanter Faktor bei der Gestaltung des Daches. Der Wirkindikator „Vermiedener Kühlbedarf“ (passive Kühlung) fokussiert die Betrachtung auf das Hausinnere.

Die Leistung eines konkreten Daches ist dabei von zahlreichen Faktoren abhängig. So verringert auf begrünten Dächern etwa eine höhere Menge Pflanzenmasse und eine dickere Substratschicht den Kühlenergiebedarf. Der Unterschied zu einem unbegrünten Dach nimmt jedoch ab, wenn letzteres bereits gut gedämmt ist oder eine hohe Albedo aufweist. Auch die Höhe des Gebäudes und das unmittelbare städtische Umfeld spielen eine entscheidende Rolle. Bei höheren Gebäuden mit insgesamt

mehr Außenfläche, die zugleich weniger von umstehenden Gebäuden verschattet wird, spielt die Dachgestaltung beim Kühlenergiebedarf eine nachgeordnete Rolle. Ebenso wirken beispielsweise die Bausubstanz sowie die Größe der Fensterflächen und deren Ausrichtung auf den Kühlbedarf. Diese Effekte sind jedoch im Einzelfall genau zu betrachten.

PV-Anlagen können ebenso den Kühlbedarf eines Gebäudes beeinflussen, da sie die eigentliche Dachhaut verschatten, die sich folglich nicht so stark aufheizt. Dies ist jedoch erneut von der konkreten Umgebungssituation und Ausführung der PV-Anlage abhängig, sodass pauschale Einschätzungen des Kühlungseffekts mit großen Unsicherheiten verbunden sind.

Während die „Dachtemperaturminderung“ – die auch als extra Wirkindikator ausgewiesen wird – abschätzend berechnet werden kann (siehe Abschnitt Temperaturminderung), ergibt sich der vermiedene Kühlbedarf aus dem Zusammenspiel vielfältiger Einflussfaktoren, die für ein konkretes Dach im Detail geprüft werden müssten. Daher wird für den Wirkindikator „Vermiedener Kühlbedarf“ eine fixe Skala angelegt. Gründächer werden mit 5 bewertet, da sie eine hohe Dämmwirkung sowie die größte Minderung der Dachflächentemperatur aufweisen. PV-Gründächer mit etwas geringerer Substratdicke erhalten eine 4 und PV-Dächer eine 1.

Treibhausgas-Senke durch CO₂-Sequestration im Gründach

Durch die Regulation des Treibhausgases Kohlenstoffdioxid (CO₂) kann Stadtnatur, darunter auch Gründächer, einen wichtigen Beitrag zu Minderungszielen auf dem Pfad zu Netto-Null-Emissionen leisten.

Im Photosyntheseprozess der Pflanzen auf Gründächern wird Kohlenstoff aus der Luft aufgenommen und sowohl in den Pflanzenteilen als auch im Substrat langfristig gebunden. Dabei nimmt die gespeicherte Menge CO₂ grob linear mit der Phytomasse zu (Köhler/Kaiser 2021), die wiederum tendenziell mit der Substratdicke zunimmt (Getter et al. 2009; Herfort et al. 2012; Köhler/Kaiser 2021). Darüber hinaus sind auch die spezifische Auswahl der Pflanzenmischung, das Wachstumsmedium (verschiedene Substrattypen und Pflanzmatten) sowie, Verschattung, Düngung und Bewässerung von maßgeblicher Bedeutung für die Entwicklung der Phytomasse.

Anhand von Literaturwerten zu diesen Parametern kann für die definierten technischen Ausführungen von Grün- und PV-Gründächern die CO₂-Senkenleistung näherungsweise berechnet werden. Dabei wird eine reine Sedum-Begrünung angenommen, da dies die einzige Pflanzengattung ist, für die ausreichend Datenpunkte vorliegen. Eine lineare Regression der Bindungsleistung in Abhängigkeit der Substratdicke erlaubt die Differenzierung in Abhängigkeit der konkret angenommenen Substratschicht. Basierend auf den Ergebnissen aus (Köhler/Kaiser, 2021) wird für PV-Gründächer für die verschatteten Bereiche unter den Paneelen eine um 16% höhere Bindungsleistung angenommen. Für eine detailliertere Betrachtung der weiteren oben skizzierten Faktoren waren nicht genügend Datenpunkte verfügbar, um diese verlässlich abzubilden.

Zur Bewertung der alternativen Dachausführungen wird jeweils die CO₂-Senkenleistung pro m² begrünter Fläche berechnet und in Relation zur Senkenleistung der effizientesten Dachvariante gesetzt, die mit 5 bewertet wird. Dies kann je nach konkreter Ausgestaltung entweder das Gründach oder das PV-Gründach sein. Die Wertung der weniger effizienten Gründachvariante erfolgt nach der in Tabelle 6 beschriebenen Skala. Das PV-Dach wird mit 0 bewertet.

Perspektivisch ließe sich diese Berechnung erweitern, um auch verschiedene Substrate, Pflanzengattungen sowie Düngungs- und Bewässerungsstrategien zu berücksichtigen, sobald dafür detaillierte Studien verfügbar werden.

Wirkebene Betriebswirtschaftlichkeit

Die Betriebswirtschaftlichkeit stellt bei der Entscheidung für/gegen eine PV-Anlage, ein Gründach oder ein PV-Gründach für viele Gebäudeeigentümerinnen und -eigentümer ein wichtiges Kriterium dar. Eine genaue Aussage zur Betriebswirtschaftlichkeit bedarf der Kenntnis der Kosten und Einnahmen/Einsparungen, die miteinander über den Betriebszeitraum bilanziert werden. Typische Kosten bei den unterschiedlichen Ausführungsmöglichkeiten sind übersichtlich in Arbeitsschritt 4 (AS4) aufgelistet worden.

Bei allen Ausführungsmöglichkeiten stellt die Investition den Hauptteil der Kosten dar. Laufende Kosten fallen im Gegensatz dazu nur gering ins Gewicht, sollten aber trotzdem mit betrachtet werden. Sowohl die Investitionen als auch die laufenden Kosten zeigen dabei eine Abhängigkeit von der Anlagengröße bzw. der auszukleidenden Fläche. Dementsprechend lassen sich kostenseitig zwei Wirkindikatoren definieren: die Investitionskosten (spezifisch, in €/m²) und die laufenden Kosten (spezifisch, in €/m²)

Demgegenüber ergeben sich auf der Einnahmen/Einsparungen-Seite ebenso Wirkindikatoren, die die Betriebswirtschaftlichkeit beeinflussen. Diese sind: die Einsparungen durch den selbstverbrauchten PV-Strom, die Einnahmen aus der Einspeisevergütung und die Einsparungen durch vermiedene Niederschlagsgebühren. Darüber hinaus ergeben sich in der Praxis noch Einsparungen durch einen vermiedenen Kühl- und/oder Heizbedarf. Da diese Effekte jedoch stark von der Gebäudetechnik abhängig sind, werden diese Einflüsse auf die Betriebswirtschaftlichkeit an dieser Stelle nicht betrachtet.

Folgend wird näher auf die einzelnen Wirkindikatoren der Wirkebene „Betriebswirtschaftlichkeit“ eingegangen. Darüber hinaus wird der zusätzliche Wirkindikator „LCOE“ (Levelized Cost of Electricity – Stromgestehungskosten des Gesamtstromverbrauchs) beschrieben, der die strombezogenen Wirkindikatoren zusammenfasst und eine vergleichende Betrachtung mit dem Haushaltsstrompreis ermöglicht.

Investitionskosten

Der Wirkindikator „Investitionskosten“ soll eine Einschätzung darüber ermöglichen, wie hoch die Investitionskosten eines m² der jeweiligen Ausführungsmöglichkeit verglichen mit einer Dachfläche von ca. 1450 m² liegen (entspricht ca. 300 kWp PV bei Vollbelegung – ehemalige EEG-Grenze für die Vollvergütung des gesamten erzeugten Stroms (EEG2021)). Auch wenn im Einzelfall bestimmte bauliche Gegebenheiten wie beispielsweise die Notwendigkeit der Erneuerung der Elektroinstallation oder zusätzliche Maschinen für den Transport der Waren auf das Dach die Investitionskosten z. T. stark beeinflussen können, stellt die Größe der Anlage in der Regel die wichtigste Einflussgröße auf die spezifischen Investitionskosten dar.

Dieser Zusammenhang kann mit einer Kostenfunktion abgebildet werden. Im Rahmen dieser Studie wurden daher Kostendaten recherchiert und eine solche Kostenfunktion, aus der sich für jede Größe der Anlage die entsprechenden Kosten berechnen lassen, hergeleitet (für tiefergehende Informationen siehe Anhang). Im Verhältnis zu den Referenzinvestitionskosten (1450 m² einer jeden Ausführungsmöglichkeit) ergibt sich so die Bewertung des Wirkindikators (5 bis 3: Abstufung in 10% ab 100%; 2 = 70–50%, 1 = 50–30%, 0 = 30–0%).

Laufende Kosten

Analog zum Wirkindikator „Investitionskosten“ soll dieser Wirkindikator eine Einschätzung über die Höhe der laufenden Kosten verglichen mit einer Referenzdachfläche von 1450 m² ermöglichen.

Die laufenden Kosten einer PV-Anlage unterliegen ebenso einer Größenabhängigkeit, verändern sich jedoch gegenüber den Investitionskosten zeitlich weniger stark. Daher wird empfohlen, dass gerade bei kleineren Anlagen die laufenden Kosten über einen Sockelbetrag (145 €) und eine leistungsabhängige Komponente berechnet werden (5 €/kWp) (Bergner/Siegel, 2021):

Für die laufenden Kosten eines Gründachs kann wiederum in gleicher Weise wie bei den Investitionskosten verfahren werden und eine Kostenfunktion gebildet werden (siehe Anhang für weitere Informationen). Die typischen laufenden Kosten eines Gründachs und einer PV-Anlage unterscheiden sich grundlegend und es besteht keine Dopplung in den Arbeiten, die zur Instandhaltung der Dachausführung notwendig sind. Daher können die laufenden Kosten eines PV-Gründachs als die Kombination aus den laufenden Kosten für die Gründachpflege (PV-Gründach Variante mit leicht höherem Pflegebedarf vergl. mit Gründach) und den laufenden Kosten einer PV-Anlage mit um den jeweiligen Flächennutzungsgrad reduzierten Leistung angenommen werden.

Um eine einfache qualitative Bewertung der laufenden Kosten zu erhalten, werden in dieser Arbeit die tatsächlich anfallenden laufenden Kosten mit der größten hier betrachteten Fläche von ca. 1450 m², die die geringsten spezifischen laufenden Kosten aufweist, ins Verhältnis gesetzt. Die willkürliche qualitative Einteilung kann dann analog zu den Investitionskosten wie folgt vorgenommen werden: 5 bis 3: Abstufung in 10% ab 100%; 2 = 70–50%, 1 = 50–30%, 0 = 30–0%.

Einnahmen durch Einspeisung

Seit Ende Juli 2022 gelten für kleinere PV-Anlagen (< 750 kWp) unterschiedliche Betreiber- und damit Vergütungsmodelle. Die Anlagenbetreiber können zwischen der Volleinspeisung oder der Teileinspeisung (Nutzung eines Teils der Erzeugung für den Eigenverbrauch) wählen. Je nach Modell ergeben sich bis zum 31.01.2024 folgende anzulegende Werte für die Vergütung in Abhängigkeit der Anlagenleistung (Tabelle 7):

Tabelle 7
Übersicht der anzulegenden Werte nach PV-Anlagengröße

Anzulegende Werte in Cent/kWh – Marktprämienmodell					
Betreibermodell	bis 10 kW	bis 40 kW	bis 100 kW	bis 400 kW	bis 1 MW
Teileinspeisung	8,60	7,50	6,20	6,20	6,20
Volleinspeisung	13,40	11,30	11,30	9,40	8,10

Quelle: Institut für ökologische Wirtschaftsforschung GmbH 2023

Diese anzulegenden Werte gelten für das Marktprämienmodell. Anlagen ab 100 kWp müssen ihren Strom über dieses Modell direkt vermarkten. Anlagen unter 100 kWp können eine feste Einspeisevergütung wählen, die sich durch den Abzug einer Managementprämie von 0,4 Cent/kWh von den anzulegenden Werten ergibt. Die unterschiedlichen Vergütungssätze werden bei größeren Anlagen berücksichtigt. So erhält beispielsweise eine teileinspeisende Anlage mit 70 kWp eine feste Einspeisevergütung von: $10/70 * (8,6 - 0,4) + 30/70 * (7,5 - 0,4) + 30/70 * (6,2 - 0,4) = 6,7$ Cent/kWh.

Dieser Wirkindikator nimmt diese regulatorischen Einflussgrößen auf und berechnet zusammen mit der ins Netz zurückgespeisten Strommenge die Einnahmen aus dem überschüssigen PV-Strom. Außer von den regulatorischen Vorgaben wird dieser Wirkindikator nur von Effekten beeinflusst, die sich direkt auf den PV-Ertrag auswirken (siehe Abschnitt zum PV-Ertrag und Ertragssteigerung weiter oben und im Anhang).

Die Bewertung dieses Wirkindicators wird durch die energetische Betrachtung für den Wirkindikator „Einspeisung“ festgelegt bzw. ist mit dieser identisch.

Einsparungen durch Eigenverbrauch

Die Einsparungen, die durch den PV-Eigenverbrauch erzielt werden, werden durch die Differenz der Stromgestehungskosten der PV-Anlage (Bezugsgröße ist hier der mittlere PV-Jahresertrag der Anlage) und des Strompreises beschrieben. Je höher diese Differenz, desto mehr lohnt sich der Eigenverbrauch. Dementsprechend stellen die Stromgestehungskosten der PV-Anlage und der Haushaltstrompreis die größten Einflüsse für die Einsparungen durch Eigenverbrauch dar. Die Bewertung dieses Wirkindicators wird durch die energetische Betrachtung für den Wirkindikator „Eigenverbrauch“ festgelegt bzw. ist mit dieser identisch.

Betriebswirtschaftlich werden die Einsparungen durch den Eigenverbrauch im Wirkindikator „LCOE“ abgebildet, denn dort reduziert der „Eigenverbrauch“ den Gesamtstromverbrauch – die Bezugsgröße für die Gesamtstromgestehungskosten des Gebäudes. Darauf wird im Folgenden näher eingegangen.

LCOE (Gesamtstromgestehungskosten des Gebäudes)

Bei Energieerzeugungsanlagen ist es üblich, die Kosten auf die erzeugte Energie zu beziehen. Die sich so ergebenden Stromgestehungskosten sind ein Maß dafür, wie viel die Erzeugung einer Kilowattstunde mittels der jeweiligen Anlage kostet. Eine genaue Berechnung der Stromgestehungskosten ist mit der Kapitalwertmethode oder abschätzend mit der Annuitätenmethode möglich (Kost et al. 2021). Letztere wurde für diese Studie verwendet (für weiterführende Informationen siehe Anhang). Bezieht man bei der Betrachtung nicht nur die erzeugte Energie mit ein, sondern bezieht alle anfallenden Kosten auf den Gesamtstromverbrauch des Gebäudes, so ergibt sich eine Vergleichsgröße (hier als „LCOE“ bezeichnet), mit der sich die unterschiedlichen Varianten vergleichen lassen.

Maßgeblichen Einfluss auf diese Betrachtungsweise hat der Betrachtungszeitraum, auf den die Kosten verteilt werden. Zur Verteilung der Kosten wird bei dieser Methode der Annuitätenfaktor verwendet. Dieser wiederum ist stark vom jeweiligen Vorhaben und den derzeitigen Rahmenbedingungen abhängig. Denn dieser ergibt sich über den kalkulatorischen Zinssatz, dem die Eigenkapitalquote und die damit verbundenen Eigen- und Fremdkapitalzinssätze zugrunde liegen. Auch müssen zur Berechnung des kalkulatorischen Zinssatzes Inflationsannahmen getroffen werden, was derzeit nur mit hoher Ungewissheit getan werden kann. Das Verhältnis von Eigen- zu Fremdkapital ist vor allem auch abhängig von der Anlagengröße. Während kleinere Anlagen häufig vollständig aus Eigenkapital finanziert werden, ist bei Großanlagen eine Kreditfinanzierung üblich.

Im Ergebnis können die LCOE mit dem Haushaltstrompreis verglichen werden. Dabei wurde für den Wirkindikator folgende Bewertung willkürlich festgesetzt: $5 = 75\text{--}82,5\%$ des Haushaltstrompreises, danach aufsteigend in $7,5\%$ -Schritten. Liegen die LCOE unter dem Haushaltstrompreis ergeben sich somit Wertungen ≥ 3 , liegen sie darüber fällt die Bewertung mit ≤ 2 aus. Das Aufführen von LCOE für das Gründach als nicht-stromproduzierende Technologie ist rein theoretisch nicht zielführend, scheint aber als zusammenfassende Betrachtung für den Vergleich der Technologien sinnvoll (fixe Bewertung von $3 = 100\%$ Haushaltsstrompreis).

Lärminderung

Die lärmindernden Eigenschaften eines begrünten Daches wirken auf zwei Ebenen: 1) innerhalb eines einzelnen Gebäudes, hier ist der Übertragungsverlust von Außenlärm ins Innere relevant, und 2) auf Nachbarschaftsebene, wo die Absorption von Außengeräuschen, die sich in der Umgebung ausbreiten, die relevante Größe darstellt.

Für eine Unterscheidung der Dachtypen in Bezug auf die Minderung der Schallübertragung ins Hausinnere (1) lagen keine ausreichend robusten Daten vor, um eine Bewertung vorzunehmen. Der Wirkindikator „Lärminderung“ umfasst in seiner aktuellen Definition daher lediglich die Schallabsorptionsleistung (2).

Die Absorptionseigenschaften von Gründächern für die Ausbreitung von Außenlärm werden durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst, die sich mit einfachen Modellen nur schwer quantifizieren lassen. So kann bereits eine unbegrünte Substratschicht als wirksamer Schallabsorber fungieren, wobei ein höherer Anteil organischer Stoffe, eine größere Dicke, ein geringerer Wassergehalt und eine geringere Verdichtung jeweils die Absorption verbessern. Sobald jedoch eine durchgehende Vegetationsdecke besteht, verlieren die Eigenschaften des Substrats an Bedeutung und die Beschaffenheit der Pflanzenoberfläche wird die maßgebliche Determinante.

Abhängig von ihrer Neigung und ihrem Abstand zum Dach können PV-Paneele die Schallabsorption von Gründächern weiter verbessern, wobei eine steilere Neigung und Montage ohne Abstand zur Dachoberfläche sich besonders positiv auswirken. Reine PV-Dächer dagegen wirken sich kaum positiv oder sogar negativ auf die Schallabsorption aus, verglichen mit einem Dach ohne Paneele.

Aus diesen Zusammenhängen ergibt sich für den Wirkindikator „Lärminderung“ eine fixe Bewertung: PV-Dach = 0, Ost-West PV-Gründach (mit weniger stark geneigten Modulen) = 3, reines Gründach = 4 und südlich ausgerichtetes PV-Gründach (mit steilerer Modulneigung) = 5.

Bewertungsindikatoren der Makroebene

Luftschadstoffbindung und damit verbundene Gesundheitskosten

Luftverschmutzung in dicht besiedelten urbanen Räumen ist eine wichtige Ursache von Erkrankungen und vorzeitigen Todesfällen (Khomenko et al. 2021). Eine Reduktion der Belastung etwa durch Feinstaub und Stickoxide hat das Potenzial, die Gesundheit und Lebensqualität in Städten deutlich zu verbessern. Vor diesem Hintergrund erscheint es vielversprechend, neben Temperaturminderungseffekten auch die Luftschadstoffbindungsleistung von Gründächern zu analysieren.

Idealerweise befindet sich Vegetation, die Schadstoffe filtern soll, nahe der Quelle, weist eine große Oberfläche zur Schadstoffdeposition auf und ist zugleich durchlässig genug, sodass der Luftstrom nicht hauptsächlich abgelenkt wird. Es überrascht daher nicht, dass die Schadstofffilterleistung insbesondere extensiver Gründächer ohne Sträucher und Bäume, die zudem vergleichsweise weit vom Straßenverkehr als primäre Emissionsquelle entfernt liegen, bislang eher nachrangig untersucht wurden. Dennoch gibt es Evidenz, dass flächendeckende extensive Dachbegrünung eine bedeutende Filterleistung von -2,3% oder 9,18 Tonnen PM10 bei 325 ha Dachbegrünung aufweisen könnte (vgl. z. B. Speak et al. 2012).

Um eine möglichst präzise Filterleistung für die Luftschadstoffe Feinstaub (PM10), Schwefeldioxid (SO₂), Stickstoffdioxid (NO₂) und Ozon (O₃) auf Gründächern zu ermitteln, fehlen für Sedum als gängigste Pflanzengattung größtenteils noch verlässliche Werte aus Experimenten. Wo diese fehlten, wurde für eine erste näherungsweise Berechnung die Filterleistung von Sträuchern über den Blattflächenindex und einen Korrekturfaktor auf eine Sedum Begrünung umgerechnet.

Zur Bewertung wird der Dachtyp mit der höchsten Schadstoffbindungsleistung als Referenz herangezogen und mit 5 bewertet. Je nach gewählter Ausführung kann so entweder das reine Gründach oder das PV-Gründach die Referenz darstellen. Die Bewertung des anderen Gründachtyps ergibt sich aus der Bewertungsskala aus Tabelle 6. Das reine PV-Dach wird immer mit 0 bewertet.

Einsparungen von Gesundheitskosten durch Luftschadstoffrückhalt

Luftschadstoffbelastung erhöht Morbiditäts- und Mortalitätsrisiken erheblich, insbesondere die Risiken von Herz-Kreislauf- und Atemwegserkrankungen (vgl. WHO 2021). Im Sinne einer Schadenskostenbetrachtung kann aus Dosis-Wirkungs-Funktionen und Informationen zu Gesundheitskosten abgeschätzt werden, wie hoch die Krankheitskosten sind, die sich durch die Schadstoffreduktion einsparen lassen.

In der Methodenkonvention 3.1 des Umweltbundesamtes werden Kostensätze für die Gesundheitsschäden aus den oben beschriebenen Schadstoffen aufgeführt (Matthey/Bünger 2020). Die Kosten wurden anhand einer Kombination von Maßstäben monetär bewertet, u. a. Euro pro verlorenes Lebensjahr durch vorzeitigen Tod, Euro pro Krankenhauseinweisung wegen Atemwegs- oder Herzerkrankungen, Euro pro Tag teilweiser oder vollständiger Arbeitseinschränkung und Euro pro Fall von Säuglingssterblichkeit oder Bronchitis bei Kindern (Holland 2014). Der monetäre Wert der eingesparten Gesundheitskosten ergibt sich aus der Multiplikation der geschätzten zurückgehaltenen Schadstoffmenge mit dem jeweiligen Kostensatz. Unter Annahme des Kostensatzes für Gesundheitsschäden durch PM10 aus unbekannter Quelle (43.300 €₂₀₂₀/t) (Matthey/Bünger, 2020, Tabelle 4) ergibt sich durch die oben beispielhaft angeführte großflächige 325 ha Dachbegrünung eine Umweltkostenreduktion von 397.494 €. Dieses Beispiel zeigt, dass relevante Einsparungen von Gesundheitskosten erst bei flächendeckender Umsetzung von Dachbegrünung zu erwarten sind und dann verglichen mit dem Umsetzungsaufwand sehr gering ausfallen. In einer holistischen Betrachtung der Wirkungen von Gründächern sollten sie dennoch berücksichtigt werden.

Biodiversität

Die Biodiversitätskrise gerät in Zeiten von Extremwetterereignissen und dem resultierenden Fokus auf die Klimakrise leicht aus dem Blick, doch letztlich werden dringend Antworten auf beide benötigt. Auch hier können verschiedene Typen von (PV-)Gründächern einen kleinen Beitrag leisten, der in diesem Wirkindikator abgebildet werden soll.

Verschiedene Studien haben gezeigt, dass die Substratdicke zu den wichtigsten Faktoren für die Vielfalt an Pflanzen und Tieren gehört (Aloisio et al. 2020; Braaker et al. 2014; Madre et al. 2014; van der Kolk et al. 2020). Ein weiterer essenzieller Faktor ist die Menge und Vielfalt an Grünflächen, die das Gründach umgeben (Aloisio et al. 2020). Von dort aus können sowohl Pflanzen als auch Tiere das Gründach allmählich besiedeln. Hierbei stellt die Dachhöhe jedoch ein Hemmnis dar, sowohl für flugunfähige Arthropoden als auch Vögel, die auf hohen Dächern nur in geringer Vielfalt vorkommen (vgl. Belcher et al. 2019; Wang et al. 2017).

Die Auswirkungen von zusätzlichen PV-Anlagen auf die Biodiversität eines Gründachs sind schwierig abschließend zu beurteilen. Durch die Paneele werden potenziell neue Mikrobiome geschaffen, die die Biodiversität fördern könnten (Nash et al. 2016). Studienergebnisse sind in dieser Hinsicht jedoch nicht eindeutig.

Da die Substratdicke der einzige Parameter ist, der sich in den vorliegenden Studien konsistent positiv auf die biologische Vielfalt auf Dächern auswirkt und der sich zwischen den unterschiedlichen Dachvarianten unterscheidet, wird sie als Basisgröße für die Bewertung herangezogen. Gründächer, entsprechend der Beschreibung der technischen Varianten mit einer Substratdicke von 10 cm, werden mit 5 bewertet, während PV-Gründächer mit einer Substratdicke von 8 cm mit 4 bewertet werden. Das PV-Dach ohne Substrat schließlich wird mit 0 bewertet.

Wasserrückhalt und damit verbundene Einsparungen

Die größte Bedeutung der Wasserrückhaltung liegt in der Verringerung der Abflussspitzen, die zu Überlastung der Entwässerungssysteme und Überschwemmungen und damit zu erheblichen Schäden in einer Gemeinde führen können. Begrünte Dächer verringern den Abfluss, indem sie die Niederschläge in ihrem Substrat absorbieren und so die Gesamtmenge, die in einem gegebenen Moment in ein Abwassersystem eintretenden Niederschläge verzögern.

Der „Wasserrückhalt“ wird anhand der für die jeweiligen Dachtypen spezifischen Abflussbeiwerten berechnet (siehe auch detaillierte Ausführungen zu den Werten und Annahmen im Anhang), der den Anteil des Wassers beschreibt, der bei einem Niederschlagsereignis von einer bestimmten Oberfläche

abfließt (vgl. z. B. Maniak 2016). Sowohl die Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA) als auch das Deutsche Institut für Normung (DIN) haben Koeffizienten für verschiedene Gründacharten, die zur Berechnung verwendet werden können.

Rückhalt während eines Starkregenereignisses

Für die Berechnung des Wasserrückhalts bei einem Starkregenereignis können die Spitzenabflussbeiwerte aus DIN 1986-100 (Absatz 14.2.3) (2016) verwendet werden, die unter anderem die Dachneigung und für Gründächer auch die Substratdicke berücksichtigen. Berechnet wird für diesen Wirkindikator der Wasserrückhalt in m^3 für einen zweijährigen 10-Minuten Regen, der nach DWA-A 118 (2019) für die Bemessung von Entwässerungsnetzen von u. a. Stadtzentren und Wohngebieten verwendet wird.

Zur Bewertung wird die effizienteste Dachausführung (de facto immer das reine Gründach) als Referenz herangezogen, die mit 5 bewertet wird. Der Rückhalt auf den übrigen Dachausführungen wird mit dieser Referenz in Verhältnis gesetzt und anhand der in Tabelle 6 aufgeführten Skala bewertet.

Rückhaltung der durchschnittlichen jährlichen Niederschlagsmenge

Die Berechnung des Wirkindikators zum durchschnittlichen jährlichen Wasserrückhalt ist analog zum Rückhalt bei einem Starkregenereignis wird mit dem 30-jährigen durchschnittlichen Jahresniederschlag und den mittleren Abflussbeiwerten aus DIN 1986-100 (2016) sowie DWA-M 153 (2007) möglich. Die Bewertung erfolgt ebenso analog.

Einsparungen bei der Kanalisation

Durch eine Verringerung des Spitzenabflusses bei Starkregen ergibt sich eine Entlastung des Kanalnetzes. Anhand der Berechnungen des Wirkindikators „Rückhalt während eines Starkregenereignisses“ kann der reduzierte Bedarf an Kanalisationsinfrastruktur ermittelt werden, da der Indikator auf dem entsprechenden Bemessungsregen beruht. Dies ermöglicht die monetäre Quantifizierung der Rückhalteleistung, indem die Kosten für Rückhaltevolumen im Kanalnetz angesetzt werden, die alternativ notwendig wären, um eine äquivalente Leistung zu erbringen.

Eine Bewertung der monetären Einsparpotenziale ist bisher nicht umgesetzt, da es sich um eine andere Metrik des Wirkindikators zum Starkregenrückhalt handelt und keinen eigenständigen Indikator. Je nach Perspektive, etwa für lokale Planungsakteure, könnte diese alternative Metrik dennoch eine wertvolle Ergänzung sein.

Einsparungen bei der Niederschlagswassergebühr

Dieser Indikator erfasst einen zusätzlichen betriebswirtschaftlichen Nutzen für die Gebäudeeigentümerinnen bzw. Gebäudeeigentümer, da viele Kommunen eine Reduktion der Niederschlagswassergebühren für begrünte Dächer gewähren. Wie hoch die Reduktion ist und welche Anforderungen das Gründach dafür erfüllen muss, unterscheiden sich von Kommune zu Kommune.

Dem Wirkindikator liegt eine Übersicht der Niederschlagswassergebühren für 160 Städte mit mindestens 50.000 Einwohnenden, sowohl in €/m² als auch in Prozent, zugrunde (Mann et al. 2022). Die Verteilung der prozentualen Einsparung, die die Kommunen anbieten, wird in Quintile unterteilt und Grün- und PV-Gründächer entsprechend ihrer geografischen Lage einer Kommune und somit einem dieser Quintile zugeordnet. So werden (PV-)Gründächer in Kommunen, die die prozentual höchsten Einsparungen anbieten (>= 77%, oberstes Quintil der Verteilung), mit 5 bewertet, solche mit einer Einsparung unter 45% (unterstes Quintil) mit 1. PV-Dächer werden mit 0 bewertet.

Arbeitsproduktivität

Umwelteinflüsse auf die Arbeitsproduktivität können unter anderem in Form von Hitzestress auftreten, wenn die thermischen Bedingungen das Komfortniveau einer Person für Spitzenleistungen

überschreiten. Fokus dieses Wirkindikators sind die Arbeitsbedingungen in dem (Büro)Gebäude, dessen Dach potenziell begrünt und oder mit einer PV-Anlage versehen werden soll.

Die Arbeitsproduktivitätseffekte von Hitzebelastung wurden bisher hauptsächlich in hochintensiven manuellen Arbeitsumfeldern im Freien wie der Landwirtschaft, dem Fertigungssektor oder dem Bauwesen größtenteils in Ländern des globalen Südens direkt untersucht (Hsiang 2010; Ioannou et al. 2017; Li et al. 2016; Sahu et al. 2013; Sett/Sahu 2014; Somanathan et al. 2021; Yi/Chan 2017). Während dies für manuelle Tätigkeiten im Freien an heißen Sommertagen auch in Deutschland relevant sein könnte, so ist es bedeutend schwieriger, Effekte für Wirtschaftssektoren mit weniger exponierten Arbeitsumgebungen und besseren Schutzmaßnahmen abzuschätzen, wie sie für diesen Wirkindikator relevant wären. Darüber hinaus gibt es in den Studien, in denen Produktivitätsverluste genau quantifiziert werden, keine Konsistenz bei der Basistemperatur, die für ideale Arbeitsbedingungen verwendet wird. Sie schwankt entweder zwischen 24 und 26 Grad Celsius oder wird überhaupt nicht angegeben. Es sollte auch beachtet werden, dass bei größeren Untersuchungen zu hitzebedingten Produktivitätseinbußen die direkten Verluste in den oben genannten Branchen oft mit indirekten Auswirkungen auf die Lieferketten der gesamten Wirtschaft verbunden sind, die sich langfristig noch verstärken (Borg et al. 2021; Zhao/Srebric 2012). Derartige Messungen liegen jedoch außerhalb des Rahmens des vorliegenden Projekts.

Da dieser Indikator in erster Linie von den Innentemperaturen beeinflusst wird, wird vereinfachend die gleiche Bewertungsmethode angewendet, wie für den verminderten Kühlbedarf (siehe „Vermiedener Kühlbedarf“). Daher werden Gründächer in der Skala mit 5 bewertet, PV-Gründächer mit 4 und PV-Dächer mit 1.

Temperaturminderung (Mikro- und Makroebene)

Stark erschlossene Gebiete wie Städte und Industriezonen verursachen ein Phänomen, das als städtische Wärmeinsel bekannt ist (engl. urban heat island, UHI). Gründächer können diesem Effekt in kleinem Maßstab entgegenwirken, hauptsächlich indem sie in bewässerungsreichen Zeiten das aufgenommene Wasser durch Verdunstung zur Kühlung der Umgebung nutzen.

Der Feuchtigkeitsgehalt des Daches spielt bei der Kühlwirkung folglich eine entscheidende Rolle. Darüber hinaus sind jedoch auch die spezifische urbane Konfiguration (insbesondere die Bebauungsdichte) sowie die Höhe des Gebäudes relevante Faktoren. Letztere ist insbesondere ausschlaggebend dafür, ob auf Straßenhöhe überhaupt ein Effekt messbar ist.

Aus einer Vielzahl an Studien wurden vereinfachte funktionale Zusammenhänge abgeleitet, um ausgehend vom Bodenwassergehalt (Proxy für den Feuchtigkeitsgehalt im Gründach), der Gebäudehöhe, der Bevölkerungsdichte (als Proxy für Bebauungsdichte) und dem PV-Layout drei Kennwerte zu ermitteln: die „Dachflächentemperaturminderung“, die „Über-Dach-Lufttemperaturminderung“ und die „Über-Boden-Lufttemperaturminderung“.

Die Über-Boden-Lufttemperaturminderung wird als Wirkindikator „Temperaturminderung im Quartier“ als Makroebenindikatoren (quartierbezogen) betrachtet. Die „Dachflächentemperaturminderung“ und die „Über-Dach-Lufttemperaturminderung“ haben hauptsächlich Einfluss auf die nötige Kühlung im Gebäude und werden daher zusammengefasst und als separater Wirkindikator „Dachtemperaturminderung“ auf der Mikroebene ausgewiesen (findet ebenso Eingang in die Abschätzung für den Wirkindikator „Vermiedener Kühlbedarf“). Die final berechneten Temperaturminderungseffekte werden zur Bewertung mit der Reduzierung derselben Dachfläche in einer dichten städtischen Konfiguration mit niedrigen Gebäuden verglichen, d. h. der Situation, in der der Effekt maximal und von größter Bedeutung wäre. Bei größerer Gebäudehöhe und geringerer Bevölkerungsdichte reduziert sich dementsprechend die Bewertung entsprechend der Skala in Tabelle 6.

Einfluss auf die Gesundheit

Der Einfluss begrünter Dächer auf die Gesundheit ergibt sich aus der Absorption von Luftschadstoffen und der Senkung der Umgebungstemperatur.

Weil der Einfluss verschiedener Dachtypen auf die Gesundheit über Mechanismen geschieht, die bereits in anderen Wirkindikatoren abgebildet sind, kann der Wirkindikator „Einfluss auf die Gesundheit“ über einen Durchschnitt jener Indikatoren bestimmt werden. Konkret wird er berechnet aus dem Durchschnitt der Wirkindikatoren „Luftschadstoffbindung und damit verbundene Gesundheitskosten“, der „Temperaturminderung im Quartier“ und des „Vermiedener Kühlbedarf (passive Kühlung)“. Dabei trägt die Quartierstemperaturminderung den gesundheitlichen Auswirkungen der Hitze im Außenbereich Rechnung, während der vermiedene Kühlbedarf als Proxy für verringerte Hitzebelastung innerhalb des Gebäudes agiert.

Es ist anzumerken, dass die beschriebene Vorgehensweise nur als ein erster Ansatz zur Evaluation der gesundheitlichen Wirkungen verstanden werden kann, der keine Ableitung der absoluten Höhe der Effekte zulässt. Gerade bei kleinflächigen Dachausführungen ist davon auszugehen, dass die Wirkungen gering sind und sich messbare Effekte vermutlich erst durch die weite Verbreitung von Gründächern einstellen würden (vgl. Beispielrechnung im Abschnitt Luftschadstoffbindung und damit verbundene Gesundheitskosten).

Treibhausgas-Emissionen durch die Herstellung

Betrachtet über den Gesamtlebenszyklus sind die Treibhausgas (THG)-Emissionen während der Herstellung für alle der in dieser Studie betrachteten Technologien am höchsten. Sowohl für PV-Anlagen als auch für Gründächer ergeben sich jedoch große Spannen für die THG-Emissionen in Abhängigkeit der eingesetzten Technologie und dem Produktionsstandort (siehe auch Hintergrundinformationen im Anhang).

Vergleicht man die unterschiedlichen Technologien jedoch untereinander, so können deutliche Unterschiede festgestellt werden. Diese soll der Wirkindikator „THG-Emission durch die Herstellung“ mit einer festen Bewertungsskala darstellen. Denn, obwohl die verschiedenen technischen Ausführungsfaktoren, die die produktionsbedingten THG-Emissionen dieser Dachtypen beeinflussen, nicht genau berücksichtigt werden können, reichen die einzelnen Spannen aus (siehe weiterführende Informationen im Anhang), um qualitative Aussagen zu treffen, die als Bewertungsskala verwendet werden können. Für Gründächer fallen für die Herstellung die geringsten THG-Emissionen an. Diese werden daher pauschal mit 5 bewertet. Dagegen weisen PV-Dächer unabhängig vom Zellentyp deutlich mehr herstellungsbezogene THG-Emissionen auf und werden daher mit 0 bewertet. Für kombinierte PV-Gründächer wird davon ausgegangen, dass in etwa die Summe der beiden vorgenannten Optionen pro Quadratmeter emittiert wird, wobei sich die PV-Fläche um den Flächennutzungsfaktor der Ausführung minimiert. Dadurch fällt die Gesamtemission bei den hier beispielhaft verwendeten Varianten (Ost-West = 65%, Süd = 45,6%) immer noch geringer aus als bei der reinen PV-Ausführung. Daraus ergibt sich eine Bewertung von 2 für die Ost-West Ausführung und von 3 für die Süd Ausführung.

Vor-Ort Verbrauch und Netzaustausch

Je nachdem wie groß die PV-Leistung im Vergleich zum Stromverbrauch des Gebäudes ist, muss mehr oder weniger PV-Strom über den Netzanschlusspunkt des Gebäudes abgeführt werden (Einspeisung). Während die Wartung und Anlagenplanung innerhalb des Gebäudes auf die Eigentum innehabende Person zurückfällt, ist für die Verteilung des rückgespeisten PV-Stroms und die Wartung des dazu notwendigen Verteilnetzes der Netzbetreiber zuständig. In erster Linie muss dieser den stabilen Betrieb des Stromnetzes sicherstellen. In jedem Falle ist es vorteilhaft, wenn auf lokaler Ebene ein Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch stattfindet, da dadurch nur ein kleiner Teil des Verteilnetzes

beansprucht wird und Komponenten wie beispielsweise bestehende Transformatoren länger betrieben werden können. Bei der PV-Einspeisung ist es daher sinnvoll, die nähere Umgebung der Anlage mit zu betrachten, um eine Aussage darüber treffen zu können, inwiefern das Verteilnetz über die lokale Umgebung hinweg beansprucht werden wird. Dies wird mit dem Wirkindikator „Vor-Ort Verbrauch und Netzaustausch“ versucht.

Während dieser Wirkindikator theoretisch der genauen Kenntnis der lokalen Stromversorgung (Verbrauch in den Gebäuden der Umgebung, Netzinfrastrukturkomponenten etc.) bedarf, kann eine erste Abschätzung über die im Anhang näher beschriebene Methodik der Erzeugung fiktiver PV-Leistungen geschehen, die dann in ähnlicher Weise wie bei den Wirkindikatoren „Eigenverbrauch“ und „Einspeisung“ zur Berechnung einer Direktverbrauchsquote in den Gebäuden der Umgebung genutzt werden können. Die maximale Bewertung dieses Indikators kann durch einen sehr hohen Vor-Ort Verbrauch bzw. sehr geringe Rückspeisung erreicht werden (5 = 0 bis 5% Rückspeisung; vergl. Tabelle 6).

Regionalökonomische Wertschöpfung

Ein Aspekt, der in seiner Dimension über die einzelne betrachtete Dachfläche hinausgeht, ist die regional verbleibende Wertschöpfung, die durch die Nachfrage nach Produkten und Dienstleistungen entsteht. Diese beinhaltet etwa zusätzliches Beschäftigteneinkommen und die Schaffung neuer Arbeitsplätze, Unternehmensgewinne und kommunale Steuereinnahmen. Gerade bei größer angelegten Nachrüstungen von Photovoltaik, Grün- und PV-Gründächern im Hausbestand im Rahmen der Quartiersentwicklung, kann diese regionale Wertschöpfung vor Ort spürbar positive Wirkung entfalten.

Auf Basis detaillierter Informationen zu den Materialien, Arbeitsaufwänden und Kosten, die bei der Herstellung und Wartung der verschiedenen Dachausführungen anfallen, können die oben beschriebenen regionalökonomischen Kenngrößen berechnet werden. Dazu werden zwei sich ergänzende Methodiken angewandt: Eine regionalisierte Input-Output-Analyse für die Dachbegrünung sowie ein Wertschöpfungskettenmodell für die Effekte von PV-Anlagen. In Kombination lassen sich damit die Effekte aller drei Dachvarianten ermitteln.

Für die Berechnung der im „Wirk-Tool“ angezeigten Wertschöpfungsindikatoren wird die Dachalternative mit der höchsten Gesamtwertschöpfung als Referenz herangezogen. Dies geschieht für Wertschöpfung aus einmaliger Investition und jährlicher Instandhaltung getrennt, sodass die Referenzdacharten zwischen beiden Indikatoren nicht übereinstimmen müssen. Das PV-Gründach weist bei der Erstinstallation durchgehend die höchste regionale Wertschöpfung auf. Weil in die jährliche Wertschöpfung der PV-Anlagen sowohl Instandhaltungskosten als auch die Gewinne der Eigentümern einfließen, kann hier je nach konkreter Ausgestaltung das PV-Gründach oder das reine PV-Dach die höchsten Werte aufweisen.

AS7 – Vorschläge zur Umsetzung von Nutzungsstrategien in die Praxis und Analyse etwaiger Hemmnisse und AS8 – Lösungsansätze und Handlungsempfehlungen

Entsprechend der Ergebnisse aus AS 1 bis 5 wurden in den AS 7 und 8 wichtige Fragestellungen abgebildet, wie die Umsetzung der effizienten Nutzung von Dachflächen als Gründach, PV-Anlage oder PV-Gründach in der Praxis erfolgen kann. Des Weiteren wurden Hemmnisse, die diesem Umgang hinderlich sind, aufgezeigt und im gleichen Rahmen entsprechende Lösungsansätze gegeben. Abschließend finden sich für verschiedene Akteure Handlungsempfehlungen, wie die klimagerechte Umsetzung von Dachflächen unterstützt werden kann.

Institutioneller Rahmen und weitere Rahmenbedingungen

Welche Regelwerke und Fachgesetze müssten möglicherweise angepasst werden, um die Umsetzung einer klimagerechten Dachnutzung zu unterstützen?

Um die optimale gebäudeübergreifende Dachnutzung zu gewährleisten, sind zunächst die einschlägigen Gesetze, Richtlinien, Verordnungen, Genehmigungen u. ä. von Photovoltaik und Dachbegrünung zu prüfen. Der Ausschluss der jeweilig anderen Dachnutzung ist zu vermeiden. Sofern möglich sollte die Kombination aus beiden Systemen, das PV-Gründach, als maßgebende Lösung behandelt und festgeschrieben werden.

Folgende Regelwerke und Fachinformationen sollten insbesondere geprüft werden:

- EEG – Erneuerbare-Energien-Gesetz,
- GEG – Gebäudeenergiegesetz,
- FLL-Dachbegrünungsrichtlinien,
- FLL-Hinweise zur Pflege und Wartung von begrünten Dächern,
- BuGG-Fachinformation „Leitfaden sicherer Gewerkeübergang Dachbegrünung“,
- BuGG-Fachinformation „Solar-Gründach“ und
- Fachempfehlungen der PV-Branche.

Außerdem sind Regelwerke angrenzender Gewerke zu prüfen und ggf. anzupassen. Dazu zählen u. a.:

- Flachdachrichtlinie des Zentralverbands des deutschen Dachdeckerhandwerks
- DIN 18531 – 18535 („Abdichtungsnorm“)
- Brandschutz (u. a. DIN 4102-4)
- Blitzschutz (u. a. DIN EN 62305)
- Statik (u. a. DIN EN 1990, DIN EN 1991)
- Arbeitsschutz (u. a. DIN 4425, DGUV Vorschrift 38, DGUV Information 201-056)

Falls erforderlich und möglich, sollten Bund, Länder und Kommunen weiterhin an folgenden Regelwerken Änderungen vornehmen:

- BauGB – Baugesetzbuch
- MBO – Musterbauordnung
- VOB – Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen
- StLB-Bau – Standardleistungsbuch Bauwesen
- RBBau – Richtlinie für Durchführung von Bauaufgaben des Bundes

- BNB – Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen
- BNatSchG – Bundesnaturschutzgesetz
- Mieterstromgesetz
- Klimaschutzgesetz
- DAS – Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel
- Landesgesetze und Richtlinien zur PV-Nutzung / Solardachpflicht
- LBO – Landesbauordnungen
- Örtliche Bauvorschriften
- Denkmalschutzgesetz
- Förderrichtlinien (für Dachbegrünung und/oder PV-Anlagen)
- Gestaltungssatzungen
- Kommunale Richtlinien

Auch unabhängige Institute sollten ihre Regelungen für Gründächer, PV-Anlagen und PV-Gründächer prüfen, u. a.:

- DGNB
- KfW-Förderbank

Wie kann eine bundesweite Dachflächenstrategie entwickelt werden? Oder ist dies nur kommunal oder städtisch möglich?

Derzeit führen aus Sicht der Autorinnen und Autoren Länder und Kommunen auch ohne gegenseitiges Wissen und Abstimmung verschiedene Aktionen durch. Das ist nicht zielgerichtet und führt zu unnötiger Doppelarbeit sowie unkoordinierten Einzelaktionen, deren Wirkungen „verpuffen“. Gleichzeitig wird sich aktuell, u. a. durch Solar-Pflichten, auf die Nutzung von erneuerbaren Energien fokussiert, die Begrünung wird dabei vernachlässigt. Das mag zwar einen kurzfristigen Effekt erzielen, kurz-, mittel- und langfristig findet jedoch keine Klimawandelanpassung statt. Aus diesem Grund ist es wichtig, dass alle Nutzungsvarianten berücksichtigt werden. Dazu zählen auch extensive und intensive Dachbegrünungen, sowie deren Sondernutzungen als Biodiversitäts Gründach, Retentionsgründach, Urban-Farming-Dach und PV-Gründächer. Eine länderübergreifende Strategie könnte dies unterstützen und fördern.

Für eine bundesweite Dachflächenstrategie sollte aus Sicht der Autorinnen und Autoren der Bund die Leitung übernehmen und zusammen mit Ländern und Kommunen und weiteren externen Expertengruppen (z. B. Verbände), die strategischen Merkmale erarbeiten.

Grundsätzlich sollte die Strategie konkrete Aufgaben und Ziele beinhalten, wie Dachflächen im Neubau und Bestand anhand der örtlichen Gegebenheiten klimagerecht mit Begrünung, PV-Anlage oder der Kombination umgesetzt werden sollten. Dafür sind die unterschiedlichen Lösungen von Dachflächen hinsichtlich deren Umsetzung und Wirkung genauestens zu beschreiben. Eine im Rahmen der Strategie erarbeitete Online-Informations- und Beratungsplattform kann zudem Auskünfte geben zu:

Planungs- und Ausführungshilfen zur Fehlervermeidung,

- Checklisten,
- Merkblätter,
- Wirtschaftlichkeitsanalysen,
- Beispiel-Leistungsverzeichnissen,

- örtlichen Best-Practice-Beispielen,
- Liste von planenden und ausführenden Unternehmen und
- Leitfäden für Förderanträge.

Eine grundsätzliche Festsetzung, dass öffentliche Gebäude eine klimagerechte Dachnutzung erhalten, sollte über die Strategie angestrebt werden. Damit die Dachflächenstrategie Beachtung findet, sollte der Bund aus Sicht der Forschung als gutes Beispiel bei den eigenen, bereits bestehenden Dachflächen vorangehen und diese mit den verschiedenen Lösungen in Abhängigkeit der gebäudeübergreifenden Eigenschaften ausstatten.

Ebenso hilfreich wäre eine Bundesförderung für Bestands- und Neubauten, die sich auf Dachnutzungen konzentriert und beispielsweise PV-Gründächer im Fokus hat. Diese sollte nicht nur die Herstellung, sondern auch Instandhaltung und alle weiteren damit einhergehenden Arbeiten der umgesetzten Anlagen fördern.

Durch Bund, Länder und Kommunen ausgerufene Architektur-Wettbewerbe sollten mit dem bindenden Kriterium zur klimagerechten Dachnutzung auszuschreiben.

Um die bundesweite Dachflächenstrategie bekannt zu machen, könnte eine umfassende Öffentlichkeitsarbeit beitragen. Diese sollte in Abhängigkeit der Zielgruppen von Bund, Kommunen oder Externen (z. B. Verbänden) durchgeführt werden.

Sind ggf. ergänzende Förderkonzepte erforderlich?

Direkte Förderung

Von Ländern und Kommunen werden bereits verschiedene Förderprogramme für Dachbegrünungen und PV-Anlagen angeboten. Immer mehr kommunale Förderprogramme integrieren zudem einen Zuschuss für die Kombination von Dachbegrünung mit PV-Anlagen, um die Mehrkosten der Installation beider Systeme abzumildern. Dabei findet die Berücksichtigung des PV-Gründachs sowohl bei energiebezogenen Klimaschutz-Programmen als auch bei begrünungsbezogenen Klimaanpassungs-Programmen statt.

Bislang bestand kein Bundesförderprogramm für investive Maßnahmen, bei dem eine Dachbegrünung und eine PV-Anlage zusammen gefördert werden konnten. Mit dem "Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz" hat sich dies geändert. Aus dem Kabinettsbeschluss vom 29. März 2023 geht hervor, dass die Förderung von PV-Gründächern in der ersten Förderperiode ab 2023 bereits möglich ist. Es werden sowohl die Nachrüstung von Solar-Gründächern auf bestehenden Dächern als auch die kombinierte Installation im Neubau mit Modellcharakter gefördert. Zielgruppe sind staatliche, kommunale und private Bauträger, Unternehmen und Verbände. Auch bei den eigenen Liegenschaften möchte der Bund als Vorbild agieren (Mann et al. 2023).

Zudem können verschiedene Bundesförderprogramme je nach Antragsstellenden und bis zu bestimmten Fördergrenzen kumuliert werden, sodass eine PV-Gründach-Förderung auf Bundesebene auch anderweitig möglich wird. Der Einbezug eines Förderberaters wird hierbei aufgrund des komplexeren Förderprozesses und des höheren Verwaltungsaufwands empfohlen.

Auffällig ist, dass die bekannten Förderprogramme kaum die folgenden Parameter mitfördern:

- Beratungskosten,
- Planerischer Mehraufwand (u. a. Prüfung der Statik bei Bestandsbau, Statische Ertüchtigung bei Bestandsbau, Prüfung der elektronischen Anlagen im Bestandsbau und Ertüchtigung der Elektronik bei Bestandsbau)
- Umrüstung auf wurzelfeste Dachabdichtung bei Gründach und

■ Instandhaltung über mehrere Jahre.

Da es sich um typische Arbeiten handelt, die im Rahmen der Umsetzung erforderlich werden, sollten Förderprogramme neben der Material- und Einbaukosten, die vorgenannten Kriterien aufnehmen. Um den dauerhaften Erfolg zu ermöglichen, sind die Förderungen auf mehrere Jahre auszulegen. Zudem sollte die Förderung, abgesehen von öffentlichen Gebäuden, für alle Gebäudetypen gültig sein, damit sowohl Bauherrschaften als auch Eigentum innehabende Personen im Privaten und Gewerbe profitieren können. Die Kombinationslösung aus PV-Anlage und Dachbegrünung sollte aus Sicht der Autorinnen und Autoren höher vergütet werden.

Anzustreben wäre ein umfassendes Bundesförderprogramm für klimagerechte Dachnutzung. Im Gegensatz könnte zu den bereits bestehenden unterschiedlichen Förderprogrammen von Ländern und Kommunen die Förderung bundesweit nach den gleichen Maßstäben erfolgen. Das hätte sowohl für Fördermittelgebende als auch Antragstellende positive Auswirkungen. Insbesondere der Verwaltungsaufwand würde sich für letztere verringern. So wird nur noch ein Förderantrag notwendig, um abhängig des Objektes eine PV-Anlage und/oder ein Gründach umzusetzen. Des Weiteren würde sich beispielsweise für Bundesländer übergreifend tätige Unternehmen der Vorteil ergeben, dass diese nicht für jeden neuen Standort die dort geltenden Förderbedingungen eruiieren müssen.

Aus Sicht des Fördermittelgebenden könnten Anpassungen der Förderbedingungen und -beträge leichter vorgenommen werden. Auch eine Trennung in Investition und Instandhaltung wäre durch die Bundesförderung möglich.

Bedingung sollte sein, dass die Planung und Ausführung nur durch qualifizierte Fachbetriebe durchgeführt werden darf, die integrierte Dachnutzungsanlage entsprechend dem Stand der Technik auszuführen ist und die regelmäßige Instandhaltung durch geeignete Laufwege, ausreichend Abstand zwischen den Modulen und eine Absturzsicherung sichergestellt ist.

Indirekte Förderung

Bei der indirekten Förderung sollte das PV-Gründach vermehrt in der verbindlichen Bauleitplanung festgeschrieben werden. Die Festsetzung wäre nach § 9 Abs. 1 Nr. 20 oder 25 in Verbindung mit Nr. 23b BauGB möglich. Bei einem Großteil der Festsetzungen zur Dachbegrünung wird bereits hervorgehoben, dass sich Anlagen zur Nutzung der Solarenergie und Gründächer nicht ausschließen, sondern ergänzen. Es wird empfohlen, dass die Umsetzung der Kombination flächenmäßig übereinander erfolgen sollte, wobei die PV-Module aufgeständert und in einem auflastgehaltenen Systemaufbau über der vollflächigen extensiven Dachbegrünung angebracht werden.

Ebenso sollten in Begrünungs- oder Freiflächengestaltungssatzungen PV-Gründächer mitgedacht werden.

Wie können Dachflächen des öffentlichen Raums einbezogen werden?

Bestehende Dachflächen der öffentlichen Hand sollten auf ihre Umsetzung mit einer passenden Dachnutzung geprüft werden. Sollte die Nachrüstung einer PV-Anlage, eines Gründachs oder PV-Gründachs möglich sein, ist deren Ausführung anzustreben.

Bei Neubauten öffentlicher Gebäude sollte darauf geachtet werden, dass diese dem Standort entsprechend mit der wirksamsten Dachnutzungslösung ausgestattet werden. Empfohlen wird das PV-Gründach.

Können Dachflächenkataster hilfreich sein?

Die verfügbaren Dachflächenpotenzialkataster können nur für eine grobe Ersteinschätzung genutzt werden. Da aussagekräftige Kriterien für die PV- oder Gründachbelegung zumeist nicht berücksichtigt sind, erfordert jede Dachfläche nach wie vor eine individuelle Betrachtung. So werden bei Solarkatastern

oft Wartungswege und Verschattungen von Dachaufbauten oder gar umliegenden Strukturen nicht mitberücksichtigt, was negative Auswirkungen auf die zu erreichenden Erträge haben kann. Zudem können keine Daten zu den im Gebäude befindlichen elektronischen Anlagen und dem Netzanschluss aufgezeigt werden, die möglicherweise eine zu aufwändige Ertüchtigung benötigen.

Die Genauigkeit von Solarpotenzialkatastern ist allerdings im Vergleich zu Gründachpotenzialkatastern noch höher einzuschätzen, da Gründachkataster meist aus Solarkatastern hervorgehen. Die statischen Lastreserven werden in diesen Fällen nicht berücksichtigt, obwohl dies eines der Hauptkriterien für Dachbegrünungen ist. Demnach ist die Fehlerquote vergleichsweise hoch und Flächen, die im Kataster als geeignet gelten, sind es womöglich nicht.

Wenn möglich, sollten Kataster daher zukünftig um die angesprochenen Kriterien erweitert werden, damit eine qualifiziertere Bewertung der Dachflächen erfolgen kann.

In ihrer heutigen Form sind Dachflächenpotenzialkataster also für die Umsetzung in die Praxis nur bedingt hilfreich. Während die aufgezeigten Effekte der Dachnutzung sich noch nah an der Wirklichkeit orientieren, ist die tatsächliche Nachrüstung einer Potenzialfläche nur über Vor-Ort-Untersuchungen möglich.

Außerdem bilden Kataster zumeist nur eine Momentaufnahme ab. Sie benötigen einer ständigen Datenpflege, insbesondere was die Scannerdaten und Kostenrichtwerte betrifft.

Gebäudekategorien

Welche städtebaulichen und baulichen Situationen sind besonders gut geeignet?

Folgende Kategorisierungen sind möglich, um ein erstes Bild zur Eignung verschiedener städtebaulicher Situationen zu erhalten und wie insbesondere die Bestandsgebäude eines Quartiers mit einer nachträglichen Dachnutzungsanlage ausgestattet werden sollten. Die nachstehenden Aussagen beruhen auf Ergebnissen der bisherigen Studie und Ergebnissen von Dettmar et al. (2020). Wenn alle aus AS 2 genannten Indikatoren und deren Parameter zum Gebäude bekannt sind, kann eine Eignungsprüfung ein aussagekräftiges Ergebnis liefern.

Geeignete Quartierstypen für vorwiegend PV-Anlagen

Blockrandbebauung

Da dieser Quartierstyp stark verdichtet und der Wärmeinseleffekt in diesen Bereichen stark erhöht ist, würde sich eine Begrünung der Dachfläche lohnen. Typische mehrstöckige Blockrandbebauungen wurden in ihrer Hochphase jedoch meist mit Sattel- oder Walmdächern geplant und umgesetzt. Diese schließen eine umfangreiche nachträgliche Begrünung aufgrund des hohen Aufwands aus. Die Nutzung von PV-Anlagen empfiehlt sich hier aufgrund des hohen Dachflächenanteils sehr.

Werden allerdings Baulücken in diesen Quartieren geschlossen oder die Dachgeschosse ausgebaut und statisch ertüchtigt, besteht die Möglichkeit, die Dachflächen als Flachdächer auszuführen. Das begünstigt die Installation von Gründächern oder PV-Gründächern. Gleichwegs ist die Begrünung der aufgeheizten Straßenräume, beispielsweise mit Bäumen oder Fassadenbegrünung zu empfehlen.

Altstadtbebauung

Ähnliche Kriterien wie bei der Blockrandbebauung gelten für die Altstadtbebauung. Historische Altstädte sind vorwiegend durch Mehrfamilienhäuser mit Schrägdächern geprägt. Wenig Grünanteil und viel Versiegelung bestimmen dieses Quartier. Dadurch kommt es zur Aufheizung. Nachträgliche Begrünungen sind jedoch auf bereits bestehenden Gebäuden häufig nicht möglich, da einerseits die oberflächliche Gebäudesubstanz zumeist durch vorhandene Denkmalschutzaufgaben nicht geändert werden kann und andererseits Neigungen und Lastreserven der Dächer nicht optimal sind. PV-Anlagen

dürfen und sollten aufgebracht werden, solange die Denkmalschutzbestimmungen eingehalten werden. Sind Neubauten geplant ist zu empfehlen, diese mit einem Gründach oder einem PV-Gründach auszustatten, um dem Wärmeinseleffekt entgegen zu wirken.

Innenstadtbebauung Kleinstadt

Kleinere Innenstädte sind geprägt durch Ein- und Mehrfamilienhäuser sowie Gewerbegebäude, vorwiegend mit Schrägdächern. Der Begrünungsanteil ist in etwa gleich hoch zur versiegelten Fläche. Dachbegrünungen oder PV-Gründächer sollten daher bei neuen Gebäuden mit eingeplant werden, sind aber im Bestand nicht zwingend erforderlich, um nachträglich aufgebracht zu werden. Das Potenzial der vorhandenen Schrägdächer im Stadtgebiet eignet sich sehr gut für die Installation einer PV-Anlage.

Dörfliche Bebauung

Aufgrund der umliegenden Grünflächen aus Land- und Forstwirtschaft verfügen dörfliche Gegenden meist über keinen ausgeprägten Hitzeeffekt. Dies erfordert keinen grundlegenden Einsatz von Gründächern zur Reduktion der Hitzebelastung. Zusätzlich sind die in dörflicher Bebauung zu findenden Ein- und Mehrfamilienhäuser oft mit Schrägdächern ausgeführt, die sich hervorragend für PV-Anlagen eignen. Bei Neubauten oder Carports und Garagen können Eigentümerinnen oder Eigentümer freiwillig entscheiden, ob sie ihre Gebäude zusätzlich mit einem Gründach ausstatten, um die weiteren positiven Effekte der Dachbegrünung zu erzielen.

Geeignete Quartierstypen für alle technologischen Anlagen (PV-Anlage, Gründach, PV-Gründach)

Kleine, freistehende Wohnbebauung

Gekennzeichnet ist dieser Quartierstyp mit einer Zusammensetzung aus Einfamilienhäusern mit Schrägdächern und Mehrfamilienhäusern, teilweise mit Schrägdächern und teilweise mit Flachdächern. Durch einen vergleichsweise hohen Begrünungsanteil im Quartier sind nur auf den Mehrfamilienhäusern, die über ein Flachdach verfügen, und vorhandenen Carports und Garagen Begrünungen mit oder ohne PV-Nutzung angeraten. Die restlichen Ein- und Mehrfamilienhäuser lassen sich mit PV belegen, solange die im Gebiet vorkommenden Bäume keine Verschattung erzeugen.

Reihenhausbebauung

Diese Quartierstypen können in zwei Varianten auftreten. Reihenhäuser älteren Typs wurden mit Schrägdächern, zumeist Satteldächern, entworfen. PV-Anlagen eignen sich vor allem für diesen Gebäudetyp. Da die Dächer häufig ausgebaut sind, ist eine Umrüstung zu einem Gründach nicht sinnvoll. Neuere Reihenhausquartiere werden meist mit Flachdächern umgesetzt. Hierfür lohnen sich neben reinen PV-Anlagen auch Gründächer oder im besten Fall PV-Gründächer.

Zeilenbebauung niedriger bis mittlerer Geschossigkeit

Diese Anordnung aus vier bis sechs-geschossigen Mehrfamilienhäusern kann sowohl mit Flachdach als auch mit Schrägdächern ausgestattet sein. Letztere eignen sich sehr gut für die Installation von PV-Anlagen, da kaum Verschattungen durch äußere Umstände möglich sind. Der Aufwand zur Umrüstung auf ein Gründach wäre hoch.

Da die oftmals stark durch Parkplätze und Gebäude versiegelte Fläche kaum Platz für Begrünung zulässt, sollte zumindest für die Flachdachgebäude statisch geprüft werden, ob eine Dachbegrünung oder ein PV-Gründachsystem möglich sind, um der Ausprägung des Wärmeinseleffekts in diesen Quartieren entgegenzuwirken.

Großmaßstäbliche Wohnbebauung hoher Geschossigkeit

Dieser Stadtraumtyp, geprägt durch sehr hochgeschossige Mehrfamilienhäuser, verlangt durch das hohe Bauvolumen ausreichend Ausgleich durch Begrünung. Die Gebäude verfügen über Flachdächer, die begrünt werden können, wenn es die statische Belastung des Daches hergibt. Eine Kombination mit PV

ist angeraten, da diese Gebäude viele Bewohnende haben, die direkt von der erzeugten Energie profitieren können. Der Einsatz einer PV-Anlage muss allerdings hinsichtlich des Brandschutzes und der Verwehicherheit für diese hohen Gebäude zwingend geprüft werden.

Innenstadtbebauung Großstadt

Für diesen Stadtquartierstyp aus Mehrfamilienhäusern und Gebäuden für den Handel ist eine Begrünung unbedingt empfehlenswert. Fast das gesamte Gebiet gilt als versiegelte Fläche. Demnach ist die Hitzebelastung so hoch wie in sonst keinem anderen Quartierstyp. Die bestehenden Gebäude in den Innenstadtbereichen von Großstädten verfügen zumeist über eine Durchmischung aus Flach- und Schrägdächern. Während sich für die Schrägdachflächen PV-Anlagen anbieten, sollten für die Flachdachbereiche möglichst Gründächer oder PV-Gründächer eingesetzt werden. Damit dieser Hot-Spot weiter gekühlt wird, empfiehlt es sich auch im Neubau auf Dachbegrünungen mit oder ohne PV-Anlage zurückzugreifen.

Innenstadtbebauung Mittelstadt

Die Innenstadt einer Mittelstadt ist sehr heterogen geprägt. Sie setzt sich aus Mehrfamilienhäusern mit Schräg- und Flachdächern, einzelnen Einfamilienhäusern und verschiedenen Gewerbegebäuden zusammen. Der Wärmeinseleffekt ist etwas geringer als in Großstädten und der Grünanteil kaum vorhanden. Eine Nachbegrünung lohnt sich demnach insbesondere bei allen Mehrfamilienhäusern und gewerblichen Immobilien mit Flachdächern. Diese sollten zusätzlich mit einer PV-Anlage kombiniert werden. Für die restlichen Gebäude mit Schrägdächern wird der Einsatz von PV-Anlagen empfohlen.

Geschäfts-, Büro- und Verwaltungsbebauung

Dieser Stadtraumtyp trägt oftmals stark zur Versiegelung eines Gebietes bei. Die Gebäude verfügen im Regelfall über ein Flachdach. Ein Ausgleich durch die Begrünung ist daher anzuraten. Mittels Dachbegrünung kann durch die Verdunstungskühlung der Hitzeinseleffekt bekämpft werden. Zusätzlich ist zu prüfen, ob die Begrünung mit einer PV-Anlage kombiniert werden kann. Bei Bürogebäuden kann es jedoch je nach Nutzung dazu kommen, dass die Dächer über weitere Dachaufbauten (z. B. Anlagen der technischen Gebäudeausrüstung) verfügen, die zu einer Verschattung der PV-Anlage oder Flächenkonkurrenz führen.

Gewerbebebauung

Gewerbegebiete tragen enorm zum Wärmeinseleffekt bei. Eine Begrünung der ohnehin verfügbaren Flachdachflächen ist bei ausreichenden Lastreserven der Gebäude zu empfehlen. Gleichzeitig bieten die großen Dachflächen ein enormes Potenzial, PV-Anlagen anzulegen. Zunächst ist daher bei Bestandsgebäuden zu prüfen, ob Gründach und PV-Anlage kombiniert werden können. Sollte das nicht funktionieren, ist im Einzelfall zu entscheiden, ob sich entweder PV-Anlage oder Dachbegrünung am Standort lohnen. Gegebenenfalls kann auf alternative Flächen, wie die Gebäudefassaden als PV- oder Begrünungsausgleich zurückgegriffen werden.

Sonderbau

Sonderbauten (z. B. kulturelle und religiöse Gebäude, Parkhäuser oder Krankenhäuser) müssen differenziert betrachtet werden, da sie keinem Standard entsprechen. Zunächst ist der Strombedarf eines Sonderbaus zu prüfen und anschließend nochmals der Heizbedarf des Gebäudes. Daran kann ggf. ausgemacht werden, ob sich eine PV-Anlage, ein Gründach oder ein PV-Gründach als geeignet erweist. Grundsätzlich gilt auch für Sonderbauten, dass Dachbegrünung und PV-Anlage als PV-Gründächer zusammengedacht werden sollten.

Geeignete Gebäude für PV-Gründächer

PV-Gründächer sind lediglich auf Flachdächern bis zu einer Neigung von 5° umsetzbar. Die Konstruktion nimmt durch die aufgeständerte Form und der etwas höheren Reihenabstände objektabhängig mehr

Fläche ein, als eine typische PV-Anlage. Somit ist das Potenzial von Flachdach-Gebäudetypen mit einem PV-Gründach unterschiedlich hoch.

Für Einfamilienhäuser, die eine nur sehr kleine Dachfläche haben, ist ein PV-Gründachsystem sehr kostenintensiv, aufgrund der Reihenabstände weniger ertragreich und lohnt sich daher ohne zusätzliche Förderung nur in den wenigsten Fällen zum nachträglichen Einbau.

Ausgehend davon, dass die statische Belastung des Daches ausreichend ist, sind die Potenziale auf Mehrfamilienhäuser für PV-Gründächer hoch einzuschätzen. Andere Dachaufbauten, die für eine Verschattung sorgen können, sind auf diesen Dächern meist nicht zu finden. Mit zunehmender Gebäudehöhe können jedoch zusätzliche technische Aufwendungen durch erhöhten Windsog erforderlich sein.

Gute Bedingungen für PV-Gründächer sind oftmals auf Bürogebäuden zu finden. Eine Beeinträchtigung durch andere Dachaufbauten bedarf vorab jedoch einer Verschattungsprüfung.

Das Potenzial bei Gewerbe- und Industriegebäuden für PV-Gründächer ist sehr hoch, da es sich um große Flächen handelt und sowohl die Effekte der PV-Anlage als auch der Dachbegrünung gebraucht werden. Jedoch können die bestehenden Gewerbebauten häufig die zusätzlichen Lasten für ein PV-Gründach nicht aufnehmen. Im Neubau sollte diese Lösung grundsätzlich angedacht werden.

Auch bei Einrichtungen für Bildung, wie Schulen, Hochschulen oder Kindertagesstätten, und Heilbehandlung (z. B. Krankenhäuser) ist die Kombination aus PV und Gründach sehr lohnenswert. Die Dachflächen haben zumeist keine weiteren Dachaufbauten, womit eine großflächige Anlage ermöglicht wird. Die Statik ist im Bestand unbedingt zu prüfen.

Ebenso sind bei Handels- und Verkaufsbauten (z. B. Einkaufszentrum, Möbelcenter) PV-Gründächer aufgrund der hohen Strombedarfe empfehlenswert. Häufig geben die Dachflächen aber aufgrund anderer Nutzungsformen (z. B. Parkplätze auf dem Dach) dieses Potenzial nicht mehr her.

Erfüllen Sportstätten (z. B. Sporthallen und Schwimmhallen) die statischen Erfordernisse, sind sie optimale Gebäude für den Einsatz von PV-Gründächern. Meist sind keine weiteren Aufbauten auf dem Dach vorhanden, wodurch großflächige Anlagen ermöglicht werden.

Bei Kulturgebäude oder Verkehrsbauten (z. B. Bahnhof) ist zu prüfen, ob die architektonische Gebäudeform eine großflächige Umsetzung von PV-Gründächern ermöglicht.

In welchen Situationen sind größere Probleme zu erwarten?

Vor allem im Bestandsbau sind die Indikatoren des Gebäudes aus AS 1 und AS 2, wie beispielsweise statische Lastreserven oder Verschattung der Dachfläche, entscheidend für die Eignung einer klimagerechten Dachnutzungsanlage.

Sind serielle Lösungen für Gruppen von Dachflächen denkbar?

Serielle Lösungen eignen sich vor allem bei Neubauten von gesamten Quartieren eines bestimmten Typs. Dann kann entsprechend der Bedürfnisse und Umweltbelastungen im Quartier die passende Dachnutzung mit PV-Anlage, Gründächern oder PV-Gründächern gewählt werden. Im Bestandsbau und Neubau von einzelnen Gebäuden sollte die Wahl der Dachnutzung von den bisherigen Einflüssen im Quartier abhängig gemacht werden.

Beteiligte Akteure und Abläufe

Welche Akteure sind zu beteiligen?

Die Einbeziehung von Akteuren wird bedingt durch die geplanten Dachnutzungsanlage.

PV-Anlage

Folgende Akteure sollten für den Bau einer PV-Anlage eventuell eingebunden werden:

- Projektentwickelnde zur Einplanung der PV-Anlage,
- Kommunale Behörde zur Genehmigung und ggf. Förderung,
- Bauherrschaft bzw. Eigentum innehabende Personen zur Überwachung der Planung und Ausführung,
- Generalunternehmende zur Projektabwicklung,
- Planende (Hochbau) für die Planung der Anlage und Koordinierung der Gewerke,
- Fachkraft für Statik zur Berechnung der erforderlichen Tragkonstruktion,
- Sachverständige für Brandschutz zur Prüfung des Brandschutzes,
- Koordinierende für Sicherheits- und Gesundheitsschutz zur Prüfung des Arbeitsschutzes und der Absturzsicherung,
- Gerüstbauende zur Ausführung der Absturzsicherung während der Bauphase,
- Technische Fachkraft HLS (Heizung, Lüftung, Sanitär) für technische Anlagen in und am Gebäude,
- Fachkraft des Dachdeckerhandwerks zur Ausführung der Wärmedämmung und Dachabdichtung,
- Fachkraft des Sprenglerhandwerks für Blecharbeiten am Dach,
- Fachkraft für Blitzschutz zur Ausführung des Blitzschutzes,
- Fachkraft für Elektronik für elektronische Anlagen und Leitung im Gebäude,
- Systemherstellende für PV-Unterkonstruktionen für Lieferung der Unterkonstruktion und ggf. Planung der PV-Anlage und
- Fachkraft für Solartechnik für die Planung und Ausführung der PV-Anlage.

Gründach

Folgende Akteure sollten für den Bau eines Gründachs eventuell eingebunden werden:

- Projektentwickelnde zur Einplanung des Gründachs,
- Kommunale Behörde zur Genehmigung und ggf. Förderung,
- Bauherrschaft bzw. Eigentum innehabende Personen zur Überwachung der Planung und Ausführung,
- Generalunternehmende zur Projektabwicklung,
- Planende (Hochbau und Landschaftsarchitektur) für die Planung der Anlage und Koordinierung der Gewerke,
- Fachkraft für Statik zur Berechnung der erforderlichen Tragkonstruktion,
- Sachverständige für Brandschutz zur Prüfung des Brandschutzes,
- Koordinierende für Sicherheits- und Gesundheitsschutz zur Prüfung des Arbeitsschutzes und der Absturzsicherung,
- Gerüstbauende zur Ausführung der Absturzsicherung während der Bauphase,
- Technische Fachkraft HLS (Heizung, Lüftung, Sanitär) für technische Anlagen in und am Gebäude,
- Fachkraft des Dachdeckerhandwerks zur Ausführung der Wärmedämmung und Dachabdichtung,

- Fachkraft des Sprenglerhandwerks für Blecharbeiten am Dach,
- Fachkraft für Blitzschutz zur Ausführung des Blitzschutzes,
- Systemherstellende Dachbegrünung für Lieferung und ggf. Planung des Gründachs und
- Garten- und Landschaftsbauende für die Ausführung des Gründachs.

PV-Gründach

Folgende Akteure sollten für den Bau eines PV-Gründachs eventuell eingebunden werden:

- Projektentwickelnde zur Einplanung des PV-Gründachs,
- Kommunale Behörde zur Genehmigung und ggf. Förderung,
- Bauherrschaft bzw. Eigentum innehabende Personen zur Überwachung der Planung und Ausführung,
- Generalunternehmende zur Projektabwicklung,
- Planende (Hochbau und Landschaftsarchitektur) für die Planung der Anlage und Koordinierung der Gewerke,
- Fachkraft für Statik zur Berechnung der erforderlichen Tragkonstruktion,
- Sachverständige für Brandschutz zur Prüfung des Brandschutzes,
- Koordinierende für Sicherheits- und Gesundheitsschutz zur Prüfung des Arbeitsschutzes und der Absturzsicherung,
- Gerüstbauende zur Ausführung der Absturzsicherung während der Bauphase,
- Technische Fachkraft HLS (Heizung, Lüftung, Sanitär) für technische Anlagen in und am Gebäude,
- Fachkraft des Dachdeckerhandwerks zur Ausführung der Wärmedämmung und Dachabdichtung,
- Fachkraft für Blitzschutz zur Ausführung des Blitzschutzes,
- Fachkraft für Elektronik für elektronische Anlagen und Leitungen im Gebäude,
- Systemherstellende Dachbegrünung für Lieferung und Planung des PV-Gründachs,
- Garten- und Landschaftsbauende für die Ausführung des Gründachs und der PV-Unterkonstruktion und
- Fachkraft für Solartechnik für die Ausführung der PV-Anlage.

Sind dazu neue Planungsabläufe erforderlich?

Bereits zu Beginn des Planungsprozesses, unabhängig von Neubauten oder Umplanungen bestehender Dächer, ist im Zusammenspiel von Bauherrschaft bzw. der Eigentum innehabenden Personen, Planung und Kommune zu klären, mit welcher Dachnutzungsanlage die Dachfläche ausgestattet werden soll, damit sie den höchsten Effekt erzielt und für alle Nutzenden profitabel ist. Demnach wird festgelegt welche Gewerke im Planungsablauf zu beteiligen sind.

Damit die Koordination durch die Planung reibungslos verläuft ist es ratsam zu Beginn des Prozesses einen Termin mit den hauptsächlich beteiligten Gewerken zu finden, bei dem die wichtigsten Kriterien zur geplanten Anlage besprochen und Gewerketrennungen festgelegt werden können. Ohne eine abgestimmte Planung ist die nachhaltige Funktionsfähigkeit des Gründachs und die Erwirtschaftung der prognostizierten Erträge der PV-Anlage nicht gewährleistet.

Wird sich beispielsweise für die Ausführung eines PV-Gründachs entschieden kann die Planung dementsprechend durchgeführt werden. Der wichtigste Schritt ist nun die Lasten der systemherstellenden Firma der Dachbegrünung zu erhalten. Liegen die Daten vor, können diese zur Berechnung der Tragkonstruktion an das Gewerk Statik weitergegeben werden. Anderenfalls wären möglicherweise umfangreiche und kostenaufwändige Neuplanungen erforderlich.

Im weiteren Prozess sollte mit den Fachplanenden beider Leistungssysteme (i.d.R. systemherstellende Firma der Dachbegrünung und Fachkraft für Solartechnik) ein für die Dachfläche passendes, nachhaltiges Konzept entwickelt werden, um Minderungen der beiden Systeme und damit Verluste durch Ertragsminderungen oder erhöhtem Instandhaltungsaufwand zu vermeiden. Auf Seiten der Dachbegrünung zählen zu den typischen Planungsdetails u. a. die erforderlichen Substratstärken, die Pflanzenarten und die Planung der Lage und Abstände der PV-Modulreihen. Der PV-Fachbetrieb ist währenddessen für die Konzeption der Leitungen und den Anschluss an das Netz zuständig.

Für die Planung von Systemen mit Dachbegrünung sollten Planende der Landschaftsarchitektur hinzugezogen werden.

Wie kann allen Beteiligten eine Planungssicherheit gegeben werden?

Für Bauherrschaften und Eigentum innehabende Personen sind zunächst die Kosten relevant. Hierfür ist eine möglichst genaue Kostenaufstellung der geplanten Dachnutzungsanlage aufzuzeigen.

Strittige Themen bezüglich der Ausführung und Instandhaltung (z. B. Brandschutz, Verschattung der PV-Anlage, Absturzsicherung, Vereinbarkeit der Kombination etc.) sollten zu Beginn der Planung der jeweiligen Anlage angesprochen und ggf. über Nachweise / Hinweisblätter oder Protokolle festgehalten werden. Weiterhin sind bewährte Systeme zu nutzen. Von den systemherstellenden Unternehmen sind bei Bedarf Referenzen vorzulegen.

Für eine termingerechte Umsetzung der Arbeiten sind schon in der Planungsphase innerhalb eines detaillierten Bauablaufplans die für die Dachnutzung einbezogenen Gewerke inklusive ihrer Aufgaben aufzulisten. Der Bauablaufplan ist dafür mit den Gewerken abzustimmen. System anbietende Unternehmen sollten in diesem Schritt auch die Lieferung der Materialien zum geplanten Zeitpunkt garantieren. Zusätzlich sind im Bauablaufplan die Zahlungsfälligkeiten der einzelnen Bauphasen aufzulisten.

Um die dauerhafte Funktion der installierten Anlage sicherzustellen ist zudem die Wartung vertraglich über mehrere Jahre festzuschreiben.

Speziell für PV-Anlagen sind anlagenbetreibende Personen darüber zu informieren, wie der erzeugte Strom bei einer Einspeisung über viele Jahre vergütet wird. Vertragslaufzeiten für Stromlieferverträge sind über mehrere Jahre auszulegen.

Wie könnte das Zusammenspiel unterschiedlicher Planungsbeteiligter bei der Umsetzung von der jeweiligen Dachnutzung aussehen?

Nachfolgend werden die wichtigsten Kooperationen zwischen Akteuren der entsprechenden Dachnutzungen beschrieben.

PV-Anlage

Bauherrschaft bzw. Eigentum innehabende Personen und Kommune

Die Bauherrschaften bzw. Eigentum innehabenden Personen müssen eine Genehmigung für die geplante PV-Anlage einholen. Die jeweiligen Behörden sind einzubeziehen. Kommunale Fördermöglichkeiten sind bei der Kommune zu erfragen und ggf. zu beantragen.

Bauherrschaft bzw. Eigentum innehabende Personen und Planende

Die Planung erfolgt gemäß den Wünschen von Bauherrschaften bzw. der Eigentum innehabenden Personen. Planerische Details und bauliche Kriterien zur PV-Anlage sind abzustimmen und Fördermöglichkeiten zu besprechen.

Planende und Fachkraft für Solartechnik

Zwischen Planenden und der Fachkraft für Solartechnik sind die verschiedenen Lösungen und Möglichkeiten der PV-Anlage zu diskutieren und die geeignetste Lösung auszuwählen. Über eine gemeinsame Planung der PV-Anlage wird das beste Ergebnis erzielt.

Fachkraft für Solartechnik und Fachkraft des Dachdeckerhandwerks

Vor der Installation der PV sind die Leistungen der Fachkraft des Dachdeckerhandwerks zu prüfen und ggf. Bedenken anzumelden. Die Vereinbarkeit der Verankerung der PV-Aufständerung mit der Dachoberfläche sind abzustimmen.

Gründach

Bauherrschaft bzw. Eigentum innehabende Personen und Kommune

Die Bauherrschaften bzw. Eigentum innehabenden Personen müssen eine Genehmigung für die geplante Dachbegrünung einholen. Die jeweiligen Behörden sind einzubeziehen. Kommunale Fördermöglichkeiten sind bei der Kommune zu erfragen und ggf. zu beantragen.

Bauherrschaft bzw. Eigentum innehabende Personen und Planende

Die Planung erfolgt gemäß den Wünschen von Bauherrschaften bzw. der Eigentum innehabenden Personen. Über die planerischen Details und baulichen Kriterien zur Dachbegrünung werden Bauherrschaften bzw. der Eigentum innehabenden Personen informiert. Fördermöglichkeiten sind zu besprechen.

Planende und Systemherstellende Dachbegrünung

Die Planung der Dachbegrünung sollte in Abstimmung mit den systemherstellenden Unternehmen der Dachbegrünung erfolgen. Entsprechend der Gebäudedimensionierung und Ansprüche ist das geeignetste System auszuwählen und insbesondere entsprechend Entwässerung und Verwehsicherheit gemeinsam zu planen.

Planende und Garten- und Landschaftsbauende

Zwischen den Planenden und den Garten- und Landschaftsbauenden sind die Ausführungskriterien zu klären und der Bauablaufplan abzustimmen. Ausführende Garten- und Landschaftsbaubetriebe benötigen den finalen Verlegeplan der Dachbegrünung.

Fachkraft des Dachdeckerhandwerks und Garten- und Landschaftsbauende

Die Leistung der Fachkraft des Dachdeckerhandwerks ist im Regelfall bis zur Oberkante der Dachabdichtung. Vor der Installation der Dachbegrünung sind die Leistungen der Fachkraft des Dachdeckerhandwerks zu prüfen und ggf. Bedenken anzumelden. Insbesondere Wurzelfestigkeit und Schadfreiheit der Dachabdichtung muss gegeben sein. Es wird empfohlen die BuGG-Fachinformation „Sicherer Gewerkeübergang“ hinzuzuziehen.

PV-Gründach

Bauherrschaft bzw. Eigentum innehabende Personen und Kommune

Die Bauherrschaften bzw. Eigentum innehabenden Personen müssen eine Genehmigung für das geplante PV-Gründach einholen. Die jeweiligen Behörden sind einzubeziehen. Kommunale Fördermöglichkeiten sind bei der Kommune zu erfragen und ggf. zu beantragen.

Bauherrschaft bzw. Eigentum innehabende Personen und Planende

Die Planung erfolgt gemäß den Wünschen von Bauherrschaften bzw. der Eigentum innehabenden Personen. Über die planerischen Details und baulichen Kriterien zum PV-Gründach werden Bauherrschaften bzw. die Eigentum innehabenden Personen informiert. Fördermöglichkeiten sind zu besprechen.

Planende und Systemherstellende Dachbegrünung

Die Planung des PV-Gründachs sollte in Abstimmung mit den systemherstellenden Unternehmen der Dachbegrünung erfolgen. Entsprechend der Gebäudedimensionierung und Ansprüche ist das geeignetste System auszuwählen, die PV-Aufständigung sollte dabei den Ansprüchen für ein PV-Gründach entsprechen. Gründachherstellende Firmen bieten diese Art Lösungen als Gesamtsystem an. Daher wird empfohlen auf ein solches System zurückzugreifen. Gleichzeitig erfolgt die Planung der Absturzsicherung zur Vermeidung der Behinderung von PV-Anlage und Sicherungsmaßnahmen zur Absturzsicherung und die Planung der Entwässerung, zur Vermeidung der Behinderung von PV-Anlage und Entwässerungseinrichtungen (z. B. Überbau).

Planende– Garten- und Landschaftsbauende

Zwischen Planenden und den Garten- und Landschaftsbauenden sind die Ausführungskriterien zu klären und der Bauablaufplan abzustimmen. Ausführende Garten- und Landschaftsbaubetriebe benötigen den finalen Belegungsplan des PV-Gründachs.

Fachkraft des Dachdeckerhandwerks und Garten- und Landschaftsbauende

Die Leistung der Fachkraft des Dachdeckerhandwerks ist bis zur Oberkante der Dachabdichtung. Vor der Installation der Dachbegrünung inklusive der PV-Unterkonstruktion sind die Leistungen der Fachkraft des Dachdeckerhandwerks zu prüfen und ggf. Bedenken anzumelden. Insbesondere Wurzelfestigkeit und Schadfreiheit der Dachabdichtung muss gegeben sein. Es wird empfohlen die BuGG-Fachinformation „Sicherer Gewerkeübergang“ hinzuzuziehen.

Garten- und Landschaftsbauende und Fachkraft für Solartechnik

Der Garten- und Landschaftsbaubetrieb ist für alle Arbeiten des Gründaches zuständig. Außerdem implementiert er die in den Gründachaufbau integrierte PV-Aufständigung. Die Herstellung eines PV-Gründachs ist im Gegensatz zu einer reinen PV-Anlage oder einem Gründach erschwert. Damit der reibungslose Einbau funktioniert sollte auf einen erfahrenen Betrieb für PV-Gründächer zurückgegriffen werden. Das Aufgabengebiet der Solar-Fachfirma ist der Anschluss der PV-Module sowie aller weiteren Bauteile, die für die Funktionsfähigkeit der PV-Anlage notwendig sind. Sofern kein detaillierter Bauablaufplan besteht, sollte eine genaue Abstimmung des Einbaus zwischen den Gewerken im Vorfeld geschehen.

Nachfolgender Ablauf für den Einbau des PV-Gründachs, nach Fertigstellung des Gewerks Dachdeckerhandwerk, wird empfohlen:

1. Garten- und Landschaftsbauende: Einbau Schutzlagen und Drainagen
2. Garten- und Landschaftsbauende: Einbau PV-Unterkonstruktion bis Oberkante Montageschienen

3. Garten- und Landschaftsbauende: Einbau Vegetationssubstrat mit Rohplanum
4. Fachkraft für Solartechnik: Montage PV-Module und Versorgungstrassen und Wechselrichter
5. Garten- und Landschaftsbauende: Herstellung Feinplanum Vegetations- und Kiesflächen, Einbau Kiesfangstreifen, Schrittplatten, Kontrollschächte
6. Garten- und Landschaftsbauende: Einsaat und Fertigstellungspflege

Wie kann der optimale Betrieb der Dachflächen sichergestellt werden (Pflege und Wartung)?

Nur Fachkräfte für Solartechnik sind für die Wartung und Reinigung der PV-Anlage (PV-Module und PV-Unterkonstruktion) inklusive der dafür erforderlichen elektronischen Anlagen zuständig.

Die Instandhaltung des Gründaches sollte dagegen von einem Fachbetrieb des Garten- und Landschaftsbaus durchgeführt werden.

Bei einer mangelnden, oder gar fehlenden Abstimmung der Gewerke kann es zu einer Erschwernis der Instandhaltung der jeweiligen Dachnutzungen kommen. Um dies zu verhindern, ist bereits in der Planung die Sicherstellung der Instandhaltung mit den einzelnen Gewerken abzustimmen. Die Herstellung der Anlagen sollte gemäß den Empfehlungen der Fachleute ausgeführt werden. Das hat zur Folge, dass eine ausreichende Zugänglichkeit zu den einzelnen Bauteilen gewährleistet ist und sich die Bauteile untereinander nicht behindern.

Um die Pflege und Wartung auf dem Dach weiter zu vereinfachen, sind Kollektivschutzmaßnahmen hilfreich. Durch umlaufende Geländer entlang der Attika und Lichtkuppeln kann sich das Personal für die Instandhaltung ohne zusätzliche Sicherungsmaßnahmen über die Dachfläche bewegen. Kollektivschutzmaßnahmen haben stets Vorrang. Lediglich wenn betriebstechnische Gründe vorliegen dürfen Individualschutzmaßnahmen (z. B. PSAgA) eingebaut werden (ASR A2.1). Der Zwang zum Kollektivschutz sollte angedacht werden, um die sichere und barrierefreie Begehung der Dachflächen zu gewährleisten.

Bei PV-Gründächern würde es sich womöglich anbieten, wenn Garten- und Landschaftsbaubetriebe Fachkräfte der Solartechnik als Unterauftragnehmende hinzuziehen.

Damit die Dachnutzung dauerhaft wie vorgesehen funktioniert, sind entsprechende Instandhaltungsverträge über mehrere Jahre abzuschließen.

Für PV-Gründächer wird zur Vermeidung des erhöhten Pflegeaufwandes empfohlen, geeignete PV-Unterkonstruktionen für die Kombination, niedrige Substratstärken (max. 8-10 cm) und niedrigwüchsige Pflanzenarten einzusetzen. Kabel der PV-Anlage sollten entsprechend geschützt verlegt werden, um den Rückschnitt des Gründachs zu vereinfachen.

Der Rückschnitt der Begrünung bei PV-Gründächern könnte zukünftig möglicherweise automatisch funktionieren. Forschungen zu Mährobotern laufen bereits. An den Unterkonstruktionen könnten die Ladestationen direkt integriert werden.

Um einen weiteren Anreiz zu geben, sind Fördermittelgebende dazu aufgerufen, die Instandhaltungsmaßnahmen zu fördern.

Hemmnisse bei der Umsetzung der Dachnutzungstypen

Hemmnisse zur Umsetzung von Dachnutzungen bestehen auf verschiedenen Ebenen. Häufig basieren sie auf fehlendem (Fach-)Wissen oder Vorurteilen. Für eine gelungene Umsetzung müssen die Hinderungsfaktoren bekannt sein, um entsprechend reagieren zu können und sie zu vermeiden. Nachfolgend werden die bekannten Hemmnisse auf Bund-, Länder- und kommunaler Ebene, sowie bei Planung und Ausführung erläutert und erste Lösungsansätze beschrieben.

Hemmnisse auf Bund-, Länder- und kommunaler Ebene

Anpassung Solardachpflicht

Solardachpflichten sind ein wichtiges Mittel um die Umsetzung von PV-Anlagen voranzubringen. Die Studie hat jedoch aufgezeigt, dass sich generelle Solardachpflichten nicht immer als geeignete Lösung anbieten, da abhängig der Lage für einige Gebäude- und Quartierstypen andere Dachnutzungen besser geeignet wären.

Lösungsansätze:

Durch Bund, Länder und Kommunen beschlossene Solardachpflichten sollten dahingehend angepasst werden, dass sie einerseits Gründächer nicht ausschließen und gleichzeitig PV-Gründächer ermöglichen bzw. sogar vorschreiben. Als Beispiel sei hier die Stadt Hamburg genannt, die ab 2027 alle Neubauten mit PV-Gründächern realisieren will.

Fehlen von rechtlichen Grundlagen bzw. Vorschriften

Vorschriften, wie mit der nachhaltigen Nutzung von Dächern in Deutschland umzugehen ist, fehlen derzeit noch. Aufgrund dessen werden in der Vorbereitung, Planung, Ausschreibung und Ausführung noch viele Fehler begangen, die bestimmte Dachnutzungen nicht zur fachgerechten Umsetzung bringen.

Lösungsansätze:

Bund und Länder sollten aus Sicht der Autorinnen und Autoren Dachnutzungen entsprechend den Eignungen für das Gebäude und Quartier verpflichten. Dabei sollte darauf geachtet werden, dass sich PV und Gründach nicht gegenseitig ausschließen. Bautechnische Standards (DIN-Normen) oder Vollzugshinweise für Baugenehmigungsbehörden oder Bauordnungsrechtliche Vorgaben für die Erstellung von Bauleitplänen oder Bebauungsplänen der Kommunen im Rahmen der Definition eines Maßnahmenkatalogs sind sinnvoll zur bedarfsgerechten Umsetzung der Dachnutzungsanlagen und sollten daher erarbeitet werden.

Bebauungspläne fachgerecht ausschreiben

Durch i.d.R. fehlende Kenntnis zur Kombinationslösung kommt es im Bauleitplanprozess immer wieder vor, dass PV-Anlagen und Dachbegrünung nur als Einzellösungen festgesetzt werden und eine Kombination beider Systeme nicht berücksichtigt wird.

Lösungsansätze:

Kommunen sollten von Verbänden oder anderen Kommunen darüber informiert werden, dass die Kombination beider Systeme durch eine genaue und bedarfsgerechte Planung und den einhergehenden positiven Effekten objektspezifisch ohne bedeutende Verluste möglich ist. In Bebauungsplänen sollte das PV-Gründach als Kombination auf einer Fläche fokussiert werden.

Anpassung Kataster (Solar- und Gründachkataster)

Kataster können für eine erste Einschätzung hilfreich sein, sollten in ihren derzeitigen Versionen jedoch nicht als alleinige Grundlage für eine Planung einer nachträglichen Anlage herangezogen werden. Ohne Vor-Ort-Untersuchungen kann keine belastbare Einschätzung für die Dachnutzung gegeben werden.

Die bestehenden Kataster für PV-Anlagen oder Gründächer weisen aufgrund noch fehlender notwendiger Parameter eine zu hohe Fehlerquote auf. Gründachkataster orientieren sich zudem zu stark an den bereits vorliegenden Solarkatastern, obwohl für die Ausführung von Gründächern teilweise andere Indikatoren als bei PV-Anlagen zu betrachten sind.

Lösungsansätze:

Solar- und Gründachkataster sollten entsprechend der geeigneten Parameter und aktuellen Datenlage überarbeitet werden.

Fachwissen innerhalb von Kommunen

Für PV-Dachanlagen und Gründächer ist ein spezielles Fachwissen notwendig, um eine fachgerechte Planung, Installation und Instandhaltung zu gewährleisten sowie die Wirksamkeit der Maßnahmen sicherzustellen. Innerhalb einer Stadtverwaltung stellt dies vor allem bei der Dachbegrünung häufig eine Querschnittsthematik dar, d. h. sie betrifft gleichzeitig verschiedene Ämter (z. B. Umweltamt, Stadtplanungsamt, Grünflächenamt, Untere Naturschutzbehörde etc.). Eine Bündelung der Thematik und die Benennung einer kommunalen Ansprechperson zur Gebäudebegrünung findet bisher nur in wenigen Städten statt. Dabei führt das Fachwissen zur Dachbegrünung innerhalb der Stadtverwaltung auch zu Sicherheiten bei der inhaltlichen Ausgestaltung der Maßnahmen oder Beratung von Interessierten.

Lösungsansätze:

Um dieses Hemmnis abzubauen, wäre der Aufbau einer gegebenenfalls bundesweiten Beratungsstelle zu empfehlen. Zudem sollte das Weiterbildungsangebot für städtische Mitarbeitende und der fachliche Austausch zwischen den Städten gestärkt werden. Federführend könnten Verbände agieren. Wichtig wären zudem Informationsbroschüren sowie Hinweise, die allen Kommunen auch zur Beratung der Bauherrschaft zur Verfügung gestellt werden.

One-Stop-Shops könnten als Anlaufstelle fungieren, um die Bürokratie zu minimieren.

Besonders relevante Gebiete für die verschiedenen Dachnutzungsanlagen sollten in Flächennutzungsplänen hinterlegt werden.

Begrenzte kommunale Haushaltsmittel für kommunale Förderprogramme

Vor allem finanzschwache Gemeinden sind bei der Aufstellung eines Förderprogramms als freiwillige kommunale Leistung auf die finanzielle Unterstützung von Bund und Ländern angewiesen. Für Gründächer bedeutet dies beispielsweise, dass die Städtebauförderung oftmals die einzige Möglichkeit ist, die Dachbegrünung als Maßnahme zur Klimaanpassung zu fördern. Einige Bundesländer (z. B. NRW) haben für ihre Kommunen Förderprogramme aufgestellt, um sie bei investiven Maßnahmen zum Klimaschutz und zur Klimaanpassung zu unterstützen.

Lösungsansätze:

Bund und Länder sollten die Kommunen stärker bei der Aufsetzung von kommunalen Förderprogrammen unterstützen oder eigene Förderprogramme initiieren, bei denen bis hin zu Privatpersonen finanzielle Unterstützungen möglich sind.

Unattraktive Förderhöhen für Maßnahmen von kommunalen Förderprogrammen

Der Kostenaspekt bei der Herstellung und Instandhaltung von Dachnutzungen sind häufig entscheidende Gründe, warum nicht mehr umgesetzt wird. Förderprogramme können hier finanziell unterstützen. Damit diese allerdings auch angenommen werden, sind attraktive Förderhöhen als Anreiz notwendig. Zwischen den kommunalen Förderprogrammen bestehen hohe Differenzen in den Förderhöhen. Grund dafür sind vor allem die unterschiedlich zur Verfügung stehenden finanziellen Mittel und die Finanzkraft der Städte. Weitere Informationen kann der Machbarkeitsstudie für eine Förderrichtlinie für Dach- und Fassadenbegrünung entnommen werden (Mann et al. 2021).

Lösungsansätze:

Eine finanzielle Unterstützung von Bund und Ländern wäre für finanzschwache Kommunen sinnvoll. Zusätzlich fehlt es den Kommunen häufig an Kostenrichtwerten zur Dachbegrünung, die die Investitionskosten und Folgekosten für die Instandhaltung umfänglich abschätzen, auf deren Grundlage Städte sinnvolle Förderhöhen definieren können. Verbände sollten zur Beratung und Behebung dieses Hemmnisses hinzugezogen werden.

Fehlende Förderung von Maßnahmen von kommunalen Förderprogrammen

Neben den Herstellungskosten von Dachnutzungen, die im Rahmen von Förderprogrammen im Regelfall mitgefördert werden, bestehen zumeist noch weitere anfallende Maßnahmen, bei denen die Förderung jedoch ausbleibt. Das mindert die Attraktivität des Förderprogramms und damit die Umsetzung der Dachnutzungstypen.

Lösungsansätze:

Sofern möglich sollten Förderprogramme die zusätzlich anfallenden Maßnahmen mitfördern. Dafür sollten weitere finanzielle Mittel bereitgestellt werden.

Zusätzlicher Personalbedarf zur Betreuung kommunaler Förderprogramme

Für die Aufstellung, Organisation, und Antragsbearbeitung eines Förderprogramms wird Personal benötigt. Auch die Beratung von Interessierten wird zum Teil durch die zuständige Behörde durchgeführt. Finanzstarke Kommunen besitzen häufig noch ausreichende Mittel, um den Bedarf durch die Einstellung neuer Mitarbeitenden zu decken. Bei kleineren und finanzschwachen Kommunen bedeutet der zusätzliche Personalbedarf hohe Kosten, die den städtischen Haushalt belasten. Die Betreuung des Förderprogramms wird daher in der Regel über eine Umverteilung der Arbeit innerhalb der Stadtverwaltung in die laufenden Verwaltungsgeschäfte integriert. Eine ausreichende Bewerbung des Förderprogramms, eine intensive Beratung von Interessierten sowie eine Kontrolle der Umsetzung von geförderten Maßnahmen sind aus zeittechnischen Gründen zumeist nicht durchführbar.

Lösungsansätze:

Zur Sicherstellung einer intensiven Betreuung von kommunalen Förderprogrammen wäre aus Sicht der Autorinnen und Autoren eine finanzielle Unterstützung durch Bund und Ländern bei den zusätzlichen Personalkosten für Kommunen hilfreich.

Alternativ könnten One-Stop-Shops aufgebaut werden, die für die Beratung und Bewerbung der Förderprogramme zuständig sind.

Geringer Bekanntheitsgrad eines Förderprogramms

Viele Kommunen erarbeiten im Rahmen des Klimaschutzes und der Klimaanpassung Förderprogramme, die die verschiedenen Dachnutzungstypen als förderfähige Maßnahmen einschließen. Werden diese Programme nicht in einem ausreichenden Maß und zielgruppengerecht beworben, wird der Erfolg der Förderprogramme gehemmt, da der Bekanntheitsgrad innerhalb der Bevölkerung niedrig ist.

Lösungsansätze:

Eine intensive Bewerbung des Förderprogramms, vor allem in der Startphase und über unterschiedliche Medien, ist wichtig. Eine klare und einfache Kommunikation des Förderprogramms, bei der alle notwendigen Informationen übersichtlich und kompakt zusammengestellt sind, fördert zudem die Akzeptanz. Dafür sollten zusätzliche finanzielle Mittel bereitgestellt werden.

Hohe Komplexität der Förderrichtlinie

Beim Aufbau der Förderrichtlinie eines Förderprogramms ist es aus Sicht des Fördermittelgebers wichtig, eine ausreichend detaillierte und umfängliche Grundlage der Förderbedingungen und des

Antragsverfahrens zu erarbeiten. Die hierbei verwendete Verwaltungs- und Fachsprache sowie eine hohe Komplexität des Antragsverfahrens können für Fördermittelwillige aber auch Hemmnisse darstellen, wodurch sich im ungünstigsten Fall gegen die Förderung und Umsetzung der Dachnutzungsanlage entschieden wird.

Lösungsansätze:

Um die Akzeptanz des Förderprogramms bei privat Eigentum innehabenden Personen zu sichern, ist die Verwendung einer verständlichen Sprache sowie schlanke bürokratische Strukturen bei der Antragsstellung sinnvoll. Die jeweiligen Förderkriterien sollten direkt zu Beginn prüfbar sein. Wichtig ist insbesondere eine Ansprechperson für Förderberechtigte, die bei aufkommenden Fragen die Antragsstellung begleiten kann.

Denkmalschutz

Denkmalgeschützte Gebäude nachträglich mit einem der aufgeführten Dachnutzungstypen auszustatten ist häufig sehr aufwändig und hängt noch immer sehr stark von der kommunalen Behörde ab, wie aufgeschlossen sie der Thematik gegenüber ist.

Lösungsansätze:

Um die Zugänglichkeit für die Dachnutzung herzustellen, sollte der Denkmalschutz in diesen Bereichen gelockert werden.

Es gibt zudem bereits Lösungen, um diesem Konflikt entgegenzuwirken. So könnten beispielsweise PV-Anlagen auf Flachdächern von besonders erhaltenswerten Gebäuden mittels einer Parallelverlegung so platziert werden, dass sie vom Boden aus nicht mehr einsehbar sind. Für Schrägdächern könnten optisch angepasste dachintegrierte PV-Anlagen für ein weniger auffälliges Erscheinungsbild eingesetzt werden.

Gründächer auf denkmalgeschützten Gebäuden mit Flachdächern sind ohnehin meist unproblematisch, da Dachbegrünungen nur selten einsehbar sind und demnach die Optik des Gebäudes nicht beeinträchtigt.

Für PV-Gründächer, bei denen die aufgeständerte PV-Anlage einsehbar sind, sollte abgewogen werden, ob die Optik des Gebäudes oder eine klimagerechte Stadtentwicklung wichtiger ist.

Zu bemerken ist, dass die Priorität zunächst auf einfacher mit PV-Anlagen und/oder Gründächern auszustattenden Neubauten und Bestandsgebäuden liegen sollte. Der Anteil denkmalgeschützter Gebäude ist in den meisten Kommunen gering und der bürokratische Aufwand gleichzeitig deutlich höher.

Planerische Hemmnisse

Fehlende Kenntnisse zu den Lösungen

Gerade die Kombinationslösungen aus PV-Anlage und Dachbegrünung sind noch weitgehend unbekannt und werden bei Neuplanungen häufig nicht mit bedacht. Das resultiert darin, dass bereits in der Projektentwicklungsphase und später in der Planungsphase eine möglicherweise für das Gebäude oder Quartier weniger geeignete Lösung festgesetzt wird.

Lösungsansätze:

Die Vorgaben für die geeignete Dachnutzung können bereits in der Projektentwicklung getroffen werden. Damit Projektentwickelnde und Planende die verschiedenen Lösungen und deren Vorteile kennenlernen, sind sie von Fachpersonen (z. B. Fachplanenden, Verbänden oder Systemherstellenden) zu schulen.

Mangelnde Kenntnisse zur Begrünung

Im Bereich der Dachbegrünung sind für Planende genaue Kenntnisse bezüglich der Vegetation und deren Bedürfnisse erforderlich. Bei nicht fachgerechter Planung kann es entweder zum Ausfall der Begrünung oder zu einem zu starkem und unerwünschtem Wuchs der Vegetation führen.

Lösungsansätze:

Während der Planung einer Dachbegrünungsmaßnahme sollten Fachplanende, zumeist aus der Landschaftsarchitektur, hinzugezogen werden, die zur Thematik entsprechend geschult sind. Für Detailfragen sollten Systemherstellende für Dachbegrünung eingebunden werden.

Mangelhafte Ausschreibungen

In Ausschreibungen können bereits einige Fehler vermieden werden. So ist bei PV-Gründächern innerhalb der Ausschreibung nicht immer klar geregelt, welche Maßnahmen von welchem Gewerk durchzuführen sind. Zudem werden oft aufgrund von Unkenntnis falsche Unterkonstruktionen für die Kombination aus PV-Anlage und Dachbegrünung festgeschrieben.

Lösungsansätze:

Die Gewerke sind für das PV-Gründach so auszuschreiben, dass der ausführende Garten- und Landschaftsbaubetrieb für alle Maßnahmen des Gründachs sowie die Unterkonstruktion der PV-Anlage zuständig ist. Der Solarfachbetrieb sorgt für die Installation der PV-Module sowie alle weiteren Maßnahmen (z. B. Kabelverlegung, Anschluss Wechselrichter), die für die Funktion der PV-Anlage erforderlich sind.

Als PV-Unterkonstruktion sind Systeme festzuschreiben, die einen Abstand des PV-Moduls zur Substratoberkante von mindestens 20 cm (besser 30 cm) gewährleisten.

Planungsfehler der Kombination

Für PV-Gründächer findet vor allem auf Seiten der Solarbranche teilweise noch immer eine mangelhafte Beratung bezüglich der Umsetzung statt. Das hat häufig falsche PV-Aufständungen (zu geringer Abstand Unterkante PV-Modul zu Oberkante Dachsubstrat), Reihenabstände, fehlende Wartungswege und somit eine erschwerte Zugänglichkeit und Instandhaltung der Fläche zur Folge. Das Ergebnis ist ein Negativ-Image des PV-Gründachs, da aufgrund der fehlerhaften Planung die Funktionsfähigkeit nicht gegeben ist.

Die beschriebene Problematik tritt vor allem häufig bei PV-Anlagen auf, die nachträglich auf bereits begrünten Dächern platziert werden.

Zu beachten ist, dass Unterkonstruktionen von PV-Anlagen auf begrünten Dächern sich erheblich von unbegrünten Dächern unterscheiden, da nicht nur die Funktionsfähigkeit der PV bedacht werden muss, sondern auch die Begrünung nicht durch die PV-Anlage beeinträchtigt werden darf.

Lösungsansätze:

PV-Gründächer sollten von entsprechenden Systemherstellenden beraten und gemeinsam mit der planenden Person und Fachkraft für Solartechnik geplant werden.

Planungsänderungen während der Ausführungsphase

Änderungen oder unklare Vorgaben (z. B. bezüglich der Gewerketrennung) in der Planung können während der Ausführung einen erheblichen Mehraufwand mit sich ziehen. Zu typischen Änderungen zählen überarbeitete Ballastierungspläne, veränderte Modulverteilungspläne und wechselnde PV-Module. Ausführende Betriebe müssen für die Beschaffung der Materialien und dem Personalaufwand entsprechend planen können. Kommen jedoch oft Änderungen zur Ausführung auf sie zu, kann das

einerseits die Umsetzung zeitlich stark verzögern als auch das Fehlerpotenzial erhöhen, weil beispielsweise Maße und Aufbauten auf den Dachflächen nicht mehr stimmen.

Lösungsansätze:

Um Verzögerungen und Fehler bei der Herstellung zu vermeiden, ist mit der Beauftragung der ausführenden Unternehmen bis zur finalen Planung zu warten. Die Aufgaben der einzelnen Gewerke sind klar im Leistungsverzeichnis zu formulieren.

Fehlender Zugang zur Dachfläche

Instandhaltende Betriebe für die Dachnutzungsanlagen stehen häufig vor dem Problem, dass sie nicht auf die Dachfläche gelangen, um die entsprechende Pflege und Wartung durchzuführen. Dann müssen teure Geräte, wie etwa Hubsteiger oder Kräne, angemietet werden.

Lösungsansätze:

Um die Herstellung, Veränderung und Instandhaltung der Dachnutzungsanlagen zu gewährleisten, sind in der Planungsphase ausreichend große Zugangsmöglichkeiten zur Dachfläche (z. B. außenliegende Leitern oder Dachausstiege) einzuplanen.

Fehlende Absturzsicherung

Eine weitere Schwierigkeit ist das Fehlen entsprechender Absturzsicherungsmaßnahmen. Ist keine fachgerechte Absturzsicherung vorhanden oder sind diese nicht erreichbar (z. B. durch Überbauung) darf das Dach nicht begangen werden. Die meisten Dächer verfügen zumindest über Einzelanschlagpunkte oder Seilsysteme für PSAgA (Persönliche Schutzausrüstung gegen Absturz). Dafür sind jedoch spezielle Schulungen erforderlich. Bei umfangreichen Instandhaltungsmaßnahmen von PV-Anlagen oder Gründächern sind PSAgA oft hinderlich. Besser wäre ein Kollektivschutz (Geländer).

Lösungsansätze:

Grundsätzlich hat jedes Dach, unabhängig davon ob begrünt oder nicht, über eine Art der Absturzsicherung zu verfügen. Damit sich das Personal barrierefrei und gesichert über das Dach bewegen kann, sollte entweder eine ausreichend hohe Attika oder die Nutzung von Kollektivschutzmaßnahmen geschaffen werden. Das ist während der Planung zu berücksichtigen.

Mehraufwand bei der Planung

Durch die Erweiterung des Bauleistungsbereichs, vor allem bei PV-Gründächern, und der notwendigen Abstimmung der Planung mit den verschiedenen Gewerken (z. B. konstruktiver Aufbau, Statik, Ver- und Entsorgungstechnik) wird der planerische Aufwand erhöht.

Lösungsansätze:

Um die Planung zu entlasten sind frühzeitige Hilfeleistungen der systemherstellenden Unternehmen von Nöten. Am Beispiel des PV-Gründaches planen die zuständigen Fachfirmen der Dachbegrünung (meist Systemherstellende) die Verlegung der PV-Anlage (PV-Unterkonstruktion) und teilen der Planung mit, welche Kriterien (z. B. statische Erfordernisse, Dachneigung etc.) dafür erfüllt werden müssten. Vorgefertigte Checklisten zur Ermittlung der Gegebenheiten des Gebäudes sollten unterstützend herangezogen werden.

Bauschäden

Noch immer bestehen Vorbehalte bezüglich Feuchteschäden und mechanischer Schäden beim Einbau von Dachnutzungsanlagen.

Lösungsansätze:

Auch für dieses Hemmnis gilt, dass für eine vorsorglichen Schadensvermeidung eine entsprechend erweiterte interdisziplinäre Planungsintensität eine unerlässliche Voraussetzung ist. Daher sind potenzielle Fehlerquellen der Dachnutzungsanlage schon zu Beginn der Planung zu identifizieren und mit den jeweiligen ausführenden und herstellenden Betrieben zu klären.

Die Dichtigkeit einer Dachabdichtung muss gewährleistet sein. Einerseits sollte dies über einen fachgerechten Einbau der Dachnutzungsanlage, als auch über einen fachgerechten Gewerkeübergang (z. B. von Dacheindeckung und Dachbegrünung) und ggf. eine Dichtigkeitsprüfung geschehen. Ist die Besorgnis besonders groß, oder handelt es sich um besonders schützenswerte Gebäude (z. B. Rechenzentren) können Systeme zur aktiven und passiven Flachdachüberwachung in den Dachaufbau integriert werden.

Brandschutz

Es häufen sich Annahmen, dass von Kombination aus Dachbegrünung und PV-Anlagen aus brandschutztechnischer Sicht ein erhöhtes Gefährdungspotenzial hervorgeht. Begründet wird dies mit fehlenden Prüfzeugnissen und Aussagen zu trockenen Pflanzen und darüberliegenden PV-Anlagen.

Lösungsansätze:

In der Publikation der deutschen Versicherer (GDV e.V.) zur Schadensverhütung VDS 6023 (2023-02 (01)) "Photovoltaik-Anlagen auf Dächern mit brennbaren Baustoffen" werden mögliche Gefahren bei der Installation von PV-Anlagen auf Dachflächen mit brennbaren Baustoffen beschrieben und wie man die damit verbundenen Risiken minimieren kann. Die Dachbegrünung wird nicht explizit behandelt. Im Austausch mit der VGH Versicherungen Hannover besteht jedoch Einigkeit, dass neben Kiesbedeckungen auch Gründächer als vorbeugender Brandschutz bei Dächern mit PV-Anlagen dienen können.

Dennoch bestehen aktuell keine wissenschaftlichen Untersuchungen zur Ermittlung des Brandverhaltens von PV-Gründächern, weshalb noch Handlungsbedarf besteht zum Thema aufzuklären.

Allerdings ist es auch so, dass entsprechend der bisherigen Erfahrung der Autorinnen und Autoren die bauordnungsrechtlichen Bestimmungen, vor allem für Gründächer, in der Praxis etwas verbessert werden könnten. Wie bekannt, müssen nach § 32 (1) Musterbauordnung "Bedachungen gegen eine Brandbeanspruchung von außen durch Flugfeuer und strahlende Wärme ausreichend lang widerstandsfähig sein (harte Bedachung)." Abweichend von dem genannten Absatz sind "begrünte Bedachungen zulässig, wenn eine Brandentstehung bei einer Brandbeanspruchung von außen durch Flugfeuer und strahlende Wärme nicht zu befürchten ist oder Vorkehrungen hiergegen getroffen werden". Dementsprechend sind Gründächer nach den technischen Baubestimmung DIN 4102-4:2016-05 Absatz 11.4.7 unter Einhaltung bestimmter Kriterien herzustellen. Sofern diese Kriterien eingehalten, ist dies eine baurechtskonforme harte Bedachung. Damit entfällt die Pflicht für ein Prüfzeugnis, da die Errichtung der baurechtlich geforderten "harten Bedachung" mittels technischer Regel nachgewiesen werden kann.

Anforderungen bei Hochhäusern

Für Hochhäuser müssen erhöhte Anforderungen, insbesondere beim Brandschutz, erfüllt werden. Dafür sind zumeist aufwändige, zusätzliche Genehmigungsverfahren für die Dachnutzungsanlagen erforderlich.

Lösungsansätze:

Die baulichen Kriterien sind zu Beginn der Planung gemeinsam mit den Fachbetrieben der Dachbegrünung und / oder PV-Nutzung zu klären, um die für das Hochhaus passende Lösung zu entwickeln. Verbände sollten Hinweisblätter erarbeiten, wie diese Thematik zu behandeln ist.

Elektronische Anlagen im Bestandsbau

Obwohl die bauliche Konstruktion des Daches geeignet wäre, kann es im Bestandsbau vorkommen, dass verschiedene Parameter eine nachträgliche Dachnutzungsanlage dennoch verhindern können. So kann etwa der Zustand der vorhandenen elektronischen Anlagen entscheidend für die PV-Nutzung sein.

Lösungsansätze:

Vorab ist von einer Fachperson zu prüfen, ob eine Ertüchtigung der elektronischen Anlagen erforderlich ist und wie aufwändig diese wäre.

Statische Erfordernisse im Bestandsbau

Während reine PV-Anlagen meist keine großartigen statischen Erfordernisse benötigen und daher häufig auch nachträglich noch auf einem Dach untergebracht werden können, gestaltet sich dies bei der Installation eines Gründaches, geschweige denn eines PV-Gründaches, komplizierter.

Im Rahmen der Studie wurden verschiedene Anlaufpunkte begutachtet, ob anhand der Gebäudestruktur festgelegt werden kann, dass sich ein Bestandsgebäude aus statischer Sicht nachträglich begrünen lässt. Ein eindeutiges Ergebnis ließ sich jedoch nicht ableiten.

Über das Baujahr wurde zunächst versucht die Gebäudealtersklassen zu identifizieren, um damit Rückschlüsse auf die Statik zu erhalten. Dafür wurden Ergebnisse aus bestehenden Untersuchungen zusammengefasst (vgl. Zeumer/Zeumer 2020; Korinke/Bensch 2016; Kruse/Rodríguez Castillejos 2017; Loga et al. 2015). Auffällig ist, dass bisher lediglich Wohngebäude (Ein- und Mehrfamilienhäuser) betrachtet wurden. Darstellungen zu Gebäudealtersklassen von weiteren Gebäudetypen, wie Gewerbebauten, Bürogebäude oder sonstige Sonderbauten (z. B. Bildungseinrichtungen, Gebäude für Heilbehandlung, Sport, Handel, Kultur oder Verkehr) fehlen bislang.

Innerhalb der Untersuchungen wurden von den Autoren Einschätzungen zur nachträglichen Dachbegrünung der verschiedenen Wohngebäudealtersklassen gegeben. Wissenschaftliche Ergebnisse, die diese Einschätzungen belegen, bestehen allerdings nicht.

Von einer späteren Dachbegrünung auf Gebäuden, die vor 1859 entstanden sind, wird aufgrund der zu geringen Lastreserven, einem ausgebauten Dachgeschoss und häufig bestehendem Denkmalschutz grundsätzlich abgeraten.

Gebäude, die allerdings im Zeitraum von 1860 bis 1918 entstanden, könnten möglicherweise eine statische Ertüchtigung erhalten und mit Leichtdachbegrünungen ausgestattet werden. Flachdächer wurden in dieser Zeit häufig nachträglich gebaut. Präsent waren aber Satteldächer, die zusätzlich meist zur Wohnfläche ausgebaut waren und daher aufgrund des hohen Aufwands nicht für eine Begrünung in Frage kommen.

Von der Begrünung von Gebäuden aus 1919 bis 1948 wird allgemein aufgrund zu geringer Lastreserven abgeraten.

Ab dem Jahr 1958 wurden vermehrt Flachdächer umgesetzt. Für diese ist zunächst eine statische Prüfung und im Nachgang möglicherweise auch eine statische Ertüchtigung erforderlich, um zumindest Leichtdachbegrünungen umsetzen zu können. In Einzelfällen können überdies höherwertige Begrünungen möglich sein.

Zwischenzeitlich wurden eingeschossige Flachdachbungalows gebaut, die womöglich Begrünungen zulassen.

Vor allem in Ostdeutschland gewannen WBS 70 Bauten während der DDR-Zeit an Bedeutung. Bei den Plattenbauten besitzen die obersten Geschossdecken eine geringere Tragfähigkeit von nur 0,75 kN/m². Das lässt eine nachträgliche Begrünung im Grunde nicht zu (Müller 2015).

Ab den 1990er Jahren und sich immer häufiger wechselnden energetischen Gesetze werden zunehmend verschiedene, neuartige Bauweisen für die Wohngebäude genutzt, die eine Differenzierung der Gebäudealtersklassen und der damit einhergehenden statischen Lastreserven nun nur noch umso mehr mit einer Einzelbetrachtung ermöglichen.

Noch kritischer wird diese Thematik in Bezug auf Gewerbegebäude, schaut man sich insbesondere Hallenbauten mit ihren großen Spannweiten an. Bei Hallen kommt es weniger auf die Ästhetik als vielmehr auf reine Funktionalität an. Hallen werden mutmaßlich in den seltensten Fällen beheizt, geschweige denn gekühlt. Da der Bau auch möglichst zügig geschehen soll, werden Hallen häufig durch Fertigteile realisiert, welche vorgefertigt zur Baustelle transportiert werden und dort kraftschlüssig miteinander und der Bodenplatte verbunden werden. Aus den Statiken der Fertigteile kann erschlossen werden wie viel Lastreserve vorhanden ist. Allerdings sind Fertigteilbauende i.d.R. auf Wirtschaftlichkeit bedacht, wodurch möglichst nicht mehr Material verbraucht werden soll als für den Bau nötig wird. Damit einhergehend wird oft die kostenintensive Ertüchtigung als Gegenargument angeführt.

Wie bereits weiter oben beschrieben, wird darüber hinaus innerhalb der bestehenden Gründachkataster in Deutschland (z. B. Gründachpotenzialkataster des Landes NRW oder verschiedener Städte), die teilweise sehr viele wichtige Parameter aufzeigen, das Kriterium der Statik nie mitbetrachtet. Somit können jedoch Verfälschungen bei der Darstellung entstehen. Gründachkataster beruhen meist auf Solarkatastern. Das strengste Kriterium für eine nachträgliche PV-Anlage betrifft die Neigung des Daches. Und dieses Kriterium wurde fast unverändert auf das Gründachkataster reproduziert. Die Neigung kann zwar ein Ausschlusskriterium für ein Gründach sein, noch viel wichtiger sind jedoch die statischen Lastreserven der Dachfläche. Ein aufgrund der Neigung im Kataster als „gut“ oder „sehr gut“ geeignetes Dach zur Begrünung erhält wohlmöglich keine Eignung mehr, weil die statischen Erfordernisse nicht ausreichen.

Innerhalb des Projektes „TransMIT“ wurden bestehende Gründachkataster bereits untersucht und sollten weiterentwickelt werden. Sie kamen ebenso zu der Ansicht, dass die Bauweise bzw. Statik des Daches zur Ausweisung von Dachflächen mit Dachbegrünung unbedingt mitbetrachtet werden muss. Das „TransMIT“-Projekt löst diese Problematik, indem sie zwischen "Massivbauweise - Flachdach ohne Bekiesung (im Einzelfall)", "Massivbauweise Flachdach mit (ehemaliger) Bekiesung", "Skelettbauweise" und "alter Dachstuhl" differenziert. Massivbauweisen gelten demnach als für die Begrünung geeignete Dachflächen und Skelettbauweisen sowie alte Dachstühle werden als nicht geeignet markiert (Kaiser 2022). Grundsätzlich lässt sich damit zwar eine Einteilung darstellen, ob diese allerdings korrekt ist, bleibt offen. Teilweise kann es vorkommen, dass auch Massivbauweisen keine nachträgliche Begrünung zulassen und Skelettbauweisen wiederum begrünt werden können. Nichtsdestotrotz ist diese Vorgehensweise eine gute Möglichkeit, um realistischere Ergebnisse darzustellen.

Eine Verallgemeinerung ist vermutlich nicht möglich. Auch die in dieser Studie empfohlene Unterscheidung hinsichtlich der Einteilung der Flächenlast ($< 80 \text{ kg/m}^2$, $80\text{--}120 \text{ kg/m}^2$, $> 120 \text{ kg/m}^2$), um damit Rückschlüsse zur Eignung des Daches als PV-Anlage, Gründach oder PV-Gründach zu gewinnen, ist nicht optimal, da zumeist die genauen Lastreserven des Daches nicht bekannt sind und von den Eigentümern in Anspruch genommenen Personen kostenpflichtig beschafft werden müssten.

Daher müssen wohl auch für ein wirklich aussagekräftiges Ergebnis in Bezug auf die Statik für Dächer zur nachträglichen Begrünung immer Einzelfallbetrachtungen durchgeführt werden.

Lösungsansätze:

Sowohl im Neubau als auch im Bestandsbau ist die Statik ein entscheidendes Kriterium für die Dachnutzungsform. Bei Neubauten ist noch vor Planungsbeginn zu klären, welche statischen Erfordernisse das Dach für die Anlage mit PV, Gründach oder PV-Gründach haben muss. Dies geschieht in Absprache zwischen der Planung und den systemherstellenden Unternehmen.

Für die Ermittlung der Statik bei Bestandsgebäuden kann ggf. auf vorliegende Pläne zurückgegriffen werden. Sind keine Informationen mehr verfügbar, sind Fachkräfte der Statik zur Klärung hinzuzuziehen. Damit die Kosten für diesen Prozess allerdings nicht bei den Eigentümern innewohnenden Personen liegen, ist an dieser Stelle eine Förderung angebracht.

Ausführungsbedingte Hemmnisse

Mehraufwand bei der Ausführung

Ein erhöhter Arbeitsaufwand beim Einbau von PV-Gründächern kommt durch den Einbau der PV-Unterkonstruktion und eine erschwerte Einbringung der Vegetationstragschicht (Substrat) für die Garten- und Landschaftsbaubetriebe zu Stande.

Lösungsansätze:

Damit der höhere Arbeitsaufwand möglichst geringgehalten wird, sollten sich die ausführenden Betriebe an den Empfehlungen der systemherstellenden Unternehmen und Verbände zum Ablauf des Einbaus von PV-Gründächern halten. In Produktanleitungen wird der Einbau des Systems detailliert beschrieben.

Bauherrschaften und Planende sind darüber aufzuklären, dass die Fertigstellung eines PV-Gründachs aufgrund des Erfordernisses verschiedener Gewerke länger dauern kann als reine PV-Anlagen oder Gründächer. Das sollte im Bauablaufplan berücksichtigt werden.

Missachtung von Planungsgrundlagen, Normen und Regeln

Auf Dächern sind viele Gewerke unterwegs. Neben der funktionsgerechten Installation der PV-Anlage und / oder des Gründachs müssen u. a. Absturzsicherung, Blitzschutz, Brandschutz und Entwässerung sichergestellt sein. Seitens ausführender und instandhaltender Betriebe von Dachbegrünungen wird angemerkt, dass PV-Anlagen, speziell bei nachträglichen Aufbauten, oftmals ohne Rücksicht auf andere Gewerke montiert sind. D. h. es werden beispielweise für die Kombination falsche (zu niedrige) Unterkonstruktionen und geringe Reihenabstände verwendet, die eine Instandhaltung des Gründachs nicht mehr möglich machen. Zudem werden häufig Entwässerungseinrichtungen, Brandschutzstreifen, Blitzschutzmaßnahmen und Absturzsicherungen überbaut, sodass deren Funktion nicht mehr gewährleistet ist.

Lösungsansätze:

PV-Anlagen sind so zu planen und zu montieren, dass andere Gewerke in ihrer Funktion nicht eingeschränkt werden.

Vernachlässigung der Instandhaltung (Pflege und Wartung)

Speziell bei Dachbegrünungen wird seitens der Bauherrschaften und Eigentümern innewohnenden Personen oft aus Kostengründen auf eine dauerhafte Instandhaltung (Entwicklungs- und Unterhaltungspflege) der begrünten Dachfläche verzichtet. Das kann dazu führen, dass sich das Gründach nicht so etabliert wie vorgesehen, indem sich unerwünschter Fremdaufwuchs ansammelt und Pflanzen sich in Bereichen etablieren, wo sie vermieden werden sollten. Gleichzeitig kann die Funktion der Entwässerungseinrichtungen durch Zuwachs beeinträchtigt werden.

Nicht durchgeführte Pflege und Wartung kann insbesondere bei PV-Gründächern zu Problemen führen. Vor den PV-Modulen sollte die Vegetation das gesamte Jahr über kurz gehalten werden, um Effizienzeinbußen durch Verschattung der PV-Module zu vermeiden.

Instandhaltende Garten- und Landschaftsbaubetriebe merken des Weiteren an, dass sie bei nachträglich installierten PV-Anlagen auf bestehenden Gründächern häufig durch die falsche Wahl der Unterkonstruktion, und damit einhergehend zu niedrigen und flachen Modulen und fehlenden

Reihenabständen, keine Pflege und Wartung des Gründaches mehr durchführen können. In diesen Fällen sollten Bedenken angemeldet und die Gewährleistung eingeschränkt oder gar abgelehnt werden.

Lösungsansätze:

Zur Sicherstellung der dauerhaften Funktion der Dachnutzung ist bereits zu Beginn der Planungsphase deren Instandhaltung mit einzukalkulieren und zu klären, welche Instandhaltungsmaßnahmen zu welchen Zeiten erforderlich sind. Entsprechende Wartungsverträge sind für einen längeren Zeitraum aufzusetzen.

Für PV-Gründächer sollten die Abstände zwischen den Modulreihen ausreichend groß sein, um die fachgerechte Instandhaltung inklusive Rückschnitt und Beräumung des Schnittguts durchführen zu können. Die Empfehlungen der Verbände und Systemherstellenden sind zu berücksichtigen.

Um die Arbeiten der instandhaltenden Betriebe zu erleichtern, sollte die Planung folgendes berücksichtigen:

- Ausreichend Platz für Pflege- und Wege zwischen den PV-Modulreihen belassen. Die Dächer sind Arbeitsplätze und müssen daher in allen Bereichen vernünftig und sicher zugänglich sein.
- Saatgutmischungen für PV-Gründächer festschreiben, da die darin enthaltenen Pflanzen durch ihre geringe Wuchshöhe einen Überwuchs auf die PV-Module bereits vermeiden. Anderenfalls können falsche Saatgutmischungen für einen erhöhten Instandhaltungsaufwand sorgen.
- Fachgerechte Absturzsicherung einplanen. Möglichst Kollektivschutz.
- Kabel der PV-Anlage entsprechend schützen, damit diese bei den Mäharbeiten nicht beschädigt werden.
- Bei nachträglicher Installation von PV-Anlagen auf bestehenden Gründächern auf PV-Unterkonstruktionen zurückgreifen, die sich für die Kombination eignen und ausreichend hoch aufgeständert sind.

Projektentwickelnde sollten die Kosten der Instandhaltung der Dachnutzung für mehrere Jahre mit einkalkulieren.

Von Bund, Ländern und Kommunen sollte ein Weg aufgezeigt werden, wie die anfallenden Kosten für die Instandhaltung der Dachnutzungsanlage gefördert werden können.

Zuständigkeit der Gewerke

Entgegen reinen PV-Anlagen oder Gründächern, bei denen das zuständige Gewerk für die Ausführung der Anlage zumeist klar ist, bestehen bei PV-Gründächern aufgrund der Kombination noch immer Schwierigkeiten in der Zuordnung der Gewerke. Eines der häufigsten Hemmnisse bei der Planung und Ausführung von PV-Gründächern ist fehlendes Wissen zum jeweilig anderen Leistungsbereich und die dazu passende Trennung der Gewerke. In der Regel hat der Gründachfachbetrieb keine Erfahrungen im Bereich der elektronischen Anlagen und der Solarfachbetrieb wiederum keine Expertise in der Begrünung von Dächern. Kommuniziert die Planung nur mit einem der beiden Gewerke, kann dies zu Fehlern führen, und zwar nicht nur bei der Festlegung der zuständigen Gewerke, sondern auch bei der späteren Ausführung der Anlage.

Lösungsansätze:

Kein fachfremdes Gewerk sollte die Arbeiten des anderen Gewerks übernehmen. Daher ist während der Planung eines PV-Gründachs zum einen genauestens festzulegen wo die Leistungsgrenzen und Schnittstellen zwischen den Gewerken sind und weiterhin welches Gewerk welche Materialien gemäß Ausschreibung liefern sollte. Dafür sind die Empfehlungen der Verbände zur Gewerketrennung

heranzuziehen. Die Koordination der Gewerketrennung, sowie die fachliche Abstimmung sollte durch die Planung erfolgen.

Möglicherweise ist es sinnvoll, wenn Gründachfachbetriebe Solarfachbetriebe als Unterauftragnehmer einstellen. So könnte ein reibungsloser Ablauf sichergestellt werden.

Arbeitskräftemangel / Personalmangel

In vielen Bereichen des Handwerks fehlt es an Fachkräften. Das trifft auch für die dachnutzungsrelevanten Gewerke zu, zu denen besonders Fachkräfte des Dachdeckerhandwerks, Garten- und Landschaftsbauende und Fachkräfte der Solartechnik zählen. Ohne fachkompetente Verarbeitende, kann die Ausstattung der Dachflächen mit PV-Anlagen und/oder Gründächern allerdings nicht funktionieren.

Lösungsansätze:

Die Erstellung einer bundesweiten Liste zu Ausführungsbetrieben der Dachnutzungen ist anzustreben (PV-Anlage, Gründach und PV-Gründach). Auf institutioneller Ebene ist die Schaffung von Weiterbildungsangeboten zu empfehlen, um deutschlandweit weitere Fachbetriebe zu gewinnen, die den steigenden Bedarf decken können. Auch sollten die fachlichen Inhalte der Dachbegrünung stärker in der Ausbildung zu Garten- und Landschaftsbauende sowie Fachkräfte des Dachdeckerhandwerks verankert werden. Grundsätzlich gilt es die Förderung des Handwerks, hiermit Blick auf den Berufen der Fachkraft des Dachdeckerhandwerks, Garten- und Landschaftsbauende und Fachkräfte der Solartechnik, durch den Bund weiter voranzubringen. Neue Berufsfelder, wie z. B. „Fachkraft für Gebäudebegrünung“ oder „Fachkraft für Dachnutzung“ sind möglicherweise zu etablieren.

Einhaltung von Angeboten

Durch den Arbeitskräftemangel im eigenen Gewerk und den Vorgewerken sowie die starken Preisschwankungen, ist es für die ausführenden Betrieben oft schwer, preisstabile Angebote zu erstellen. Zusätzlich häufen sich bei den verschiedenen Gewerken Lieferverzögerungen, was den Bauablauf stören kann. Grund dafür sind nicht lieferbare Materialien als auch ein Mangel an Lieferanten.

Lösungsansatz:

Der Arbeitskräftemangel kann kurzfristig nicht gelöst werden. Daher sollte bei den Projektkosten von Beginn an ein Spielraum für Mehrkosten mit einkalkuliert werden. Für die Planung ist ebenso anzuraten, dass die Dauer des Bauablaufs etwas verlängert werden sollte, damit es nicht zu Überschneidungen verschiedener Gewerke kommt.

Sonstige Hemmnisse

(Keine) Einsehbarkeit

Die Einsehbarkeit wird abhängig des Dachnutzungstyps kontrovers betrachtet. Während aus architektonischer Betrachtung einsichtige PV-Anlagen auf Dächern oft als störend empfunden werden, wird sich bei Gründächern darüber beschwert, dass die Bevölkerung zumeist selbst nichts davon hat. Obwohl jährlich immer mehr Dächer in Deutschland begrünt werden, ist die Sichtbarkeit der im öffentlichen Raum tatsächlich eingeschränkt. Bei Gründächern liegt dies an der erhöhten Lage des Daches. Von der Straßenebene sind begrünte Dächer häufig nicht zu erkennen. Die Begrünung wird daher von der Bevölkerung weniger wahrgenommen, sodass eine Auseinandersetzung mit der Maßnahme im Alltag kaum stattfindet.

Lösungsansätze

PV-Anlagen können schon in der Planungsphase so integriert werden, dass sich in die Form des Gebäudes einfügen. Sollten aufgeständerte PV-Unterkonstruktionen für die Kombination mit einem

Gründach zum Einsatz kommen, könnte die Attika höher gezogen werden, um den Blick auf die PV-Anlage zu vermeiden. Dies hätte gleichzeitig den Effekt, dass sich das Personal für die Instandhaltung barrierefrei ohne zusätzliche Absturzsicherung über das Dach bewegen kann.

Die Begrünung öffentlichkeitswirksamer Gebäude ist entsprechend wichtig, um die Sichtbarkeit der Dachbegrünung im öffentlichen Raum zu steigern. Städtische Gebäude sowie Bundes- und Landesgebäude können als Vorbilder einer nachträglichen und hochwertigen Gebäudebegrünung dienen. Möglicherweise kann die Zugänglichkeit zur Dachfläche für die Öffentlichkeit gewährleistet werden. Auch die stadtweite Begrünung von Gebäuden des Alltags, wie etwa Wartehäuschen oder Garagen, erhöht die Sichtbarkeit im öffentlichen Raum. Diese Lösungen könnten ebenso mit PV kombiniert werden.

Interessenkonflikt/Flächenkonflikt

Ein genereller Konflikt entsteht darin, dass die Gebäudewirtschaft noch immer die Dachnutzung als „entweder/oder“ sieht, d. h. dass die Dachfläche entweder eine PV-Anlage oder eine Dachbegrünung erhält. An die Kombination wird nicht gedacht bzw. wird aufgrund höherer Kostenaufwände vermieden.

Zwar wird die Dachbegrünung, als wichtige Maßnahme zur Klimaanpassung und zur nachhaltigen Regenwasserbewirtschaftung sowie zur Durchgrünung der verdichteten Stadt, innerhalb von Stadtverwaltungen grundsätzlich als positive Maßnahme angesehen. Die aktuelle Situation und das Ziel im Rahmen des Klimaschutzes möglichst viel nachhaltige Energie zu erzeugen lässt derzeit die PV-Nutzung im Fokus stehen. So ist auch bei Dächern eine Flächenkonkurrenz durch PV-Anlagen zu beobachten.

Lösungsansätze:

Für die Zukunft gilt es, die Vorteile der Dachnutzungen herauszustellen und durch einen fachlichen Diskurs Vorurteile abzubauen. Es ist wichtig Lösungswege im Rahmen von Best-Practice-Beispielen zu entwickeln, bei denen konkurrierende Interessen ausgewogen berücksichtigt werden können.

Vor allem die Politik sollte darüber aufgeklärt werden, dass die Möglichkeiten der Dachnutzung vielschichtig sind und sich nicht nur auf eine Lösung konzentriert werden sollte.

Eigentumsverhältnisse

Oft tritt der Fall auf, dass bei Mehrfamilien- oder Reihenhäusern mehrere Eigentum innehabende Personen vorhanden sind. Für eine nachträgliche Dachflächennutzung auf einen Bestandsgebäude können somit Interessenkonflikte entstehen, wenn es um die Wahl des Systems geht. Alle Eigentum innehabenden Personen des Gebäudes müssen der jeweiligen Nutzung zustimmen. Das ist aber zumeist schwierig zu erreichen. Darüber hinaus ist für die Eigentum innehabende Personen häufig nicht klar, wie sie von der Dachnutzung im gleichen Maßstab profitieren können, wenn es sich beispielsweise um eine PV-Anlage handelt.

Lösungsansätze:

In einem ersten Schritt ist innerhalb der Eigentumsversammlungen darüber abzustimmen, welche Lösung für die Dachfläche die geeignetste ist.

Verbände sollten für dieses Problem Hinweisblätter für Eigentum innehabende Personen erarbeiten, um diesen Argumentationshilfen für die unterschiedlichen Dachnutzungen bereitzustellen.

Verlust von PV-Fläche bei PV-Gründach

Ein Gegenargument, welches immer wieder gebracht wird, betrifft den PV-Flächenverlust bei einem PV-Gründach im Gegensatz zu einem reinen PV-Dach. Diese kommt vor allem durch die Wartungswege zwischen den Modulreihen zustande, um die Vegetation des Gründachs fachgerecht pflegen zu können.

Vergessen wird jedoch häufig, dass auch für PV-Flachdächer genügend Platz für die Wartung belassen werden sollte. Darauf wird aber oft verzichtet, um möglichst viel PV-Fläche zu generieren.

Lösungsansätze:

Der Verlust an PV-Fläche und der damit einhergehende Minderertrag hängt stark vom Gebäude und der Verlegung der PV-Anlage ab. Bei Neuplanungen können die optimalen Verlegungen des PV-Gründachs eingeplant werden, bei denen der Verlust an PV-Fläche schließlich kaum merkbar ist. Gleichzeitig ist zu beachten, dass durch die Verdunstungskühlung der Dachbegrünung die Leistung der PV-Module marginal erhöht wird. Das kann dem Flächenverlust gegengerechnet werden.

Oft muss zudem nicht das gesamte Gebäude mit PV ausgestattet werden, vor allem wenn die PV-Anlage für den Eigenverbrauch genutzt wird.

Gesetze des Bundes und der Länder sollten berücksichtigen, dass die ggf. festgeschriebene PV-Fläche eines Daches auch PV-Gründächer zulässt, damit ebenso die positiven Wirkungen der Dachbegrünung zum Tragen kommen.

Eine umfassende BBSR-Analyse der Fachgesetzgebung zur besseren Berücksichtigung von Anpassungsmaßnahmen gegen den Klimawandel wird im ersten Quartal 2024 veröffentlicht. Im Fokus stehen hierbei das Bauordnungs- und das Bauplanungsrecht.

Kosten

Dachnutzungsanlagen kosten Geld, sowohl in der Herstellung als auch in der Instandhaltung. Viele Eigentum innehabende Personen schreckt dieser finanzielle Mehraufwand ab. Während sich PV-Anlagen zumeist finanziell schon nach wenigen Jahren rentieren, werden Dachbegrünungen für die Nutzenden als zu kostenaufwändig und wenig profitabel gesehen, da die Kosten und der dafür erhaltene Gegenwert oft nicht abgewogen werden kann. Hat es demnach keine fachkompetente Beratung, die dies widerlegt, werden die Eigentum innehabenden Personen dadurch in ihrer Unsicherheit überproportional hoher Kosten bzw. hoher Verlustrisiken bestärkt. Werden Dachbegrünungen und PV-Anlagen zusätzlich kombiniert verschärft sich dieses Hemmnis weiter, da die Kombinationslösung i.d.R. teurer ist als die getrennte Lösung.

Gleiches gilt für die Instandhaltung der Anlagen. Gründächer und PV-Gründächer bedürfen einer mehrmals jährlichen Pflege. Die damit einhergehenden laufenden Kosten sind meist höher als die einer PV-Anlage.

Lösungsansätze:

Entscheidungstragende sind fachkompetent zu den anfallenden Kosten und Einsparungen der Dachnutzung aufzuklären.

Für Gründächer und PV-Gründächer sollten aus Sicht der Autorinnen und Autoren für Neubauten und Gebäudeerneuerungen aussagekräftige Lebenszykluskostenbetrachtungen durchgeführt werden, die neben den anfallenden Kosten auch die Kosteneinsparungen der Dachnutzung (u. a. durch Langlebigkeit des Daches) detailliert aufzeigen. Gleichzeitig sollte weiter zu den zahlreichen positiven Effekten von Dachbegrünungen und PV-Gründächern aufgeklärt werden, die nicht monetär abbildbar sind.

Verbänden und Systemherstellenden für Dachbegrünung wird empfohlen mehr Aufklärung zu betreiben, dass sich Systeme mit Dachbegrünungen rentieren können.

Es wird angeregt, dass Bund, Länder und Kommunen Mehrkosten fördern, die durch bestimmte Dachnutzungen entstehen, die aber für eine Anpassung an die klimatischen Verhältnisse erforderlich sind. Gleiches trifft für die Instandhaltung der Dachnutzung zu. Sofern wird von den Autorinnen und Autoren empfohlen eine Förderung der laufenden Arbeiten anzustreben.

Außerdem sollte in Erwägung gezogen werden Gesetzesänderungen zu initiieren, damit Dachnutzungsanlagen, wie das PV-Gründach, zum Standard werden.

Fehlende Informationen beim Bestandsbau

Sollten Eigentum innehabende Personen für ihre Dachflächen eine Einschätzung zur Eignung ihrer bestehenden Dachflächen geben müssen, würden sie sehr wahrscheinlich schnell an ihre Grenzen kommen. Neben der bereits benannten Statik könnte für weitere Indikatoren ggf. unzureichendes Wissen bestehen.

Für Dachbegrünungen zwingend erforderlich sind beispielsweise wurzelfeste Dachabdichtungen. Ob eine Flachdachabdichtung als wurzelfest gilt, kann nur über das Produktdatenblatt, einen anderen Nachweis zum Einbau des Produktes oder einen Experten beurteilt werden. Für Eigentum innehabende Personen ist der Unterschied i.d.R. nicht zu erkennen.

Bezugnehmend auf eine PV-Anlage muss der Platz für einen Wechselrichter und der Ertüchtigungsaufwand der elektronischen Anlagen zur nachträglichen Installation im Gebäude von einer fachkundigen Person kontrolliert werden.

Des Weiteren ist unter Umständen das Blitzschutz- und ggf. Entwässerungskonzept des Gebäudes auf die geplante Anlage anzupassen.

Lösungsansätze:

Im Bestandsbau können viele Informationen noch aus bestehenden Plänen entnommen werden. Zur Kontrolle, ob Änderungen der bestehenden Einrichtungen von Nöten sind, sollten jedoch immer Fachpersonen eingebunden werden.

Für Neubauten gilt es, dass die erforderlichen Maßnahmen bereits zu Beginn erfolgen müssen. Sollten die Dächer eines Neubaus zu einem späteren Zeitpunkt mit einer Dachnutzungsanlage ausgestattet werden, sollten alle Maßnahmen (Indikatoren) aus AS 1 und AS 2, die für die Dachnutzungsanlage erforderlich sind, bereits entsprechend umgesetzt sein. Sie sind ausreichend zu dokumentieren und den Eigentum innehabenden Personen zur Verfügung zu stellen.

Handlungsempfehlungen für die Akteure

Nachfolgend werden für die relevanten Akteure mögliche Empfehlungen für die effektive Dachflächennutzung in einer gebäudeübergreifenden Betrachtung zusammengefasst.

Projektentwickelnde

- Bei PV-Gründächern frühzeitige Einbindung von Fachpersonal, um die Planungs- und Kostenkriterien zu klären.
- Teilnahme an Weiterbildungsseminaren.

Bauherrschaft und Eigentum innehabende Personen

- Offenheit für Mehrkosten und Ertragseinbußen durch weniger Module für die Kombination aus PV-Anlage mit Dachbegrünung zulassen.
- Planungsänderungen sind mit zu finanzieren und zu beauftragen.
- Fachfirmen für die Herstellung und Instandhaltung der Dachnutzungstypen einsetzen.
- Dauerhafte bzw. langjährige Wartungsverträge abschließen.

Planende

- Frühzeitige Einbindung von Planenden (bei Gründach oft Landschaftsplanende), wenn keine oder kaum Kenntnisse zum Dachnutzungstyp vorliegen.
- Frühzeitige Klärung der Traglasten, damit möglichst die entsprechende Dachnutzung umgesetzt werden kann. Vorzugsweise sollte das Tragwerk zumindest PV-Gründächer zulassen.
- Koordinierung der Gewerketrennung entsprechend des Dachnutzungstyps.
- Einbindung der Gewerke in die Planung der Dachnutzung.
- Beachtung der Planungsgrundlagen, Normen und Gesetze des Dachnutzungstyps.
- Leistungsverzeichnisse entsprechend der Gewerke ausschreiben.
- Instandhaltung der Dachnutzung in der Planung berücksichtigen.
- Instandhaltungsbeauftragten und Instandhaltungsumfang festlegen. Mitentwicklung des Instandhaltungsplans für die Dachnutzung.
- Zugänglichkeit zur Dachfläche während Herstellung, Veränderung und Instandhaltung berücksichtigen.
- Bei Gründächern und PV-Gründächern sollte neben der Fertigstellungspflege auch die Entwicklungs- und Unterhaltungspflege mitbeauftragt werden.
- Bei PV-Gründächern sind entsprechende Unterkonstruktionen von PV-Anlagen einzuplanen, die für die Kombination mit Gründächern geeignet sind und ausreichend Abstand zwischen der PV-Modulunterkante und dem Substrat sowie zwischen den PV-Modulreihen zulassen.

Teilnahme an Weiterbildungsseminaren.

Systemherstellende Dachbegrünung

- Seminare für Projektentwickelnde und Planende anbieten.
- Schulungen bzw. Weiterbildungsmöglichkeiten für ausführende Betriebe anbieten.
- Informationen und Unterstützung der Planende und ausführenden Betriebe bereitstellen.

- Argumente bezüglich Kosten und Nutzen sollten bereitgestellt werden können.
- Vorurteile (z. B. zu Mehraufwand, Dichtigkeit, Instandhaltung) ausräumen.
- Aufklärung, dass Instandhaltungsmaßnahmen erforderlich sind.

Ausführende Betriebe

- Fachgerechte Ausführung entsprechend des Dachnutzungstyps.
- Abgrenzung der Gewährleistungsbereiche, besonders bei PV-Gründächern.
- Gewerkeübergreifende Zusammenarbeit.
- Vor Ausführung Überprüfung der Planungen mit der zuständigen Planung und ggf. mögliche Nachjustierungen.
- Sorgfältige Instandhaltung der entsprechenden Dachnutzung.
- Bereitgestellte Schulungen annehmen.

Verbände

- Netzwerk bereitstellen, um Planenden entsprechende Systemanherstellende und ausführende Betriebe für die die jeweiligen Dachnutzungstypen anbieten zu können.
- Produktneutrale Planungs- und Ausschreibungsunterlagen anbieten.
- Informationsdatenbank, Beratungsplattform zur Verfügung stellen.
- Referenzprojekte zur Orientierung für Projektentwickelnde und Planende anbieten.
- Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen der unterschiedlichen Dachnutzungstypen inklusive Vergleiche anbieten.
- Vorurteile (z. B. zu Mehraufwand, Dichtigkeit, Instandhaltung) ausräumen.
- Aufklärung von Entscheidungstragenden zu den Möglichkeiten der Dachnutzung.
- Seminare für Projektentwickelnde, Planende, Bund, Länder, Kommunen und Politik anbieten.

Bund

- Bundesförderung für klimagerechte Dachnutzung anbieten.
- Länder und Kommunen bei der Umsetzung unterstützen.
- Als Vorreiter voran gehen und die Bundesgebäude mit Dachnutzungstypen ausstatten, idealerweise mit PV-Gründach.

Länder

- Landesförderung anbieten.
- Kommunen bei der Umsetzung von Dachnutzungen unterstützen.
- Als Vorreiter voran gehen und die Landesgebäude mit Dachnutzungstypen ausstatten, idealerweise mit PV-Gründach.

Kommunen

- Verpflichtung zur Dachnutzung, idealerweise des PV-Gründachs.
- Besonders relevante Gebiete für die Dachnutzungstypen, z. B. im Flächennutzungsplan, ausweisen.

-
- Festsetzungsmöglichkeiten der Kommunen nutzen, wie Bebauungspläne oder Gestaltungssatzungen.
 - Bei PV-Gründächern Festsetzungen so, dass das PV-Gründach funktioniert, d. h. beispielsweise den Substrataufbau nicht zu hoch festzuschreiben.
 - Schnellere Genehmigungsprozess innerhalb der Behörden.
 - Kommunale Förderung anbieten.
 - Förderung von zusätzlichen Arbeiten, wie erhöhten Planungsleistungen, Prüfung der Statik und Instandhaltungstätigkeiten.
 - Als Vorreiter voran gehen und die öffentlichen Gebäude innerhalb der Kommune mit Dachnutzungstypen ausstatten, idealerweise mit PV-Gründach.
 - Anpassung der Förderprogramme für Dachbegrünung oder PV-Anlagen, um das jeweilig andere System nicht auszuschließen oder unattraktiv zu machen.

AS9 – Materialien und Konzeption zum Aufbau eines Informationsportals

Um das Thema der Umnutzung von Dachflächen und den verschiedenen Möglichkeiten dazu in eine breite Öffentlichkeit zu bringen, wurde der Aufbau eines Informationsportals konzipiert und bereits bestehende Portale auf ihre Eignung geprüft. Dazu wurde eine geeignete Struktur und Vorgehensweise entwickelt.

Ziele des Informationsportals

Über das Informationsportal sollen die Ergebnisse des vorliegenden Gutachtens, der aktuelle Stand zum Thema PV-Gründach und weitere hilfreiche Informationen (bzw. Links) zu PV, Gründach und PV-Gründach zur Verfügung gestellt werden.

Die wichtigsten Grundlagen sollen schon hier dargestellt sein und ggf. auch aktualisiert werden, jedoch sollen auch Verlinkungen gesetzt werden, die weiterführende, detaillierte und sich laufend ändernde Informationen bieten.

Das Informationsportal ist gedacht als guten Einstieg, das Wichtigste zu PV und Gründach übersichtlich und schnell vermittelt zu erhalten und bei weiterem Bedarf an Informationen auf weiterführende Seiten zu gelangen.

Zielgruppen

Im Fokus des Portals sollen Fachleute aus der Baubranche (Hochbau- und Landschaftsarchitektenplanende, Städteplanende, Fachkräfte des Dachdeckerhandwerks und des Garten- und Landschaftsbaus, Elektrohandwerk, Verbände und Systemanbieter der Dachabdichtung, Dachbegrünung und Photovoltaik) stehen. Diese benötigen in erster Linie Informationen zur sachgemäßen Umsetzung von klimagerechten Dachflächen.

Mögliche Inhalte des neuen Informationsportals „Klimagerechte Dachflächen“

Um die Grundlagen zu vermitteln, die die angeführten Zielgruppen für die Themen PV, Gründach und PV-Gründach für einen ersten Überblick und Einblick benötigen, sind folgende Wissensbausteine vorzusehen:

- Begriffsdefinitionen und Grundlagen zu Photovoltaik, Dachbegrünung und Kombination PV/Gründach zur Einführung in das Thema, um allen Zielgruppen (von PV- und von Gründachseite) einen Einstieg zu vermitteln und um die „gleiche Sprache zu sprechen“.
- Verlegearten von PV und PV-Gründächern mittels grafischer Darstellung und Angaben welche Dachform mit welchen PV- bzw. PV-Gründach-Variante belegt werden kann. (aus dem Gutachten zu entnehmen)
- Beachtenswertes bei der Kombination PV mit Dachbegrünung (PV-Gründach) durch Grundlagen für die fachgerechte Planung, Umsetzung und Instandhaltung von PV-Gründächern. (aus dem Gutachten zu entnehmen)
- Kriterien für die Nutzung bestehender Dachflächen und Entscheidungshilfe, ob nur energetische Sanierung, Photovoltaik, Dachbegrünung oder PV-Gründach. (aus dem Gutachten zu entnehmen)
- Rechner und Entscheidungshilfen: Überarbeitete Gründachpotenzialkataster, Solarkataster, PV-Gründach-Potenzialkataster (neu), Ertragsrechner, „Wirk-Tool“ (neu) aus dem Gutachten in ausgearbeiteter Form. Das Kernstück des Portals; dafür muss das im Gutachten vorgestellte „Wirk-Tool“ fertig entwickelt und fortlaufend aktualisiert werden. (teilweise aus dem Gutachten zu entnehmen)
- Praxisbeispiele mit Objektsteckbriefen (neu).

-
- Sammlung an gelungenen PV-Gründach-Objekten, die auf der Deutschlandkarte mit einem kurzen Datenblatt dargestellt werden (neu).
 - Gesetzliche Vorgaben (Solarpflicht) und Fördermöglichkeiten zur Darstellung des aktuellen Stands der gesetzlichen Vorgaben und Hinweise zu weiteren Informationen. (teilweise aus dem Gutachten zu entnehmen)
 - Downloads bzw. Links zu den wichtigsten Fachinformationen und Informationsquellen (Organisationen und Verbände). (aus dem Gutachten zu entnehmen)
 - Hinweise auf Fort- und Weiterbildungen, Seminaren usw. (neu)
 - FAQs oder nachfolgend angeführten Schritte. Das könnte eine alternative Darstellungsform sein, die über Fragen bzw. Abwicklungsschritte informiert und führt.
 - Schritt 1: Grundlagen: Wie funktioniert eine Photovoltaik-Anlage?
 - Schritt 2: Wirtschaftlichkeit: lohnt sich eine Photovoltaik-Anlage?
 - Schritt 3: Umsetzung: wie realisiere ich meine Photovoltaik-Anlage ohne/mit Gründach?
 - Schritt 4: Finanzierung und Förderung: wie finanziere ich meine Photovoltaik-Anlage?
 - Schritt 5: Steuern und Anmeldung: was gibt es rechtlich zu beachten?
 - Schritt 6: Fragen klären: wo finde ich unabhängige Beratung für mein Photovoltaik- bzw. Gründach-Projekt?

In der weiteren Diskussion, detaillierteren Konzeption und im Rahmen der Erarbeitung des Informationsportals können weitere Wissensbausteine ergänzt werden.

Schon vorhandene, möglicherweise geeignete Plattformen

Bei der Sichtung schon vorhandener Internetseiten als mögliche Plattformen für „Klimagerechte Dachflächen“ wurde das Augenmerk auf Seiten des Bundes gelegt, um die Bedeutung des Themas zu verdeutlichen und zu stärken. Grundsätzlich sind auch ausgewählte Verbandsseiten als Plattformen geeignet.

- Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR): Informationsportal Energieeinsparung (https://www.bbsr-geg.bund.de/GEGPortal/DE/Home/home_node.html)
- Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR): Energie, Umwelt und Klima / Freiraum und Stadtgrün (https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/themen/energie-umwelt-klima/freiraum-stadtgruen/_node.html)
- Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen: Informationsportal nachhaltiges Bauen (<https://www.nachhaltigesbauen.de/themen/funktional-und-komfortabel/>)
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz: Informationsportal Erneuerbare Energien (<https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Technologien/Solarenergie-Photovoltaik/solarenergie-photovoltaik.html>)

Zusammenfassung und weitere Vorgehensweise

Es gibt eine Vielzahl an Internetseiten zum Thema PV und Gründach als auch zu PV-Gründach, doch keine Plattform stellt nach Einschätzung der Autorinnen und Autoren alle Bereiche übersichtlich, gut strukturiert, anschaulich und für die wichtigsten Fragen umfassend dar. Bisher behandelt jede Seite nur das Thema ihrer Branche.

Die schon vorhandenen vorgenannten Informationsportale des Bundes sind grundsätzlich geeignet, die Forschungsergebnisse und weitere Informationen zu „Klimagerechten Dachflächen“ zu transportieren und die Relevanz des Themas zu verdeutlichen.

Bei der Wahl, wo das Thema platziert werden könnte, sollten folgende Kriterien beachtet werden:

- Auf welche Plattform schauen die Nutzenden am ehesten drauf, wenn es um Bestandsgebäudenutzung bzw. PV auf Dächern geht?
- Ist die Aktualisierung des Portals sichergestellt (z. B. Eingabe neuer Erkenntnisse, Überprüfung von Verlinkungen, ...)
- Passt die vorgeschlagene Darstellung und Informationstiefe zu den schon veröffentlichten Themen und Inhalten?

Überlegenswert ist, auf einer der bestehenden Plattformen eine Unterseite mit einer eigenen Domain (z. B. www.klimagerechte-dachflaechen.de) zu hinterlegen, auf die alle anderen Portale des Bundes verlinken.

Das gleiche Prinzip wäre denkbar mit einer Verbandsseite (z. B. www.gebaeudegruen.info), die eine Unterseite stellt und aktualisiert.

Diesem aktuellen und wichtigen Thema sollte mit einer eigenen Domain die entsprechende Plattform und Aufmerksamkeit gegeben werden. Mit dem gleichzeitigen Wissenstransfer von PV und Gründach und deren Kombination und dem Kernstück des „Wirk-Tools“ zur objektbezogen besten Lösung bei Umnutzung von Dachflächen wird eine neues Informationsportal geschaffen, das es in dieser Form bisher nicht gibt.

Folgende weitere Vorgehensweise wird empfohlen:

- Festlegung, wo und mit welcher Domain das Thema präsentiert werden soll.
- Festlegung der Wissensbausteine und deren Umfang.
- Zusammenstellung der Daten aus dem Gutachten und weiteren Quellen.
- Umsetzung.

Recherchierte Internetadressen

Der Schwerpunkt der Recherche lag auf Internetseiten, die die Themen produktneutral und mehr oder weniger umfassend dargestellt haben, ohne Anspruch auf Vollständigkeit. Sie können teilweise als Beispiele und Orientierungshilfen zur Erstellung des neuen Informationsportals dienen.

Erneuerbare Energien, Photovoltaik

- Bundesinstitut für Bau, Stadt und Raumforschung (https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/themen/energie-umwelt-klima/_node.html)
- Bundesverband Solarwirtschaft e. V. <https://www.solarwirtschaft.de/>
- co2online (<https://www.co2online.de/>)
- Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie (<https://www.dgs.de/aktuell/>)
- Fraunhofer ISE (<https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.html>; <https://www.ise.fraunhofer.de/de/daten-zu-erneuerbaren-energien.html>)
- Informationsportal Energieeinsparung (<https://www.bbsr-geg.bund.de/GEGPortal>)
- Leitfaden Bauwerksintegrierte Photovoltaik (<https://bipv-bw.de/>; <https://bipv-bw.de/b-architektur-mit-photovoltaik/b4-exkurs-kombination-mit-begrueung/>)
- Photovoltaiknetzwerk Baden-Württemberg (<https://www.photovoltaik-bw.de/>)
- Solarenergie.de (<https://solarenergie.de/>)
- Solaranlagenportal (<https://www.solaranlagen-portal.com/>)
- Solar-Cluster Baden-Württemberg (<https://solarcluster-bw.de/de/>)
- Umweltbundesamt (<https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien>)
- Verbraucherzentrale NRW (<https://www.verbraucherzentrale.nrw/wissen/energie/erneuerbare-energien>)

Dachbegrünung, PV-Gründach

- Bundesverband GebäudeGrün e. V. (www.gebaeudegruen.info)
- Mehr Grün am Haus (<https://www.mehrgruenamhaus.de/mehrgruen-solargruendach>)
- Solaranlagenportal (<https://www.solaranlagen-portal.com/photovoltaik/gruendach>)

Förderung Solarenergie und Dachbegrünung

- Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (https://www.bafa.de/DE/Energie/Effiziente_Gebaeude/effiziente_gebaeude_node.html)
- Bundesverband GebäudeGrün e. V. (<https://www.gebaeudegruen.info/gruen/foerderungen>)

- co2online (<https://www.co2online.de/modernisieren-und-bauen/photovoltaik/was-ist-photovoltaik-faq/ratgeber/foerdermittelcheck/>)
- Förderungsportal.de (<https://foerderungportal.de/solargruendaecher/>)
- Umweltbundesamt (<https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/werkzeuge-der-anpassung/tatenbank/foerderangebot-solargruendach>)

PV- und weitere Rechner

- Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e. V. (<https://www.dgs.de/service/kooperationen/pvrechner/>; <https://www.dgs-franken.de/service/stromkostenrechner/>)
- Forschungsgruppe Solarspeichersysteme (<https://solar.htw-berlin.de/rechner/>)
- Informationsportal Energieeinsparung (<https://www.bbsr-geg.bund.de/GEGPortal/DE/Wirtschaftlichkeit/VereinfachteAnsaetze/BBSR-Berechnungstool/BBSR-Berechnungstool-node.html>)

Weitere

- Deutsche Energie-Agentur (<https://www.dena.de/startseite/>)
- Informationsportal Erneuerbare Energien (<https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Home/home.html>)
- Informationsportal Nachhaltiges Bauen (<https://www.nachhaltigesbauen.de/>; <https://www.nachhaltigesbauen.de/themen/umweltschonendund-energieeffizient/>)
- Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (https://www.ioew.de/publikation/photovoltaik_auf_kommunalen_daechern_verpachtung_der_flaechen_an_dritte)
- Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (<https://www.energieatlas-bw.de/sonne/dachflachen/solarpotenzial-auf-dachflachen>)

Ergebnisse

Ergebnisse AS1

In dieser Analyse wurden über die Art der baulichen Nutzung, die Differenzierung von Stadtstrukturtypen und die Kategorisierung von Gebäudetypen verschiedene städtebauliche Situationen und Gebäudesituationen analysiert. Es bestehen verschiedene Veröffentlichungen zur Typologie des deutschen Gebäudebestands, die diesen über eine Indikatorenmatrix näherungsweise abbilden.

Für den gewachsenen und heterogenen Gebäudebestand Deutschlands stellt sich insbesondere die Vielzahl an Stadtstrukturtypen heraus. Je nach Region, Siedlungsgröße und Baualter variiert der Gebäudebestand. Die zehn Energetischen Stadtraumtypen nach Dettmar et al. (2020) bilden aufgrund ihrer großmaßstäblichen Betrachtungsebene städtebaulicher Situationen für ganz Deutschland eine sinnvolle Arbeitsgrundlage für diese Untersuchung. Sie teilen sich anhand ihrer Nutzung in Typen mit vorwiegender Wohnnutzung, mit Mischnutzung oder Büro- und gewerblicher Nutzung. Über die Nutzung konnten zudem Aussagen über die Eigentumsstruktur getroffen werden.

Gebäudetypen werden ebenfalls nutzungsbezogen in Wohngebäude und Nichtwohngebäude unterteilt. Während Wohngebäude in den Stadtraumtypen mit überwiegender Wohnnutzung oder Mischnutzung zu finden sind, stehen Nichtwohngebäude vor allem in Stadtraumtypen mit überwiegender Büro- und gewerblicher Nutzung sowie Mischnutzung. Im Bereich der Wohngebäude waren die Größenklasse und die Baualtersklasse entscheidend für die Typologie. Bei den Nichtwohngebäuden bestimmte hingegen die Gebäudenutzung. Zudem wurde aus energetischer Sicht zwischen beheizten und unbeheizten Nichtwohngebäuden unterschieden. Wie bei der Stadtstruktur zeigt sich auch auf Gebäudeebene die Vielzahl an Gebäudetypen. Die Einfamilienhäuser nehmen mit 55% den höchsten Anteil am deutschen Wohngebäudebestand ein, die höchste Anzahl an Wohnungen bieten mit 42% jedoch die Mehrfamilienhäuser. Bezogen auf die Gebäudegrundfläche bildet die Nutzungsklasse der Gewerbe- und Industriegebäude mit 55% den höchsten Anteil bei den beheizten Nichtwohngebäuden der Bundesländer Baden-Württemberg, Brandenburg, Bremen und Sachsen-Anhalt. Die beheizten Nichtwohngebäude decken jedoch nur ca. 6% des Gebäudebestands der vier Bundesländer ab, wohingegen jeweils ca. 47% auf Wohngebäude und unbeheizte Nichtwohngebäude entfallen.

Aus den Recherchen zu Stadtstruktur- und Gebäudetypen konnten auf Quartiersebene Indikatoren abgeleitet werden, die einen Einfluss auf das Potenzial und die Relevanz hinsichtlich der Umsetzung von PV-Anlagen, Gründächern und PV-Gründächern haben. Darüber hinaus wurden Indikatoren zur Eignungsprüfung von Dachflächen für die Ausgestaltung als PV-Anlage, Gründach oder PV-Gründach erarbeitet. Neben den generellen Gegebenheiten des Daches und des Gebäudes wurden dabei auch technologiespezifische und quartiersübergreifende Faktoren mitberücksichtigt. Während die meisten Indikatoren für beide Dachnutzungstypen beachtet werden müssen, sind jedoch auch auf Seiten der PV-Anlagen als auch der Dachbegrünungen einzelne Faktoren zu betrachten, die für den jeweilig andere Dachnutzungstyp nicht relevant sind. Die Indikatoren galt es nun im folgenden Arbeitsschritt zu priorisieren und zu bewerten.

Ergebnisse AS2

Aufbauend auf den Analysen und Ergebnissen aus AS 1 wurden nun die Indikatoren hinsichtlich ihrer Priorität für die Eignung einer PV-Anlage, eines Gründachs und eines PV-Gründachs auf Quartiers- und Gebäudeebene gewertet. Es stellte sich heraus, dass eine Priorisierung bezüglich des Quartierstyps noch vergleichsweise einfach möglich ist. Je kleinteiliger die Analyse jedoch wird, desto komplizierter ist es, allgemeingültige Aussagen zur Eignung zu treffen. Zwar können Prioritäten auf Gebäude- und Dachflächen festgelegt werden, aber die heutige sehr heterogene Struktur an verschiedenen Bauweisen

erfordert zumindest im Bestandsbau i. d. R. Einzelfallprüfungen, sofern es zur nachträglichen Installation einer technologischen Anlage auf dem Dach kommt. Sollten alle Indikatoren und deren Parameter zum Gebäude bekannt sein, kann eine Eignungsprüfung allerdings ein aussagekräftiges Ergebnis liefern.

Auf Quartiersebene sind entsprechend der Ergebnisse PV-Anlagen bevorzugt in Bereichen mit erhöhtem Energieverbrauch zu implementieren. Dazu zählen vor allem bei Nichtwohngebäuden Gewerbegebiete und Geschäfts-, Büro- und Verwaltungsgebiete sowie bei Wohngebäuden Ketten- und Zeilenhochhäuser und Innenstädte von Groß- und Mittelstädten. Die Dringlichkeit von Gründächern besteht überwiegend in Quartieren mit geringerem Grünanteil bei gleichzeitiger hoher Versiegelung, wie Ketten- und Zeilenhochhäusern, Blockrandbebauungen, Zeilenbebauungen niedriger Geschossigkeit und Gewerbegebieten. Quartierstypen, die eine hohe Dringlichkeit für beide Dachnutzungstypen haben, sollten, sofern deren Eignungsindikatoren erfüllt werden, vorwiegend mit PV-Gründächern umgesetzt werden. Im Neubau sollte das PV-Gründach ohnehin unabhängig des Quartierstyps immer in Betracht gezogen werden, um die Effekte beider Systeme nutzen zu können.

Auf Gebäudeebene sind 9 Indikatoren ausschlaggebend für die Eignung und den Ertrag einer PV-Anlage auf einer Dachfläche. Diese sind die Dachneigung, die statische Belastung des Daches, die Dacheindeckung bzw. Dachabdichtung, die Verschattung durch umliegende Strukturen, weitere Dachaufbauten, die Neigung der PV-Anlage, die Ausrichtung der PV-Anlage, die Höhe des Gebäudes, die Eigentumsstruktur im Gebäude, Elektrische Anlagen im Gebäude und das Nutzungsprofil des Solarstroms. Für Gründächer sind dagegen zum Teil andere Indikatoren prioritär zu prüfen. Relevant sind die Neigung des Daches, die statische Belastung des Daches, die Dacheindeckung / Dachabdichtung und deren Wurzelfestigkeit, die Anforderung an die Entwässerung, die Eigentumsstruktur im Gebäude, und der Zugang zur Dachfläche. Objektspezifisch können weitere relevante Indikatoren, wie ein bestehender Denkmalschutz sowie die vorhandenen Blitzschutzeinrichtungen und Anforderungen an den Brandschutz und Absturzsicherung sein. Um das PV-Gründach zu realisieren, müssen die Indikatoren von PV-Anlage und Dachbegrünung in ihrer Gesamtheit betrachtet werden.

Ergebnisse AS4

Im Arbeitsschritt 4 wurden die für die Studie relevanten Erkenntnisse zu den technischen Möglichkeiten, wirtschaftlichen Aspekten, Vor- und Nachteilen und dem Instandhaltungsaufwand von PV-Anlagen, Gründächern und PV-Gründächern zusammengetragen und einander gegenübergestellt. Abschließend wurde veranschaulicht, unter welchen Bedingungen die PV-Grünfassade als Alternative eingesetzt werden kann.

Die Planungsgrundlagen für PV-Anlagen und Gründächer sind abgesehen von den statischen Erfordernissen grundverschieden. PV-Gründächer müssen darüber hinaus alle planerischen Kriterien für beide Systeme erfüllen. Während bei Gründächern insbesondere die Wurzelfestigkeit der Dachabdichtung gegeben sein muss, sind für die Wahl des Montagesystems einer PV-Anlage in erster Linie die Dachkonstruktion sowie die Windverhältnisse vor Ort entscheidend. Mit Blick auf die Dachneigung lassen sich bis zu 45° Lösungen für Gründächer und PV-Anlagen implementieren. Die Kombination aus beiden Systemen ist dagegen mit den momentan im Markt vorhandenen Bauweisen nur auf Flachdächern mit Neigungen bis zu 5° möglich. Ebenso wird die Begrünung ab 10–15° Dachneigung aufgrund des Erfordernisses von zusätzlichen Schubsicherungsmaßnahmen erschwert.

Für die drei Dachnutzungen existieren jeweils verschiedene Lösungen, um entsprechend des Nutzungsziels das optimale Ergebnis zu erreichen. Das Grundprinzip für die verschiedenen Gründachsysteme bleibt zumeist gleich. Die Zielvegetation wird vor allem durch die Höhe des Gründachaufbaus bestimmt. Dadurch werden auch die weiteren positiven Effekte, wie Verdunstungskühlung oder Niederschlagswasserrückhalt, des Dachbegrünungsaufbaus verändert. Der maßgebende Nachteil eines Gründachs ist dessen erhöhte Last, die das Dach aufnehmen muss. Jedoch

wird entgegen einer PV-Anlage auch die Dachabdichtung geschützt, wodurch die Lebensdauer des Daches verlängert werden kann. Der Ertrag der PV-Anlage wird insbesondere durch ihre Verlegung bestimmt, demnach ist auch das passende Montagesystem für die örtlichen Verhältnisse zu verwenden. Das PV-Gründach vereint die Wirkungen des Gründachs mit der PV-Anlage. Damit das funktioniert und sich beide Systeme nicht gegenseitig behindern, sollte die geeignete Vegetationsform mit einem aufgeständerten, ballastierten PV-Montagesystem verbunden werden, das einen Abstand zwischen Substrat und Modulunterkante von mindestens 20 bis 30 cm ermöglicht.

Die Kosten für die Herstellung und Instandhaltung ergeben sich abhängig der Dachnutzung aus verschiedenen Parametern. Ausschlaggebend ist vor allem die Größe der Anlage. Je kleiner die Fläche wird, desto höhere Kosten ergeben sich.

Ergebnisse AS5

Arbeitsschritt 5 erarbeitete eine Methodik für die Abschätzung der Wirkungen verschiedener Ausgestaltungsmöglichkeiten wie PV-Dächer, Gründächer und kombinierte PV-Gründächer. Hierzu stellt die Methodik für die Wirkungen Indikatoren auf und quantifiziert diese, soweit im Rahmen des Projektes möglich. Die Beschreibung dieser abschätzenden Quantifizierung ist Kern der obigen Dokumentation.

Für unterschiedliche Akteure haben bestimmte Wirkungen unterschiedliches Gewicht. Daher stellt die entwickelte Methodik die verschiedenen Wirkungen wertungsfrei nebeneinander. Unterschiedlichen Akteuren wird somit ein gleichberechtigter Zugang für eine Eignungseinschätzung gegeben. Die Anwendung der Methodik kann durch ein eigenentwickeltes, nicht-veröffentlichbares Excel-Tool erprobt werden, welches als zusätzliches Produkt des Arbeitsschrittes vom IÖW erstellt wurde. Im Allgemeinen wird ersichtlich, dass die Wirkungen einer PV-Anlage vorrangig auf der Mikroebene wirken und dementsprechende Akteure durch die Technologie vermehrt angesprochen werden (z. B. Eigentum innehabende Personen). Gerade die energetisch-betriebswirtschaftlichen Wirkungen stehen hier im Fokus. Die eher globalen Wirkungen von Gründächern werden demgegenüber vermehrt von Akteuren der Makroebene wahrgenommen (z. B. Stadtplanende). Kombinierte Systeme mögen in den untersuchten Wirkebenen (ökologisch, energetisch, betriebswirtschaftlich, regionalökonomisch, Lebensqualität und Gesundheit) zwar weniger starke Effekte zeigen. Die Gleichzeitigkeit aller Wirkungen macht diese Lösungen aber gerade für Objekte attraktiv, bei denen Interessen vieler Akteure berücksichtigt werden sollen.

Die hier beschriebene Methodik und die zu Grunde liegenden Wirkabschätzungen sind dabei im Detailgrad und Anpassbarkeit an den spezifischen Kontext beschränkt. Höhere Genauigkeiten und damit bessere Eignungsschätzungen bedürfen eines deutlich höheren Aufwands als im Rahmen des Projekts möglich war. Gleichzeitig zeigen die Methode und das begleitende Excel-Tool die Sinnhaftigkeit der Weiterentwicklung einer ganzheitlichen Wirkanalyse. Konzeptionell könnte bei einer Weiterentwicklung auch die semi-qualitative Bewertung, die mittels einer sechsstufigen Skaleneinteilung geschieht, überarbeitet werden. Für die abschätzenden Betrachtungen in dieser Studie ist diese zwar ausreichend, bei einem höherem Detailgrad zur Berechnung der einzelnen Indikatoren kann diese Bewertung jedoch viel feiner quantitativ ausgestaltet werden.

Die Wirkungen sind von vielen äußeren Faktoren abhängig, die sich beispielsweise durch regionale Gegebenheiten, technische Freiheitsgrade und das Objekt an sich ergeben. Auch bezüglich dieser Kontextspezifität bietet sich noch großes Weiterentwicklungspotenzial für die Methodik und dessen Umsetzung (z. B. in einem umfassenden Excel-Tool).

Ergebnisse AS7 und AS8

Da sie aufeinander aufbauen wurden die Arbeitsschritte 7 und 8 zusammengefasst behandelt. In einem ersten Schritt wurden wichtige Fragestellungen beantwortet, wie die klimagerechte Umsetzung von Dachflächen weiter gefördert werden kann. Darauffolgend wurden Hemmnisse identifiziert, welche diese Umsetzung auf verschiedenen Ebenen noch immer blockieren. Für die Hemmnisse wurden im gleichen Zuge entsprechende Lösungsansätze aufgezeigt, wie diese behoben werden können. Außerdem erhielten die Akteure erste Handlungsempfehlungen, um die Nutzung von Dachflächen zukünftig weiter zu fördern und Fehler und Hemmnisse zu vermeiden.

Die gängigen Fragestellungen wurden in drei Themenkomplexe unterteilt: "Institutioneller Rahmen und weitere Rahmenbedingungen", "Gebäudekategorien" und "Beteiligte Akteure". Durch die Beantwortung wird verschiedenen Akteuren eine Unterstützung anhand gegeben, was für den klimagerechten Umgang von Dachflächen zu beachten ist und in welchen Bereichen noch Handlungsbedarf besteht.

Empfohlen wird aus Sicht der Autorinnen und Autoren eine bundesweite Dachflächenstrategie, in welcher der Bund die Leitung übernehmen sollte und zusammen mit Ländern, Kommunen und weiteren externen Expertengruppen (z. B. Verbänden), strategischen Merkmale entwickelt, wie Dachflächen im Neubau und Bestand mit PV-Anlagen, Begrünung oder deren Kombination auszustatten sind. Ergänzend dazu sollte ein Bundesförderprogramm angestrebt werden, das die Förderung der verschiedenen Dachnutzungsanlagen entsprechend deren quartiers- und gebäudespezifischen Eignungen ermöglicht. Neben den Herstellkosten des Systems sollten weitere, damit einhergehende Kosten, wie planerische Mehrkosten, wurzelfeste Dachabdichtungen und ggf. Instandhaltungsmaßnahmen, mitgefördert werden. Weiterhin wird angeregt Regelwerke und Gesetze von Bund und Ländern sowie der direkt beteiligten und angrenzenden Gewerke für die optimale gebäudeübergreifende Dachnutzung zu prüfen und gegebenenfalls anzupassen.

Bestehende und geplante Solarverpflichtungen auf Bundes- und Länderebene sollten dahingehend überprüft und ggf. überarbeitet werden, dass diese weitere wichtige Dachnutzungsanlagen für Klimaschutz und Klimawandelanpassung (z. B. Gründächer) nicht ausschließen.

Eine fachgerechte Planung und Ausführung von Dachnutzungsanlagen sind essenziell für deren dauerhafte Funktion. Alle Beteiligten benötigen zunächst Planungssicherheit. Das heißt, die Kosten sind möglichst detailliert aufzuzeigen und strittige Themen zur Ausführung und Instandhaltung der Systeme sind unter den Akteuren zu diskutieren und zu lösen. In einem Bauablaufplan werden die Aufgaben, Abläufe und Übergänge der verschiedenen Gewerke aufgelistet. Die Instandhaltung der Dachnutzungsanlage sollte über mehrere Jahre sichergestellt werden.

Hemmnisse bei der Umsetzung von Dachnutzungsanlagen bestehen sowohl auf Ebene von Bund, Länder und Kommunen, sowie auch bei der Planung und Ausführung der Dachnutzungstypen. Häufig sind Nichtkenntnis, Vorurteile, fehlende Informationen im Bestandsbau und falsche Planung, aber auch fehlende oder nicht bedarfsgerechte Förderungen, der Grund dafür, dass die Nutzung von Dachflächen nicht zielführend umgesetzt wird. Zur Lösung dieser Hemmnisse sollten die verschiedenen Akteure entsprechend handeln. Bund, Länder und Kommunen könnten dabei eine tragende Rolle einnehmen und über Festsetzungen, Förderungen und schnellere Genehmigungsprozesse vorgeben, wie die Dächer in Deutschland klimagerecht genutzt werden könnten. Um zudem als positives Beispiel voran zu gehen, sollten öffentliche Gebäude quartiers- und gebäudegerecht mit Dachnutzungsanlagen ausgestattet werden. Zur Vermeidung von Planungs- und Baufehlern sollten insbesondere Planende und ausführende Betriebe, aber auch Projektentwickelnde, zu den unterschiedlichen Dachnutzungssystemen und deren Bedürfnisse geschult werden. Anderenfalls sind Fachpersonen in den Planungs- und Ausführungsprozess einzubinden. Die Fachverbände können als neutrale Plattform die Akteure bei der Ausarbeitung und Umsetzung ihrer Maßnahmen unterstützen. Sie stellen zudem jeweilige Handlungshilfen für die Akteure zur Verfügung, betreiben Aufklärung (z. B. über Seminare) und räumen Vorurteile zu den Dachnutzungssystemen aus.

Ergebnisse AS9

Die Verbreitung der Ergebnisse aus der Studie sowie die Zusammenführung von bereits bestehenden Erkenntnissen der klimagerechten Dachnutzung sollten in einem Informationsportal stattfinden, um die Möglichkeiten von PV, Gründächern und PV-Gründächern möglichst vielen Baubeteiligten anbieten zu können. Im Arbeitsschritt 9 wurden dafür Ansätze zu Inhalten und Struktur des Portals erarbeitet. Die angesprochene Zielgruppe sollten Beteiligte der Baubranche sein.

Des Weiteren wurde geprüft, welche Portale bereits bestehen und ob die Einbindung der neuen Inhalte in diesen Portalen sinnvoll ist. Da sich die Informationen jedoch sehr stark abgrenzen ist zu empfehlen, eine eigene Seite bzw. Unterseite mit eigener Domain zu erstellen, auf der schon die wichtigsten Grundlagen von PV, Gründach und PV-Gründach zusammengestellt sind und auf die die bereits bestehenden Portale verweisen können.

Als Datengrundlage wurden die relevantesten Webseiten für Photovoltaik, Gründächer und PV-Gründächer zusammengetragen.

Fazit und Ausblick

Im Rahmen der Studie „Strategien für klimagerechte Dachflächen“ wurde die Komplexität der nachhaltigen und klimaangepassten Dachflächengestaltung aufgezeigt. Die Forschungsfrage war, ob sich Photovoltaikanlagen und Dachbegrünungen gegenseitig ausschließen oder unter welchen Voraussetzungen eine Kombination der beiden Systeme auf einer Dachfläche möglich und sinnvoll ist. Hierzu wurden in neun Arbeitsschritten verschiedene Themen dargelegt und erörtert. Neben dem Bestandsbau lag der Fokus auch auf der klimagerechten Dachflächengestaltung im Neubau und wie diese zielgerichtet angegangen und gefördert werden kann.

Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass sich Photovoltaik und Dachbegrünung in vielen Fällen ergänzen können und die Kombination auf Grund ihrer vielfältigen Wirkungen bevorzugt anzustreben ist. Dennoch ist eine Kombination nicht in allen Fällen sinnvoll, da die verschiedenen Gebäude- und Quartierstypen und deren Nutzungsstrukturen jeweils unterschiedlichen sozio-technischen Anforderungen und Bedürfnissen unterliegen. Zum Teil ist die Nutzung eines speziellen Systems der PV-Anlage oder Dachbegrünung geeigneter. Zusätzlich sind insbesondere im Bestandsbau für eine nachträgliche Installation einer Dachnutzungsanlage (d. h. PV-Anlage, Gründach oder PV-Gründach) zahlreiche Indikatoren zu beachten, die unter Umständen einer Nachrüstung entgegenstehen. Insbesondere wenn zunächst umfangreiche Ertüchtigungsmaßnahmen für den Einbau der Dachnutzungsanlage erforderlich sind, kann dies eine Installation unwirtschaftlich machen. Ob sich die nachträgliche Installation einer Dachnutzungsanlage auf einem Bestandsgebäude lohnt, sollte daher per Einzelfallbetrachtung entschieden werden. Entscheidend sind vor allem auch die bautechnischen Gegebenheiten im Bestand. Der Statik der Dachfläche kommt hier eine entscheidende Bedeutung zu, bestimmt sie doch bei einer geeigneten Dachneigung die generelle Umsetzbarkeit eines Gründachs oder eines PV-Gründachs. Die Datenlage zur Beurteilung des deutschen Gebäudebestands hinsichtlich der verfügbaren Lastreserven ist jedoch gering. Dies schränkt vor allem auch mögliche Potenzialschätzungen stark ein.

Auch die Dachflächengröße ist relevant, da sie maßgeblich sowohl die Wirkungen als auch die Kosten und Sinnhaftigkeit des Dachnutzungstyps klarlegt. Kleine, beispielsweise durch Dachaufbauten oder Dachfenster stark fragmentierte Dachflächen sind gerade für Gründächer und PV-Gründächer schwer erschließbar. Diese Flächen können jedoch bei nicht zu großen Verschattungsverlusten gut für PV-Anlagen geeignet sein.

Gerade aufgrund der erhöhten bautechnischen Anforderungen bei (PV-)Gründächern gepaart mit einer geringen Verbreitung von Flachdächern im Vergleich zu stärker geneigten Dachflächen ist es empfehlenswert, bei geeigneten Dachflächen immer auch die Umsetzung als (PV-)Gründach zu prüfen. Entsprechende Anreize für Eigentum innehabenden Personen sollten geschaffen werden. Dies gilt im Speziellen für Stadtraumtypen bzw. Quartiere, bei denen eine hohe Dringlichkeit zur Umsetzung von Dachbegrünung besteht. Diese sind vor allem stark versiegelte und verdichtete Wohnquartiere. Da in diesen Stadtraumtypen jedoch auch ein hoher Bedarf an Energie besteht, ergibt sich ein verhältnismäßig hohes Konkurrenzpotenzial. Speziell bei größeren Dachflächen innerhalb dieser Quartierstypen können kombinierte Systeme eine Lösung für diesen Konflikt darstellen. Neben Stadtraumtypen mit vorrangiger Wohnnutzung gilt dies auch für Quartiere mit Nichtwohngebäuden (z. B. Verwaltungs- und Bürogebäude).

Die Erschließung des Potenzials der Gewerbegebäude (Produktionsstätten aber auch Hallenbauten etc.) wird jedoch vorrangig bei der Photovoltaik gesehen, da hier oftmals die Statik der Dachflächen als limitierender Faktor gesehen wird. Tiefergehende Analysen der Bestandsdachflächen und deren bautechnischen Eigenschaften erscheinen diesbezüglich dringend erforderlich.

Im Gegensatz dazu kann im Neubau auf die gebäude- und quartiersspezifischen Eigenschaften eingegangen werden und entsprechend eine PV-, Gründach- oder kombinierte Lösung zum Einsatz kommen. Wie bei den Bestandsgebäuden sind kombinierte Systeme gerade auch bei Neubauten in stark versiegelten Stadtraumtypen mit hoher Bevölkerungsdichte angezeigt, da sich hier eine hohe Dringlichkeit für beide Technologien ergibt. Hierzu könnten Kommunen besonders relevante Gebiete beispielsweise im Flächennutzungsplan gesondert ausweisen.

Die Variabilität der Systeme ist hoch. Für Gründach und Photovoltaik existieren für die meisten Dachtypen zielgerichtete Lösungen. Die Planung, Ausführung und Instandhaltung dieser beiden Dachnutzungstypen ist bei getrennter Umsetzung jedoch grundverschieden und obliegt teilweise unterschiedlichen Anforderungen an das Dach bzw. Gebäude. Da mit Blick auf Klima- und Biodiversitätsschutz sowie Klimawandelanpassung die Kombination aus beidem, also PV-Gründächer, die umfangreichste Wirkung entfalten, sind diese zu präferieren. Für PV-Gründächer müssen jedoch aufgrund der kombinierten Eignungskriterien beider Systeme (Gründach und Photovoltaik) mehr Faktoren berücksichtigt und insgesamt höhere Anforderungen erfüllt werden. Aufgrund dessen schrumpft das verfügbare Potenzial für PV-Gründächer gegenüber dem der reinen Gründächer nochmals. Limitierende Faktoren sind hier vor allem die erhöhten Kosten (Investitionen und laufende Kosten) sowie der erhöhte Planungs- und Installationsaufwand flankiert mit der entsprechenden Expertise der beteiligten Firmen.

Anhand der Analyse einer Vielzahl an Indikatoren aus unterschiedlichen Wirkebenen (energetisch, betriebswirtschaftlich, ökologisch, regionalökonomisch, Lebensqualität und Gesundheit) wurde angestrebt die Sinnhaftigkeit der unterschiedlichen Dachnutzungstypen für gängige System zu bewerten. Die Abschätzung dieser Wirkungen offenbart die Vorteile der kombinierten Lösung, vor allem bei größeren Dachflächen. Hier stellen sich für alle Wirkebenen hohe Effekte ein und gerade die relativ hohen Kostenunterschiede, die bei kleinen Dachflächen einen Hinderungsgrund darstellen sollten, können hier angeglichen werden.

Eine Unterstützung für Planungsakteure bei der Auswahl einer geeigneten Dachnutzungsanlage könnte in der Bündelung der Eignungsfaktoren einer Dachfläche und der Wirkanalyse der jeweiligen Umsetzungsvariante liegen. Im Rahmen dieser Studie wurde ein Grundstein für ein solches Werkzeug gelegt, in dem die entwickelte Bewertungsmethodik, die in der Quantifizierung der Wirkungen lediglich richtungsweisend sein konnte, begleitend in einem nichtveröffentlichbarem Excel-Tool umgesetzt („Wirk-Tool“). Auch wenn der Fokus des Gutachtens nicht auf der Entwicklung eines solchen multikriteriellen Tools lag und die Umsetzung dementsprechend oberflächlich ist, wurde dadurch ein wesentliches Verbesserungs- und Entwicklungspotenzial zur Planung klimagerechter Dachflächen identifiziert, welches in weiteren Arbeiten weiterverfolgt werden sollte. Dabei kann auch die Genauigkeit zur Quantifizierung der identifizierten Wirk-Indikatoren auf Gebäude- und Quartiersebene verbessert werden. Neben der Einschätzung der Wirkungen könnte das Tool ebenso eine Einschätzung der Eignung von PV-Anlagen, Gründächern und PV-Gründächern darstellen und somit ein wichtiger Baustein für eine klimagerechte Dachflächengestaltung werden.

Darüber hinaus listet diese Studie eine Reihe weiterer Maßnahmen auf, die zum Ziel haben, die Umsetzung von PV-Anlagen und Dachbegrünungen und deren Kombination auf Gebäuden im Neu- und Bestandsbau zu fördern und zahlreiche Hemmnisse in unterschiedlichen Bereichen und auf verschiedenen Ebenen, beginnend bei fehlendem Wissen zur Kombination von Gründächern und PV-Anlagen, über Vorurteile bezüglich Schäden bis hin zu nicht verfügbaren Informationen bei Bestandsgebäuden und fehlerhaften Ausschreibungen, abzubauen. Die Studie stellt dazu Ansätze und Handlungshilfen für die verschiedenen Akteure vor, die es in weiteren Studien zu bearbeiten gilt.

Vor allem Bund und Länder sind aus Sicht der Autorinnen und Autoren dazu aufgerufen, als Vorbilder voranzugehen und zur Thematik aufzuklären. Neben der Empfehlung zur Bereitstellung von Fördermitteln, um die Implementierung von insbesondere kombinierten Dachnutzungen finanziell zu

unterstützen, sollten ebenso alle geeigneten öffentlichen Gebäude mit einer entsprechenden Dachnutzungslösung ausgestattet werden. Gleichzeitig sollte die Verpflichtung von allen klimagerechten Dachnutzungsanlagen angestrebt werden. Für alle am Bau beteiligten Akteure sollte ggf. vom Bund ein Informationsportal zur klimagerechten Dachnutzung mit den wichtigsten Grundlagen zur Verfügung gestellt werden, um eine fachgerechte Planung, Ausführung und Instandhaltung und Fehlervermeidung zu gewährleisten.

Abschließend bleibt festzuhalten, dass es vor dem Hintergrund des Klimawandels künftig erforderlich sein wird, Gebäude und deren Dachflächen in der Planung nicht mehr als Einzelstrukturen im Stadtraum zu betrachten, sondern vielmehr in einem quartiersgerechten Maßstab als explizite Planungsgröße zu berücksichtigen. Das Gutachten kann hierfür als Basis dienen. Es zeigt insbesondere auf, dass beide Dachnutzungstypen ihre Berechtigung haben und bei der objektbezogenen Verwendung, ob separat oder in Kombination, in jedem Fall wertvolle Ergänzungen für eine klimagerechte Stadtentwicklung sind.

Zur Diskussion: Klimagerechte Dachflächen trotz Solardachpflichten?

Ausschließlichkeit vermeiden

PV-Anlagen sind eine nicht mehr wegzudenkende Maßnahme für die erneuerbare Energiegewinnung in Deutschland. Vor allem in besiedelten Gebieten können sie an Einzelgebäuden wirksam zur lokalen Stromerzeugung für den Eigenverbrauch oder zur Einspeisung genutzt werden. So ist es nicht verwunderlich, dass auf verschiedenen Ebenen (Bund, Länder, Kommunen) neben Förderprogrammen auch Solardachpflichten geplant oder gar initiiert wurden. Auch eine bundesweite Verpflichtung von PV-Anlagen (und Solarthermie) auf Dächern wird bereits diskutiert. Zudem werden auf europäischer Ebene die Mitgliedstaaten verpflichtet, ab 2027 zunächst für einige Nichtwohngebäude, später auch für Wohngebäude, Solardachpflichten einzuführen.

Eine Solardachpflicht kann Vorteile für Bund, Land bzw. Kommune bezüglich des Ausbaus erneuerbarer Energien und des Klimaschutzes bringen. Eine einseitige Solarpflicht kann jedoch zu Ziel- und Flächenkonflikten vor allem bei Flachdächern, die als begrünte Dächer noch andere Funktionen, wie Regenwasserrückhalt und Lebensraum zum Erhalt der biologischen Artenvielfalt übernehmen können, führen. Daher ist es ratsam weitere Dachnutzungen, wie beispielsweise Dachbegrünungen, nicht durch eine Solardachpflicht auszuschließen.

Vorteile der Technologien erkennen und nutzen

Gerade die Funktionen der Dachbegrünung werden bereits heute gefordert, um den Folgen des Klimawandels zu begegnen. Heiße Tage, Tropennächte, Hitze- und Dürreperioden in den Sommermonaten häufen sich. Zusätzlich zur Überhitzung treten vermehrt Starkregenereignisse auf, die aufgrund unterdimensionierter oder fehlender Entwässerungseinrichtungen und gleichzeitig starkem Oberflächenabfluss zu Überflutungen führen können. Darüber hinaus ist auch noch der Rückgang der heimischen Artenvielfalt zu beobachten. Die Nachverdichtungen und damit einhergehend steigende Flächenversiegelungen im städtischen Raum begünstigen diese Situationen noch weiter und verlangen daher nach entsprechenden Gegenmaßnahmen, wie Dachbegrünungen. Diese können ein wichtiger Baustein für eine nachhaltige und klimawandelgerechte, multifunktionale Dachlandschaft sein, indem sie folgende wichtige Funktionen erfüllen:

- Niederschlagswasserrückhalt,
- Verdunstungskühlung,
- Biodiversitätsförderung,
- CO₂- und Schadstoffbindung,

- Energieeinsparung,
- Lärminderung,
- Schutz der Dachabdichtung und
- Erholungs- und Aufenthaltsfläche (bei intensiver Dachbegrünung).

Das vorliegende Gutachten zeigt auf, dass sowohl PV als auch Dachbegrünung individuelle Vor- und Nachteile haben. Die Wirkungen beider Technologien manifestieren sich auf unterschiedlichen Ebenen. Während die Photovoltaik vor allem auf der Gebäudeebene wirkt (inkl. Vorteile für einzelne Akteure) sind die Benefits von Gründächern breiter und wirken über die Gebäudeebene hinaus vor allem auf Quartiersebene. Diese Unterschiede sollten bei der Ausgestaltung von Vorgaben und Pflichten zwingend mitbetrachtet werden und der Einsatz beider Technologien sowohl aus beispielsweise der Gebäude- als auch der Quartierebene evaluiert werden.

Dabei wurde in der Studie auch gezeigt, dass sich PV-Anlagen und Dachbegrünungen nicht ausschließen, sondern in Kombination als „PV-Gründächer“ Stand der Technik sind. Mit dieser Kombinationslösung wird sowohl Klimaschutz als auch Klimawandelanpassung umgesetzt und das auf schon bestehenden Flächen, ohne weitere Naturflächen in Anspruch zu nehmen.

PV-Gründächer sind vor allem in stark versiegelten und verdichteten Quartieren sinnvoll, die gleichzeitig einen hohen Energieverbrauch aufweisen, wie Ketten- und Zeilenhochhäuser, Blockrandbebauungen oder großmaßstäblicher Wohnungsbau, aber auch bei Nichtwohngebäuden, wie in Gewerbe- oder Geschäfts-, Büro- und Verwaltungsgebieten. Hier müssen Grünflächen als Ausgleich geschaffen und gleichzeitig dem hohen Energiebedarf Rechnung getragen werden.

Zusätzlich erzielt das PV-Gründach als Kombination von PV-Anlage und Dachbegrünung auf einer Fläche weitere positive Effekte, die über die systemspezifischen Wirkungen von PV-Anlagen und extensiven Gründächern hinausgehen. Das sind:

- Steigerung der Leistung von PV-Modulen durch Verdunstungskühlung des Gründachs,
- Vermeidung von Dachdurchdringungen bei der Befestigung der PV-Unterkonstruktion.
- Vermeidung mechanischer Beschädigung der Dachabdichtung durch Punktlasten beim Beschweren mit Betonsteinen o.ä. und Begehungen bei Wartungsgängen,
- Verhinderung von Brandweiterleitung (Dachbegrünungen gelten als „Harte Bedachung“) und
- mögliche Förderung der Artenvielfalt durch verschiedene Licht- und Feuchtigkeitsverhältnisse auf der Dachfläche.

Mögliche Folgen einer Solardachpflicht ohne Begrünung

Eine einseitig definierte Solardachpflicht würde zwar einen starken Zubau an Photovoltaik und den damit verbundenen positiven Effekten bewirken (z. B. hohe Wertschöpfung, hoher Anteil erneuerbarer Energien am Strommix, in Städten hohe Gleichzeitigkeit von Energieerzeugung und -verbrauch), könnte jedoch zur Folge haben, dass die Wirkungen der Dachbegrünung nicht genutzt werden und sich damit die Auswirkungen durch den Klimawandel sogar noch verschärfen.

Die Dachbegrünung vereint von der Herstellung über die Planung bis zur Ausführung verschiedene Gewerke. Es ist ein aufstrebendes und zukunftssträchtiges Arbeitsfeld in dem noch viel Potenzial liegt. Allein im Jahr 2022 sind in Deutschland 8,7 Millionen m² an neuer Gründachfläche hinzugekommen. Das jährliche Wachstum des Gründach-Marktes beträgt im Durchschnitt 7% (Mann et al. 2023). Es ist anzunehmen, dass dieser Wert in den kommenden Jahren sogar noch steigen wird und dadurch neben einer klimagerechten Dachflächennutzung auch weitere Arbeitsplätze entstehen.

Eine Vielzahl an Kommunen nutzen die Wirkungen der Dachbegrünung und setzen diese bei Vorgaben in Bebauungsplänen fest und bieten zahlreiche Förderprogramme an, um die Umsetzung von Gründächern zu unterstützen. In 2023 waren das 90% aller Kommunen mit mehr als 50.000 Einwohnenden, die Dachbegrünungen über Bebauungspläne festsetzen und 143 Kommunen deutschlandweit, die ein Förderprogramm zur Dachbegrünung anbieten. Diese positive Entwicklung steigt stetig an und immer mehr Städte fordern und fördern indirekt und direkt mittlerweile auch PV-Gründächer. Städte in Bundesländern, die jetzt schon eine Solarpflicht eingeführt haben, sind aktuell dem Zielkonflikt ausgesetzt, was sie bei kommunalen Festsetzungen von Dachbegrünungen in Bebauungsplänen tun sollen.

Solarpflicht zur Pflicht für klimagerechte Dachflächen erweitern

Verpflichtungen auf PV- und Gründachseite sollten so beschlossen werden, dass sie die jeweils andere Dachnutzung nicht ausschließen und im besten Fall sogar PV-Gründächer priorisieren, um den höchsten Effekt zu erzielen. Die Stadt Hamburg geht hier als positives Beispiel voran, indem ab 2027 alle Neubauten und Bestandsgebäude bei Dachsanierungen mit PV-Gründächern realisiert werden sollen (Pinzke, n.d.).

Folgende Empfehlungen werden getroffen, damit weiterhin eine klimagerechte Dachflächennutzung mit verschiedenen Dachnutzungstypen gewährleistet wird:

- Erarbeitung eines Bundesförderprogramms oder einer Bundesstrategie für eine ganzheitlich klimagerechte Dachnutzung.
- Einführung einer „Dachnutzungspflicht“, um sowohl PV-Anlagen als auch Gründächer und deren Kombination als PV-Gründächer festzuschreiben.
- Die Regelungen könnten entsprechend der Quartiers- bzw. Gebäudetypen getroffen werden (vgl. AS2 und AS5).
- Die nachträgliche Umwandlung von Flachdachflächen sollte entsprechend der quartiers- und gebäudespezifischen Eigenschaften, mit Fokus auf den kombinierten PV-Gründach-Lösungen, liegen.
- Bei Bestandsgebäuden sollte der Dachnutzungstyp mit der besten Eignung zur Umsetzung und dem höchsten Effekt auf das Quartier und das Gebäude mithilfe der im Gutachten aufgezeigten Indikatoren und des (noch weiter zu entwickelnden) „Wirk-Tools“ bestimmt werden.
- Der Fokus der nachträglichen Umwandlung von bestehenden Dachflächen mit PV-Anlagen sollte auf Schrägdächern über 10° liegen, da diese mit Gründächern nur aufwändig umzusetzen sind.
- Die Erstellung der Regularien für eine Bundesförderung, Bundesstrategie oder „Dachnutzungspflicht“ sollte in Zusammenarbeit mit den verschiedenen Interessengruppierungen (z. B. Branchen-Verbänden, Wissenschaft und Zivilgesellschaft) erfolgen.

Mitwirkende

Autorinnen und Autoren

Dr. Mann, Gunter (BuGG - Bundesverband GebäudeGrün e. V.)

Mollenhauer, Felix (BuGG - Bundesverband GebäudeGrün e. V.)

Landwehr, Rebecca (BuGG - Bundesverband GebäudeGrün e. V.)

Dr. Kegel, Jan (IÖW - Institut für ökologische Wirtschaftsforschung GmbH)

Möllney, Tobias (IÖW - Institut für ökologische Wirtschaftsforschung GmbH)

Welling, Malte (IÖW - Institut für ökologische Wirtschaftsforschung GmbH)

Unter Mitarbeit von: Martin, Peter (IÖW - Institut für ökologische Wirtschaftsforschung GmbH)

Kurzbiographien



Dr. Gunter Mann

Dr. Gunter Mann studierte Biologie in Tübingen (Thema der Diplomarbeit: „Ökologisch-faunistische Aspekte begrünter Dächer in Abhängigkeit vom Schichtaufbau“) und hatte Ende 1993 seinen ersten Kontakt zur Gründachbranche durch die Anstellung bei der Firma Optima-Süd, die seit dem Jahr 2000 als Optigrün international AG im Markt agiert. Dort war es bis 2018 Marketingleiter und Prokurist.

Von 1995-1998 fertigte er seine Dissertation „Vorkommen und Bedeutung von Bodentieren (Makrofauna) auf begrünten Dächern in Abhängigkeit von der Vegetationsform“ an. Gunter Mann war im Mai 2018 maßgeblich bei der Gründung des Bundesverband GebäudeGrün e.V. (BuGG) beteiligt und ist seitdem Präsident und Geschäftsführer des Branchenverbands.

Er ist seit vielen Jahren Betreuer verschiedener Diplom-, Bachelor- und Masterarbeiten, Referent bzw. Autor zahlreicher Fachvorträge und Veröffentlichungen zum Thema Dach- und Fassadenbegrünung.

Seit 2002 ist Gunter Mann Mitglied im FLL-Arbeitskreis Dachbegrünung und seit 2005 im zugehörigen Regelwerksausschuss (RWA). Ebenso ist er Mitglied der FLL-Regelwerksausschüsse „Verkehrsflächen auf Bauwerken“ und „Fassadenbegrünung“.



Felix Mollenhauer, M. Sc.

Felix Mollenhauer ist seit 2018 beim Bundesverband GebäudeGrün e.V. (BuGG) als Referent für Projektarbeit tätig. Seine Arbeitsschwerpunkte liegen in der technischen Beratung und Schulung der Gebäudebegrünung. Nach seinem Studium an der Hochschule Neubrandenburg im Bereich Landnutzungsplanung (M.Sc.) von 2010 bis 2016 war Felix Mollenhauer für die Optigrün international AG als Anwendungstechniker für Dach- und Fassadenbegrünung tätig. Herr Mollenhauer betreut mehrere Projektgruppen und arbeitet in nationalen und internationalen Forschungsprojekten zur Gebäudebegrünung mit.

**Rebecca Landwehr, M. Sc.**

Rebecca Landwehr (geb. Gohlke) studierte von 2014 bis 2020 Landschaftsarchitektur (B. Eng. und M. Sc.) an der Hochschule Geisenheim University. Seit 2018 arbeitet sie als Referentin für Projektarbeit beim Bundesverband GebäudeGrün e.V. (BuGG). Ihr Tätigkeitsschwerpunkt betrifft die Beratung von Städten zu kommunalen Förderinstrumenten der Dach- und Fassadenbegrünung. Frau Landwehr ist in mehreren Forschungsprojekten zur Gebäudebegrünung aktiv.

**Dr. Jan Kegel**

Dr. Jan Kegel studierte Umwelttechnik/Regenerative Energiesysteme (Bachelor/Master) an der HTW Berlin. Nach erfolgreichem Abschluss seines Promotionsstudiums im Bereich der physikalisch-chemischen Materialforschung zur solaren Wasserspaltung am Tyndall National Institute / University College Cork (Irland), arbeitete er als Entwicklungsingenieur an der Weiterentwicklung von Photovoltaikmodulen (AVANCIS GmbH). Seit März 2021 ist er als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Forschungsfeld „Nachhaltige Energiewirtschaft und Klimaschutz“ tätig. Sein Forschungsschwerpunkt liegt in der technischen Umsetzung Erneuerbarer Energien – im Speziellen der Photovoltaik – im energiesystemischen und gesamtgesellschaftlichen Kontext.

**Tobias Möllney, M. Sc.**

Tobias Möllney studierte von 2015 bis 2022 Sozialökonomie an der Universität Hamburg (B. A.) und Umwelt- und Ressourcenökonomik an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (M. Sc.). Am IÖW ist er seit Dezember 2022 als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Forschungs-bereich "Umweltökonomie und -politik" tätig.

Schwerpunkt seiner Arbeit ist die Quantifizierung und Bewertung von Ökosystemleistungen, darunter insbesondere regulierender Ökosystemleistungen urbanen Grüns und grüner Klimaanpassungsmaßnahmen.

**Malte Welling, M. Sc.**

Malte Welling studierte von 2010 bis 2016 Volkswirtschaftslehre (B. Sc.) an der Ludwig-Maximilians-Universität München und an der Universitat Pompeu Fabra in Barcelona, sowie Ökonomie und Philosophie (M. Sc.) an der London School of Economics. Anschließend arbeitete er für eine Berliner Politikberatung im Bereich nachhaltige Entwicklung und als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bundestag. Seit 2017 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter am IÖW im Forschungsfeld „Umweltökonomie und -politik“, wo er schwerpunktmäßig zu präferenzbasierter Bewertung von Ökosystemleistungen arbeitet. Ein Fokus liegt dabei auf Fragen der Wertschätzung und Akzeptanz sowie Kosten-Nutzen-Analysen von Klimaanpassungsmaßnahmen im urbanen Raum.

Verzeichnisse

Literaturverzeichnis

- Adélaïde, L.; Chanel, O.; Pascal, M., 2022: Health effects from heat waves in France: an economic evaluation. *Eur J Health Econ* 23, 119–131. Zugriff: <https://doi.org/10.1007/s10198-021-01357-2> [abgerufen am 27.08.2024].
- Albatayneh, A.; Albadaineh, R.; Juaidi, A.; Abdallah, R.; Montoya, M.D.G.; Manzano-Agugliaro, F., 2022: Rooftop photovoltaic system as a shading device for uninsulated buildings. *Energy Reports* 8, 4223–4232. Zugriff: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.03.082> [abgerufen am 27.08.2024].
- Aloisio, J.M.; Palmer, M.I.; Tuininga, A.R.; Lewis, J.D., 2020: Introduced and native plant species composition of vacant unmanaged green roofs in New York City. *Urban Ecosyst* 23, 1227–1238. Zugriff: <https://doi.org/10.1007/s11252-020-00992-6> [abgerufen am 27.08.2024].
- Appels, R.; Lefevre, B.; Herteleer, B.; Goverde, H.; Beerten, A.; Paesen, R.; De Medts, K.; Driesen, J.; Poortmans, J., 2013: Effect of soiling on photovoltaic modules. *Solar Energy* 96, 283–291. Zugriff: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.07.017> [abgerufen am 27.08.2024].
- Aretz, A.; Gährs, S.; Kegel, J., 2022a: Mieterstrom zukunftsfähig machen. *Ecornet Berlin Policy Brief* 3, 11.
- Aretz, A.; Ouanes, N.; Wiesenthal, J.; Petrick, K.; Hirschl, B., 2022b: Energiewende beschleunigen: Stromnetz für gemeinschaftliches Energy Sharing öffnen 8.
- Ascione, F.; Bianco, N.; de' Rossi, F.; Turni, G.; Vanoli, G.P., 2013: Green roofs in European climates. Are effective solutions for the energy savings in air-conditioning? *Applied Energy* 104, 845–859. Zugriff: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.068> [abgerufen am 27.08.2024].
- ASR A2.1 Schutz vor Absturz und herabfallenden Gegenständen, Betreten von Gefahrenbereichen, 2022: , Technische Regeln für Arbeitsstätten. Ausschuss für Arbeitsstätten.
- Bagherian, B.; Swiderek, S.; Hartung, A.; Bischof, J., 2021: Vergleichswerte für den Energieverbrauch von Nichtwohngebäuden. Herausgeber: BBSR – Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung. BBSR-Online-Publikation 37/2021. Bonn.
- Baumann, T.; Schär, D.; Carigiet, F.; Dreisiebner, A.; Baumgartner, F., 2016: Performance Analysis of PV Green Roof Systems. Zugriff: <https://doi.org/10.4229/EUPVSEC20162016-5CO.14.3> [abgerufen am 27.08.2024].
- BBSR – Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, 2017: Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB). Zugriff: https://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/Nutzungsdauer_Bauteile/BNB_Nutzungsdauern_von_Bauteilen_%C3%84nderungs%C3%BCbersicht_2017-02-24.pdf [abgerufen am 27.08.2024].
- Belcher, R.N.; Sadanandan, K.R.; Goh, E.R.; Chan, J.Y.; Menz, S.; Schroepfer, T., 2019: Vegetation on and around large-scale buildings positively influences native tropical bird abundance and bird species richness. *Urban Ecosyst* 22, 213–225. Zugriff: <https://doi.org/10.1007/s11252-018-0808-0> [abgerufen am 27.08.2024].
- Berardi, U., 2016: The outdoor microclimate benefits and energy saving resulting from green roofs retrofits. *Energy and Buildings* 121, 217–229. Zugriff: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.021> [abgerufen am 27.08.2024].

- Berardi, U.; GhaffarianHoseini, A.H.; GhaffarianHoseini, A., 2014: State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. *Applied Energy* 115, 411–428. Zugriff: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.047> [abgerufen am 27.08.2024].
- Berardi, U.; Graham, J., 2020: Investigation of the impacts of microclimate on PV energy efficiency and outdoor thermal comfort. *Sustainable Cities and Society* 62, 102402. Zugriff: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102402> [abgerufen am 27.08.2024].
- Bergner, J.; Siegel, B., 2021: PV-Wegweiser - Leitfaden für die Planung von PV-Anlagen und der solaren Eigenversorgung. HTW Berlin.
- Berliner Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Wohnen (Hrsg.), 2021: Flächennutzung und Stadtstruktur. Dokumentation der Kartiereinheiten und Aktualisierung des Datenbestandes 2020.
- BMVBS – Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.), 2013: Systematische Datenanalyse im Bereich der Nichtwohngebäude – Erfassung und Quantifizierung von Energieeinspar- und CO₂-Minderungspotenzialen. BMVBS-Online-Publikation 27/2013.
- Borg, M.A.; Xiang, J.; Anikeeva, O.; Pisaniello, D.; Hansen, A.; Zander, K.; Dear, K.; Sim, M.R.; Bi, P., 2021: Occupational heat stress and economic burdens: A review of global evidence. *Environmental Research* 195, 110781. Zugriff: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.110781> [abgerufen am 27.08.2024].
- Bozorg Chenani, S.; Lehvävirta, S.; Häkkinen, T., 2015: Life cycle assessment of layers of green roofs. *Journal of Cleaner Production* 90, 153–162. Zugriff: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.070> [abgerufen am 27.08.2024].
- Braaker, S.; Ghazoul, J.; Obrist, M.K.; Moretti, M., 2014: Habitat connectivity shapes urban arthropod communities: The key role of green roofs. *Ecology* 95, 1010–21. Zugriff: <https://doi.org/10.1890/13-0705.1> [abgerufen am 27.08.2024].
- Braaker, S.; Obrist, M.K.; Ghazoul, J.; Moretti, M., 2017: Habitat connectivity and local conditions shape taxonomic and functional diversity of arthropods on green roofs. *Journal of Animal Ecology* 86, 521–531. Zugriff: <https://doi.org/10.1111/1365-2656.12648> [abgerufen am 27.08.2024].
- Breitner, S.; Pickford, R.; Schneider, A., 2021: Interaktion von Temperatur und Luftschadstoffen: Einfluss auf Morbidität und Mortalität, in: Günster, C., Klauber, J., Robra, B.-P., Schmucker, C., Schneider, A. (Eds.), *Versorgungs-Report: Klima und Gesundheit*. Medizinisch Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, pp. 105–117. Zugriff: <https://doi.org/10.32745/9783954666270-8> [abgerufen am 27.08.2024].
- Breuste, J.; Pauleit, S.; Haase, D.; Sauerwein, M., 2016: *Stadtökosysteme: Funktion, Management und Entwicklung*, Lehrbuch. Springer Spektrum, Berlin/Heidelberg.
- Brombach, H.; Jüpner, R.; Müller, U.; Patt, H.; Richwien, W.; Vogt, R., 2013: Hochwasserschutzmaßnahmen, in: *Hochwasser-Handbuch: Auswirkungen Und Schutz*. Berlin/Heidelberg, pp. 519–443.
- Cascone, S.; Catania, F.; Gagliano, A.; Sciuto, G., 2018: A comprehensive study on green roof performance for retrofitting existing buildings. *Building and Environment* 136, 227–239. Zugriff: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.052> [abgerufen am 27.08.2024].
- Castiglia Feitosa, R.; Wilkinson, S., 2016: Modelling green roof stormwater response for different soil depths. *Landscape and Urban Planning* 153, 170–179. Zugriff: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.05.007> [abgerufen am 27.08.2024].

- Cavadini, G.B.; Cook, L.M., 2021: Green and cool roof choices integrated into rooftop solar energy modelling. *Applied Energy* 296, 117082. Zugriff: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117082> [abgerufen am 27.08.2024].
- Connelly, M.; Hodgson, M., 2011: Laboratory experimental investigation of the acoustical characteristics of vegetated roofs. *The Journal of the Acoustical Society of America* 129, 2393–2393. Zugriff: <https://doi.org/10.1121/1.3587778> [abgerufen am 27.08.2024].
- Connelly, M.R., 2011: Acoustical characteristics of vegetated roofs - contributions to the ecological performance of buildings and the urban soundscape. University of British Columbia. Zugriff: <https://doi.org/10.14288/1.0072314> [abgerufen am 27.08.2024].
- D'Agostino, D.; Parker, D.; Melià, P.; Dotelli, G., 2022: Optimizing photovoltaic electric generation and roof insulation in existing residential buildings. *Energy & Buildings* 111652.
- de Munck, C.; Lemonsu, A.; Masson, V.; Le Bras, J.; Bonhomme, M., 2018: Evaluating the impacts of greening scenarios on thermal comfort and energy and water consumptions for adapting Paris city to climate change. *Urban Climate, ICUC9: The 9th International Conference on Urban Climate* 23, 260–286. Zugriff: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.01.003> [abgerufen am 27.08.2024].
- de Wild-Scholten, M.J., 2013: Energy payback time and carbon footprint of commercial photovoltaic systems. *Solar Energy Materials and Solar Cells, Thin-film Photovoltaic Solar Cells* 119, 296–305. Zugriff: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.08.037> [abgerufen am 27.08.2024].
- Derksen, M.L.; van Teeffelen, A.J.A.; Verburg, P.H., 2015: REVIEW: Quantifying urban ecosystem services based on high-resolution data of urban green space: an assessment for Rotterdam, the Netherlands. *Journal of Applied Ecology* 52, 1020–1032. Zugriff: <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12469> [abgerufen am 27.08.2024].
- Dettmar, J.; Drebes, C.; Sieber, S., 2020: Energetische Stadtraumtypen - Strukturelle und energetische Kennwerte von Stadträumen. Fraunhofer IRB Verlag.
- DIN 1986-100, 2016: Entwässerungsanlagen für Gebäude und Grundstücke – Teil 100: Bestimmung in Verbindung mit DIN EN 752 und DIN EN 12065.
- D'Ippoliti, D.; Michelozzi, P.; Marino, C.; de'Donato, F.; Menne, B.; Katsouyanni, K.; Kirchmayer, U.; Analitis, A.; Medina-Ramón, M.; Paldy, A.; Atkinson, R.; Kovats, S.; Bisanti, L.; Schneider, A.; Lefranc, A.; Iñiguez, C.; Perucci, C.A., 2010: The impact of heat waves on mortality in 9 European cities: results from the EuroHEAT project. *Environmental Health* 9, 37. Zugriff: <https://doi.org/10.1186/1476-069X-9-37> [abgerufen am 27.08.2024].
- DWA-A 118, 2019: Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen, 4. Auflage, korrigierte Fassung: Stand September 2011. ed, DWA-Regelwerk Arbeitsblatt. DWA, Dt. Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser u. Abfall, Hennef.
- DWA-M 153, 2007: Merkblatt DWA-M 153 Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Regenwasser, Juli 2007, korrigierte Fassung Dezember 2020. ed. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, Hennef.
- EEA, 2022: Climate change as a threat to health and well-being in Europe: focus on heat and infectious diseases — European Environment Agency. Zugriff: <https://www.eea.europa.eu/publications/climate-change-impacts-on-health> [abgerufen am 27.08.2024].
- Enkhardt, S., 2021: Polarstern: Photovoltaik-Anlagen auf Gründächern bringen bis zu 8 Prozent mehr Leistung. *pv magazine*. Zugriff: <https://www.pv-magazine.de/2021/08/26/polarstern->

- photovoltaik-anlagen-auf-gruendaechern-bringen-bis-zu-8-prozent-mehr-leistung/#:~:text=Polarstern%20hat%20eine%20Untersuchung%20ver%C3%B6ffentlicht,auf%20einem%20Gr%C3%BCndach%20installiert%20wird [abgerufen am: 27.08.2024].
- Escobedo, F.J.; Nowak, D.J., 2009: Spatial heterogeneity and air pollution removal by an urban forest. *Landscape and Urban Planning* 90, 102–110. Zugriff: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2008.10.021> [abgerufen am 27.08.2024].
- Escobedo, F.J.; Wagner, J.E.; Nowak, D.J.; Maza, C.L.D. la; Rodriguez, M.; Crane, D.E., 2008: Analyzing the cost effectiveness of Santiago, Chile's policy of using urban forests to improve air quality. *Journal of Environmental Management*. 86: 148-157. 863.
- Eurostat, 2011: Degree of urbanisation classification - 2011 revision - Statistics Explained. Zugriff: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Degree_of_urbanisation_classification_-_2011_revision#Degree_of_urbanisation_classification [abgerufen am 27.08.2024].
- f.data GmbH, 2023: Baupreislexikon.de - Über 1.000.000 Bauleistungen. Baupreislexikon.de. Zugriff: <https://www.baupreislexikon.de> [abgerufen am 27.08.2024].
- Fleck, R.; Gill, R.; Pettit, T.J.; Torpy, F.R.; Irga, P.J., 2022: Bio-solar green roofs increase solar energy output: The sunny side of integrating sustainable technologies. *Building and Environment* 226, 109703. Zugriff: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109703> [abgerufen am 27.08.2024].
- Friedrich, R.; Kuhn, A., 2011: Integrated environmental health impact assessment for Europe: methods and results of the HEIMTSA/INTARESE Common Case Study (report). Stuttgart: Universität Stuttgart, IER. Zugriff: <https://doi.org/10.18419/opus-11913> [abgerufen am 27.08.2024].
- Frontini, F.; Caccivio, M.; Renken, C., 2019: Leitfaden bifaziale Module. energie Schweiz.
- Galbrun, L.; Scerri, L., 2017: Sound insulation of lightweight extensive green roofs. *Building and Environment* 116, 130–139. Zugriff: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.02.008> [abgerufen am 27.08.2024].
- Getter, K.L.; Rowe, D.B.; Robertson, G.P.; Cregg, B.M.; Andresen, J.A., 2009: Carbon Sequestration Potential of Extensive Green Roofs. *Environ. Sci. Technol.* 43, 7564–7570. Zugriff: <https://doi.org/10.1021/es901539x> [abgerufen am 27.08.2024].
- Giamaa, E.; Papageorgiou, C.; Theodoridou, I.; Papadopoulos, A., 2021: Life Cycle Analysis and Life Cycle Cost Analysis of green roofs in the Mediterranean climatic conditions: Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects: Vol 0, No 0.
- Heaviside, C.; Vardoulakis, S.; Cai, X.-M., 2016: Attribution of mortality to the urban heat island during heatwaves in the West Midlands, UK. *Environmental Health* 15, S27. Zugriff: <https://doi.org/10.1186/s12940-016-0100-9> [abgerufen am 27.08.2024].
- Hendarti, R., 2013: The Influence of the Evapotranspiration Process of Green Roof Tops on PV Modules in the Tropics.
- Hengstler, J.; Russ, M.; Stoffregen, A.; Hendrich, A.; Weidner, S., 2021: Aktualisierung und Bewertung der Ökobilanzen von Windenergie- und Photovoltaikanlagen unter Berücksichtigung aktueller Technologieentwicklungen.
- Herfort, S.; Tschukowa, S.; Ibañez, A., 2012: CO₂-Bindungsvermögen der für die Bauwerksbegrünung typischen Pflanzen.

- Hirschl, B.; Aretz, A.; Prah, A.; Böther, T.; Heinbach, K. (Eds.), 2010: Kommunale Wertschöpfung durch Erneuerbare Energien, Schriftenreihe des IÖW. Institut für ökologische Wirtschaftsforschung, Berlin.
- Hirschl, B.; Heinbach, K.; Prah, A.; Salecki, S.; Schröder, A.; Aretz, A.; Weiß, J., 2015: Wertschöpfung durch Erneuerbare Energien. Ermittlung der Effekte auf Länder- und Bundesebene. Schriftenreihe des IÖW.
- Hoferichter, A., 2010: Reaktion auf Montagefehler. photovoltaik-Magazin.
- Holland, M., 2014: Cost-benefit Analysis of Final Policy Scenarios for the EU Clean Air Package.
- Hörner, M.; Cischinsky, H.; Bischof, J.; Schwarz, S.; Behnisch, M.; Meinel, G.; Spars, G.; Busch, R., 2022: Repräsentative Primärdatenerhebung zur statistisch validen Erfassung und Auswertung der Struktur und der energetischen Qualität des Nichtwohngebäudebestands in Deutschland. (Schlussbericht), Forschungsdatenbank NichtWohnGebäude. Institut Wohnen und Umwelt GmbH, Darmstadt.
- Hou, G.; Sun, H.; Jiang, Z.; Pan, Z.; Wang, Y.; Zhang, X.; Zhao, Y.; Yao, Q., 2016: Life cycle assessment of grid-connected photovoltaic power generation from crystalline silicon solar modules in China. *Applied Energy* 164, 882–890. Zugriff: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.023> [abgerufen am 27.08.2024].
- Hsiang, S.M., 2010: Temperatures and cyclones strongly associated with economic production in the Caribbean and Central America. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107, 15367–15372. Zugriff: <https://doi.org/10.1073/pnas.1009510107> [abgerufen am 27.08.2024].
- Hui, S.C.M.; Chan, S., 2011: Integration of green roof and solar photovoltaic systems.
- Imran, H.M.; Kala, J.; Ng, A.W.M.; Muthukumar, S., 2018: Effectiveness of green and cool roofs in mitigating urban heat island effects during a heatwave event in the city of Melbourne in southeast Australia. *Journal of Cleaner Production* 197, 393–405. Zugriff: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.179> [abgerufen am 27.08.2024].
- Ioannou, L.G.; Tsoutsoubi, L.; Samoutis, G.; Bogataj, L.K.; Kenny, G.P.; Nybo, L.; Kjellstrom, T.; Flouris, A.D., 2017: Time-motion analysis as a novel approach for evaluating the impact of environmental heat exposure on labor loss in agriculture workers. *Temperature (Austin)* 4, 330–340. Zugriff: <https://doi.org/10.1080/23328940.2017.1338210> [abgerufen am 27.08.2024].
- Irga, P.; Fleck, R.; Wooster, E.; Torpy, F.; Pettit, T.; Gill, R.; Ball, J., 2021: Green Roof & Solar Array – Comparative Research Project Final Report July 2021 (Report). City of Sydney Council.
- IWU, 2020: Institut Wohnen und Umwelt (IWU): Gradtagzahlen Deutschland. Zugriff: <https://www.iwu.de/publikationen/fachinformationen/energiebilanzen/#c205> [abgerufen am 27.04.2023].
- Jahanfar, A.; Drake, J.; Sleep, B.; Margolis, L., 2016: Shading Effects of Photovoltaic Panels on the Evapotranspiration Process in Extensive Green Roofs.
- Jang, H.S.; Lee, S.; Jeon, J.Y.; Kang, J., 2015: Evaluation of road traffic noise abatement by vegetation treatment in a 1:10 urban scale model. *The Journal of the Acoustical Society of America* 138, 3884–3895. <https://doi.org/10.1121/1.4937769>.
- Janhäll, S., 2015: Review on urban vegetation and particle air pollution – Deposition and dispersion. *Atmospheric Environment* 105, 130–137. Zugriff: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.01.052> [abgerufen am 27.08.2024].

- Japan Refrigeration and Air Conditioning Industry Association (JRAIA), 2022: *世界のエアコン需要推定 - Geschätzte weltweite Nachfrage nach Klimageräten.*
- Jim, C.Y., 2014: Air-conditioning energy consumption due to green roofs with different building thermal insulation. *Applied Energy* 128, 49–59. Zugriff: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.055> [abgerufen am 27.08.2024].
- Jones, L.; Vieno, M.; Fitch, A.; Carnell, E.; Steadman, C.; Cryle, P.; Holland, M.; Nemitz, E.; Morton, D.; Hall, J.; Mills, G.; Dickie, I.; Reis, S., 2019: Urban natural capital accounts: developing a novel approach to quantify air pollution removal by vegetation. *Journal of Environmental Economics and Policy* 8, 413–428. Zugriff: <https://doi.org/10.1080/21606544.2019.1597772> [abgerufen am 27.08.2024].
- Kaiser, M., 2022: Dachbegrünung im Bestand – Konzeptionelle Ansätze für eine Weiterentwicklung von Dachbegrünungspotenzialkatastern.
- Kegel, J.; Lenk, C.; Ouanes, N.; Wiesenthal, J.; Weiß, J., 2022: *Prosumerverhalten und Energiewende.* IÖW, Berlin.
- Khomenko, S.; Cirach, M.; Pereira-Barboza, E.; Mueller, N.; Barrera-Gómez, J.; Rojas-Rueda, D.; de Hoogh, K.; Hoek, G.; Nieuwenhuijsen, M., 2021: Premature mortality due to air pollution in European cities: a health impact assessment. *The Lancet Planetary Health* 5, e121–e134. Zugriff: [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(20\)30272-2](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(20)30272-2) [abgerufen am 27.08.2024].
- Klugmann-Radziemska, E., 2015: Degradation of electrical performance of a crystalline photovoltaic module due to dust deposition in northern Poland. *Renewable Energy* 78, 418–426. Zugriff: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.01.018> [abgerufen am 27.08.2024].
- Knaus, M.; Haase, D., 2020: Green roof effects on daytime heat in a prefabricated residential neighbourhood in Berlin, Germany. *Urban Forestry & Urban Greening* 53, 126738. Zugriff: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126738> [abgerufen am 27.08.2024].
- Köhler, M.; Kaiser, D., 2021: Green Roof Enhancement on Buildings of the University of Applied Sciences in Neubrandenburg (Germany) in Times of Climate Change. *Atmosphere* 12, 382. Zugriff: <https://doi.org/10.3390/atmos12030382> [abgerufen am 27.08.2024].
- Köhler, M.; Malorny, W., 2009: Wärmeschutz durch extensive Gründächer. *Europäischer Sanierungskalender* 195–212.
- Köhler, M.; Mann, G.; Appl, R., 2012: *Handbuch Bauwerksbegrünung. Planung – Konstruktion – Ausführung*, 1st ed. Rudolf Müller, Köln.
- Köhler, M.; Wiartalla, W.; Feige, R., 2007: Interaction Between PV-Systems and Extensive Green Roofs, in: *Session 3.3: Energy and Thermal Performance. Presented at the The Fifth Annual Greening Rooftops for Sustainable Communities Conference.*
- Korinke, E.; Bensch, F., 2016: Potenziale und Rahmenbedingungen von Dachaufstockungen und Dachausbauten.
- Korjenic, A.; Tudiwer, D.; Penaranda Moren, M.S.; Hollands, J.; Salonen, T.; Mitterböck, M.; Pitha, U.; Zluwa, I.; Stangl, R.; Kräftner, J.; Gump, K.; Becker, G., 2019: Hocheffiziente Fassaden- und Dachbegrünung mit Photovoltaik-Kombination. *Bundesministerium Verkehr, Innovation und Technologie*, Wien.
- Kost, C.; Shammugam, S.; Fluri, V.; Peper, D.; Memar, A.D.; Schlegel, T., 2021: *STROMGESTEHUNGSKOSTEN ERNEUERBARE ENERGIEN.* Fraunhofer ISE.

- Kratschmer, S.; Kriechbaum, M.; Pachinger, B.; 2018: Buzzing on top: Linking wild bee diversity, abundance and traits with green roof qualities. *Urban Ecosyst* 21, 429–446. Zugriff: <https://doi.org/10.1007/s11252-017-0726-6> [abgerufen am 27.08.2024].
- Kruse, E.; Rodríguez Castillejos, Z., 2017: Überflutungs- und Hitzevorsorge in Hamburger Stadtquartieren: Wissensdokument, 1. Auflage. ed. Tutech Verlag, Hamburg.
- Kuhn, A., 2010: Input-Outputrechnung im Überblick. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.
- Kumar, R.; Kaushik, S.C., 2005: Performance evaluation of green roof and shading for thermal protection of buildings. *Building and Environment* 40, 1505–1511. Zugriff: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.11.015> [abgerufen am 27.08.2024].
- Kuronuma, T.; Watanabe, H.; Ishihara, T.; Kou, D.; Touda, K.; Ando, M.; Shindo, S., 2018: CO₂ Payoff of Extensive Green Roofs with Different Vegetation Species. *Sustainability* 10, 2256. Zugriff: <https://doi.org/10.3390/su10072256> [abgerufen am 27.08.2024].
- Kyrö, K.; Kotze, D.J.; Müllner, M.A.; Hakala, S.; Kondorosy, E.; Pajunen, T.; Vilisics, F.; Lehvavirta, S., 2020: Vegetated roofs in boreal climate support mobile open habitat arthropods, with differentiation between meadow and succulent roofs. *Urban Ecosyst* 23, 1239–1252. Zugriff: <https://doi.org/10.1007/s11252-020-00978-4> [abgerufen am 27.08.2024].
- Laaidi, K.; Zeghnoun, A.; Dousset, B.; Bretin, P.; Vandentorren, S.; Giraudet, E.; Beaudeau, P., 2012: The Impact of Heat Islands on Mortality in Paris during the August 2003 Heat Wave. *Environmental Health Perspectives* 120, 254–259. Zugriff: <https://doi.org/10.1289/ehp.1103532> [abgerufen am 27.08.2024].
- Lalosevic, M.; Komatina, M.; Milos, M.; Rudonja, N., 2018: Green roofs and cool materials as retrofitting strategies for urban heat Island mitigation - Case study in Belgrade, Serbia. *Thermal Science* 2018, 86–86. Zugriff: <https://doi.org/10.2298/TSCI171120086L> [abgerufen am 27.08.2024].
- Lamnatou, Chr.; Chemisana, D., 2014: Photovoltaic-green roofs: An experimental evaluation of system performance. *Applied Energy* 119, 246–256. Zugriff: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.12.027> [abgerufen am 27.08.2024].
- Langner, M.; Kull, M.; Endlicher, W.R., 2011: Determination of PM₁₀ deposition based on antimony flux to selected urban surfaces. *Environmental Pollution, Selected papers from the conference Urban Environmental Pollution: Overcoming Obstacles to Sustainability and Quality of Life (UEP2010)*, 20-23 June 2010, Boston, USA 159, 2028–2034. Zugriff: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.01.017> [abgerufen am 27.08.2024].
- Leimbach, S.; Brendt, T.; Ebert, G.; Jackisch, N.; Zieger, F.; Kramer, S., 2018: Regenwasserbewirtschaftungsanlagen in der Praxis: Betriebssicherheit, Kosten und Unterhaltung. Zugriff: <https://doi.org/10.6094/UNIFR/16551> [abgerufen am 27.08.2024].
- LENA, 2018: STROM AUS PHOTOVOLTAIKANLAGEN ZUR EIGENVERSORGUNG.
- Lenk, C.; Torliene, L.; Weiß, J.; Wiesenthal, J., 2022: Wie wirken Rebound-Effekte von Prosumern? IÖW, Berlin.
- Li, D.; Bou-Zeid, E.; Oppenheimer, M., 2014: The effectiveness of cool and green roofs as urban heat island mitigation strategies. *Environ. Res. Lett.* 9, 055002. Zugriff: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/5/055002> [abgerufen am 27.08.2024].
- Li, X.; Chow, K.H.; Zhu, Y.; Lin, Y., 2016: Evaluating the impacts of high-temperature outdoor working environments on construction labor productivity in China: A case study of rebar workers. *Building and Environment* 95, 42–52. Zugriff: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.09.005> [abgerufen am 27.08.2024].

- Liu, W.; Feng, Q.; Chen, W.; Wei, W., 2020: Assessing the runoff retention of extensive green roofs using runoff coefficients and curve numbers and the impacts of substrate moisture. *Hydrology Research* 51, 635–647. Zugriff: <https://doi.org/10.2166/nh.2020.167> [abgerufen am 27.08.2024].
- Loga, T.; Diefenbach, N.; Stein, B.; Born, R., 2012: TABULA – Scientific Report Germany Further Development of the German Residential Building Typology.
- Loga, T.; Stein, B.; Diefenbach, N., Born, R. (Eds.), 2015: Deutsche Wohngebäudetypologie: beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden, 2., erw. Aufl. ed. IWU, Darmstadt.
- Lösken, G.; Ansel, W.; Backhaus, T., 2018: Dachbegrünungsrichtlinien - Richtlinien für Planung, Bau und Instandhaltung von Dachbegrünungen. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V., Bonn.
- Maclvor, J.S., 2016: Building height matters: nesting activity of bees and wasps on vegetated roofs. *Israel Journal of Ecology and Evolution* 62, 88–96. Zugriff: <https://doi.org/10.1080/15659801.2015.1052635> [abgerufen am 27.08.2024].
- Madre, F.; Vergnes, A.; Machon, N.; Clergeau, P., 2014: Green roofs as habitats for wild plant species in urban landscapes: First insights from a large-scale sampling. *Landscape and Urban Planning* 122, 100–107. Zugriff: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.11.012> [abgerufen am 27.08.2024].
- Maniak, U., 2016: Hydrologie und Wasserwirtschaft: Eine Einführung für Ingenieure. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. Zugriff: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-49087-7> [abgerufen am 27.08.2024].
- Mann, G.; Fischer, B.; Fischer, S.; Gohlke, R.; Mollenhauer, F.; Wolff, F.; Köhler, M.; Pfoser, N., 2021: Förderrichtlinie Dach- und Fassadenbegrünung - Machbarkeitsstudie (Endbericht No. SWD – 10.08.86.16.5). Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung.
- Mann, G.; Gohlke, R.; Haase, D., 2023: BuGG-Marktreport Gebäudegrün 2023 Dach-, Fassaden- und Innenraumbegrünung Deutschland.
- Mann, G.; Gohlke, R.; Wolff, F., 2022: BuGG-Marktreport Gebäudegrün 2022 Dach-, Fassaden- und Innenraumbegrünung Deutschland.
- Mann, G.; Mollenhauer, F., 2020a: BuGG-Fachinformation "Leitfaden zur Absturzsicherung - Dachbegrünung."
- Mann, G.; Mollenhauer, F., 2020b: BuGG-Fachinformation Solar-Gründach. Bundesverband GebäudeGrün e. V.
- Märtel, C., 2023: Ist Photovoltaik auf einem Asbestdach verboten? Geltendes Recht. photovoltaik-web.de. Zugriff: <https://www.photovoltaik-web.de/photovoltaik/dacheignung/pv-auf-asbestdach> [abgerufen am 8.11.2022].
- Matthey, A.; Bünger, B., 2020: Methodenkonvention 3.1 zur Ermittlung von Umweltkosten, Kostensätze. Umweltbundesamt.
- Meinecke, S.; Sarajlić, D.; Drauz, S.R.; Klettke, A.; Lauen, L.-P.; Rehtanz, C.; Moser, A.; Braun, M., 2020: SimBench—A Benchmark Dataset of Electric Power Systems to Compare Innovative Solutions Based on Power Flow Analysis. *Energies* 13, 3290. Zugriff: <https://doi.org/10.3390/en13123290> [abgerufen am 27.08.2024].
- Menke, P.; Thönnessen, M.; Beckröge, W.; Bauer, J.; Schwarz, H.; Groß, W.; Hiemstra, J.A.; Schoenmaker-van der Bijl, E.; Tonneijk, A.E.G., 2013: Bäume und Pflanzen lassen Städte atmen. Schwerpunkt – Feinstaub. Düsseldorf.

- Mitchell, R., Maher, B.A., 2009: Evaluation and application of biomagnetic monitoring of traffic-derived particulate pollution. *Atmospheric Environment* 43, 2095–2103. Zugriff: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.01.042> [abgerufen am 27.08.2024].
- Morakinyo, T.E.; Dahanayake, K.W.D.; Kalani.C.; Ng, E.; Chow, C.L., 2017: Temperature and cooling demand reduction by green-roof types in different climates and urban densities: A co-simulation parametric study. *Energy and Buildings* 145, 226–237. Zugriff: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.066> [abgerufen am 27.08.2024].
- Muller, J.N.; Loh, S.; Braggion, L.; Cameron, S.; Firn, J.L., 2014: Diverse urban plantings managed with sufficient resource availability can increase plant productivity and arthropod diversity. *Frontiers in Plant Science* 5.
- Müller, V., 2018: Ist eine Errichtung urbaner Nutzgärten auf den Dächern typischer ostdeutscher Plattenbauten der Wohnbauserie 70 möglich? Welche Möglichkeiten ergeben sich in Neubrandenburgs Rückbaugelände, dem Datzeviertel? (Masterarbeit). Zugriff: https://digibib.hs-nb.de/mcviewer/recordIdentifier/dbhsnb_thesis2017-0374/Masterarbeit-Mueller-2017.pdf?page=1 [abgerufen am 27.08.2024].
- MWIKE NRW, 2022: Wirtschaftlichkeit und Förderung. Zugriff: <https://www.pv-auf-gewerbe.nrw/pv-auf-ihrem-dach/wirtschaftlichkeit-und-foerderung> [abgerufen am 04.10.2023].
- Nagengast, A.; Hendrickson, C.; Scott Matthews, H., 2013: Variations in photovoltaic performance due to climate and low-slope roof choice. *Energy and Buildings* 64, 493–502. Zugriff: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.05.009> [abgerufen am 27.08.2024].
- Nash, C.; Clough, J.; Gedge, D.; Lindsay, R.; Newport, D.; Ciupala, M.A.; Connop, S., 2016: Initial insights on the biodiversity potential of biosolar roofs: a London Olympic Park green roof case study. *Israel Journal of Ecology and Evolution* 62, 74–87. Zugriff: <https://doi.org/10.1080/15659801.2015.1045791> [abgerufen am 27.08.2024].
- Niinemets, Ü.; Tobias, M., 2019: Canopy leaf area index at its higher end: dissection of structural controls from leaf to canopy scales in bryophytes. *New Phytologist* 223, 118–133. Zugriff: <https://doi.org/10.1111/nph.15767> [abgerufen am 27.08.2024].
- Osma, G.; Ordonez, G.; Hernandez, E.; Quintero, L.; Torres, M., 2016: The impact of height installation on the performance of PV panels integrated into a green roof in tropical conditions. pp. 147–156. Zugriff: <https://doi.org/10.2495/EQ160141> [abgerufen am 27.08.2024].
- Osma-Pinto, G.; Ordóñez-Plata, G., 2019: Measuring factors influencing performance of rooftop PV panels in warm tropical climates. *Solar Energy* 185, 112–123. Zugriff: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.04.053> [abgerufen am 27.08.2024].
- Peng, J.; Lu, L.; Yang, H., 2013: Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 19, 255–274. Zugriff: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.035> [abgerufen am 27.08.2024].
- Peng, L.L.H.; Jim, C.Y., 2013: Green-Roof Effects on Neighborhood Microclimate and Human Thermal Sensation. *Energies* 6, 598–618. Zugriff: <https://doi.org/10.3390/en6020598> [abgerufen am 27.08.2024].
- Peri, G.; Traverso, M.; Finkbeiner, M.; Rizzo, G., 2012: Embedding “substrate” in environmental assessment of green roofs life cycle: evidences from an application to the whole chain in a Mediterranean site. *Journal of Cleaner Production* 35, 274–287. Zugriff: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.05.038> [abgerufen am 27.08.2024].

- Pfoser, N.; Jenner, N.; Henrich, J.; Heusinger, J.; Weber, S., 2013: Gebäude Begrünung Energie Potenziale und Wechselwirkungen. Darmstadt.
- Philipps, D.S.; Bett, A.; Burger, B.; Friedrich, L.; Kost, C.; Nold, S.; Peper, D.; Preu, R.; Rentsch, J.; Stryi-Hipp, G.; Wirth, H.; Warmuth, W., 2023: Photovoltaics Report.
- photovoltaikforum.com, 2023: Angebote EEG Photovoltaikanlage. Zugriff: <https://www.photovoltaikforum.com/board/41-angebote-eeg-photovoltaikanlage/> [abgerufen am 28.04.2023].
- Pinzke, R., n.d.: Hamburger Senat bringt CO₂-neutralen Umbau der Stadt weiter voran. GebäudeGrün 4/2023, 18–21.
- Pugh, T.A.M.; MacKenzie, A.R.; Whyatt, J.D.; Hewitt, C.N., 2012: Effectiveness of Green Infrastructure for Improvement of Air Quality in Urban Street Canyons. *Environ. Sci. Technol.* 46, 7692–7699. Zugriff: <https://doi.org/10.1021/es300826w> [abgerufen am 27.08.2024].
- Quaschnig, V., 2013: Regenerative Energiesysteme, 8th ed. München.
- Ramirez-Garcia, J.; Almendros, P.; Quemada, M., 2012: Ground cover and leaf area index relationship in a grass, legume and crucifer crop. *Plant Soil Environ.* 58, 385–390. Zugriff: <https://doi.org/10.17221/195/2012-PSE> [abgerufen am 27.08.2024].
- REEEM Project, 2019: REEEM-D5.2_Focus Report on Health Impacts and External Costs due to Air Pollution. Zugriff: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3368530> [abgerufen am 27.08.2024].
- Sahu, S.; Sett, M.; Kjellstrom, T., 2013: Heat exposure, cardiovascular stress and work productivity in rice harvesters in India: implications for a climate change future. *Ind Health* 51, 424–431. Zugriff: <https://doi.org/10.2486/indhealth.2013-0006> [abgerufen am 27.08.2024].
- Salamanca, F.; Georgescu, M.; Mahalov, A.; Moustou, M.; Martilli, A., 2016: Citywide Impacts of Cool Roof and Rooftop Solar Photovoltaic Deployment on Near-Surface Air Temperature and Cooling Energy Demand. *Boundary-Layer Meteorol* 161, 203–221. Zugriff: <https://doi.org/10.1007/s10546-016-0160-y> [abgerufen am 27.08.2024].
- Salecki, S., 2017: Wertschöpfung vor Ort: Quantifizierung ökonomischer Faktoren der regionalen Nutzung erneuerbarer Energien., 1st ed. Berlin.
- Sander, T., 2022: Brandschutzmaßnahmen bei Planung und Installation von PV-Anlagen. Bad Staffelstein.
- Schärer, L.A.; Busklein, J.O.; Sivertsen, E.; Muthanna, T.M., 2020: Limitations in using runoff coefficients for green and gray roof design. *Hydrology Research* 51, 339–350. Zugriff: <https://doi.org/10.2166/nh.2020.049> [abgerufen am 27.08.2024].
- Schenk, D.; Tonedde, M.; Krüger, H.; Leupold, D.; Löcherbach, J.; Antunes, M., 2021: BuGG-Fachinformation „Wurzelfeste Produkte für begrünte Dächer (BuGG-WBB-Liste) 2021“.
- Schindler, B.Y.; Blank, L.; Levy, S.; Kadas, G.; Pearlmutter, D.; Blaustein, L., 2016: Integration of photovoltaic panels and green roofs: review and predictions of effects on electricity production and plant communities. *Israel Journal of Ecology and Evolution* 62, 68–73. Zugriff: <https://doi.org/10.1080/15659801.2015.1048617> [abgerufen am 27.08.2024].
- Schindler, B.Y.; Blaustein, L.; Lotan, R.; Shalom, H.; Kadas, G.J.; Seifan, M., 2018: Green roof and photovoltaic panel integration: Effects on plant and arthropod diversity and electricity production. *Journal of Environmental Management* 225, 288–299. Zugriff: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.017> [abgerufen am 27.08.2024].

- Schleicher, T.; Liu, R.; Gröger, J.; Heubes, J.; Radermacher, P., 2018: The Blue Angel for Stationary Room Air Conditioners – market analysis, technical developments and regulatory framework for criteria development. Dessau-Roßlau.
- Schröder, A.; Zimmermann, K., 2014: Erstellung Regionaler Input-Output-Tabellen. Ein Vergleich existierender Ansätze und ihre Anwendung für die deutsche Ostseeküstenregion (No. 33), RADOST-Berichtsreihe.
- Schultz, I.; Sailor, D.J.; Starry, O., 2018: Effects of substrate depth and precipitation characteristics on stormwater retention by two green roofs in Portland OR. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 18, 110–118. Zugriff: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.06.008> [abgerufen am 27.08.2024].
- Schulz, H.; Karrasch, S.; Bolke, G.; Cyrus, J.; Hornberg, C.; Pickford, R.; Schneider, A.; Witt, C.; Hoffmann, B., 2019: Atmen: Luftschadstoffe und Gesundheit. *Pneumologie* 73.
- Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, 2010: Konzepte der Regenwasserbewirtschaftung - Gebäudebegrünung, Gebäudekühlung - Leitfaden für Planung, Bau, Betrieb und Wartung. Berlin.
- SenWEB Berlin, 2022: Förderrichtlinie SolarPLUS.
- Sett, M.; Sahu, S., 2014: Effects of occupational heat exposure on female brick workers in West Bengal, India. *Glob Health Action* 7, 21923. Zugriff: <https://doi.org/10.3402/gha.v7.21923> [abgerufen am 27.08.2024].
- Sharma, A.; Conry, P.; Fernando, H.; Hamlet, A.; Hellmann, J.; Chen, F., 2016: Green and cool roofs to mitigate urban heat island effects in the Chicago metropolitan area: Evaluation with a regional climate model. *Environmental Research Letters* 11, 064004. Zugriff: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/6/064004> [abgerufen am 27.08.2024].
- Silva, C.M.; Gomes, M.G.; Silva, M., 2016: Green roofs energy performance in Mediterranean climate. *Energy and Buildings* 116, 318–325. Zugriff: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.01.012> [abgerufen am 27.08.2024].
- SOEP, 2020: SOEP-Core Panel Data: dwelling with air conditioner. Zugriff: <https://paneldata.org/soep-core/datasets/hl/hlf0034> [abgerufen am 17.02.2023].
- Söfker, W. (Ed.), 2022: Baugesetzbuch, 54. Auflage, Stand: 1. September 2022, Sonderausgabe. München.
- SolarPower Europe, 2021: EU Market Outlook For Solar Power 2021 - 2025. Brüssel.
- Somanathan, E.; Somanathan, R.; Sudarshan, A.; Tewari, M., 2021: The Impact of Temperature on Productivity and Labor Supply: Evidence from Indian Manufacturing. *Journal of Political Economy* 129, 1797–1827. Zugriff: <https://doi.org/10.1086/713733> [abgerufen am 27.08.2024].
- Speak, A.F.; Rothwell, J.J.; Lindley, S.J.; Smith, C.L., 2012: Urban particulate pollution reduction by four species of green roof vegetation in a UK city. *Atmospheric Environment* 61, 283–293. Zugriff: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.07.043> [abgerufen am 27.08.2024].
- Spilker, R.; Liebert, G.; Zöller, M.; Oswald, M.; Haselhuhn, R.; Siegfriedt, U., 2019: Solaranlagen auf geeigneten Dachflächen im Gebäudebestand, Forschungsinitiative Zukunft Bau. Stuttgart.
- Stadtwerke Gießen, ohne Datum: Informationen für Büros und Verwaltungen Optimaler Einsatz von Energie. Gießen.
- Starry, O., 2013: The comparative effects of three sedum species on green roof stormwater retention. *Ann Arbor*.

- Statistisches Bundesamt, 2022: Stromverbrauch der privaten Haushalte nach Haushaltsgrößenklassen. Zugriff: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/private-haushalte/Tabellen/stromverbrauch-haushalte.html> [abgerufen am 10.04.2023].
- Statistisches Bundesamt, 2021: Mehr Büroimmobilien gebaut: 2019 wurde 8% mehr Bürofläche fertiggestellt als 2009. Zugriff: [https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2021/03/PD21_N019_31121.html#:~:text=Wie%20das%20Statistische%20Bundesamt%20\(Destatis,Anstieg%20gegen%C3%BCber%202009%20um%204%20%25.](https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2021/03/PD21_N019_31121.html#:~:text=Wie%20das%20Statistische%20Bundesamt%20(Destatis,Anstieg%20gegen%C3%BCber%202009%20um%204%20%25.) [abgerufen am 10.04.2023].
- Tonietto, R.; Fant, J.; Ascher, J.; Ellis, K.; Larkin, D., 2011: A comparison of bee communities of Chicago green roofs, parks and prairies. *Landscape and Urban Planning* 103, 102–108. Zugriff: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.07.004> [abgerufen am 27.08.2024].
- van der Kolk, H.-J.; van den Berg, P.; Korthals, G.; Bezemer, T.M., 2020: Shading enhances plant species richness and diversity on an extensive green roof. *Urban Ecosyst* 23, 935–943. Zugriff: <https://doi.org/10.1007/s11252-020-00980-w> [abgerufen am 27.08.2024].
- Van Renterghem, T., 2018: Improving the noise reduction by green roofs due to solar panels and substrate shaping. Gent.
- Van Renterghem, T.; Botteldooren, D., 2011: In-situ measurements of sound propagating over extensive green roofs. *Building and Environment* 46, 729–738. Zugriff: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.10.006> [abgerufen am 27.08.2024].
- Van Renterghem, T.; Botteldooren, D., 2009: Reducing the acoustical façade load from road traffic with green roofs. *Building and Environment* 44, 1081–1087. Zugriff: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.07.013> [abgerufen am 27.08.2024].
- Van Renterghem, T.; Hornikx, M.; Forssen, J.; Botteldooren, D., 2013: The potential of building envelope greening to achieve quietness. *Building and Environment* 61, 34–44. Zugriff: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.12.001> [abgerufen am 27.08.2024].
- Verma, S.; Mohapatra, S.; Chowdhury, S.; Dwivedi, G., 2020: Cooling techniques of the PV module: A review. *Materials Today: Proceedings* 38. Zugriff: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.130> [abgerufen am 27.08.2024].
- Veser, S., 2020: VertiKKA - Vertikale Klima-Klär-Anlagen für den Einsatz an Gebäudefassaden. Bundesministerium für Bildung und Forschung, Bonn.
- Virk, G.; Jansz, A.; Mavrogianni, A.; Mylona, A.; Stocker, J.; Davies, M., 2015: Microclimatic effects of green and cool roofs in London and their impacts on energy use for a typical office building. *Energy and Buildings* 88, 214–228. Zugriff: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.039> [abgerufen am 27.08.2024].
- Wang, J.W.; Poh, C.H.; Tan, C.Y.T.; Lee, V.N.; Jain, A.; Webb, E.L., 2017: Building biodiversity: drivers of bird and butterfly diversity on tropical urban roof gardens. *Ecosphere* 8, e01905. Zugriff: <https://doi.org/10.1002/ecs2.1905> [abgerufen am 27.08.2024].
- Weiß, J.; Gähns, S.; Galvin, R., 2021: Rebound-Effekte und Prosumer. Die Rolle der Rahmenbedingungen für den Stromverbrauch bei Photovoltaik-Erzeugern. *Ökologisches Wirtschaften* 1/2021, 17–19.
- Weniger, J.; Zoll, M.; Buhr Sepúlveda, G.; Quaschnig, V., 2021: Auslegung von Solarstromspeichern im Gewerbe. *das Elektrohandwerk* 30–33.
- Westerholt, D., 2022: Abflussverhalten bei Gründächern mit Solaranlagen. Ergebnisse verschiedener Untersuchungen. Berlin.

- WHO, 2021: WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Zugriff: <https://www.who.int/publications-detail-redirect/9789240034228> [abgerufen am 27.03.2023].
- WHO, 2013: Health risks of air pollution in Europe – HRAPIE project, Recommendations for concentration–response functions for cost–benefit analysis of particulate matter, ozone and nitrogen dioxide. Kopenhagen.
- Witzel, A., 2016: Blitzschutzanlagen bei begrünten Dächern. Beachtenswertes bei Planung, Ausführung und Wartung. Ditzingen.
- Yang, J.; Mohan Kumar, D.I.; Pyrgou, A.; Chong, A.; Santamouris, M.; Kolokotsa, D.; Lee, S.E., 2018: Green and cool roofs' urban heat island mitigation potential in tropical climate. *Solar Energy* 173, 597–609. Zugriff: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.08.006> [abgerufen am 27.08.2024].
- Yang, J.; Yu, Q.; Gong, P., 2008: Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago. *Atmospheric Environment* 42, 7266–7273. Zugriff: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.07.003> [abgerufen am 27.08.2024].
- Yi, W.; Chan, A.P.C., 2017: Effects of Heat Stress on Construction Labor Productivity in Hong Kong: A Case Study of Rebar Workers. *Int J Environ Res Public Health* 14, 1055. Zugriff: <https://doi.org/10.3390/ijerph14091055> [abgerufen am 27.08.2024].
- Zapfe, C., 2010: Statische Anforderungen für Dach- und Freiflächenmontagen. Kirchdorf / Haag in Oberbayern.
- Zeumer, F.; Zeumer, M., 2020: Klasse Baualter! – Qualitäten der Baualtersklassen. *Altbau Neu Gedacht*. Zugriff: www.altbau-neu-gedacht.de/2018/09/25/klasse-baualter-qualitaeten-der-baualtersklassen/ [abgerufen am 11.11.22].
- Zhao, M.; Srebric, J., 2012: Assessment of green roof performance for sustainable buildings under winter weather conditions. *J. Cent. South Univ. Technol.* 19, 639–644. Zugriff: <https://doi.org/10.1007/s11771-012-1050-1> [abgerufen am 27.08.2024].
- ZinCo GmbH, 2010: ZinCo Dachbegrünungs-Systeme. Zugriff: <https://www.zinco.de/solarmessung> [abgerufen am 11.04.2023].
- Zinzi, M.; Agnoli, S., 2012: Cool and green roofs. An energy and comfort comparison between passive cooling and mitigation urban heat island techniques for residential buildings in the Mediterranean region. *Energy and Buildings, Cool Roofs, Cool Pavements, Cool Cities, and Cool World* 55, 66–76. Zugriff: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.024> [abgerufen am 27.08.2024].
- Zöllner, M.; Spilker, R.; Liebert, G.; Oswald, M., 2016: Solaranlagen auf Flachdächern im Gebäudebestand: Abschlussbericht, Forschungsinitiative Zukunft Bau. Stuttgart.
- Zonato, A.; Martilli, A.; Gutierrez, E.; Chen, F.; He, C.; Barlage, M.; Zardi, D.; Giovannini, L., 2021: Exploring the Effects of Rooftop Mitigation Strategies on Urban Temperatures and Energy Consumption. *JGR Atmospheres* 126. Zugriff: <https://doi.org/10.1029/2021JD035002> [abgerufen am 27.08.2024].

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Gründachschichtaufbau mehrschichtig	45
Abbildung 2: Typischer Aufbau eines auflastgehaltenen PV-Gründachs	57
Abbildung 3: Aufgeständerte, gründachintegrierte Südverlegung	58
Abbildung 4: Aufgeständerte, gründachintegrierte Ost-Westverlegung	58
Abbildung 5: Aufgeständerte, gründachintegrierte Vertikalverlegung	59
Abbildung 6: Aufgeständerte, nachträglich aufgestellte Verlegung	59

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Indikatoren auf Gebäudeebene für PV-Anlagen und Gründächer	25
Tabelle 2: Priorisierung der Indikatoren auf Quartiersebene für PV-Anlagen und Gründächer	28
Tabelle 3: Ergebnisse der Wichtung zu PV-Anlagen (qualitative Bewertung)	30
Tabelle 4: Ergebnisse der Wichtung zu Gründächern (qualitative Bewertung)	31
Tabelle 5: Vergleich PV-Anlage, Gründach, PV-Gründach	61
Tabelle 6: Übersicht der Indikatoren und (soweit vorhanden) indikatorspezifischen Referenzen und im „Wirk-Tool“ verwendeten Bewertungsschemata	67
Tabelle 7: Übersicht der anzulegenden Werte nach PV-Anlagengröße	75

Anhang

- IÖW-„Wirk-Tool“ V0.4
- Excel-Tabelle Bewertung Indikatoren auf Quartiersebene
- Excel-Tabelle Bewertung Indikatoren auf Gebäudeebene
- Excel-Tabelle Baukonstruktion Gebäude nach Altersklassen

Abbildungsverzeichnis Anhang

Abbildung A 1: Abhängigkeit der Direktverbrauchsquote unterschiedlicher Gebäude(nutzungs)typen von dem Verhältnis aus PV-Leistung und jährlichem Stromverbrauch.	180
Abbildung A 2: Verlauf der spezifischen Investitionskosten in Abhängigkeit der PV-Anlagengröße. Vergleich recherchierter Kostendaten mit errechneten Kostendaten.	188
Abbildung A 3: Vergleich der spezifischen Investitionskosten als Funktion der Größe der nutzbaren Dachfläche. Bei der PV-Gründach Variante ist eine Ost-West Ausführung hinterlegt.	189
Abbildung A 4: Vergleich der spezifischen laufenden Kosten als Funktion der Größe der nutzbaren Dachfläche. Bei der PV-Gründach Variante ist eine Ost-West Ausführung hinterlegt.	190
Abbildung A 5: Screenshot aus dem Wirk-Tool: Eingabeparameter zum Gebäude.	214
Abbildung A 6: Screenshot aus dem Wirk-Tool: Eingabeparameter zum Quartier.	215
Abbildung A 7: Spinnendiagramm der Wirkebenen für das Beispielgebäude bzw. -quartier.	216
Abbildung A 8: Screenshot der Auflistung der semi-quantitativen Bewertung der einzelnen Wirkindikatoren für das Beispielgebäude bzw. -quartier.	217
Abbildung A 9: Screenshot der Auflistung der semi-quantitativen Bewertung der einzelnen Wirkindikatoren für das zweite Beispielgebäude bzw. -quartier (Verwaltungsgebäude in einer Einfamilienhausumgebung).	218

Tabellenverzeichnis Anhang

Tabelle A 1: Flächentypen der Gruppe I: Flächentypen der Wohnnutzungen und der Mischnutzungen mit Wohngebietscharakter	150
Tabelle A 2: Flächentypen der Gruppe II: Flächentypen der Misch-, Gewerbe- und Industrienutzungen sowie der Ver- und Entsorgung	150
Tabelle A 3: Flächentypen der Gruppe III: Flächentypen der Gemeinbedarfs- und Sondernutzungen	151
Tabelle A 4: Erläuterung zur Hierarchie des Indikators Dachneigung	152
Tabelle A 5: Erläuterung zur Hierarchie des Indikators statische Belastung	152
Tabelle A 6: Erläuterung zur Hierarchie des Indikators Dacheindeckung/Wurzelschutz	153
Tabelle A 7: Erläuterung zur Hierarchie des Indikators Dachaufbauten	154
Tabelle A 8: Erläuterung zur Hierarchie des Indikators Verschattung	155
Tabelle A 9: Erläuterung zur Hierarchie des Indikators Ausrichtung	157
Tabelle A 10: Erläuterung zur Hierarchie des Indikators Neigung	157
Tabelle A 11: Erläuterung zur Hierarchie des Indikators Entwässerung	158
Tabelle A 12: Erläuterung zur Hierarchie des Indikators Gebäudehöhe	159
Tabelle A 13: Erläuterung zur Hierarchie des Indikators Brandschutz	159
Tabelle A 14: Erläuterung zur Hierarchie des Indikators Eigentumsstruktur	160
Tabelle A 15: Erläuterung zur Hierarchie des Indikators Nutzungsprofil des Solarstroms	160
Tabelle A 16: Erläuterung zur Hierarchie des Indikators Denkmalschutz	161
Tabelle A 17: Erläuterung zur Hierarchie des Indikators Zugang zur Dachfläche	162
Tabelle A 18: Erläuterung zur Hierarchie des Indikators Absturzsicherung	162
Tabelle A 19: Erläuterung zur Hierarchie des Indikators Blitzschutz	163
Tabelle A 20: Erläuterung zur Hierarchie des Indikators Zustand der elektrischen Bestandsanlagen	164
Tabelle A 21: Vergleich Gründachaufbauten Extensiv	166
Tabelle A 22: Vergleich Gründachaufbauten Intensiv	168
Tabelle A 23: Vergleich Gründachaufbauten zielgerichtete, besondere Lösungen	169
Tabelle A 24: Vergleich PV-Gründachlösungen	171
Tabelle A 25: Übersicht der verwendeten GIS Datenquellen	175
Tabelle A 26: Übersicht der anzulegenden Werte nach PV-Anlagengröße.	191
Tabelle A 27: Abgefragte Eingabeparameter im Wirk-Tool und deren weitere Verwendung in der Wirkanalyse.	212

Anhang zu AS1: Analyse verschiedener Gebäudesituationen und Vorteile einer gebäudeübergreifenden Betrachtung

Tabelle A 1

Flächentypen der Gruppe I: Flächentypen der Wohnnutzungen und der Mischnutzungen mit Wohngebietscharakter

Gruppe I	Erläuterung
TYP 1	Dichte Blockbebauung, geschlossener Hinterhof (1870er–1918), 5–6-geschossig
TYP 2	Geschlossene Blockbebauung, Hinterhof (1870er–1918), 5-geschossig
TYP 3	Geschlossene und halboffene Blockbebauung, Schmuck- und Gartenhof (1870er–1918), 4-geschossig
TYP 6	Mischbebauung, halboffener und offener Schuppenhof, 2–4-geschossig
TYP 7	Entkernte Blockrandbebauung, Lückenschluss nach 1945
TYP 8	Heterogene, innerstädtische Mischbebauung, Lückenschluss nach 1945
TYP 10	Blockrandbebauung mit Großhöfen (1920–1940er), 2–5-geschossig
TYP 72	Parallele Zeilenbebauung mit architektonischem Zeilengrün (1920er–1930er), 2–5-geschossig
TYP 11	Freie Zeilenbebauung mit landschaftlichem Siedlungsrün (1950er–1970er), 2–6-geschossig
TYP 9	Großsiedlungen und Punkthochhäuser (1960er 1990er), 4–11-geschossig und mehr
TYP 73	Geschosswohnungsbau der 1990er Jahre und jünger
TYP 22	Reihen- und Doppelhäuser mit Gärten
TYP 23	Freistehende Einfamilienhäuser mit Gärten
TYP 24	Villen und Stadtvillen mit parkartigen Gärten (überwiegend 1870er–1945)
TYP 25	Verdichtung im Einzelhausgebiet, Mischbebauung mit Garten und halbprivater Umgrünung (1870er bis heute)
TYP 21	Dörfliche Mischbebauung
TYP 59	Wochenendhaus- und kleingartenähnliches Gebiet

Quelle: Bundesverband GebäudeGrün e. V. 2023

Tabelle A 2

Flächentypen der Gruppe II: Flächentypen der Misch-, Gewerbe- und Industrienutzungen sowie der Ver- und Entsorgung

Gruppe II	Erläuterung
TYP 29	Kerngebiet
TYP 31	Gewerbe- und Industriegebiet, großflächiger Einzelhandel, dichte Bebauung
TYP 30	Gewerbe- und Industriegebiet, großflächiger Einzelhandel, geringe Bebauung
TYP 38	Mischgebiet ohne Wohngebietscharakter, dichte Bebauung
TYP 33	Mischgebiet ohne Wohngebietscharakter, geringe Bebauung
TYP 32	Ver- und Entsorgung

Quelle: Bundesverband GebäudeGrün e. V. 2023

Tabelle A 3

Flächentypen der Gruppe III: Flächentypen der Gemeinbedarfs- und Sondernutzungen

Gruppe III	Erläuterung
TYP 41	Sicherheit und Ordnung
TYP 43	Verwaltung
TYP 46	Krankenhaus
TYP 49	Kirche
TYP 45	Kultur
TYP 44	Hochschule und Forschung
TYP 12	Altbau-Schule (Baujahr vor 1945)
TYP 13	Neubau-Schule (Baujahr nach 1945)
TYP 47	Kindertagesstätte
TYP 51	Sonstige Jugendeinrichtung
TYP 58	Campingplatz
TYP 60	Sonstiges und heterogenes Gemeinbedarfs- und Sondergebiet

Quelle: Bundesverband GebäudeGrün e. V. 2023

Anhang zu AS2: Kategorisierung geeigneter Dachflächen und Gebäudesituationen

Tabelle A 4

Erläuterung zur Hierarchie des Indikators Dachneigung

Parameter	PV	GD	PV-GD	Erläuterung
0°	x	x	x	PV-Anlagen können mittels Aufständigung (anderer Neigungswinkel einstellbar) installiert werden Gründächer mit passenden Systemen möglich. Kombination mit Retentionselementen möglich. PV-Gründächer mit passenden Systemen möglich. Kombination mit Retentionselementen möglich.
1–5°	x	x	x	PV-Anlagen mit passenden Bauweisen möglich Gründächer mit verschiedenen Bauweisen möglich PV-Gründächer mit passenden Bauweisen möglich
(< 45°)	x	(x)	/	PV-Anlagen mit passenden Bauweisen möglich, i.d.R. mindestens eine Seite geeignet Gründächer bedingt mit passenden Bauweisen bedingt möglich. U.U. zusätzliche Schubsicherungsmaßnahmen erforderlich. PV-Gründächer aufgrund von Materialverlagerung (Abrutschen) nicht möglich.
(> 45°)	x	/	/	PV-Anlagen bedingt angepassten Bauweisen möglich. i.d.R. mindestens eine Seite geeignet PV-Gründächer aufgrund von Materialverlagerung (Abrutschen und Schüttstoffverlagerung) nicht möglich. PV-Gründächer aufgrund von Materialverlagerung (Abrutschen und Schüttstoffverlagerung) nicht möglich.

X geeignet (x) bedingt geeignet / nicht geeignet

Quelle: Bundesverband GebäudeGrün e. V. 2023

Tabelle A 5

Erläuterung zur Hierarchie des Indikators statische Belastung

Parameter	PV	GD	PV-GD	Erläuterung
< 80 kg/m ²	x	(x)	/	PV-Anlagen mit verschiedenen Bauweisen möglich Gründächer bedingt mit Leichtbauweisen möglich

Parameter	PV	GD	PV-GD	Erläuterung
				PV-Gründächer benötigen höhere Lastreserven
80–120 kg/m ²	x	x	/	PV-Anlagen mit verschiedenen Bauweisen Gründächer mit Extensivbegrünungen möglich PV-Gründächer benötigen höhere Lastreserven
> 120 kg/m ²	x	x	x	PV-Anlagen mit verschiedenen Bauweisen möglich Gründächer mit verschiedenen Bauweisen möglich PV-Gründächer möglich

x geeignet (x) bedingt geeignet / nicht geeignet
Quelle: Bundesverband GebäudeGrün e. V. 2023

Tabelle A 6
Erläuterung zur Hierarchie des Indikators Dacheindeckung/Wurzelschutz

Parameter	PV	GD	PV-GD	Erläuterung
Abdichtung (z. B. Bitumen, Kunststoff, Kautschuk) ohne entsprechenden Wurzelschutz	x	/	/	PV-Anlagen mit passenden Systemen möglich. Gründächer benötigen eine wurzelfeste Dachabdichtung. Abdichtung ist zu erneuern. PV-Gründächer benötigen eine wurzelfeste Dachabdichtung. Abdichtung ist zu erneuern.
Flachdachabdichtung (z. B. Bitumen, Kunststoff, Kautschuk) mit Wurzelschutz auf Warmdach bzw. Massivkonstruktion (z. B. Stahlbeton)	x	x	x	PV-Anlagen benötigen keine wurzelfeste Dachabdichtung und nur wenig Lastreserven. Umsetzung möglich. Gründächer benötigen wurzelfeste Dachabdichtungen und ausreichend Lastreserven. Umsetzung i.d.R. möglich. PV-Gründächer benötigen wurzelfeste Dachabdichtungen und ausreichend Lastreserven. Umsetzung i.d.R. möglich.
Flachdachabdichtung (z. B. Bitumen, Kunststoff, Kautschuk) mit Wurzelschutz auf Kaldach bzw.	x	(x)	/	PV-Anlagen benötigen keine wurzelfeste Dachabdichtung und nur wenig Lastreserven. Umsetzung möglich. PV-Gründächer benötigen wurzelfeste Dachabdichtungen und ausreichend Lastreserven. Umsetzung nur bedingt möglich.

Parameter	PV	GD	PV-GD	Erläuterung
Leichtdach (z. B. Trapezblech)				PV-Gründächer benötigen wurzelfeste Dachabdichtungen und ausreichend Lastreserven. Umsetzung i.d.R. nicht möglich.
Kiesdach	(x)	(x)	(x)	PV-Anlagen können mit Aufwand auf Kiesdächern nachgerüstet werden oder diese ersetzen. Gründächer können Kiesdächer ersetzen. Die Dachabdichtung muss wurzelfest sein. PV-Gründächer können Kiesdächer ersetzen. Die Dachabdichtung muss wurzelfest sein und Dach ausreichende Lastreserven aufweisen.
Andere Dacheindeckungen (z. B. Ziegel, Schindel)	x	/	/	PV-Anlagen können i.d.R. auf andere Dacheindeckungen montiert werden. Gründächer können nicht auf andere Dacheindeckungen montiert werden. PV-Gründächer können nicht auf andere Dacheindeckungen montiert werden.
Asbestdach	/	/	/	PV-Anlagen dürfen nicht auf Asbest gebaut werden. Gründächer dürfen nicht auf Asbest installiert werden. PV-Gründächer dürfen nicht auf Asbest installiert werden.

x geeignet (x) bedingt geeignet / nicht geeignet

Quelle: Bundesverband GebäudeGrün e. V. 2023

Tabelle A 7

Erläuterung zur Hierarchie des Indikators Dachaufbauten

Parameter	PV	GD	PV-GD	Erläuterung
Keine	x	x	x	PV-Anlagen mit verschiedenen Bauweisen möglich. Gründächer mit verschiedenen Bauweisen möglich. PV-Gründächer mit verschiedenen Bauweisen möglich.
Wenig (Einzelne Dachaustritte, Lichtkuppeln, Entlüfter und/oder weitere Bauteile)	x	x	(x)	PV-Anlagen mit verschiedenen Bauweisen möglich. Dachaufbauten und PV-Anlage dürfen sich nicht behindern.

Parameter	PV	GD	PV-GD	Erläuterung
				<p>Gründächer mit verschiedenen Bauweisen möglich. Dachaufbauten und Gründach dürfen sich nicht behindern.</p> <p>PV-Gründächer bedingt möglich. Ausreichend Fläche muss vorhanden sein. Dachaufbauten und PV-Gründach dürfen sich nicht behindern.</p>
Häufig (Unregelmäßige Verteilung und/oder vermehrt Dachaustritte, Lichtkuppeln, Leitungen/Rohre, Klimageräte und/oder weitere Bauteile)	(x)	x	/	<p>PV-Anlagen aufgrund zunehmenden Platzmangels nur bedingt möglich. Dachaufbauten erhöhen die Verschattungssituation. Genaue Planung notwendig; höhere Kosten bei geringeren Erträgen sind zu erwarten.</p> <p>Gründächer mit verschiedenen Bauweisen möglich. PV-Gründächer aufgrund Platzmangels nicht möglich. Dachaufbauten erhöhen die Verschattungssituation.</p>
Sehr häufig (Fast das komplette Dach ist mit Anlagen für die Gebäudetechnik belegt)	/	(x)	/	<p>PV-Anlagen aufgrund Platzmangels und langanhaltenden Schlagschatten oftmals nicht möglich/sinnvoll.</p> <p>Gründächer bedingt mit verschiedenen Bauweisen möglich. Prüfung, ob Installation sinnvoll ist.</p> <p>PV-Gründächer aufgrund Platzmangels nicht möglich. Dachaufbauten erhöhen zudem die Verschattungssituation.</p>

x geeignet (x) bedingt geeignet / nicht geeignet
 Quelle: Bundesverband GebäudeGrün e. V. 2023

Tabelle A 8
 Erläuterung zur Hierarchie des Indikators Verschattung

Parameter	PV	GD	PV-GD	Erläuterung
Keine	x	x	x	<p>PV-Anlagen mit verschiedenen Bauweisen möglich. Bei Installation aufgeständerter Anlagen Verschattung zwischen Modulreihen vermeiden.</p> <p>Gründächer mit verschiedenen Bauweisen möglich. PV-Gründächer mit verschiedenen Bauweisen möglich. Bei Installation Verschattung zwischen Modulreihen und durch Vegetation des Gründaches vermeiden.</p>

Parameter	PV	GD	PV-GD	Erläuterung
Gelegentliche Verschattungssituation	x	x	x	<p>PV-Anlagen bedingt mit verschiedenen Bauweisen möglich. Geringer Minderertrag zu erwarten. Bei Installation aufgeständerter Anlagen Verschattung zwischen Modulreihen vermeiden.</p> <p>Gründächer mit verschiedenen Bauweisen möglich.</p> <p>PV-Gründächer mit verschiedenen Bauweisen möglich. Geringer Minderertrag zu erwarten. Bei Installation Verschattung zwischen Modulreihen und durch Vegetation des Gründaches vermeiden.</p>
Häufige Verschattungssituation (zu bestimmten Tageszeiten, mit den Jahreszeiten zunehmend)	(x)	x	(x)	<p>PV-Anlagen bedingt mit verschiedenen Bauweisen möglich. Höherer Minderertrag zu erwarten. Verschattungsanalyse empfehlenswert. Eventuell technische Auslegung PV anpassen (z. B. durch Einsatz von Modulwechselrichtern und Leistungsoptimierern). Bei Installation Verschattung zwischen Modulreihen und durch Vegetation des Gründaches vermeiden.</p> <p>Gründächer mit verschiedenen Bauweisen möglich. Geringe Auswirkung auf den Begrünungserfolg. Eventuell Anpassung der Pflanzenauswahl.</p> <p>PV-Gründächer bedingt mit verschiedenen Bauweisen möglich. Höherer Minderertrag zu erwarten. Verschattungsanalyse empfehlenswert. Eventuell technische Auslegung PV anpassen (z. B. durch Einsatz von Modulwechselrichtern und Leistungsoptimierern). Bei Installation Verschattung zwischen Modulreihen und durch Vegetation des Gründaches vermeiden.</p>
Dauerhafte Verschattungssituation (dauerhafte Verschattung einzelner Bereiche)	/	x	/	<p>PV-Anlagen aufgrund zu hoher Verschattung aus betriebswirtschaftlicher Sicht oft nicht darstellbar.</p> <p>Gründächer mit verschiedenen Bauweisen möglich. Geringe Auswirkung auf den Begrünungserfolg. Eventuell Anpassung der Pflanzenauswahl.</p> <p>PV-Gründächer aufgrund zu hoher Verschattung nicht möglich.</p>

x geeignet (x) bedingt geeignet / nicht geeignet
Quelle: Bundesverband GebäudeGrün e. V. 2023

Tabelle A 9
Erläuterung zur Hierarchie des Indikators Ausrichtung

Parameter	PV	GD	PV-GD	Erläuterung
Süd	x	k.A. .	X	PV-Anlagen bringen den höchsten Solarertrag. Peak zu Mittagszeit PV-Gründächer bringen den höchsten Solarertrag. Peak zu Mittagszeit
Süd-West / Süd-Ost	x	k.A. .	X	PV-Anlagen bringen einen hohen bis sehr hohen Ertrag. Peak vor oder nach der Mittagszeit. PV-Gründächer bringen einen hohen bis sehr hohen Ertrag. Peak vor oder nach der Mittagszeit.
West / Ost	x	k.A. .	X	PV-Anlagen bringen einen mittleren bis hohen Solarertrag. Peak Vor- und Nachmittags PV-Gründächer bringen einen mittleren bis hohen Ertrag. Peak Vor- und Nachmittags
Nordwest / Nordost	(x)	k.A. .	(x)	PV-Anlagen bringen einen geringen Solarertrag. Verlegung möglichst vermeiden. PV-Gründächer bringen einen geringen Solarertrag. Verlegung möglichst vermeiden.
Nord	/	k.A. .	/	PV-Anlagen bringen sehr geringen Solarertrag. Verlegung nicht empfohlen. PV-Gründächer bringen sehr geringen Solarertrag. Verlegung nicht empfohlen.

X geeignet (x) bedingt geeignet / nicht geeignet
Quelle: Bundesverband GebäudeGrün e. V. 2023

Tabelle A 10
Erläuterung zur Hierarchie des Indikators Neigung

Parameter	PV	GD	PV-GD	Erläuterung
< 5°	/	k.A. .	(x)	PV-Anlagen werden nicht mehr angestrebt. Zu hoher Aufwand für zu geringen Ertrag. PV-Gründächer bedingt mit passenden Bauweisen möglich. Auf darauf angepasste Instandhaltungskonzepte achten.
5–15°	(x)	k.A. .	(x)	PV-Anlagen bedingt mit verschiedenen Bauweisen möglich. Geringer Ertrag zu erwarten.

Parameter	PV	GD	PV-GD	Erläuterung
				PV-Gründächer bedingt mit verschiedenen Bauweisen möglich. Geringer Ertrag zu erwarten.
15–45°	x	k.A ·	x	PV-Anlagen mit verschiedenen Bauweisen möglich PV-Gründächer mit verschiedenen Bauweisen möglich
45–60°	x	k.A ·	/	PV-Anlagen bedingt mit verschiedenen Bauweisen auf Schrägdächern möglich. PV-Gründächer werden nicht mehr angestrebt. Zu hoher Aufwand für zu geringen Ertrag.
> 60°	(x)	k.A ·	/	PV-Anlagen bedingt mit verschiedenen Bauweisen auf Schrägdächern möglich. Geringerer Ertrag zu erwarten. PV-Gründächer werden nicht mehr angestrebt. Zu hoher Aufwand für zu geringen Ertrag.
90°	(x)	k.A ·	x	PV-Anlagen bedingt mit bifazialen Modulen möglich. Auf passende Verankerung zu achten. Ggf. nur mit Gründach oder Kiesdach als Ballastierung möglich. PV-Gründächer mit passenden Bauweisen mit bifazialen Modulen möglich.

x geeignet (x) bedingt geeignet / nicht geeignet
Quelle: Bundesverband GebäudeGrün e. V. 2023

Tabelle A 11
Erläuterung zur Hierarchie des Indikators Entwässerung

Parameter	PV	GD	PV-GD	Erläuterung
Keine Anpassung erforderlich	k.A ·	x	x	Gründächer mit verschiedenen Bauweisen möglich. PV-Gründächer mit verschiedenen Bauweisen möglich.
Anpassung erforderlich	k.A ·	(x)	(x)	Gründächer bedingt mit angepassten Bauweisen an das neue Entwässerungskonzept möglich. Entwässerungseinrichtungen und Gründachsystem dürfen sich nicht behindern. PV-Gründächer bedingt mit verschiedenen Bauweisen möglich. bedingt mit angepassten Bauweisen an das neue Entwässerungskonzept möglich. Entwässerungseinrichtungen und PV-Gründachsystem dürfen sich nicht behindern.

x geeignet (x) bedingt geeignet / nicht geeignet
Quelle: Bundesverband GebäudeGrün e. V. 2023

Tabelle A 12
Erläuterung zur Hierarchie des Indikators Gebäudehöhe

Parameter	PV	GD	PV-GD	Erläuterung
Höhe < 22 m	x	x	x	<p>PV-Anlagen mit verschiedenen Bauweisen möglich.</p> <p>Gründächer mit verschiedenen Bauweisen möglich. Verwehsicherheitsberechnungen grundsätzlich empfohlen.</p> <p>PV-Gründächer PV-Anlagen mit verschiedenen Bauweisen möglich. Verwehsicherheits- und Ballastierungsberechnung erforderlich.</p>
Höhe ≥ 22 m	(x)	x	(x)	<p>PV-Anlagen bedingt möglich, da ggf. höhere Anforderungen an die Installation gestellt werden (z. B. Brandschutz und Windlast). I.d.R. sind PV-Anlagen nur genehmigungspflichtig umsetzbar.</p> <p>Gründächer mit verschiedenen Bauweisen möglich. Eventuell werden strengere Verwehsicherheitsmaßnahmen erforderlich. Verwehsicherheitsberechnungen grundsätzlich empfohlen.</p> <p>PV-Gründächer bedingt möglich, da höhere Anforderungen an die Installation der PV-Anlage hinsichtlich Baugenehmigung und Brandschutz gestellt werden. Windlastberechnungen verschärfen sich, wodurch eventuell höhere Auflasten und strengere Verwehsicherheitsmaßnahmen erforderlich werden.</p>

X geeignet (x) bedingt geeignet / nicht geeignet
Quelle: Bundesverband GebäudeGrün e. V. 2023

Tabelle A 13
Erläuterung zur Hierarchie des Indikators Brandschutz

Parameter	PV	GD	PV-GD	Erläuterung
Bewilligung Brandschutz erhalten	x	x	x	<p>PV-Anlagen dürfen installiert werden.</p> <p>Gründächer dürfen installiert werden.</p> <p>PV-Gründächer dürfen installiert werden.</p>
Bewilligung Brandschutz nicht erhalten	/	/	/	<p>PV-Anlagen dürfen nicht installiert werden.</p> <p>Gründächer dürfen nicht installiert werden. Bewilligung des Bauamtes/Bauaufsichtsbehörde ist einzuholen. Bedingungen an extensive Begrünungen als harte</p>

Parameter	PV	GD	PV-GD	Erläuterung
				<p>Bedachung müssen erfüllt sein. Intensivbegrünungen sind grundsätzlich als Harte Bedachungen einzustufen.</p> <p>PV-Gründächer dürfen nicht installiert werden. Bewilligung des Bauamtes/Bauaufsichtsbehörde ist einzuholen. PV-Anlage muss brandschutzsicher sein. Bedingungen an extensive Begrünungen als harte Bedachung müssen erfüllt sein.</p>

x geeignet (x) bedingt geeignet / nicht geeignet
 Quelle: Bundesverband GebäudeGrün e. V. 2023

Tabelle A 14
 Erläuterung zur Hierarchie des Indikators Eigentumsstruktur

Parameter	PV	GD	PV-GD	Erläuterung
Zustimmung aller Eigentum innehabenden Personen besteht	x	x	x	<p>PV-Anlagen dürfen installiert werden.</p> <p>Gründächer dürfen installiert werden.</p> <p>PV-Gründächer dürfen installiert werden.</p>
Zustimmung aller Eigentum innehabenden Personen besteht nicht	/	/	/	<p>PV-Anlagen dürfen nicht installiert werden. Die Zustimmung aller Eigentum innehabenden Personen zur Installation der Anlage ist einzuholen.</p> <p>Gründächer dürfen nicht installiert werden. Die Zustimmung aller Eigentum innehabenden Personen zur Installation der Anlage ist einzuholen.</p> <p>PV-Gründächer dürfen nicht installiert werden. Die Zustimmung aller Eigentum innehabenden Personen zur Installation der Anlage ist einzuholen.</p>

X geeignet (x) bedingt geeignet / nicht geeignet
 Quelle: Bundesverband GebäudeGrün e. V. 2023

Tabelle A 15
 Erläuterung zur Hierarchie des Indikators Nutzungsprofil des Solarstroms

Parameter	PV	GD	PV-GD	Erläuterung
Hohe Gleichzeitigkeit	x	k.A.	x	<p>PV-Anlagen mit verschiedenen Bauweisen möglich. Hoher Grad an Zusatznutzen wahrscheinlich.</p>

Parameter	PV	GD	PV-GD	Erläuterung
				PV-Gründächer mit verschiedenen Bauweisen möglich. Hoher Grad an Zusatznutzen wahrscheinlich
Mittlere Gleichzeitigkeit	x	k.A.	x	<p>PV-Anlagen mit verschiedenen Bauweisen möglich. Mittlerer Grad an Zusatznutzen wahrscheinlich.</p> <p>PV-Gründächer mit verschiedenen Bauweisen möglich. Mittlerer Grad an Zusatznutzen wahrscheinlich</p>
Geringe Gleichzeitigkeit	x	k.A.	x	<p>PV-Anlagen (bedingt) mit verschiedenen Bauweisen möglich. Geringer Grad an Zusatznutzen wahrscheinlich.</p> <p>PV-Gründächer (bedingt) mit verschiedenen Bauweisen möglich. Geringer Grad an Zusatznutzen wahrscheinlich.</p>

X geeignet (x) bedingt geeignet / nicht geeignet
 Quelle: Bundesverband GebäudeGrün e. V. 2023

Tabelle A 16
 Erläuterung zur Hierarchie des Indikators Denkmalschutz

Parameter	PV	GD	PV-GD	Erläuterung
Denkmalschutzforderungen vorhanden	(x)	(x)	(x)	<p>PV-Anlagen dürfen bedingt installiert werden. Ggf. muss die Anlagenplanung angepasst werden. Die Zustimmung der unteren Denkmalschutzbehörde zur Installation der Anlage ist einzuholen.</p> <p>Gründächer dürfen bedingt installiert werden. Die Zustimmung der unteren Denkmalschutzbehörde zur Installation der Anlage ist einzuholen.</p> <p>PV-Gründächer dürfen bedingt installiert werden. Die Zustimmung der unteren Denkmalschutzbehörde zur Installation der Anlage ist einzuholen.</p>
Denkmalschutzforderungen nicht vorhanden	x	x	x	<p>PV-Anlagen dürfen installiert werden.</p> <p>Gründächer dürfen installiert werden.</p> <p>PV-Gründächer dürfen installiert werden.</p>

X geeignet (x) bedingt geeignet / nicht geeignet
 Quelle: Bundesverband GebäudeGrün e. V. 2023

Tabelle A 17
Erläuterung zur Hierarchie des Indikators Zugang zur Dachfläche

Parameter	PV	GD	PV-GD	Erläuterung
Kein Zugang	(x)	(x)	(x)	<p>PV-Anlagen mit verschiedenen Bauweisen bedingt möglich. Fehlender Zugang zum Dach erschwert Installation, Änderung und Instandhaltung der PV-Anlage.</p> <p>Gründächer mit verschiedenen Bauweisen bedingt möglich. Fehlender Zugang zum Dach erschwert Installation, Änderung und Instandhaltung des Gründaches. Gründächer benötigen eine regelmäßige Pflege und Wartung, daher ist ein Zugang zum Dach entsprechend der Nutzung zwingend erforderlich.</p> <p>PV-Gründächer mit verschiedenen Bauweisen bedingt möglich. Fehlender Zugang zum Dach erschwert Installation, Änderung und Instandhaltung des PV-Gründaches. PV-Gründächer benötigen eine regelmäßige Pflege und Wartung, daher ist ein Zugang zum Dach zwingend erforderlich.</p>
Zugang über Dachausstieg oder außenliegende Leiter dauerhaft vorhanden	x	x	x	<p>PV-Anlagen mit verschiedenen Bauweisen möglich.</p> <p>Gründächer mit verschiedenen Bauweisen möglich.</p> <p>PV-Gründächer mit verschiedenen Bauweisen möglich.</p>

x geeignet (x) bedingt geeignet / nicht geeignet
Quelle: Bundesverband GebäudeGrün e. V. 2023

Tabelle A 18
Erläuterung zur Hierarchie des Indikators Absturzsicherung

Parameter	PV	GD	PV-GD	Erläuterung
Keine Absturzsicherung	(x)	(x)	(x)	<p>PV-Anlagen dürfen bedingt installiert werden. Nachrüstung der Absturzsicherung erforderlich. Ausnahme bilden Gebäude mit Gebäudegrößen von < 50 m² und einer Höhe < 3m.</p> <p>Gründächer dürfen bedingt installiert werden. Nachrüstung der Absturzsicherung erforderlich.</p>

Parameter	PV	GD	PV-GD	Erläuterung
				<p>Ausnahme bilden Gebäude mit Gebäudegrößen von < 50 m² und einer Höhe < 3m.</p> <p>PV-Gründächer dürfen bedingt installiert werden. Nachrüstung der Absturzsicherung erforderlich.</p> <p>Ausnahme bilden Gebäude mit Gebäudegrößen von < 50 m² und einer Höhe < 3m.</p>
<p>PSAgA (Persönliche Schutzausrüstung gegen Absturz)</p> <p>(Einzelanschlag-punkte, Seil- und Schienensysteme)</p>	x	x	x	<p>PV-Anlagen dürfen installiert werden. Die Anlage darf nur von geschultem Personal begangen werden. PV-Anlage muss sich innerhalb des PSAgA-Systems befinden. PV-Anlage und PSAgA-System dürfen sich nicht behindern.</p> <p>Gründächer dürfen installiert werden. Die Anlage darf nur von geschultem Personal begangen werden.</p> <p>PV-Gründächer dürfen installiert werden. Die Anlage darf nur von geschultem Personal begangen werden. PV-Anlage muss sich innerhalb des PSAgA-Systems befinden. PV-Anlage und PSAgA-System dürfen sich nicht behindern.</p>
Kollektivschutz (Geländer)	x	x	X	<p>PV-Anlagen dürfen installiert werden. Auf Schattenwurf des Geländers ist zu achten.</p> <p>Gründächer dürfen installiert werden.</p> <p>PV-Gründächer dürfen installiert werden. Auf Schattenwurf des Geländers ist zu achten.</p>

x geeignet (x) bedingt geeignet / nicht geeignet
 Quelle: Bundesverband GebäudeGrün e. V. 2023

Tabelle A 19
 Erläuterung zur Hierarchie des Indikators Blitzschutz

Parameter	PV	GD	PV-GD	Erläuterung
Anpassung Blitzschutz erforderlich	(x)	(x)	(x)	<p>PV-Anlagen dürfen bedingt installiert werden. Anpassung an das Blitzschutzkonzept erforderlich. PV-Anlage muss innerhalb der äußeren Blitzschutzanlage liegen. Blitzschutz und PV-Anlage dürfen sich nicht behindern.</p> <p>Gründächer dürfen bedingt installiert werden. Anpassung an das Blitzschutzkonzept erforderlich.</p>

Parameter	PV	GD	PV-GD	Erläuterung
				PV-Gründächer dürfen bedingt installiert werden. Anpassung an das Blitzschutzkonzept erforderlich. PV-Anlage muss innerhalb der äußeren Blitzschutzanlage liegen. Blitzschutz und PV-Anlage dürfen sich nicht behindern.
Keine Anpassung Blitzschutz erforderlich	x	x	x	PV-Anlagen dürfen installiert werden. Gründächer dürfen installiert werden. PV-Gründächer dürfen installiert werden.

X geeignet (x) bedingt geeignet / nicht geeignet
Quelle: Bundesverband GebäudeGrün e. V. 2023

Tabelle A 20

Erläuterung zur Hierarchie des Indikators Zustand der elektrischen Bestandsanlagen

Parameter	PV	G D	PV-GD	Erläuterung
Kein Ertüchtigungsbedarf	x	x	x	PV-Anlagen mit verschiedenen Bauweisen möglich. Gründächer mit verschiedenen Bauweisen möglich. PV-Gründächer mit verschiedenen Bauweisen möglich. Erhöhte Kosten zu erwarten
Geringer Ertüchtigungsbedarf	(x)	x	x	PV-Anlagen bedingt möglich. Erhöhte Ertüchtigungskosten zu erwarten. Gründächer mit verschiedenen Bauweisen möglich. Zu beachten, falls elektronisch gesteuerte Be- und Entwässerungseinrichtungen oder der Einsatz von elektronischen Geräten während der Instandhaltung geplant sind. PV-Gründächer mit verschiedenen Bauweisen möglich. Erhöhte Ertüchtigungskosten zu erwarten.
Hoher Ertüchtigungsbedarf	(x)	x	(x)	PV-Anlagen bedingt möglich. Hohe Ertüchtigungskosten zu erwarten. Ohne Förderung ist die Anlage vermutlich nicht betriebswirtschaftlich zu betreiben. Gründächer mit verschiedenen Bauweisen möglich. Zu beachten, falls elektronisch

Parameter	PV	G D	PV-GD	Erläuterung
				gesteuerte Be- und Entwässerungseinrichtungen oder der Einsatz von elektronischen Geräten während der Instandhaltung geplant sind. PV-Gründächer bedingt möglich. Hohe Ertüchtigungskosten zu erwarten.

X geeignet (x) bedingt geeignet / nicht geeignet
Quelle: Bundesverband GebäudeGrün e. V. 2023

Anlage zu AS4: Technische Möglichkeiten und damit verbundene wirtschaftliche Konsequenzen

Tabelle A 21
Vergleich Gründachaufbauten Extensiv

Vegetationsform	Sedum-Moos	Sedum-Moos-Kräuter	Sedum-Kräuter-Gräser	Kräuter-Gräser-Sedum	Gräser-Kräuter
Höhe Gründachaufbau [cm]	5–6	7–9	10–12	13–15	16–18
Instandhaltungsaufwand*	+ / ++	+	+ / ++	++ / +++	+++
Minimal-Gewicht [kg/m ²] (im trockenen Zustand)	18–36	48–60	60–84	72–108	108–132
Maximal-Gewicht [kg/m ²] (im wassergesättigten Zustand)	30–60	80–100	100–120	120–180	180–220
Wirkungen*					
Verbesserung des Stadtklimas	+	++	++ / +++	+++	+++
Regenwasserrückhalt	+	+ / ++	++	++ / +++	+++
Förderung der Biodiversität	+	+ / ++	++ / +++	+++	++ / +++
Lärmminderung	+	+ / ++	++	++ / +++	+++
Zusätzliche Nutz- und Freizeitflächen	+	+	+ / ++	++	++
Energieeinsparungen	+	+ / ++	++	++ / +++	+++
Schutz der Gebäudehülle	+++	++++	++++	+++++	+++++

Vegetationsform	Sedum-Moos	Sedum-Moos-Kräuter	Sedum-Kräuter-Gräser	Kräuter-Gräser-Sedum	Gräser-Kräuter
Gestaltungselement	+	+	++	++	+++
Kostenrichtwerte in €/m² (netto)					

Einbaukosten 20 m²

einschichtig	45–55	48–70	51–75	54–84	57–90
mehrschichtig	55–72	58–84	61–133	64–100	67–108
Instandhaltungskosten €/m ² /a	5–15	5–15	5–17,5	6–17,5	6,5–20

Einbaukosten 50 m²

einschichtig	30–42	35–45	40–50	44–55	47–60
mehrschichtig	43–51	46–64	49–68	52–65	55–70
Instandhaltungskosten €/m ² /a	4–8	4–8	4–10	5–10	5,5–12

Einbaukosten 100 m²

einschichtig	30–33	33–37,5	36–42,5	38–47,5	41–52,5
mehrschichtig	38–43	41–50	44–53	47–60	51–66
Instandhaltungskosten €/m ² /a	3–5	3,5–5	3,5–6	3,5–6	3,5–7

Einbaukosten 500 m²

einschichtig	20–26	22–30	24–35	29–38,5	32–42
mehrschichtig	28–34	28–37	28,5–40	37–46	39–50
Instandhaltungskosten €/m ² /a	2–3	2,2–3	2,2–4	2,2–4	2,2–5

Einbaukosten 1.000 m²

einschichtig	15–25	17–28	19–31	22–36	25–40
--------------	-------	-------	-------	-------	-------

Vegetationsform	Sedum-Moos	Sedum-Moos-Kräuter	Sedum-Kräuter-Gräser	Kräuter-Gräser-Sedum	Gräser-Kräuter
mehrschichtig	22–33	24–36	26–40	29–45	32–50
Instandhaltungskosten €/m ² /a	2–2,5	2–2,5	2–3	2,2–3	2,2–3,5

* + = niedrig => +++++ = hoch (Beruht auf eigener Einschätzung / Erfahrung)

Quelle: Bundesverband GebäudeGrün e. V. 2023

Tabelle A 22
Vergleich Gründachaufbauten Intensiv

Vegetationsform	Hohe Stauden-Gehölze (Dachgarten)	Rasen	Hohe Stauden-Rasen-Bäume (Tiefgarage)
Höhe Gründachaufbau [cm]	ab 25–30	30	25–100
Instandhaltungsaufwand*	++++	++++	+++++
Maximal-Gewicht [kg/m ²] (im wassergesättigten Zustand)	ab. 300–350	ca. 350	ca. 300–1200
Wirkungen*			
Verbesserung des Stadtklimas	++++	+++	+++++
Regenwasserrückhalt	++++	+++ /++++	++++ /+++++
Förderung der Biodiversität	++ /++++	+	+++ /++++
Lärminderung	++++	++++	+++++
Zusätzliche Nutz- und Freizeitflächen	++++	++++	+++++
Energieeinsparungen (Dämmwirkung + Kühleffekte)	++++ /+++++	++++	+++++

Vegetationsform	Hohe Stauden-Gehölze (Dachgarten)	Rasen	Hohe Stauden-Rasen-Bäume (Tiefgarage)
Schutz der Gebäudehülle	+++++	+++++	+++++
Gestaltungselement	++++	++	+++++
Kostenrichtwerte in €/m² (netto)			
Einbaukosten 20 m²	100–250	120–250	150–500
Instandhaltungskosten €/m ² /a	20–50	35–75	50–75
Einbaukosten 50 m²	95–200	110–200	140–350
Instandhaltungskosten €/m ² /a	15–40	25–65	30–65
Einbaukosten 100 m²	85–175	100–175	130–300
Instandhaltungskosten €/m ² /a	10–20	20–40	20–40
Einbaukosten 500 m²	70–150	85–150	110–250
Instandhaltungskosten €/m ² /a	6–12	6–25	10–25
Einbaukosten 1.000 m²	65–135	70–135	80–200
Instandhaltungskosten €/m ² /a	4–10	5–18	8–18

* + = niedrig => +++++ = hoch (Beruht auf eigener Einschätzung / Erfahrung)

Quelle: Bundesverband GebäudeGrün e. V. 2023

Tabelle A 23
Vergleich Gründachaufbauten zielgerichtete, besondere Lösungen

Vegetationsform	Schräg- und Steildach	Biodiversitätsgründach	Retentionsgründach	Urban-farming-Dach
Höhe Gründachaufbau [cm]	10	8–10, partiell bis 30	Ab 25	Ab 25

Vegetationsform	Schräg- und Steildach	Biodiversitätsgrün dach	Retentionsgründa ch	Urban-farming-Dach
Instandhaltungsaufwand*	++++	+++	+++	+++++
Maximal-Gewicht [kg/m ²] (im wassergesättigten Zustand)	ca. 120	80–190, partiell bis 330	300–1200	ab 300
Verbesserung des Stadtklimas	++/+++	++++	+++++	++++
Regenwasserrückhalt	++	++/+++	+++++	+++/++++
Förderung der Biodiversität	++/+++	+++++	++/++++	+++
Lärmminderung	++	++	++++	+++
Zusätzliche Nutz- und Freizeitflächen	++	+	++/++++	+++++
Energieeinsparungen (Dämmwirkung + Kühleffekte)	++	++	+++	+++
Schutz der Gebäudehülle	++++	+++++	+++++	+++++
Gestaltungselement	++++	+++	++	+++
Einbaukosten 20 m²	130–250	75–140	130–250	85–250
Instandhaltungskosten €/m ² /a	10–20	12–20	10–25	15–100
Einbaukosten 50 m²	110–220	50–120	120–200	80–200

Vegetationsform	Schräg- und Steildach	Biodiversitätsgrün dach	Retentionsgründach	Urban-farming-Dach
Instandhaltungskosten €/m ² /a	5–17	6–12	5–12	15–50
Einbaukosten 100 m²	50–150	40–68	90–175	70–200
Instandhaltungskosten €/m ² /a	3–10	4–7	3–7,5	10–25
Einbaukosten 500 m²	45–120	35–58	60–150	52–150
Instandhaltungskosten €/m ² /a	2–5	2,5–5	2–6	6–10
Einbaukosten 1.000 m²	40–110	30–54	55–135	40–135
Instandhaltungskosten €/m ² /a	unbekannt	2–3,5	2–5	4–7,5

* + = niedrig => +++++ = hoch (Beruht auf eigener Einschätzung / Erfahrung)

Quelle: Bundesverband GebäudeGrün e. V. 2023

Tabelle A 24
Vergleich PV-Gründachlösungen

PV-Gründachlösung	Integriert, 5–45°	Integriert, 90°	Aufgestellt, 10–20°
Höhe Gründachaufbau [cm]	10–12	10–12 cm	10–12 cm
Dachneigung in °	0–5	0–6	0–5
Instandhaltungsaufwand*	+++	+++	++++
Maximal-Gewicht [kg/m ²] (im wassergesättigten Zustand)	ca. 110–170	ca. 95–135	ca. 110–170
Vorteile	Anpassung an optimalen Ertrag.	Einfache Instandhaltung	Vereinfachte nachträgliche Installation.

PV-Gründachlösung	Integriert, 5–45°	Integriert, 90°	Aufgestellt, 10–20°
	Auflastgehalten, dadurch keine Dachdurchdringung.	Kürzere Reihenabstände Auflastgehalten, dadurch keine Dachdurchdringung.	Anpassung an optimalen Ertrag. Auflastgehalten, dadurch keine Dachdurchdringung.
Nachteile	Erhöhte Reihenabstände. Erschwerte nachträgliche Installation.	Erschwerte nachträgliche Installation. Einsicht auf PV-Anlage. Noch nicht ausreichend zum Ertrag geprüft.	Erhöhte Reihenabstände. Modulneigung nur bis 20°, daher in Südverlegung keine optimale Ausrichtung. Höherer Instandhaltungsaufwand.
Wirkungen* (zzgl. Wirkungen für extensive Dachbegrünung, je nach Gründachhöhe)			
PV-Ertrag	++++	++/+++	+++
Kostenrichtwerte in €/m² ohne PV-Module (netto)			
Einbaukosten 20 m²	ca. 150–250	ca. 150–250	unbekannt
Instandhaltungskosten €/m ² /a	ca. 10–18	unbekannt	unbekannt
Einbaukosten 50 m²	ca. 100–200	ca. 100–200	unbekannt
Instandhaltungskosten €/m ² /a	ca. 5–10	unbekannt	unbekannt
Einbaukosten 100 m²	ca. 80–150	ca. 80–150	unbekannt
Instandhaltungskosten €/m ² /a	ca. 3–10	unbekannt	unbekannt
Einbaukosten 500 m²	ca. 70–120	ca. 70–120	unbekannt
Instandhaltungskosten €/m ² /a	ca. 2–6	unbekannt	unbekannt
Einbaukosten 1.000 m²	ca. 60–110	ca. 60–110	unbekannt

PV-Gründachlösung	Integriert, 5–45°	Integriert, 90°	Aufgestellt, 10–20°
Instandhaltungskosten €/m ² /a	ca. 2–5	unbekannt	unbekannt

* + = niedrig => +++++ = hoch (Beruht auf eigener Einschätzung / Erfahrung)

Quelle: Bundesverband GebäudeGrün e. V. 2023

Anhang zu AS5: Literaturhinweise und Erläuterungen zu den Wirkindikatoren und deren Umsetzung im „Wirk-Tool“

Das „Wirk-Tool“ und seine Datengrundlage

Zur Umsetzung und Veranschaulichung der Methodik wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Excel-Tool entwickelt (im Folgenden „Wirk-Tool“ genannt), welches anhand weniger Eingaben die Wirkungen der einzelnen Indikatoren berechnet und übersichtlich darstellt.

Mit Hilfe des Wirk-Tools kann die Funktionsweise der im Hauptbericht beschriebenen Methodik veranschaulicht und für bestimmte Gebäudesituationen interaktiv getestet werden. Neben den Eingabeparametern für das Gebäude und dessen nähere Umgebung ergeben sich vor allem auch über die technische Ausführung der Dachflächenausgestaltung sehr viele Freiheitsgrade. Beispielhaft seien hier die verwendeten PV-Module, der Gründachaufbau oder die Reihenabstände zwischen den PV-Modulreihen genannt. Diese nehmen Einfluss auf die Wirkungen, ändern aber nichts an dem Konzept der Methodik und sind auch für die beispielhafte Umsetzung im Wirk-Tool weniger von Interesse. Daher wurden im Projektverbund gängige Ausgestaltungsoptionen für PV-Dächer, Gründächer und Solar-Gründächer festgelegt, die dem Wirk-Tool zugrunde liegen. Diese Ausgestaltungsoptionen sind im Abschnitt „Im Wirk-Tool betrachtete technische Varianten“ in Form von Steckbriefen festgehalten.

Für die Berechnung der Wirkungen sind eine Vielzahl an Eingangsparametern erforderlich, deren Werte innerhalb Deutschlands räumlich deutlich variieren können. Dies betrifft etwa die lokale jährliche Strahlungssumme zur Abschätzung des PV-Ertrags oder durchschnittliche Niederschlagsmengen zur Berechnung des Regenrückhaltepotenzials. Wo für relevante Eingangsparameter ausreichend hoch aufgelöste Datensätze geografischer Informationssysteme vorliegen, sollten diese für möglichst präzise Abschätzungen genutzt werden, um die Aussagekraft der Bewertungsindikatoren zu steigern. Dies erlaubt, jedes Dach in seinem konkreten lokalen Kontext zu bewerten.

Für eine zugleich möglichst anwendungsfreundliche und ortsspezifische Berechnung der Bewertungsindikatoren wurde im Wirk-Tool die regionale Auflösung der Postleitzahlgebiete gewählt. Die Postleitzahl ist Nutzenden des Tools mit Sicherheit bekannt und räumlich explizit genug für eine hinreichend präzise Lokalisierung in Deutschland. Gleichzeitig ist die Implementierung im Wirk-Tool in Form einer Lookup-Tabelle im Vergleich zum Geocoding exakter Adressen deutlich einfacher zu implementieren. Hinterlegt sind für jedes Postleitzahlgebiet etwa Werte für Bevölkerungsdichte, durchschnittliche Niederschlagsmengen, Temperaturen und jährliche Strahlungssumme.

Tabelle A 25

Übersicht der verwendeten GIS Datenquellenenthält eine Übersicht der verwendeten Datenquellen mit Inhalt, Name des Produkts sowie einem Link zur jeweiligen Downloadseite mit weiterführenden Datensatzbeschreibungen. Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) lagen dabei überwiegend im 1km x 1km Rasterformat vor, aus denen zonale Mittel auf der Ebene der Postleitzahlgebiete berechnet wurden. Datensätze, die in Form von Polygonen vorlagen, wurden mit den Postleitzahlgebieten verschnitten und flächengewichtete Mittelwerte für letztere berechnet. Der Bodenversiegelungsgrad war lediglich als Tabelle, nicht in GIS-Datenformat verfügbar, konnte jedoch über den Amtlichen Gemeindegrenzen mit Polygonen der Gemeindegrenzen verknüpft und letztlich mit den Postleitzahlgebieten verschnitten werden.

Tabelle A 25
Übersicht der verwendeten GIS Datenquellen

Inhalt	Produktname	Herausgeber
Postleitzahlengebiete, Einwohnerzahl (Stand 02.2022)	Postleitzahlengebiete – OSM	Esri Deutschland (2023), Lizenz: Open Data Commons Open Database License
Gemeindegrenzen (Stand 31.12.2021)	vg250-ew_ebenen_1231	BKG (2023), Lizenz: dl-de/by-2-0
30-jährige Mitteltemperatur (Sommermonate JJA)	grids_germany_multi_annual_air_tem_p_mean_1991_2020_14	DWD (2021)
30-jährige Mitteltemperatur (ganzjährig)	grids_germany_multi_annual_air_tem_p_mean_1991_2020_17	DWD (2021)
30-jährige mittlere Anzahl Sommertage (Tmax >= 25°C)	grids_germany_multi_annual_summer_days_1991-2020_17	DWD (2021)
30-jährige mittlere Anzahl Hitzetage (Tmax >= 30°C)	grids_germany_multi_annual_hot_days_1991-2020_17	DWD (2021)
30-jährige mittlere Anzahl Tage mit Niederschlagshöhe >= 30 mm	grids_germany_multi_annual_precipGE30mm_days_1991-2020_17	DWD (2022)
30-jährige mittlere Niederschlagshöhe	grids_germany_multi_annual_precipitation_1991-2020_17	DWD (2021)
30-jährige mittlere Jahressumme Globalstrahlung in kWh/m ²	grids_germany_multi_annual_radiation_global_1991_2020	DWD (2021)
30-jährige mittlere Bodenfeuchte in Prozent pflanzenverfügbares Wasser (% nFK)	grids_germany_multi_annual_soil_moist_1991-2020_06, grids_germany_multi_annual_soil_moist_1991-2020_07, grids_germany_multi_annual_soil_moist_1991-2020_08	DWD (2021)
Regenspende des 10-minütigen, 2-jährigen Bemessungsniederschlags	Kostra-DWD-2020	DWD (2022)
Anteil Siedlungs- und Verkehrsfläche an Gemeindefläche in %	Anteil Siedlungs- und Verkehrsfläche an Gesamtfläche 2020	Statistische Ämter des Bundes und der Länder (2023), Lizenz: dl-de/by-2-0
Bodenversiegelungsgrad der Gemeindefläche in % (Stand 2018)	Bodenversiegelungsgrad	IÖR (2023)

Quelle: Institut für ökologische Wirtschaftsforschung 2023

Zur Berechnung einiger Indikatoren (z. B. Dämmwirkung) ist zudem die Kenntnis der Bausubstanz und des damit verbundenen energetischen Zustandes des Gebäudes wichtig. Da die Kenntnis dieser Informationen jedoch bei der Nutzung des Tools nicht vorausgesetzt werden kann, wird über die vom Institut Wohnen und Umwelt entwickelte Typologie des deutschen Wohngebäudebestands der energetische Zustand der Bausubstanz geschätzt (Loga et al. 2015, 2012). Weiterhin wird auf PLZ-aufgelöste langjährige Mittel der Heizgradtage aus der Datenbank des „Gradtagzahlen-Deutschland“ zurückgegriffen, welches ebenfalls vom Institut Wohnen und Umwelt erstellt wurde (vgl. IWU 2020).

Erläuterungen und Literaturhinweise zu den Wirkindikatoren der Mikroebene

PV-Ertrag und Ertragssteigerung

Der maximale jährliche PV-Ertrag wird in Deutschland ohne Nachführung in der Regel bei einer Neigung von ca. 30 ° und einer Ausrichtung nach Süden erreicht. Bei dieser Ausrichtung/Neigung erhöht sich die Bestrahlungssumme im Mittel um ca. 12% gegenüber einer horizontalen Fläche (Quaschnig 2013). Im idealen Zustand fallen zudem keine Verschattungsverluste an. Zusammen mit den inhärenten Anlagenverlusten (ausgedrückt als Performance Ratio PR , hier angenommen als 0,85) ergibt sich somit ein idealer PV-Ertrag E_{ideal} , der als Referenz zur Bewertung des tatsächlichen PV-Ertrag E_{real} dient. Letztere zeichnet sich ggf. durch eine abweichende Neigung/Ausrichtung und andere Verschattungsbedingungen aus. Das Verhältnis beider Erträge E_{real}/E_{ideal} gibt somit eine Aussage über die Performance der PV-Module unter den durch das Gebäude gegebenen Bedingungen im Vergleich zu einer idealen Umgebung für die PV-Module.

Gesamtenergetisch ist zudem von Wichtigkeit, wie viel Ertrag pro Fläche generiert wird. Dabei ergibt sich für die Maximalbelegung der zur Verfügung stehenden Fläche immer der höchstmögliche Ertrag pro Fläche (Referenz). Hier wird also die real zur Verfügung stehende Fläche inkl. möglicher Verluste durch beispielsweise Verschattung betrachtet. Während sich bei einer dachparallelen Verlegung der PV-Module (unter Annahme der Vollbelegung und gleichen Leistung der Module) dadurch immer der gleiche Ertrag pro Fläche einstellt, kommt es bei aufgeständerten Anlagen zu Unterschieden. Diese aufgeständerten Anlagen sind vor allem auf Flachdächern gängig (< 10° Neigung). Die für einen verschattungsarmen Betrieb notwendigen Reihenabstände vermindern die Flächenbelegung und somit den Ertrag auf der zur Verfügung stehenden Fläche. Bei dieser Bewertung dient also der Ertrag einer dachparallelen Installation $E_{parallel}$ als Referenz und der Ertrag einer aufgeständerten PV-Anlage wird dazu ins Verhältnis gesetzt $E_{aufgeständert}/E_{parallel}$. Dieser Bewertungsparameter dient der energetischen Einschätzung der Flächennutzung aufgeständerter Anlagen auf Flachdächern. Diese beiden Verhältnisse (E_{real}/E_{ideal} und $E_{aufgeständert}/E_{parallel}$) werden in dieser Arbeit als Bewertungsparameter herangezogen. Die Bewertungsskalen dieses und aller weiterer Indikatoren sind in Tabelle 6 im Abschnitt „Untersuchte Wirkindikatoren und verwendete Referenzen“ im Hauptteil des Endberichts übersichtlich dargestellt.

Annahmen im Wirk-Tool, Limitationen und weiterer Forschungsbedarf

Das *Performance Ratio* (abgekürzt durch PR , ist ein Maß für die Systemverluste und beschreibt das Verhältnis aus realem und idealem Ertrag) der idealen und realen Anlage wird als gleich angesetzt. Eine geringere Bestrahlungssumme verglichen zur idealen Ausrichtung (Süd, 30°) wird nur grob vorgenommen (5°-Schritte bei der Neigung; 45°-Schritte bei der Ausrichtung; Änderungsschritte der Bestrahlungssumme fest bei 5%). Verschattungsverluste werden nur grob anhand der Eingaben geschätzt (z. B. wird bei der Häufigkeit der Verschattung „gelegentlich“ eingestellt, ergibt sich ein Verlust von 10%). Die Reihenabstände aufgeständerter Anlagen sind nicht anpassbar. Da dadurch der

Flächennutzungsgrad und somit der flächenspezifische Ertrag stark beeinflusst wird, sind die Ergebnisse in dieser Dimension sehr grob.

Ertragssteigerung bei PV-Gründächern

Die Kopplung von PV-Anlagen mit Gründächern in einer integrierten PV-Gründachkonfiguration führt bei gleicher PV-Leistung zur Ertragssteigerung. Bei Solarzellen aus Silizium kommt es aufgrund von Wärme vorrangig zur Verminderung der Leerlaufspannung. Die hat zur Folge, dass sich die Leistung um ca. 0,25 bis 0,45 Prozent pro Grad Celsius verringert (Verma et al. 2020). Zusätzlich erfahren PV-Anlagen in mit Deutschland vergleichbaren Regionen Leistungseinbußen von 0,8 bis 4% aufgrund von Staubablagerungen (Appels et al. 2013; Klugmann-Radziemska 2015). Begrünte Dächer senken die Temperaturen in der näheren Umgebung durch Verdunstungskühlung und geringere Strahlungsaufnahme auf der Dachoberfläche, daher verbessern sie in einer PV-Gründach Konfiguration die Leistung der PV-Anlagen. Darüber hinaus binden Gründächer Luftschadstoffe, unter anderem den in Städten sehr relevanten Feinstaub (vgl. Abschnitt Luftschadstoffbindung und damit verbundene Gesundheitskosten), und verändern die Rückstrahleigenschaften des Daches. Während ersteres dazu führen kann, dass verschmutzungsbedingte Mindererträge vermieden werden, kann auch eine erhöhte Rückstrahlung auf die Module den Ertrag zusätzlich erhöhen (Enkhardt 2021). Es ist jedoch anzumerken, dass dieses komplexe Zusammenspiel aus Kühlung, Rückstrahlung- und Verschmutzungsbeeinflussung stark von der Ausführung und des Standorts des PV-Gründachs abhängt, wie folgender Einblick in einige Studien verbildlicht.

Bisher gibt es viele Studien zu den Ertragssteigerungen durch PV-Gründächer, aber nur wenige wurden unter Klimabedingungen durchgeführt, die für Deutschland repräsentativ sind. Diese Untersuchungen legen nahe, dass PV-Gründächer im Vergleich zu PVs auf Bitumen und Kies einen Mehrertrag von 1,8–6,0% bzw. 0,7–1,8% ergeben (Baumann et al. 2016; Cavadini/Cook 2021; Köhler et al. 2012; vgl. ZinCo GmbH 2010). Die in anderen Klimazonen durchgeführten Studien liefern zusätzliche Erkenntnisse darüber, wie PV-Gründach Konfigurationen optimiert werden können. In Kolumbien ermittelten Forschende die Höhe der PV über dem Gründach, die für Verdunstungskühlung und Belüftung ideal ist (Osma et al. 2016; Osma-Pinto/Ordóñez-Plata 2019). Die Untersuchungen ergaben, dass für die um 10° geneigten Anlage eine Höhe zwischen 50 und 75 cm zu der größten Ertragssteigerung führte (sowohl auf Beton als auch auf einem schwarzen Dach). Außerdem wurde festgestellt, dass eine Installationshöhe von 25 cm zu einer schlechteren Leistung im Vergleich zu PV auf Beton führt (ca. -1,0% vermutlich durch eine gesenkte Gesamtalbedo), während eine Höhe von 100 cm keinen signifikanten Unterschied bewirkt (Osma-Pinto/Ordóñez-Plata 2019). In Spanien wurde die Bedeutung der verwendeten Pflanzenart für ein PV-Gründach unterstrichen und festgestellt, dass Sedum den PV-Ertrag um 2,2% stärker erhöht als Gazanien (Lamnatou/Chemisana 2014). Auch weisen Experimente aus Singapur darauf hin, dass die Senkung der PV-Temperatur hauptsächlich von der Verdunstungskühlung abhängt, und dass dieser Effekt wiederum positiv mit der Stärke der Sonneneinstrahlung verbunden ist (Hendarti 2013). Dies wird durch Simulationen bestätigt, die PV-Gründächer in unterschiedlichen Regionen der Vereinigten Staaten von Amerika modellierten (Nagengast et al. 2013). Auch hier wurde gezeigt, dass die Erzielung größerer Ertragssteigerungen in Gebieten mit jährlich höherer Sonneneinstrahlung und höheren Temperaturen erreicht wird. Außerdem ergaben Studien im subtropischen Sydney, Australien (Fleck et al. 2022; Irga et al. 2021) und Hongkong (Hui/Chan 2011) große Ertragssteigerungen zwischen PV-Gründächern und PV auf Beton, die zwischen 3,6 und 8,3% variierten. Obwohl das Klima in Deutschland historisch gesehen andere Charakteristika aufweist als in den zuvor genannten Regionen, deuten das vermehrte Auftreten von kontinentweiten Hitzewellen und die steigenden Jahrestemperaturen darauf hin, dass der Mehrertrag durch PV-Gründächer in Deutschland in den kommenden Jahren wachsen wird.

Generell ist anzumerken, dass die Ertragssteigerungen in bisherigen Experimenten und Simulationen sehr schwer miteinander verglichen werden können. Dies rührt zum einen von den bereits angesprochenen makroklimatischen Bedingungen. Zum anderen werden mikroklimatische Bedingungen sowie die genaue Anlagenausführung z. T. nur unzureichend dokumentiert. Die Wind- und Verschmutzungsverhältnisse in Städten können sich nicht nur von Stadt zu Stadt, sondern selbst von Haus zu Haus stark unterscheiden. Kommen dann noch unterschiedliche Systeme zum Einsatz (z. B. andere Höhe der PV-Anlage über dem Gründach, ein unterschiedlicher Neigungswinkel oder eine verschiedene Pflanzenmischungen/Pflanzenwuchs), so ist es schwierig, die Effekte des Gründachs eindeutig zu vergleichen. Diesbezüglich sind weitere Forschungsarbeiten notwendig, die vor allem auch das Mikroklima in der Umgebung des PV-Gründachs genau betrachten. Notwendig erscheint vor allem eine detaillierte Stadtklimasimulation, gekoppelt mit einer physikalischen Modellierung der Performance der PV-Module unter Berücksichtigung wichtiger Effekte, die die Leistung beeinflussen (Verdunstungskühlung, Staubablagerung etc.). Darüber hinaus sind weitere Experimente notwendig, die den Einfluss der Bepflanzung auf unterschiedlich ausgeführte PV-Anlagen (z. B. Höhe und Neigung) untersuchen.

Annahmen im Wirk-Tool, Limitationen und weiterer Forschungsbedarf

Es wird davon ausgegangen, dass der Ertrag eines PV-Gründachs um ca. 1,5% bei einem bestehenden „weißen“ Dach (z. B. Kies) bzw. 3% bei einem bestehenden „schwarzen“ Dach (z. B. Bitumen) gegenüber einer identischen PV-Anlage erhöht ist. Mikro- und makroklimatische Effekte können auf Grund der Komplexität nicht betrachtet werden. Eine Weiterentwicklung der Methodik sollte vor allem auch unterschiedliche klimatisch-geografische Parameter des jeweiligen Standorts miteinbeziehen sowie die Möglichkeit erlauben, die Effekte in Abhängigkeit der Anlagenkonfiguration zu betrachten (Substratdicke, Pflanzen, Neigung/Ausrichtung/Höhe der PV).

Einspeisung und Eigenverbrauch

Der PV-Ertrag kann unterschiedlich genutzt werden. Während rein physikalisch der Bedarf vor Ort immer zuerst möglichst umfassend durch die Photovoltaikanlage bedient wird, ergeben sich durch unterschiedliche Betreibermodelle und regulatorische Grenzen verschiedene Anlagenkonfigurationen und Abrechnungsvarianten (z. B. Volleinspeisung, Überschusseinspeisung, Direktvermarktung, Ausschreibung).

Auf Dächern von Einfamilien- und Mehrfamilienhäusern sind PV-Anlagen mit Größen kleiner 100 kWp gängig. Größere Anlagen werden nur auf größeren Dachflächen errichtet (z. B. größere Verwaltungsbauten oder Hallen). Diese Anlagen müssen den Strom direktvermarkten, wohingegen Anlagen mit Leistungen unter 100 kWp eine feste Einspeisevergütung zusteht und die Option des Eigenverbrauchs gewählt werden kann. Daher ist es für viele Anlagenbetreibende von Interesse, eine genaue Kenntnis über den Anteil des direkt verbrauchten Solarstroms (Eigenverbrauch) und des Anteils des Überschusses zur Netzeinspeisung zu haben. Energetisch betrachtet sind beide Anteile gleich wichtig, denn jede Kilowattstunde Solarstrom hilft dabei, entweder den Verbrauch des Hauses (Eigenverbrauch) oder aber eines anderen Verbrauchers (Netzeinspeisung) zu dekarbonisieren. Ein maßhaltiger Umgang mit dem Solarstrom ist daher unabdingbar (Weiß et al. 2021).

Zur genauen Berechnung der Anteile bedarf es der Kenntnis der Erzeuger- und Verbrauchsprofile. Durch den zeitlichen Abgleich beider Profile kann ermittelt werden, wie viel des Solarstroms direkt im Gebäude verbraucht werden kann. Eine genaue Analyse und Simulation der Profile ist dabei angeraten und ist beispielsweise in der Energieflusssimulation EProM (Energie-Prosumer-Moduell) des IÖW durchführbar (Lenk et al. 2022). Während die zeitliche PV-Erzeugung maßgeblich durch die Bestrahlungsbedingungen

vorgegeben wird (Ausrichtung, Neigung, Verschattung etc.), ist der Energieverbrauch des Gebäudes stark von dessen Nutzung abhängig. So sind die Verbrauchsprofile von beispielsweise Wohn-, Büro- und Gewerbegebäuden z. T. deutlich verschieden. Oftmals liegen diese Profile jedoch nicht zur Berechnung vor. Daher wird i.d.R. auf Standardlastprofile zurückgegriffen. Die HTW Berlin hat in verschiedenen Studien die Lastprofile verschiedener Gebäude vermessen (Bergner/Siegel 2021; Weniger et al. 2021). Zusammen mit der simulierten PV-Erzeugung haben die forschenden Personen diese als Basis zur Berechnung der Eigenverbrauchsquote verwendet. Dabei ergeben sich in Abhängigkeit der Gebäudenutzungen verschiedene Verläufe der Eigenverbrauchsquote als Funktion des Quotienten der PV-Leistung und des jährlichen Stromverbrauchs (Bergner/Siegel 2021). Diese Abhängigkeiten ließen die forschenden Personen in unterschiedliche Online-Tools einfließen und sie bilden auch die Grundlage für die Abschätzungen dieser Arbeit.

Beispielhaft sind in Abbildung A 1 die Verläufe des Direktverbrauchs in Abhängigkeit des Quotienten PV-Leistung/Verbrauch für die Gebäudetypen Einfamilienhaus, Mehrfamilienhaus und Büro dargestellt (PV-Anlage: 30° Süd). Generell wird ersichtlich, dass die Eigenverbrauchsquote mit steigendem Verhältnis von PV-Leistung/Verbrauch abnimmt – es also bei einer größer werdenden PV-Anlage oder geringer werdenden Verbrauch vermehrt zur Einspeisung kommt. Durch die unterschiedlichen Verbrauchsprofile der Gebäudetypen ergeben sich zudem Verschiebungen entlang der Y-Achse. So weisen Bürogebäude über den Tag verteilt eine höhere Gleichzeitigkeit von PV-Erzeugung und Verbrauch auf – die Direktverbrauchsquote steigt im Vergleich zu Wohngebäuden. Aus den Kurven, wie in Abbildung A 1 beispielhaft dargestellt, lassen sich sodann mathematische Beschreibungen ableiten, mit denen die Eigenverbrauchs-/Direktverbrauchsquote für unterschiedliche Gebäudetypen anhand der zur Verfügung stehenden Dachfläche (PV-Potenzial) und dem Verbrauch des Gebäudes abgeschätzt werden können.

Annahmen im Wirk-Tool, Limitationen und weiterer Forschungsbedarf

Da der genaue Stromverbrauch des Gebäudes oftmals unbekannt ist, wird die TABULA Gebäudetypologie (Loga et al. 2015, 2012) zur Abschätzung des Stromverbrauchs herangezogen. Diese definiert für jedes Beispielwohngebäude eine Anzahl an Haushalten. In einer ersten Näherung kann mit dem mittleren Stromverbrauch deutscher Haushalte (vgl. Statistisches Bundesamt 2022) der Gesamtstromverbrauch des Gebäudes abgeschätzt werden.

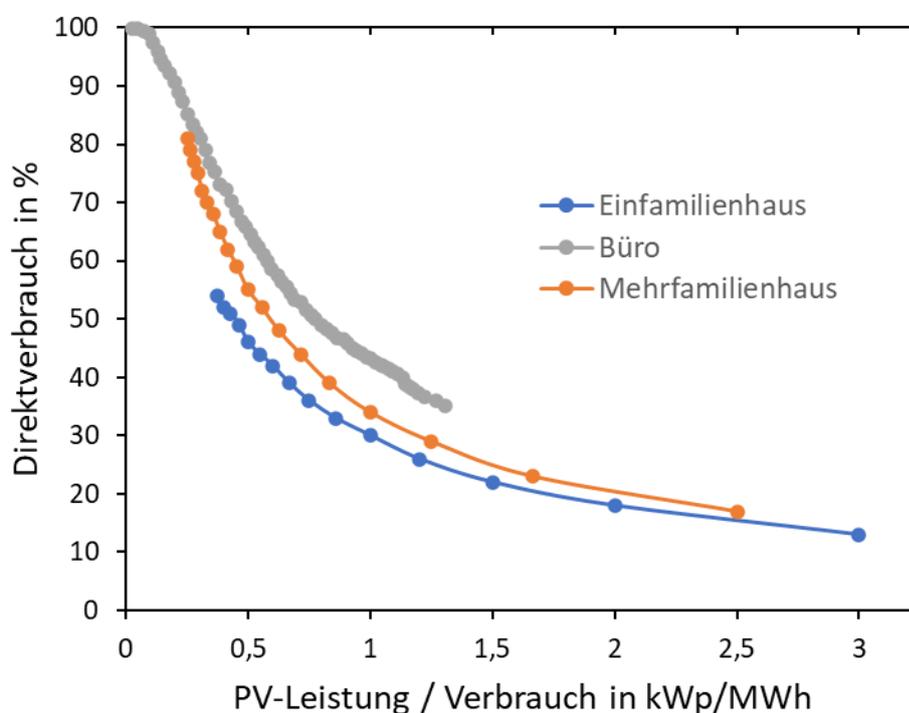
Die TABULA Gebäudetypologie bezieht sich jedoch nur auf Wohngebäude. Für andere Gebäudetypen, wie die im Tool behandelten Typen Halle (Industrie/Produktion) und Büro-/Verwaltungsgebäude, sind die Verbräuche stark verschieden und noch stärker einzelfallabhängig. Daher wurde für diese Gebäudetypen jeweils von einem mittleren Stromverbrauch ausgegangen. Stellvertretend für Hallenbauten wird ein mittlerer Stromverbrauch von 350 MWh/a angenommen. Dies stellt einen Durchschnittswert von Lebensmittelläden dar (Weniger et al. 2021). Für Bürogebäude wird eine Spanne von ca. 40 bis 70 kWh/m² Nutzfläche und Jahr bzw. ein Rechenwert von 55 kWh/m²a Nutzfläche angenommen (vgl. Stadtwerke Gießen ohne Datum). Zusammen mit einer durchschnittlichen Nutzfläche von 4000 m² (vgl. Statistisches Bundesamt 2021) ergibt sich somit ein Verbrauch von 220 MWh/a. Bei einer Weiterentwicklung des Wirk-Tools könnten auch die Verbräuche von Nichtwohngebäude stärker ausdifferenziert betrachtet werden. Eine mögliche Grundlage könnten hierfür die Ergebnisse des Forschungsprojekts „Vergleichswerte für den Energieverbrauch von Nichtwohngebäuden“ darstellen (Bagherian et al. 2021).

Die beschriebene Vorgehensweise zur Abschätzung der Einspeise- und Eigenverbrauchsmengen ist zwingend mit Unsicherheiten verbunden, da sowohl die PV-Erzeugung als auch das Verbrauchsprofil objektspezifisch sind. Die bereits angesprochenen Energieflusssimulationen wären hier insbesondere geeignet, um genauere Ergebnisse zu erhalten. Gerade für die Gebäudetypen mit hoher Relevanz würden solche Simulationen nicht nur die absoluten Strommengen darlegen, sondern auch deren zeitlichen Verlauf. Die Kenntnis über das Auftreten von Erzeugung- und Lastspitzen ist von großer

Wichtigkeit gerade für die kommunale Netzplanung, aber auch zur Identifizierung und ggf. Realisierung von Flexibilisierungspotenzialen (z. B. mittels Sektorkopplungstechnologien) auf der Verbrauchsseite.

Abbildung A 1

Abhängigkeit der Direktverbrauchsquote unterschiedlicher Gebäude(nutzungs)typen von dem Verhältnis aus PV-Leistung und jährlichem Stromverbrauch.



Quelle: Institut für ökologische Wirtschaftsforschung 2023

Dämmwirkung

Nach der Berliner Senatsverwaltung für Stadtentwicklung (2010) geht ca. 22% des Wärmeverlusts in einem normal isolierten Einfamilienhaus auf das Dach zurück. Der energetische Zustand der Gebäudehülle kann durch die Wärmetransferkoeffizienten (auch „U-Wert“) der Bauteile charakterisiert werden. Der U-Wert ($\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$) bezeichnet die Wärmeenergiemenge, die pro Grad Temperaturdifferenz und Fläche durch ein Material hindurchgeht. Ein niedrigerer U-Wert beschreibt also eine bessere Dämmwirkung. Den Zusammenhang zwischen Heizwärmebedarf und Wärmetransferkoeffizienten hat das Institut Wohnen und Umwelt für Gebäudetypologie in Deutschland analysiert. Demnach führt eine Erhöhung des U-Wertes um eine Einheit zu einem Anstieg des jährlichen Heizwärmebedarfs von etwa 70,4 kWh pro Quadratmeter Gebäudenutzfläche (Loga et al. 2012). Da gerade auch Gründächer ein Teil der Gebäudehülle sind, verändern diese den Wärmetransfer eines Gebäudes mitunter maßgeblich. Der U-Wert eines Gründaches ist abhängig von vielen Faktoren, wie beispielsweise den verwendeten Materialien, der Substratdicke, der Feuchtigkeit des Substrates sowie der Pflanzenarten und deren Wuchs. Der U-Wert kann sich daher sowohl jahreszeitlich als auch in Abhängigkeit der Ausführung des Gründaches unterscheiden. Für einen 10 cm starken Substrataufbau konnte ein winterlicher Wärmedurchlasswiderstand zwischen $0,14 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ und $0,40 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ bzw. U-Werte von $7,14 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ und $2,5 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ für das komplett durchnässte Substrat festgestellt werden (Köhler/Malorny 2009).

Auch weitere Studien präsentieren Ergebnisse, die den Zusammenhang zwischen Gründächern und der Verringerung der Heizenergieeinsparungen belegen, wobei die erzielten Einsparungen zum Teil sehr stark variieren (Ascione et al. 2013; Silva et al. 2016; Virk et al. 2015; Zinzi/Agnoli 2012). Als weitere Erkenntnis aus den Studien ist zudem herauszustellen, dass die Dämmwirkung des Gründaches mit zunehmender Stärke der bestehenden Dämmung abnimmt. Es kann daher erwartet werden, dass Neubauten oder sanierte Gebäude einen geringeren Gewinn an Wärmeenergieeinsparung durch die Dämmeigenschaften eines Gründaches erfahren als ältere Gebäude. Für diesen Wirkindikator werden zusätzliche Dämmmaßnahmen während der Installation des Gründaches nicht betrachtet. Es werden also immer die größten Wirkungen bewertet. Jedoch ist darauf hinzuweisen, dass zusätzliche Dämmmaßnahmen durch rechtlichen Vorgaben erforderlich werden können. Wenn beispielsweise die Installation eines Gründachs im Rahmen einer Sanierung eines ungedämmten Daches geschieht, muss auch eine Dämmung nach dem Mindeststandard des Gebäudeenergiegesetzes geschehen. In diesem Fall mindert sich die Dämmwirkung des Gründaches erheblich.

Ähnlich wie beim Kühlungsbedarf stellten Zonato et al. (2021) fest, dass größere Gebäudehöhen die Wärmeenergieeinsparungen von Gründächern (extensiv/intensiv mit Gras; PV-Gründach mit Gras+Sedum) verringern, während eine größere Entfernung der Gebäude zueinander sie erhöht. Bei PV-Dächern wurden ähnliche Trends zur Einsparung von Wärmeenergie festgestellt, allerdings in geringerem Umfang. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die PV-Dächer aufgrund ihrer geringeren Albedo mehr Wärmeenergie tagsüber absorbieren, während sie gleichzeitig die vom Dach abgegebene Strahlung nachts einfangen (Zonato et al. 2021).

Schließlich fanden Zhao and Srebric (2012) heraus, dass Schnee die Energieeinsparungsfähigkeit eines Gründachs im Winter stark beeinträchtigt. Ohne Schnee betragen die Einsparungen etwa 22,7%, bei Schneebedeckung sank dieser Wert jedoch auf etwa 5,2%. Die vermuteten Gründe für diesen Effekt liegen entweder in der erhöhten Albedo, die weniger Sonnenstrahlung absorbiert oder in der Verdichtung und dem Gefrieren des Substrats, was den Isolationswert des Daches verringert.

Auch wenn im Allgemeinen von einer positiven Wirkung von Gründächern auf den Wärmeverbrauch eines Gebäudes ausgegangen wird, sind die Effekte im Gegensatz zum Kühlungsbedarf weniger eindeutig. Während es beispielsweise Hinweise darauf gibt, dass unter sonst konstanten Bedingungen eine Erhöhung des Blattflächenindex oder der Substratdicke zu größeren Wärmeenergieeinsparungen führt (Berardi 2016), zeigen andere Studien geringere Einsparungen bei einer Erhöhung der Pflanzenhöhe, des Blattflächenindex und der Substratdicke (Ascione et al. 2013; Silva et al. 2016). Der Grund dafür ist wahrscheinlich die konkurrierende Wirkung der Dachbegrünung als Dämmstoff und die geringere Aufnahme von Sonnenstrahlung (solare Gewinne). Wichtig zu bemerken ist die hohe Vielfalt im Design der Experimente und/oder der Simulationen, die einen Vergleich von Studien stark erschwert.

Daher gleicht die Bewertung der Dämmwirkung durch Gründächer im Wesentlichen einer Einzelfallbetrachtung, die durch viele Parameter beeinflusst wird (Niederschlagsmenge; solare Gewinne, Gebäudeumgebung etc.). Unbestritten ist jedoch die besondere Relevanz der energetischen Eigenschaften der Gebäudehülle und hier im Speziellen des Daches.

Eine Abschätzung möglicher Wärmeeinsparung kann über den Wärmeverlust durch das Dach erfolgen. Sofern nicht direkt bekannt, kann der energetische Zustand eines Daches von Wohngebäuden mittels der TABULA Gebäudetypologie abgeschätzt werden (Loga et al. 2015). Diese listet für unterschiedliche Gebäudetypen verschiedener Baualtersklassen die U-Werte. Mittels der Dachfläche A_{Dach} wird daraus der Transmissionswärmeverlust HT durch das Dach berechnet. Wenn bei einem bestehenden Dach eine Begrünung nachträglich aufgebracht wird, ändert sich damit wie oben beschrieben der U-Wert und damit der Transmissionswärmeverlust (unter Vernachlässigung von Wärmebrücken):

$$HT_{Dach} = F_{Dach} * A_{Dach} * U_{Dach}$$

Wobei F_{Dach} den Temperaturkorrekturfaktor beschreibt, der sich jedoch im Fall einer Dachfläche zu 1 ergibt. Die relative Änderung des Wärmeverlusts wird bei gleichbleibender Fläche also Quotient der U-Werte greifbar. Der U-Wert der Kombination Dach + Begrünung ergibt sich zu:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{U_{\text{Dach}}} + \frac{1}{U_{\text{Begrünung}}}}$$

Über die Kenntnis der Heizgradtage an einem Standort können dann die Wärmeverluste Q_T der jeweiligen Variante (mit und ohne Begrünung) berechnet werden:

$$Q_T = HT * \text{Heizgradtage} * 24 \text{ h}$$

Aus der Differenz der Wärmeverluste beider Varianten kann sodann die Einsparung durch das Gründach und die „Dämmeffizienz“ der Begrünung ($1 - Q_T$ mit Grün/ Q_T ohne Grün) quantifiziert werden. Letztere Größe wurde zum Vergleich der Wirkungen herangezogen. Zur Einteilung der Skala von 0–5 wurden die Dämmeffizienzen der Begrünung für die TABULA Gebäudegrundtypen berechnet. Die daraus resultierende Verteilung der Dämmeffizienzen diente dann der Aufstellung der Skala: 5 = 28–34,2%; dann Abstufung in 6,2%-Schritten.

Bei reinen PV-Anlagen kann man nicht von einer eigentlichen Dämmwirkung sprechen. Jedoch verändern sich die Strahlungsbilanz durch die Absorption der Solarstrahlung und die Abschattung der darunter befindlichen Dachfläche. Auch blockieren sie zumindest für einige Spektralanteile im Infrarot-Bereich den radiativen Strahlungsaustausch zwischen Himmel und Dachhaut. Durch diese Effekte kann es gerade bei Einfamilienhäusern zu Wärmebedarfseinsparungen kommen (D’Agostino et al. 2022). Diese Wirkungen sind jedoch auch wieder stark abhängig von der energetischen Hülle des Daches und werden bereits bei einer geringen Dachdämmung sehr gering (D’Agostino et al. 2022). Ebenso können gerade bei größeren Mehrfamilienhäusern und Flachdächern auch negative Effekte auftreten (höherer Wärmebedarf), da die solaren Gewinne des Daches durch die PV-Abschattung geringer ausfallen (Albatayneh et al. 2022). Da sich durch die Ausführungsvariante (Neigungswinkel, Ausrichtung, mögliche Aufständigung und unterliegende Dacheindeckung) in Kombination mit der Unkenntnis über die genauen thermischen Eigenschaften des Daches große Unsicherheiten ergeben, wird der Einfluss der PV auf die Wärmebilanz nicht betrachtet.

Annahmen im Wirk-Tool, Limitationen und weiterer Forschungsbedarf

Der tatsächliche energetische Zustand des Daches kann im Tool nicht berechnet werden. Es wird auf die TABULA Gebäudetypologie zurückgegriffen. Mögliche energetische Sanierungen werden somit nicht berücksichtigt. Ebenso wird für die Begrünung ein konstanter U-Wert angenommen (Gründach: U-Wert = 5 W/m²K; PV-Gründach = 6 W/m²K – es wird also eine leicht negative Korrelation des U-Werts mit der Substratdicke angenommen). Für die Heizgradtage wird auf die langjährigen Mittel der Datenbank des „Gradtagzahlen-Deutschland“ zurückgegriffen, die dort den jeweiligen Postleitzahlen zugeordnet sind (vgl. IWU 2020). Während die Nutzung dieser Daten geografische Unterschiede in Bezug auf die Außentemperatur einpreisen lässt, ist das Zusammenspiel aus Niederschlägen, Feuchtigkeitsgehalt des Substrats, Pflanzenwuchs und solaren Gewinnen schwerer lokal abzubilden. All diese Faktoren beeinflussen effektiv den U-Wert des Daches. Weitere Forschung sollte sich daher mit der lokal aufgelösten Dynamisierung der U-Werte über den Jahresverlauf beschäftigen. Noch größerer Forschungsbedarf diesbezüglich entsteht durch die Überbauung mit einer PV-Anlage, die maßgeblich zu einer veränderten Strahlungsbilanz des Daches beiträgt und so die solaren Gewinne und die Rückstrahlung beeinflusst.

Vermiedener Kühlbedarf (passive Kühlung)

In Deutschland sind Klimaanlage in Wohngebäuden nicht sonderlich verbreitet. Weniger als 5% der Haushalte verfügen über eine solche Anlage (vgl. SOEP 2020). In Nichtwohngebäuden steigt diese Zahl

auf etwa 60% (Schleicher et al. 2018). Allerdings hat sich die Nachfrage nach Klimageräten in den letzten zehn Jahren fast verdoppelt (vgl. Japan Refrigeration and Air Conditioning Industry Association (JRAIA) 2022), was darauf hindeutet, dass die Bedeutung dieses Indikators langfristig insgesamt zunimmt.

Es gibt Hinweise dazu, dass eine größere Menge an Pflanzenmaterial auf einem Gründach zu größeren Einsparungen beim Kühlenergiebedarf führt. Diese kommt besonders im obersten Geschoss zu tragen. In Klimazonen, die mit Deutschland vergleichbar sind, führt eine Erhöhung des Blattflächenindex oder der Substratdicke *ceteris paribus* zu höheren Kühlbedarfseinsparungen (Ascione et al. 2013; Berardi 2016). Darüber hinaus scheinen kombinierte Erhöhungen des Blattflächenindex, der Substratdicke und der Pflanzenhöhe in verschiedenen Studien zuverlässig zu höheren Kühlbedarfseinsparungen zu führen (Ascione et al. 2013; Cascone et al. 2018; Silva et al. 2016).

Zu den Faktoren, die diese Effekte abschwächen, gehören die Albedo des ursprünglichen Daches, die Menge der vorhandenen Dämmung und die Konfiguration von Gebäuden in einem städtischen Umfeld. Silva et al. (2016) zeigen in Simulationen, dass die natürlichen Reflexionseigenschaften von weißen Dächern im Vergleich zu schwarzen Dächern die Kühlwirkung von extensiven, halbintensiven und intensiven Gründächern verringern. Mittlerweile haben andere Studien die erwartete negative Korrelation zwischen Dämmstärke und Kühlenergieeinsparungen bei Gründächern bewiesen (Ascione et al. 2013; Jim 2014; Silva et al. 2016; Virk et al. 2015; Zinzi/Agnoli 2012). Schließlich untersuchten Zonato et al. (2021) wie sich die Höhe eines Gebäudes und seine Nähe zu anderen Gebäuden auf die Kühlwirkung von Gründächern (unbewässert, bewässert und PV-Gründach Kopplung) auswirkt. Sie stellen fest, dass der Effekt bei allen Gründächern praktisch derselbe ist, wobei eine größere Gebäudehöhe die Kühlenergieeinsparungen verringert und eine größere Nähe zu anderen Gebäuden sie erhöht. Dies lässt sich dadurch erklären, dass höhere Gebäude eine größere Oberfläche für die Wärmeübertragung und -absorption haben, was den Kühlbedarf erhöht, während engere Konfigurationen die Winkel für die direkte Sonneneinstrahlung einengen, was den Kühlbedarf verringert. Zonato et al. (2021) untersuchten ebenfalls PV-Dächer und stellten fest, dass die größere Höhe eines Gebäudes und die engere Nachbarschaft den Kühlbedarf tatsächlich erhöht, allerdings nur geringfügig.

Die genaue Berechnung der Kühlungsleistung durch ein Gründach ist somit immer abhängig vom Einzelfall und im speziellen von den dort gegebenen Faktoren wie: Niederschlagsmenge, Temperaturverlauf, Sonnenscheinstunden, Versiegelungsgrad etc. Eine Abschätzung ist daher nur sehr grob möglich, muss sich aber zwingend mit der durch die Verdunstung entstehende Kühlleistung im Allgemeinen beschäftigen, die hauptsächlich durch die zurückgehaltene Wassermenge bzw. den Feuchtigkeitsgehalt im Substrat zustande kommt.

Eine PV-Anlage kann ebenso den Kühlbedarf eines Gebäudes beeinflussen; kommt es doch gerade im Sommer durch die PV-Anlage zur Abschattung der eigentlichen Dachhaut, die sich unter der PV-Anlage folglich nicht so stark aufheizt (Albatayneh et al. 2022; D'Agostino et al. 2022). Dieser Effekt kann regional sehr unterschiedlich sein und ist stark von der Konfiguration der PV-Anlage und den Gebäudeeigenschaften abhängig. Eine überschlägige Abschätzung der Wirkung ist daher mit hohen Unsicherheiten verbunden.

Trotz des derzeitigen Mangels an Daten, die die Auswirkungen der Ausgestaltungsmöglichkeiten der Dachkonfigurationen auf die passive Kühlung quantifizieren können, kann eine grobe Bewertung mit Hilfe von Informationen aus anderen Indikatoren vorgenommen werden. Auf der Grundlage der Daten und Berechnung zur Dachtemperaturminderung (vgl. Wirkindikator „Temperaturminderung“) kann davon ausgegangen werden, dass begrünte Dächer sowohl einen Großteil der einfallenden Sonneneinstrahlung blockieren als auch die größte Kühlleistung auf Grund der Evapotranspiration besitzen, gefolgt von PV-Gründächern und dann von PV-Dächern. Auch lässt sich ein ähnlicher Trend wie bei der Dämmwirkung vermuten: gut gedämmte Dächer würden demnach weniger Wärme von außen nach innen transportieren, was die Innentemperatur weniger schnell steigen lässt. Aus diesen Quervergleichen zu den Indikatoren Temperaturminderung und Dämmwirkung, lässt sich eine

qualitative Einschätzung zur Verminderung des Kühlbedarfs durch die jeweilige Ausgestaltungsmöglichkeit ableiten. Auf der Bewertungsskala werden Gründächer mit 5 bewertet, gefolgt von PV-Gründächern mit 4 und PV-Dächern mit 1.

Annahmen im Wirk-Tool, Limitationen und weiterer Forschungsbedarf

Die genauen Auswirkungen einer großflächigen Ausgestaltung von Dachflächen mit PV-Anlage, Gründächern und PV-Gründächern auf das Stadtklima sind noch nicht ausführlich untersucht worden. Jedoch ist gerade die Kenntnis darüber, inwiefern eine solche Ausgestaltung mit einer bestimmten Variante zur Aufheizung oder Abkühlung des Stadtklimas beiträgt, essenziell für die Stadtplanung. Ebenso muss stärker untersucht werden, welchen Einfluss unterschiedliche Ausführungen von PV-Anlagen in Abhängigkeit des Klimas und des Gebäudes (Typ und energetischer Standard) auf die Kühlleistung haben. Gerade die komplexen physikalischen Wirkungen bei kombinierten PV-Gründächern (Abschattung, Evapotranspiration in Abhängigkeit des regionalen Klimas, veränderte Wärmeübertragung durch Strahlung und Konvektion etc.) sind bisher nicht ausreichend untersucht.

Treibhausgas-Senke durch CO₂-Sequestration im Gründach

Durch die Regulation des Treibhausgases Kohlenstoffdioxid (CO₂), das etwa bei der Verbrennung fossiler Treibstoffe im Verkehr freigesetzt wird, kann Stadtnatur, darunter auch Gründächer, einen wichtigen Beitrag zu Minderungszielen auf dem Pfad zu Netto-Null-Emissionen leisten.

Im Photosyntheseprozess der Pflanzen auf Gründächern wird Kohlenstoff aus der Luft aufgenommen und sowohl in den Pflanzenteilen als auch im Substrat langfristig gebunden. Anteilig werden ca. 45% in der oberirdischen Masse gespeichert, 29% in den Wurzeln und 26% im Substrat (Getter et al. 2009). Es wurde festgestellt, dass alle diese Komponenten positiv mit der Aufnahmekapazität für Kohlenstoff korrelieren. Köhler und Kaiser (2021) zeigen, dass die CO₂-Speicherung von Pflanzen auf Gründächern grob linear mit der Phytomasse zunimmt. Des Weiteren beschreiben Getter et al. (2009), Herfort et al. (2012) und Köhler und Kaiser (2021) übereinstimmend, dass die Kohlenstoffbindung mit dickeren Substraten beständig zunimmt. Die Pflanzentypologie wurde teilweise von Herfort et al. (2012) untersucht, die feststellen, dass Moos die größte Kohlenstoffbindungskapazität (1,5 kgCO₂/m²) hat, gefolgt von Sedum (0,9 kgCO₂/m²) und schließlich Gras (0,7 kgCO₂/m²). Diese Ergebnisse können mit den jeweiligen Blattflächenindizes der einzelnen Pflanzen in Verbindung gebracht werden. (Niinemets/Tobias 2019; Ramirez-Garcia et al. 2012; Starry 2013).

Begrenzende Faktoren der Aufnahmekapazität können sowohl Wasser- als auch Nährstoffarmut und Bodenbeschaffenheit sein. Kuronuma et al. (2018) weisen nach, dass regelmäßige Bewässerung der begrüneten Fläche eine positive Auswirkung auf die Kohlenstoffaufnahmekapazität hat. Die Düngung ursprünglich nährstoffarmer Substrate kann ebenso die Produktion an Phytomasse und somit Aufnahmekapazität deutlich steigern (Köhler/Kaiser 2021). Ebenso beobachten Köhler und Kaiser (2021) im Vergleich verschiedener Substrate und Pflanzmatten, dass die Wahl des Wachstumsmediums einen entscheidenden Einfluss auf Pflanzenwachstum sowie Bodenbedeckungsgrad und somit CO₂ Bindung hat. Auf einem 17 Jahre alten Dach reicht die mittlere CO₂ Speicherleistung abhängig vom Medium von 2 bis 6 kg CO₂/m², bei konstanter Mediendicke von 10 cm (Köhler/Kaiser 2021).

Ein weiterer Faktor, der Pflanzenvielfalt, Zusammensetzung und Wachstum beeinflussen kann, kommt auf PV-Gründächern hinzu. PV-Module schaffen durch ihren im Tagesverlauf wandernden Schattenwurf und die ständig verschattete Fläche unter ihnen ein heterogenes Umfeld mit mehr ökologischen Nischen als auf einem ansonsten einheitlich sonnenbeschienenen Gründach (Schindler et al. 2016). Die Verschattung kann insbesondere auf extensiven Gründächern das dünne Substrat vor Austrocknung schützen. Vom PV-Modul herabtropfender Tau kann zudem die Bodenfeuchte in konzentrierten Bereichen noch weiter erhöhen. Tendenziell scheint die Pflanzenvielfalt und der Bodenbedeckungsgrad unter PV-Modulen höher und beständiger zu sein als auf ungeschützten Gründachflächen (Schindler et

al. 2016). Im empirischen Vergleich durch Gebäudeaufbauten verschatteter zu unverschatteten Flächen weisen erstere über zwei verschiedene Substrate hinweg eine um 16% höhere CO₂ Speicherleistung auf (Köhler/Kaiser 2021). Allerdings weisen die Autorinnen und Autoren auch darauf hin, dass auf den sonnigen Flächen durch zusätzlich reflektiertes Sonnenlicht einer Fassade sowie Abluftöffnungen der Klimaanlage besonders harsche Bedingungen herrschen.

Bei der Betrachtung der Gesamtspeicherkapazität einer Dachfläche ist zu berücksichtigen, dass die Kohlenstoffaufnahme hauptsächlich in der Wachstumsphase des Gründachs stattfindet. Nach Abschluss des Pflanzenwachstums ergibt sich ein Gleichgewicht zwischen Kohlenstoffaufnahme durch Photosynthese tagsüber und der CO₂-Abgabe bei Photorespiration (Zellatmung) nachts (Pfoser et al. 2013). Absterbende und nachwachsende Pflanzen halten sich die Waage, so dass nach Beendigung der initialen Wachstumsphase des Gründachs in Summe keine weitere Kohlenstoffbindung stattfindet. Herfort et al. (2012) gehen davon aus, dass in der Hauptwachstumsphase der ersten drei Jahre nach Anpflanzung Kohlenstoffspeicherung stattfindet, welche sich jedoch in den weiteren Jahren durch gleichgewichtige Prozesse mit Kohlenstoffaufnahme und -abgabe einstellt.

Ziel des Treibhausgas-Senke-Indikators ist es, die CO₂ Senkenleistung über die Wachstumsphase eines Gründachs abzuschätzen. Dafür werden ausreichend Datenpunkte aus Feldstudien benötigt, um robuste funktionale Zusammenhänge der oben aufgeführten Parameter (Pflanzentypologie, Substrattyp und -dicke, Düngung sowie Bewässerungszustand) mit der CO₂ Senkenleistung pro m² Gründach abzuleiten. Lassen sich diese Funktionen aufstellen, so kann über die Größe der begrünteten Fläche, die Senkenleistung einer Dachfläche bestimmt werden. Eine Bewertung kann dann relativ zum Dachtyp mit der unter diesen Umständen höchsten CO₂ Senkenleistung erfolgen. Differenzen ergeben sich zwischen Grün- und PV-Gründächern, wenn diese unterschiedliche Substratdicken aufweisen und aufgrund des unterschiedlichen Pflanzenwachstums auf PV-Gründächern im von den PV-Modulen verschatteten Bereich. Die konkrete Ausführung entscheidet dann darüber, welcher der beiden Dachtypen die höhere Senkenleistung aufweist und somit zur Referenzkategorie wird.

Im Wirk-Tool wird die CO₂ Senkenleistung der definierten technischen Ausführungen von Grün- und PV-Gründächern berechnet. Es wird eine reine Sedum-Begrünung angenommen, da dies die einzige Pflanzengattung ist, für die genug Datenpunkte vorliegen. Werte für die CO₂ Bindung für eine Begrünung mit Sedum auf unterschiedlichen Substratdicken stammen aus den Studien von (Getter et al. 2009; Herfort et al. 2012; Kuronuma et al. 2018). Eine lineare Regression der Bindungsleistung in Abhängigkeit der Substratdicke erlaubt die Differenzierung in Abhängigkeit der konkret angenommenen Substratschicht. Basierend auf den Ergebnissen aus Köhler und Kaiser (2021) wird für PV-Gründächer unter den Paneelen eine um 16% höhere Bindungsleistung angenommen. Für eine detailliertere Betrachtung der weiteren oben skizzierten Faktoren waren nicht genügend Datenpunkte verfügbar, um diese verlässlich abzubilden.

Annahmen im Wirk-Tool, Limitationen und weiterer Forschungsbedarf

Basierend auf den Annahmen von Herfort et al. (2012) wird für die Berechnung im Wirk-Tool eine dreijährige Wachstumsphase angenommen. Dabei wird die CO₂ Bindung im Jahr der Pflanzung mit 0 kg/m² angenommen, woran sich eine zweijährige CO₂ Bindungsphase anschließt. Die Recherche zu Bindungsleistungen zeigt, dass bisher vor allem Pflanzen der Gattung Sedum als typische Wahl für Dachbegrünung gut erforscht sind. Jedoch lässt sich hier in den recherchierten Werten nur ein recht grober Zusammenhang zwischen Substratdicke und Bindungsleistung herstellen ($R^2=0,12$), da viele weitere relevante Faktoren wie Bewässerungszustand, Alter der Pflanze, Verschattungsverhältnisse, etc. nur sporadisch angegeben werden. Auch der alternative Ansatz, über verschiedene Pflanzengattungen hinweg über den Blattflächenindex die Bindungsleistung zu approximieren, erwies sich als schwierig, da dieser Index ebenfalls nicht standardmäßig in Studien zu CO₂ Fixation erhoben wird. Wünschenswert wäre eine bessere Datengrundlage insbesondere für den üblichen Kraut-Gras-Sedum Mix. Eine weitere vereinfachende Annahme, die empirischer Validierung bedarf, betrifft die veränderte CO₂

Bindungsleistung unter den PV-Modulen auf PV-Gründächern aufgrund der veränderten mikroklimatischen Situation. Hier wird eine um 16% höhere Bindungsleistung angenommen, angelehnt an Köhler und Kaiser (2021). Jedoch wird in dieser Studie nicht explizit die Verschattung durch PV-Module betrachtet und die unverschatteten Flächen leiden unter zusätzlichen anderen Stressfaktoren.

Levelized Cost of Energy (LCOE)

Die Betriebswirtschaftlichkeit stellt bei der Entscheidung für/gegen PV-Anlage, Gründach oder PV-Gründach für viele Eigentümern ein wichtiges Kriterium dar. Eine genaue Aussage zur Betriebswirtschaftlichkeit bedarf der Kenntnis der Kosten und Einnahmen/Einsparungen, die miteinander über den Betriebszeitraum bilanziert werden. Die Lebensdauer der unterschiedlichen Ausführungen (PV-Anlage, Gründach oder PV-Gründach) kann dabei vom tatsächlichen Betriebszeitraum abweichen. Ein Beispiel dafür ist der Vergütungszeitraum einer PV-Anlage, welcher mit 20 Jahren unterhalb der heute gängigen Annahme von einer Lebensdauer von ca. 30 Jahre ist. Da aber die garantierte Einspeisevergütung, die über 20 Jahre gewährt wird, ein wichtiges Wirtschaftlichkeitskriterium darstellt, ist es ratsam, die Betriebswirtschaftlichkeitsbetrachtung in einem ersten Schritt auf diesen Zeitraum zu begrenzen.

Bei allen Ausführungsmöglichkeiten stellt die Investition den Hauptteil der Kosten dar. Laufende Kosten fallen im Gegensatz dazu nur gering ins Gewicht. Nichtsdestotrotz müssen alle Kosten in die Berechnung inkludiert werden. Je nach Vorhaben und Gebäude können bestimmte Kosten z. T. ganz wegfallen (z. B. Kosten für Gerüst/Hebebühne, wenn die Dachfläche gut zugänglich ist) oder aber deutlich höher ausfallen (z. B. bei einer notwendigen Ertüchtigung der elektrischen Anlagen im Gebäude, um eine PV-Anlage einbinden zu können). Daher sind die Gesamtkosten oftmals stark vorhaben- und objektspezifisch. Typische Kosten bei den unterschiedlichen Ausführungsmöglichkeiten sind übersichtlich oben aufgelistet (siehe Anlage zu AS4: Technische Möglichkeiten und damit verbundene wirtschaftliche Konsequenzen).

Bei Energieerzeugungsanlagen ist es üblich, die Kosten auf die erzeugte Energie zu beziehen. Die sich so ergebenden Stromgestehungskosten sind ein Maß dafür, wie viel die Erzeugung einer Kilowattstunde mittels der jeweiligen Anlage kostet. Eine genaue Berechnung der Stromgestehungskosten ist mit der Kapitalwertmethode oder abschätzend mit der Annuitätenmethode möglich (Kost et al. 2021). Die Annuitätenmethode zeichnet sich durch eine vereinfachende Berechnung aus, was gerade bei wenigen und z. T. unbekanntem Eingangsparametern von Vorteil sein kann. Für die Berechnung der Stromgestehungskosten der PV wird in dieser Arbeit auf die Annuitätenmethode zurückgegriffen. Die Investitionskosten werden dabei mittels eines Annuitätenfaktors (ANF) auf die Jahre des Betrachtungszeitraums verteilt. Zusammen mit den jährlichen laufenden Kosten der Anlage und dem mittleren Ertrag ergeben sich so die Stromgestehungskosten:

$$\text{Stromgestehungskosten} = \frac{\text{Invest} * \text{ANF} + \text{laufende Kosten der Anlage pro Jahr}}{\text{mittlerer Ertrag pro Jahr}}$$

Dabei ist anzumerken, dass der Annuitätenfaktor stark vom jeweiligen Vorhaben und den derzeitigen Rahmenbedingungen abhängig ist. Denn dieser ergibt sich über den kalkulatorischen Zinssatz, dem die Eigenkapitalquote und die damit verbundenen Eigen- und Fremdkapitalzinssätze zugrunde liegen. Auch müssen zur Berechnung des kalkulatorischen Zinssatzes Inflationsannahmen getroffen werden, was derzeit nur mit hoher Ungewissheit getan werden kann. Das Verhältnis von Eigen- zu Fremdkapital ist vor allem auch abhängig von der Anlagengröße. Während kleinere Anlagen häufig vollständig aus Eigenkapital finanziert werden, ist bei Großanlagen eine Kreditfinanzierung üblich.

Für die Bilanzierung eines Gebäudes ist es zielführend, alle Kosten, Einsparungen und Einnahmen einzubeziehen. Die Bezugsgröße für die so errechneten LCOE (Levelized Cost of Electricity – oftmals

Synonym mit den Stromgestehungskosten verwendet, hier anders bezeichnet, um die unterschiedlichen Bezugsgrößen herauszustellen) stellt dabei der Gesamtstromverbrauch dar:

$$LCOE = \frac{\text{Invest} * ANF + \text{jährliche laufende Kosten} + \text{jährliche Strombezugskosten} - \text{EEGVergütung}}{\text{jährlicher Gesamtstromverbrauch}}$$

Anhand der LCOE können nur die Varianten PV und PV-Gründach bewertet werden. Die Bewertung der Varianten geschieht wiederum unter dem Vergleich zu einer idealen PV-Anlage (30° Süd Ausrichtung, keine Verschattung; siehe Indikator PV-Ertrag und Ertragssteigerung), die den idealen mittleren Ertrag pro Jahr – und damit die minimalen Stromgestehungskosten – vorgibt. Da die Gründachkomponenten nicht in den Vergleich mittels LCOE eingebunden werden können, wird davon ausgegangen, dass sich die PV und PV-Gründach Variante lediglich in der Höhe der Investitionskosten für das Montagesystem sowie erhöhtem Pflege- bzw. Wartungsaufwand unterscheiden, alle anderen Kostenkategorien jedoch gleich zu behandeln sind. Im Ergebnis können die LCOE mit dem Haushaltstropreis verglichen werden. Dabei wurde für den Wirkindikator folgende Bewertung willkürlich festgesetzt: 5 = 75–82,5% des Haushaltstropreises, danach aufsteigend in 7,5%-Schritten. Liegen die LCOE unter dem Haushaltstropreis ergeben sich somit Wertungen ≥ 3 , liegen sie darüber fällt die Bewertung mit ≤ 2 aus. Das Aufführen von LCOE für das Gründach als nicht-stromproduzierende Technologie ist rein theoretisch nicht zielführend, scheint aber als zusammenfassende Betrachtung für den Vergleich der Technologien im Wirk-Tool sinnvoll (fixe Bewertung von 3).

Investitionskosten

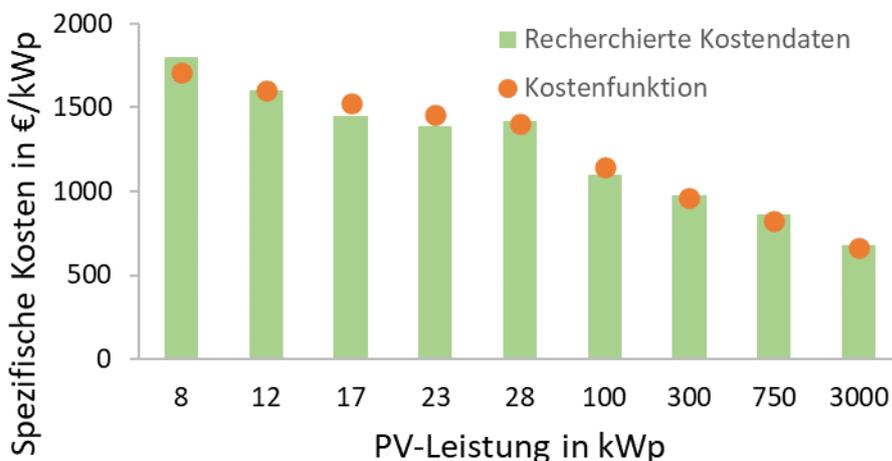
Generell besteht eine Abhängigkeit der Investitionskosten von der Anlagengröße (PV und PV-Gründach) oder der Gründachfläche. Bei einer PV-Anlage lässt sich dieser Zusammenhang mit einer Kostenfunktion beschreiben (Bergner/Siegel 2021):

$$I(P_{pv}) = I_0 * P_{pv}^b$$

Die mathematischen Konstante I_0 und die Abklingkonstante b , die ein Maß für die Abhängigkeit der Investitionskosten von der Anlagengröße darstellt, wurden für diese Arbeit aus verfügbaren Kostendaten ermittelt. Gerade die Kosten I_0 sind aus heutiger Sicht jedoch wenig vorhersehbar (Lieferengpässe, gestörte Lieferketten, Produktionsausfälle, etc.), sodass der hier berechnete Wert nur eine Momentaufnahme darstellt. Für den unteren Leistungsbereich (5–30 kWp) wurden ca. 100 Angebote aus dem „photovoltaik forum“ recherchiert und ausgewertet (vgl. photovoltaikforum.com 2023). Für größere Anlagen wurden die Angaben des Ministeriums für Wirtschaft, Industrie, Klimaschutz und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen herangezogen (vgl. MWIKE NRW 2022). Die recherchierten Kostendaten (im Bereich 5 bis 30 kWp, dargestellt mit den mittleren Leistungen pro 5 kWp-Spanne) und die Ergebnisse der Kostenfunktion mit den errechneten Konstanten $b = -0,161$ und $I_0 = 2408 \text{ €/kWp}$ sind in Abbildung A 2 dargestellt. Durch den weiten Leistungsbereich ergeben sich in den jeweiligen Leistungsbereichen Abweichungen zwischen den recherchierten Daten und der Kostenfunktion. Diese betragen jedoch im Durchschnitt nur ca. 42 €/kWp und nie mehr als 100 €/kWp (geringster Leistungsbereich).

Abbildung A 2

Verlauf der spezifischen Investitionskosten in Abhängigkeit der PV-Anlagengröße. Vergleich recherchierter Kostendaten mit errechneten Kostendaten.



Quelle: Institut für ökologische Wirtschaftsforschung 2023

In Bezug auf die Investitionskosten des PV-Anteils, unterscheiden sich PV-Gründächer durch das teurere Montagesystem. Aus einigen der für die Investitionskosten der PV ausgewerteten Angebote konnten auch Materialkosten für Montagegestelle entnommen werden. Diese lagen im Durchschnitt bei ca. 270 €/kWp, mit einer sehr geringen Varianz in Abhängigkeit der Anlagengröße. Der Aufwand für die Installation des Montagesystems wird überschlägig mit 10% der Gesamtinvestitionen der PV-Anlage angenommen. Bei der Berechnung der spezifischen Kosten eines PV-Gründachs müssen diese Kosten zur Inkludierung des PV-Anteils abgezogen werden. Die Investitionskosten für ein PV-Gründach setzen sich demnach für den Anteil des Gründaches inkl. integriertem Aufständersystem zur Montage der PV-Module und der PV-Anlage ohne Montagesystem zusammen (Materialkosten und Aufwand für die Montage).

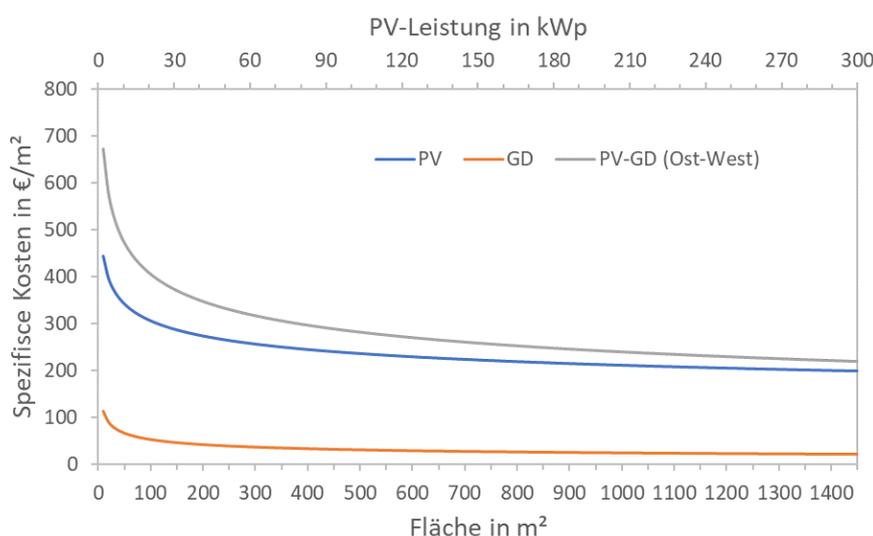
Aus den in Arbeitsschritt 4 (AS4) ermittelten Kostenspannen wurde für Gründächer und PV-Gründächer jeweils ein Mittelwert der Investitionskosten in Abhängigkeit der zu belegenden Dachfläche gebildet (= spezifische Kosten in €/m²). In gleicher Vorgehensweise wie bei einer PV-Anlage wurden anschließend die Kostenfunktionen ermittelt. Abbildung A 3 zeigt den Verlauf der Investitionskosten der 3 Varianten im Vergleich, wobei die spezifischen Kosten der PV mittels der Modulfläche und Leistung (siehe Steckbrief PV) in einen quadrameterspezifischen Wert umgerechnet wurde. Ebenso wurde ein Flächennutzungsgrad von 65% bei der PV-Gründach Variante angenommen (siehe Steckbrief PV-Gründach; Ost-West Ausführung). Dabei ist anzumerken, dass die Reduktion der spezifischen Kosten mit Zunahme der Dachfläche für ein reines Gründach am größten ist, dies aber auf Grund der Skalierung in der Grafik nicht als solche wahrgenommen wird (Abklingkonstanten b der unterschiedlichen Varianten: PV-Anlage = -0,161; Gründach = -0,323; PV-Gründach = -0,255). Dies führt auch dazu, dass sich die spezifischen Kosten für ein PV-Gründach relativ schnell an die spezifischen Kosten einer PV-Anlage annähern. Bei einer Dachflächengröße von 240 m² (50 kWp) liegt die Differenz nur noch bei ca. einem Viertel und reduziert sich bei 1000 m² auf weniger als 15%.

Um eine einfache qualitative Bewertung der Investitionskosten zu erhalten, werden in dieser Arbeit die tatsächlich anfallenden Investitionskosten mit der größten hier betrachteten Fläche von ca. 1450 m², die die geringsten spezifischen Kosten aufweist, ins Verhältnis gestellt (jede Variante für sich). Die willkürliche qualitative Einteilung kann dann wie folgt vorgenommen werden: 100–90% = 5; 90–80% = 5; 80–70% = 3; 70–50% = 2; 50–30% = 1; 30–0% = 0

In Bezug zur Berechnung der LCOE müssen bei den laufenden Kosten zudem die Kosten für den bezogenen Netzstrom betrachtet werden. Bei den Varianten mit einer PV-Anlage reduziert sich der Netzbezug durch die eigenverbrauchte Solarstrommenge. Dafür wird ein fixer Strompreis von 33 Cent/kWh angenommen. Das Einbeziehen der eigenverbrauchten Solarstrommenge bildet so auch gleichzeitig die dadurch erzielten Einsparungen ab.

Abbildung A 3

Vergleich der spezifischen Investitionskosten als Funktion der Größe der nutzbaren Dachfläche. Bei der PV-Gründach Variante ist eine Ost-West Ausführung hinterlegt.



Quelle: Institut für ökologische Wirtschaftsforschung 2023

Annahmen im Wirk-Tool, Limitationen und weiterer Forschungsbedarf

Die im Tool hinterlegten Kennwerte für die Investitionskosten bilden nur eine Momentaufnahme ab und müssen regelmäßig aktualisiert werden. Der Betrachtungszeitraum zur Berechnung der Annuitäten beträgt 20 Jahre, was auf Grund der gezahlten Einspeisevergütung gängig ist. Dabei wird davon ausgegangen, dass innerhalb des Zeitraums keine Dachsanierung stattfindet. Erweitert man den Zeitraum jedoch auf die für Gründächer gängige Annahme einer Lebensdauer von 40 Jahren, müsste vermutlich von einer Dachsanierung bei der PV-Variante ausgegangen werden, die zu zusätzlichen Investitionen führt (Ersatzkosten). Inwiefern dann auch die PV-Anlage an sich erneuert werden müsste, bleibt abzuwarten. Erste PV-Modulhersteller geben bereits Garantien bis 30 Jahre aus. Auf Grund dieser stark objektbezogenen und technologischen Ungewissheiten wird hier nur ein Zeitraum von 20 Jahren angenommen.

Zudem werden die Stromgestehungskosten durch den Annuitätenfaktor beeinflusst. Dieser ändert sich ebenso mit der Länge des Betrachtungszeitraums und müsste auf Grund sich ändernder Zinsannahmen regelmäßig angepasst werden. Im Tool wird der Annuitätenfaktor als 0,021 angenommen. Weiterhin wird in der LCOE-Berechnung von immer gleichen PV-Erträgen ausgegangen. Dies ist jedoch wetter- und degradationsbedingt nicht der Fall. Auch werden im Tool lediglich 2 PV-Gründach Varianten mit festem Flächennutzungsgrad vorgegeben. Diese bestimmen aber maßgeblich die Investitionskosten und die Erträge – und damit die LCOE.

Laufende Kosten

Die laufenden Kosten einer PV-Anlage unterliegen ebenso einer Größenabhängigkeit, verändern sich jedoch gegenüber den Investitionskosten zeitlich weniger stark. Daher wird empfohlen, dass gerade bei

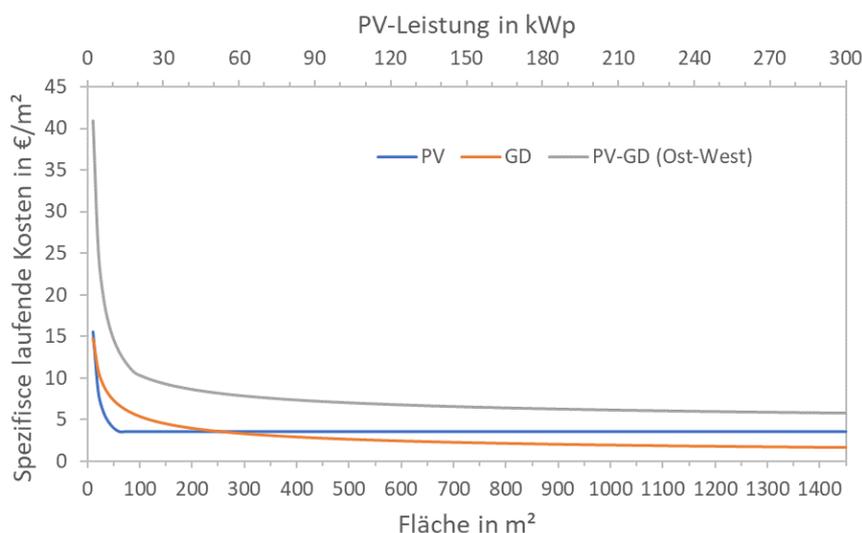
kleineren Anlagen die laufenden Kosten über einen Sockelbetrag (145 €) und eine leistungsabhängige Komponente berechnet werden (5 €/kWp) (Bergner/Siegel 2021):

Für die laufenden Kosten eines Gründachs kann wiederum in gleicher Weise wie bei den Investitionskosten verfahren werden. Aus den Mittelwerten der Preisspannen kann mittels einer mathematischen Annäherung eine Kostenfunktion für die laufenden Kosten bestimmt werden. Die typischen laufenden Kosten eines Gründachs und einer PV-Anlage unterscheiden sich grundlegend und es besteht keine Dopplung in den Arbeiten, die zur Instandhaltung der Dachausführung notwendig sind. Daher können die laufenden Kosten eines PV-Gründachs als die Kombination aus den laufenden Kosten für die Gründachpflege (PV-Gründach Variante mit leicht höherem Pflegebedarf vergl. mit Gründach) und den laufenden Kosten einer PV-Anlage mit um den jeweiligen Flächennutzungsgrad reduzierten Leistung angenommen werden. Abbildung A 4 zeigt den Verlauf der spezifischen laufenden Kosten. Ab einer Dachflächengröße von ca. 270 m² (56 kWp) fallen die laufenden Kosten eines Gründachs unter die einer PV-Anlage, welche ab einer Größe von ca. 12 kWp Werte von ca. 3,53 €/m² aufweist.

Um eine einfache qualitative Bewertung der laufenden Kosten zu erhalten, werden in dieser Arbeit die tatsächlich anfallenden laufenden Kosten mit der größten hier betrachteten Fläche von ca. 1450 m², die die geringsten spezifischen Kosten aufweist, ins Verhältnis gestellt (jede Variante für sich). Die willkürliche qualitative Einteilung kann dann wie folgt vorgenommen werden: 100–90% = 5; 90–80% = 4; 80–70% = 3; 70–50% = 2; 50–30% = 1; 30–0% = 0

Abbildung A 4

Vergleich der spezifischen laufenden Kosten als Funktion der Größe der nutzbaren Dachfläche. Bei der PV-Gründach Variante ist eine Ost-West Ausführung hinterlegt.



Quelle: Institut für ökologische Wirtschaftsforschung 2023

Annahmen im Wirk-Tool, Limitationen und weiterer Forschungsbedarf

Ähnlich wie bei den Investitionskosten stellen auch die laufenden Kosten nur eine Momentaufnahme dar. Während die laufenden Kosten der PV und GD gut abschätzbar sind, variieren die laufenden Kosten bei gleicher Dachflächengröße bei der PV-Gründach Variante durch die sich stärker unterscheidenden Aufwände in Abhängigkeit der Anlagenkonfiguration stärker. Auch hier wird im Tool jedoch nur von zwei Möglichkeiten/Flächennutzungsgraden ausgegangen.

Einnahmen und Einsparungen

Den betriebswirtschaftlichen Kosten müssen die erzielten Einnahmen aus der PV-Erzeugung sowie die Einsparungen (hier betrachtet: PV-Eigenverbrauch, Wärme- und Kälteverbrauch, Niederschlagswassergebühr) gegenübergestellt werden. Diese können überschlägig wie folgt abgeschätzt werden.

Einnahmen aus überschüssigem PV-Strom

Seit Ende Juli 2022 gelten für kleinere PV-Anlagen (< 750 kWp) unterschiedliche Betreiber- und damit Vergütungsmodelle. Die Anlagenbetreiber können zwischen der Volleinspeisung oder der Teileinspeisung (Nutzung eines Teils der Erzeugung für den Eigenverbrauch) wählen. Je nach Modell ergeben sich bis zum 31.01.2024 folgende anzulegende Werte für die Vergütung in Abhängigkeit der Anlagenleistung (Tabelle A 26):

Tabelle A 26
Übersicht der anzulegenden Werte nach PV-Anlagengröße.

Betreibermodell	Anzulegende Werte in Cent/kWh - Marktprämienmodell				
	bis 10 kW	bis 40 kW	bis 100 kW	bis 400 kW	bis 1 MW
Teileinspeisung	8,60	7,50	6,20	6,20	6,20
Volleinspeisung	13,40	11,30	11,30	9,40	8,10

Quelle: Institut für ökologische Wirtschaftsforschung 2023

Diese anzulegenden Werte gelten für das Marktprämienmodell. Anlagen ab 100 kWp müssen ihren Strom über dieses Modell direkt vermarkten. Anlagen unter 100 kWp können eine feste Einspeisevergütung wählen, die sich durch den Abzug einer Managementprämie von 0,4 Cent/kWh von den anzulegenden Werten ergibt. Die unterschiedlichen Vergütungssätze werden bei größeren Anlagen berücksichtigt. So erhält beispielsweise eine teileinspeisende Anlage mit 70 kWp eine feste Einspeisevergütung von: $10/70 * (8,6 - 0,4) + 30/70 * (7,5 - 0,4) + 30/70 * (6,2 - 0,4) = 6,7$ Cent/kWh.

Annahmen im Wirk-Tool, Limitationen und weiterer Forschungsbedarf

Im Tool ist die Auswahl zwischen Voll- oder Teileinspeisung möglich. Es wird jedoch angenommen, dass alle Anlagen <100 kWp eine feste Einspeisevergütung bekommen (die Managementprämie wird vom anzulegenden Wert abgezogen).

Einsparungen durch selbstverbrauchten PV-Strom

Die Einsparungen, die durch den PV-Eigenverbrauch erzielt werden, werden durch die Differenz der Stromgestehungskosten der Anlage (Bezugsgröße ist hier der mittlere PV-Ertrag der Anlage) und des Strompreises beschrieben. Je höher diese Differenz, desto mehr lohnt sich der Eigenverbrauch. Diese Einsparungen sind bereits in den LCOE abgegolten, da die eigenverbrauchte Strommenge bereits im Gesamtstromverbrauch enthalten ist (Eigenverbrauch reduziert den Gesamtstromverbrauch).

Annahmen im Wirk-Tool, Limitationen und weiterer Forschungsbedarf

Im Tool wird nur mit einem festen Strompreis von 33 Cent/kWh gerechnet. Auch sind die Einsparungen durch die hinterlegten Quoten des Eigenverbrauchs und der Einspeisung festgelegt (siehe auch Abschnitt „Einspeisung und Eigenverbrauch“).

Einsparungen durch verminderten Kühl- und Wärmebedarf

Die beiden Indikatoren Dämmwirkung und Vermiedener Kühlbedarf (passive Kühlung) abgeschätzten Energien können durch Annahme eines Energiepreises monetarisiert werden. Für Deutschland ist dies überschlägig nur für die Dämmwirkung zielführend, da Kühlanlagen vor allem in Wohngebäuden noch nicht weit verbreitet sind. Darüber hinaus ist der anzusetzende Energiepreis stark abhängig von der eingesetzten Haustechnik. Da diese jedoch sehr unterschiedlich ausfallen kann, wird auf die Berechnung an dieser Stelle verzichtet.

Limitationen und weiterer Forschungsbedarf

Im Tool müssten unterschiedliche Erzeugertechnologien und weitere haustechnische Anlagen (z. B. Belüftung) abgefragt werden. Auch wäre die Annahme eines festen Erzeuger/Brennstoffpreises in Zeiten hoher Preisvolatilität vermutlich nicht ausreichen. Die Einsparungen für Nichtwohngebäude können sich durch bzw. erhöhte Kühlleistung und andere Dach- und Gebäudeaufbauten deutlich von den Wohngebäuden unterscheiden. Eine wissenschaftliche Aufarbeitung der techno-ökonomischen Potenziale für die Ausgestaltung bei Nichtwohngebäuden erscheint ratsam.

Lärminderung

Die lärmindernden Eigenschaften eines begrünten Daches wirken auf zwei Ebenen: 1) innerhalb eines einzelnen Gebäudes, wo die akustische Leistung als Übertragungsverlust bewertet wird, wenn Außengeräusche durch die Materialschichten dringen, und 2) auf Nachbarschaftsebene, wo die akustische Leistung durch die Absorption von Außengeräuschen gemessen wird, die sich in einer Umgebung ausbreiten.

Der Übertragungsverlust wird hauptsächlich durch die Dicke des Materials bestimmt. Bei gleichbleibender Fläche und Material wird die Schwingungsenergie bei dickeren Schichten weniger stark übertragen – die Schalltransmission nimmt verglichen mit dünneren Schichten ab. Dies wurde von Galbrun und Scerri (2017) und Connelly (2011) experimentell getestet und obwohl die Erhöhung der Substratdicke nicht zu einer exakten Übereinstimmung mit den modellierten Vorhersagen führt, besteht dennoch ein positiver Zusammenhang zwischen der Substratdicke und der Schalldämpfung. Beispielsweise ergab nach Connelly (2011) eine für eine 5 cm dicke Substratschicht theoretisch berechnete Schallreduzierung von 9 dB experimentell nur einen Anstieg des Transmissionsverlusts um 2,6 dB. Connelly (2011) fand zudem heraus, dass extensive Dachbegrünungen den Übertragungsverlust bei niedrigen Frequenzen um bis zu 10 dB und bei mittleren Frequenzen um bis zu 20 dB erhöhen können. Im Allgemeinen wurde bei den Versuchen eine bessere Dämpfungsleistung bei höheren Frequenzen festgestellt, wobei bei Frequenzen unter 500 Hz die Übertragungsverluste durch begrünte Dächer etwa 5,5 dB pro Oktave (Tonhöhenintervall, das entweder doppelt oder halb so groß ist wie die Frequenz einer bestimmten Tonhöhe) betragen und über 500 Hz etwa 11 dB pro Oktave.

Die Arbeit von Galbrun and Scerri (2017) konnte eine grob logarithmische Beziehung zwischen dem Gründachaufbau (Sedummatte und unterschiedliche Substratdicken) und der Schallreduzierung herstellen. Mit zunehmender Dicke erhöht sich die Schallreduzierung. Verglichen mit gängigen Substratdicken (z. B. 8 oder 17 mm), führen größere Schichtaufbauten jedoch zu nur noch geringen Verbesserungen bei der Schallreduktionen. Die Autoren stellen zudem fest, dass die natürliche Verdichtung des Bodens bei der Schalldämmung des Gründachs keine wesentliche Rolle spielt. Aufgrund der Lage von Dächern an der Spitze von Gebäuden ist zu erwarten, dass die Relevanz der Schalldämmung mit zunehmender Höhe abnimmt, da Schallquellen typischerweise weiter entfernt sind. Für Schallquellen, die sich über dem Gebäude befinden, wie z. B. Flugzeuge, bleibt sie jedoch weiterhin relevant.

Die Absorptionseigenschaften von Gründächern für die Ausbreitung von Außenlärm werden durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst, die sich mit einfachen Modellen nur schwer quantifizieren lassen.

Mehrere Diffraktionspunkte, die städtische und pflanzliche Geometrie, die Eigenschaften von Gründächern und die Lärmkomposition spielen alle eine wichtige Rolle für das Verhalten des Schalls, wenn er sich durch eine städtische Umgebung bewegt. Connelly und Hodgson (2011) fanden heraus, dass unbegrünte Substratschichten eines Gründaches bereits als wirksame Schallabsorber fungieren, die sich mit einem höheren Anteil an organischen Stoffen in ihrer Komposition, einer größeren Dicke, einem geringeren Wassergehalt und einer geringeren Verdichtung verbessern. Die Einführung von Vegetation verringert jedoch die Bedeutung dieser Faktoren, da das Blätterdach als reflektierende Oberfläche für Geräusche wirkt. Die Substrattiefe scheint bei Gründachsubstraten von mehr als 5 cm an Bedeutung zu verlieren. Gleichzeitig führt eine besser durchwurzelte und größer werdende Vegetation zu einer Verbesserung der Schallabsorption, wie dies bei Gräsern und Wiesenpflanzen im Vergleich zu Sedum-/Moosdächern festgestellt wurde (Connelly 2011). Die Auswirkungen der Schallabsorption von Gründächern lassen sich am besten in Gebieten mit indirekter Schallausbreitung beobachten. Wenn sich ein Geräusch um Ecken und über Grünflächen ausbreitet, nimmt die Gesamtintensität ab, was in verschiedenen Studien in städtischen Innenhöfen und Canyon-Konfigurationen eindeutig nachgewiesen wurde (Jang et al. 2015; Van Renterghem et al. 2013; Van Renterghem und Botteldooren 2011, 2009).

Auch die Bedeutung von PV-Modulen für die Lärmabsorption von Gründächern wurde bereits untersucht (Van Renterghem 2018). Es wurde festgestellt, dass diese die Schallabsorptionsleistung von Gründächern verbessern können. Idealerweise sollte zwischen der Unterkante der Paneele und dem Dach kein Abstand vorhanden sein, aber auch mit einem Abstand (10 cm), gibt es Verbesserungen in einem Band mittlerer Frequenzen. Darüber hinaus ist der Winkel der PV-Paneele relativ zum Dach ebenfalls bedeutsam, wobei steiler geneigte PV-Konfigurationen (30 oder 45°) im Vergleich zu Flacheren (15°) den Schall besser absorbieren können. PV-Dächer allein sind jedoch kaum schallabsorbierend, insbesondere bei einem Abstand der Paneele vom Dach von 10 cm. Mit diesem Abstand und dem steilsten betrachteten Winkel von 45° ergibt sich nur eine geringfügige Verbesserung gegenüber dem leeren Dach, bei einem Winkel von 15° keinerlei Verbesserung, und ein Winkel von 30° kann schlechter sein als ein leeres Dach.

Die Daten von Van Renterghem (2018) ermöglichen eine grobe Abschätzung der relativen Effektivität der Schallabsorption der verschiedenen Dachtypen im Wirk-Tool. Die technischen Varianten, die den Bewertungen zugrunde liegen (siehe Abschnitt Im Wirk-Tool betrachtete technische Varianten), definieren für nach Süden gerichtete PV-Module eine Neigung von 30°, für Module in Ost-West Ausrichtung 15°, sodass hier eine feine Unterscheidung möglich ist.

Insgesamt wirken sich reine PV-Dächer kaum positiv oder sogar negativ auf die Schallabsorption aus. Im Vergleich dazu, sind Gründächer deutlich besser. Die Dachvariante mit der höchsten Schallabsorption ist ein südlich ausgerichtetes PV-Gründach. Ein in Ost-West-Richtung ausgerichtetes PV-Gründach ist weniger effektiv als ein reines Gründach aber noch deutlich besser als ein PV-Dach. Da es keine robusten Daten gibt, die eine Unterscheidung der Dachtypen in Bezug auf die Minderung der Schallübertragung ins Hausinnere ermöglichen, wird dies bei der endgültigen Bewertung nicht berücksichtigt. Der Indikator Lärminderung umfasst im Wirk-Tool daher ausschließlich die Schallabsorptionsleistung. Aus den oben beschriebenen Zusammenhängen ergeben sich folgende Bewertungen: PV-Dach = 0, Ost-West PV-Gründach = 3, reines Gründach = 4 und südlich ausgerichtetes PV-Gründach = 5.

Annahmen im Wirk-Tool, Limitationen und weiterer Forschungsbedarf

Ähnlich wie bei der Dämmwirkung wäre zu erwarten, dass der Wassergehalt im Substrat eines Gründaches auch die Schalltransmission in das Gebäude beeinflusst. Connelly (2011) beschreibt jedoch, dass eine Erhöhung des Wassergehalts im Substrat – was einer Erhöhung der Dichte gleichkommt – bei gleichbleibender Substratdicke nicht zu einer merklichen Änderung des Transmissionsverlusts führt. Dies deutet darauf hin, dass die Schalltransmission von komplexeren Abhängigkeiten und Einflussfaktoren geprägt ist, wie beispielsweise der Porosität des Substrats. Diese bestimmt die effektive Dichte und die Reflexion im Substrat. Es wurde erwogen, ob die Höhe des Gebäudes in die Bewertung des Indikators

Lärminderung einfließen sollte. Dies erscheint intuitiv sinnvoll, da sich der Schall mit zunehmender Entfernung abschwächt und sowohl Absorptions- als auch Transmissionsleistungen auf höher gelegenen Dächern an Relevanz verlieren sollten. Jedoch lagen nicht genügend Daten vor, um die Auswirkungen quantifizieren zu können. Dies könnte ein Bereich für künftige Forschungen sein.

Erläuterungen und Literaturhinweise zu den Wirkindikatoren der Makroebene

Luftschadstoffbindung und damit verbundene Gesundheitskosten

Luftverschmutzung in dicht besiedelten urbanen Räumen ist eine wichtige Ursache von Erkrankungen und vorzeitigen Todesfällen (Khomenko et al. 2021). Eine Reduktion der Belastung etwa durch Feinstaub und Stickoxide hat das Potenzial die Gesundheit und Lebensqualität in Städten deutlich zu verbessern. Dies wird umso relevanter vor dem Hintergrund des Klimawandels mit zunehmenden extremen Hitzeereignissen, da die Wechselwirkung kombinierte auftretender Hitze- und Luftschadstoffbelastung Sterberisiken erhöht (Breitner et al. 2021).

Luftreinhaltevorschriften der EU schreiben Grenzwerte für Schadstoffe wie Schwefeldioxid (SO₂), Stickstoffdioxid (NO₂), Stickstoffoxide (NO_x), Ozon (O₃) und Feinstaub mit einer Partikelgröße bis 2,5 µm (PM_{2,5}) bzw. 10 µm (PM₁₀) vor. Deutschland setzt diese Richtlinie u. a. im Bundes-Immissionsschutzgesetz um. Städte, die die Grenzwerte wiederholt überschreiten, müssen Luftreinhaltepläne mit Maßnahmen zur Grenzwerteinhaltung vorlegen. Diese fokussieren meist primär auf den Straßenverkehr als Hauptverursacher, umfassen (z. B. in Berlin) jedoch auch Aspekte der Stadt- und Raumplanung. Vor diesem Hintergrund erscheint es vielversprechend, neben Temperaturminderungseffekten auch die Luftschadstoffbindungsleistung von Gründächern zu analysieren.

Städtische Vegetation kann die Luftqualität deutlich verbessern. Gasförmige Schadstoffe wie Ozon und Stickoxide werden über die Spaltöffnungen der Blätter (Stomata) aufgenommen und können im Pflanzeninneren in Wasser gelöst und verarbeitet werden (Menke et al. 2013). Dieser Prozess der Absorption gasförmiger Schadstoffe wird ergänzt durch die Impaktion von Feinstaub. Durch Trockendeposition wird dieser an der Oberfläche von Blättern und Rinde nur temporär abgefangen und fixiert. Feinstaubteilchen können durch Blattfall auf den Boden gelangen und dort längerfristig gebunden oder bei Regen in die Kanalisation gewaschen werden. Bei starkem Wind ist auch eine Resuspendierung zurück in die Atmosphäre möglich (Menke et al. 2013).

Für eine effektive Filterleistung verschiedener Schadstoffe ist vor dem Hintergrund dieser Mechanismen die konkrete Ausgestaltung von Stadtgrün äußerst relevant. Hohe Bäume in Straßenschluchten etwa können dort zu geringerem Luftaustausch und lokal erhöhten Konzentrationen führen (Janhäll 2015). Besser geeignet ist niedrigere Vegetation nah an der Emissionsquelle. Modellierung von Schadstoffkonzentration und Deposition in der Straßenschlucht und auf Dachhöhe legen nahe, dass Vegetation näher an der Quelle deutlich effektiver ist (Pugh et al. 2012), da die Partikelaufnahme in der Vegetation aufgrund der natürlichen Schwerkraft mit der Höhe abnimmt. Mitchell und Maher (2009) etwa beobachten, dass ein Anstieg der Messhöhe von 0,3 m über dem Straßenniveau auf ~ 1,5–2 m zu einer Halbierung der aus Fahrzeugen stammenden PM₁₀ in Baumblättern führt. Trotz einer mit der Höhe abnehmenden Konzentration können Pflanzen, die höher wachsen und einen größeren Blattflächenindex haben (z. B. Sträucher im Vergleich zu Gräsern), PM₁₀ insgesamt besser abfangen (Derkzen et al. 2015; Escobedo et al. 2008; Langner et al. 2011; Yang et al. 2008). Yang et al. (2008) zeigen auch, dass diese Korrelation mit den anderen Luftschadstoffen (SO₂, NO₂ und O₃) besteht, wo Bäume die effektivste Filterleistung erzielen. Übereinstimmend mit Escobedo und Nowak (2009) und Jones et al. (2019) stellen sie zudem fest, dass Pflanzen O₃ am besten binden, gefolgt von NO₂ und SO₂.

Idealerweise befindet sich Vegetation, die Schadstoffe filtern soll, also nahe der Quelle, weist eine große Oberfläche zur Schadstoffdeposition auf und ist zugleich durchlässig genug, sodass der Luftstrom nicht

hauptsächlich abgelenkt wird. Es überrascht daher nicht, dass die Schadstofffilterleistung insbesondere extensiver Gründächer ohne Sträucher und Bäume in der Gesamtbetrachtung aller Nutzen eher nebensächlich ist (vgl. z. B. die Übersicht von Berardi et al. 2014). Dennoch kommen Speak et al. (2012) bei der Untersuchung der PM10 Filterleistung vier verschiedener extensiver Gründachbepflanzung zu dem Ergebnis, dass auch eine flächendeckende extensive Dachbegrünung im Stadtzentrum ein deutliches Reduktionspotenzial hätte: -2,3% oder 9,18 Tonnen PM10 bei 325 ha Dachbegrünung.

Für eine quantitative Abschätzung im Wirk-Tool bergen insbesondere die Parameter Pflanzenhöhe und Blattfläche das Potenzial, wertvolle Inputs für eine Approximation der Luftschadstoffbindungsleistung zu sein. Spezifisch bezogen auf Gründächer ist die Studienlage jedoch spärlich und die Verallgemeinerung der zu erwartenden Bindungsleistung über Pflanzenarten und Schadstoffe hinweg nur sehr grob möglich. Eine einfache Abschätzung der Luftschadstoffrückhaltwerte wird durch die Knappheit an Studien zu gängigen Gründachpflanzen (z. B. Gras, Sedum) begrenzt. Als behelfsmäßige Approximation wird der Zusammenhang zwischen dem Blattflächenindex von Sträuchern und deren Luftschadstoffrückhalt herangezogen und daraus eine Abschätzung für den Luftschadstoffrückhalt für Sedum abgeleitet.

Dazu wurden zuerst anhand der Daten von Escobedo und Nowak (2009) lineare Beziehungen zwischen dem Blattflächenindex von Sträuchern und deren Rückhalt von PM10, SO₂, NO₂ und O₃ geschätzt. Für alle diese Schätzgeraden wurde die Konstante auf 0 festgelegt, sodass sie durch den Koordinatenursprung laufen, da ein Blattflächenindex von 0 (also keine Begrünung) keine Luftschadstoffbindung impliziert.

Für Sedum gab es nur zwei brauchbare Datenpunkte für PM10-Rückhalt, jedoch keinen zugehörigen Blattflächenindex oder Höhenmessung konkret zu diesen Beobachtungen. Für die Extrapolation der Rückhalteleistung von Sträuchern zu Sedum wurde daher für letztere ein Blattflächenindex von 2 angenommen. Dies entspricht einem mittleren Wert für Sedum-Pflanzen, die auf extensiven Gründächern üblich sind. Aus den für Sträucher berechneten Zusammenhängen lassen sich Rückhaltewerte für diesen Blattflächenindex ablesen. Um jedoch dem Unterschied zwischen Sedum und Sträuchern zumindest ansatzweise Rechnung zu tragen, wurde der PM10 Rückhaltewert, der einzige Rückhaltewert, der für beide Grünarten verfügbar war, zur Kalibrierung herangezogen. Das Verhältnis zwischen der durchschnittlichen PM10-Rückhaltung der Sträucher und der PM10-Rückhaltung des Sedums dient somit als Skalierungsfaktor der geschätzten Koeffizienten für alle anderen Luftschadstoffe.

Die Berechnung des jährlichen Schadstoffrückhalts durch die Gründacharten in Gramm ist dann eine einfache Multiplikation, der für Sedum geschätzten Rückhalteleistung der jeweiligen Schadstoffe und der gesamten begrünbaren Fläche des Daches.

Zur Bewertung wird der Dachtyp mit der höchsten Schadstoffbindungsleistung als Referenz herangezogen und mit 5 bewertet. Je nach gewählter Ausführung kann so entweder das reine Gründach oder das PV-Gründach die Referenz darstellen. Die Bewertung des anderen Gründachtyps ergibt sich aus der Bewertungsskala aus Tabelle 6 im Endbericht. Das reine PV-Dach wird immer mit 0 bewertet.

Annahmen im Wirk-Tool, Limitationen und weiterer Forschungsbedarf

Derzeit gibt es keine Eingabe für den Blattflächenindex im Wirk-Tool, da es an Daten mangelt und es schwierig ist, diese spezifische Metrik zu bestimmen. Insgesamt beruht die Abschätzung der Rückhalteleistung auf stark vereinfachenden Annahmen zur Übertragbarkeit der Leistungen von Sträuchern auf Sedum und ist somit als vorläufige Annäherung zu interpretieren. Hier sind empirische Studien zur Schadstofffilterleistung von Dachbegrünung jenseits der PM10 Deposition unerlässlich für eine zukünftige Verfeinerung der Berechnung.

Einsparungen von Gesundheitskosten durch Luftschadstoffrückhalt

Luftschadstoffbelastung erhöht Morbiditäts- und Mortalitätsrisiken erheblich, insbesondere die Risiken von Herz-Kreislauf- und Atemwegserkrankungen (vgl. WHO 2021). Zu den Krankheiten, die durch kurz- und langfristige Exposition entstehen können, gehören Bronchitis bei Kindern und Erwachsenen, Schlaganfälle, chronisch obstruktive Lungenerkrankungen (COPD) und Krebserkrankungen der Atemwege. Für die Betroffenen bedeutet dies eine teilweise oder vollständige Einschränkung ihrer Tätigkeit, die wirtschaftlich bewertet werden kann (vgl. WHO 2013). Im Sinne einer Schadenskostenbetrachtung, kann aus Dosis-Wirkungs-Funktionen und Informationen zu Gesundheitskosten abgeschätzt werden, wie hoch die Krankheitskosten sind, die sich durch die Schadstoffreduktion einsparen lassen. In der Methodenkonvention 3.1 des Umweltbundesamtes werden Kostensätze für die Gesundheitsschäden aus den oben beschriebenen Schadstoffen aufgeführt (Matthey/Bünger 2020). Die Kosten wurden anhand einer Kombination von Maßstäben monetär bewertet, u. a. Euro pro verlorenes Lebensjahr durch vorzeitigen Tod, Euro pro Krankenhauseinweisung wegen Atemwegs- oder Herzerkrankungen, Euro pro Tag teilweiser oder vollständiger Arbeitseinschränkung und Euro pro Fall von Säuglingssterblichkeit oder Bronchitis bei Kindern (Holland 2014). Der monetäre Wert der eingesparten Gesundheitskosten ergibt sich aus der Multiplikation der geschätzten zurückgehaltenen Schadstoffmenge mit dem jeweiligen Kostensatz.

Annahmen im Wirk-Tool, Limitationen und weiterer Forschungsbedarf

Die Gesundheitskosten, die den jeweiligen Schadstoffen zugeordnet sind, ändern sich zeitlich, da sich auch hier die zu Grunde liegenden Berechnungsmethoden ändern. Daher stellen die im Tool angenommen Kostensätze nur eine Momentaufnahme dar. O₃ wird in emissionsbasierten Kostenbewertungen in der Regel nicht berechnet, da O₃ normalerweise durch Sekundärreaktionen in der Luft entsteht und nicht direkt als Schadstoff emittiert wird.

Biodiversität

Die Biodiversität kann anhand verschiedener Kriterien charakterisiert werden. Funktionelle Vielfalt beschreibt die Vielzahl von Arten mit unterschiedlichen Funktionen innerhalb eines Ökosystems, während der Artenreichtum die Gesamtzahl der verschiedenen Arten angibt. Schließlich beschreibt die Abundanz der Arten das relative Vorkommen einer Art in einem bestimmten Ökosystem. Die positiven Auswirkungen der Biodiversität breiten sich in der Regel in einer ökologischen Gemeinschaft aus (Muller et al. 2014), deren Grundlage die Begrünung ist.

Im Kontext eines Gründaches haben verschiedene Studien gezeigt, dass die Substratdicke zu den wichtigsten Faktoren für die Pflanzenvielfalt gehört (Aloisio et al. 2020; Braaker et al. 2014; Madre et al. 2014; van der Kolk et al. 2020). Ein dickeres Substrat ermöglicht es nicht nur größeren Pflanzenarten, Wurzeln zu schlagen, sondern hat auch eine größere Wasserrückhalt- und Nährstoffspeicherkapazität, was ideal für die Ausbreitung von Wildpflanzenarten durch Wind oder Tiere ist. Die Vielfalt, die durch die Ansiedlung von Wildpflanzen entsteht, hängt stark von der Umgebung ab. Aloisio et al. (2020) stellten fest, dass die Menge an Grünfläche, die ein Gründach umgibt, etwa 80% der Varianz des neuen Artenreichtums auf dem Gründach erklärt.

Mit dem Vorhandensein einer vielfältigen, robusten Vegetationsschicht werden verschiedene Tiere beginnen, das Gründach zu besuchen und zu besiedeln und Nischen in der neuen ökologischen Gemeinschaft zu besetzen. Sowohl für flugfähige als auch für flugunfähige Arthropoden (Gliederfüßer) sind höhere Gründächer schwieriger und gefährlicher zu erreichen (Braaker et al. 2017; MacIvor 2016; Wang et al. 2017). Wang et al. (2017) stellten in Übereinstimmung mit Belcher et al. (2019) fest, dass diese Beziehung zur Dachhöhe auch für die Vogelvelfalt gilt. Zusätzlich haben Braaker et al. (2017) und Tonietto et al. (2011) beobachtet, dass der Arthropodenartenreichtum mit dem Vegetationsreichtum und der Vegetationsdecke zunimmt, während die Substratdicke positiv mit der Bienenvielfältigkeit und

der Abundanz von Ameisen verbunden ist (Kratschmer et al. 2018; Kyrö et al. 2020). Da der Vegetationsreichtum auch mit der Substratdicke zusammenhängt, sollte es in Zukunft eine wesentliche Eingabe für die Betrachtung im Wirk-Tool sein.

Die Auswirkungen von zusätzlichen PV-Anlagen auf einem Gründach sind unterschiedlich. Während die PV-Anlagen einen Teil des Daches beschatten, was den Trockenheitsstress verringern kann, kann zu starke Verschattung unter Umständen das Wachstum der darunter liegenden Vegetation behindern. Nash et al. (2016) vermuten, dass Schatten in Kombination mit der Konzentration des Regenwassers an der unteren Kante eines PV-Moduls unterschiedliche Mikrobiome schafft, die die Pflanzenvielfalt fördern. Dies wird von Köhler et al. (2007) in einer mehrjährigen Studie bestätigt, während Schindler et al. (2018) jedoch keine Auswirkungen von PVs auf den Artenreichtum von Pflanzen feststellen können. In ähnlicher Weise fanden Schindler et al. (2018) keine eindeutige Auswirkung auf den Arthropodenreichtum insgesamt, aber Nash et al. (2016) sammelten Nachweise, die darauf hindeuten, dass flugfähige Arthropodenarten in der Nähe von PV-Gründächern weniger häufig sind als in der Nähe von reinen Gründächern.

Da die Substratdicke die einzige Variable ist, die sich in den vorliegenden Studien konsistent positiv auf die biologische Vielfalt auf Dächern auswirkt und die sich zwischen den unterschiedlichen Dachvarianten unterscheidet, wird sie als Basisgröße für die Bewertung herangezogen. Für eine vergleichende Betrachtung zwischen unterschiedlichen Dachflächen ließe sich die Gebäudehöhe ebenfalls berücksichtigen, dies entspricht jedoch nicht dem im Wirk-Tool gewählten Ansatz eines Vergleiches derselben Dachfläche in unterschiedlichen Ausführungen Gründächer, entsprechend der Beschreibung der technischen Varianten mit einer Substratdicke von 10 cm, werden mit 5 bewertet, während PV-Gründächer mit einer Substratdicke von 8 cm mit 4 bewertet werden. Das PV-Dach ohne Substrat schließlich wird mit 0 bewertet.

Annahmen im Wirk-Tool, Limitationen und weiterer Forschungsbedarf

Die Wechselwirkung zwischen Photovoltaik auf PV-Gründächern und biologischer Vielfalt muss weiter erforscht werden, um die künftige Umsetzung zu verbessern, da die derzeitigen Ergebnisse nicht eindeutig sind.

Wasserrückhalt und damit verbundene Einsparungen

Die Bedeutung der Wasserrückhaltung liegt in der Verringerung der Abflussspitzen, die zu Überlastung der Entwässerungssysteme und Überschwemmungen und damit zu erheblichen Schäden in einer Gemeinde führen können. Begrünte Dächer verringern den Abfluss, indem sie die Niederschläge in ihrem Substrat absorbieren und so die Gesamtmenge, die in einem gegebenen Moment in ein Abwassersystem eintretenden Niederschläge verzögern. Diese Gesamtwirkung nimmt jedoch mit zunehmender Intensität und Dauer der Niederschläge ab (Castiglia Feitosa/Wilkinson 2016; Schultz et al. 2018). Studien zeigen, dass unbegrünte Bodenflächen den Abfluss am stärksten dämpfen können, allerdings sind sie auch anfälliger für schnellere Erosion. Die Wurzeln der Vegetation verankern sich in den Substraten, allerdings hat diese Vegetation auch Nachteile. Pflanzen verringern die Gesamtfläche für die potenzielle Absorption, indem sie den Abfluss vom Dach ablenken und gleichzeitig die Verdunstungsrate des Bodens durch ihren Schatten verringern (Liu et al. 2020). Dies kann sich in Gebieten mit häufigen Niederschlägen als nachteilig erweisen, da der Feuchtigkeitsgehalt des Substrats vor dem Niederschlag ein entscheidender Faktor für die Wasserrückhaltung eines Gründachs ist (Castiglia Feitosa/Wilkinson 2016; Liu et al. 2020; Schärer et al. 2020). Ähnlich intuitiv ist die Tatsache, dass dickere Substrate im Laufe der Zeit eine bessere Rückhaltung des Abflusses ermöglichen (Castiglia Feitosa/Wilkinson 2016; Schultz et al. 2018). Die Rückhaltung des Abflusses wird durch den Abflusskoeffizienten bewertet, der den Anteil des Wassers beschreibt, der von einer bestimmten Oberfläche abfließt (vgl. z. B. Maniak 2016). Sowohl die Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft,

Abwasser und Abfall (DWA) als auch das Deutsche Institut für Normung (DIN) haben Koeffizienten für verschiedene Gründacharten, die im Wirk-Tool verwendet werden.

Rückhalt während eines Starkregenereignisses

Zur Berechnung des Niederschlagsrückhalts für verschiedene Dacharten und Dachneigungen werden die Spitzenabflussbeiwerte aus DIN 1986-100 (Absatz 14.2.3) (2016) genutzt. Da diese Werte (Ψ) den Anteil des Wassers beschreiben, der von einer Oberfläche abfließt, werden die Werte von $1 - \Psi$ zur Berechnung des Anteils des von den Dächern zurückgehaltenen Wassers verwendet. Für Schrägdächer ebenso wie mit Abdichtungsbahnen, Metall oder Glas gedeckte Flachdächer liegt der Spitzenabflussbeiwert bei 1, d. h. sämtlicher Regen wird abgeleitet. Für Gründächer über 5° Neigung ($\Psi = 0,7$) werden bereits 30% des Regenwassers vom unmittelbaren Abfluss zurückgehalten. Bei geringerer Neigung und einer Substratdicke ab 10 cm steigt dieser Anteil auf 60% ($\Psi = 0,4$). Als Starkregenereignis wird der zweijährige 10-Minuten Regen betrachtet, der nach DWA-A 118 (2019) für die Bemessung von Entwässerungsnetzen von u. a. Stadtzentren und Wohngebieten verwendet wird. Die entsprechenden Niederschlagsdaten, auf PLZ-Ebene gemittelt, stammen aus dem KOSTRA-DWD-2020 Datensatz (siehe Tabelle A 25). Aus der Regenspende, hinterlegt in Liter pro Sekunde pro Hektar, dem Abflussbeiwert und der für Begrünung zur Verfügung stehende Dachfläche kann die zurückgehaltene Wassermenge in Kubikmetern ermittelt werden.

Die Bewertung dieser Ergebnisse wird mit einer idealen Situation verglichen, in der für die Eingangsparameter die maximal mögliche Wasserretention zur Verfügung steht. Anschließend wird eine Skala von 0 bis 5 benutzt, die auf dem Prozentsatz des idealen Wasserrückhalts basiert, der von jeder Dachoption erreicht wird.

Rückhaltung der durchschnittlichen jährlichen Niederschlagsmenge

DIN 1986-100 (2016) und DWA-M 153 (2007) enthalten neben den Spitzenabflussbeiwerten ebenfalls mittlere Abflussbeiwerte, die entsprechend dem Vorgehen oben mit den 30-jährigen durchschnittlichen Jahresniederschlagsdaten des DWD multipliziert werden konnten: $(1-\Psi) \cdot \text{Regenmenge}$. Die Skala für die Bewertung wurde mit der gleichen Methode bestimmt, die im vorherigen Abschnitt beschrieben wurde.

Annahmen im Wirk-Tool, Limitationen und weiterer Forschungsbedarf

Eine Unterscheidung zwischen Gründächern und PV-Gründächern erfolgt hier lediglich über die Substratdicke (vgl. Im Wirk-Tool betrachtete technische Varianten), da für PV-Gründächer keine spezifischen Abflussbeiwerte vorlagen. Erste Studien weisen jedoch darauf hin, dass sich PV-Gründächer und Gründächer bezüglich der Abflussbeiwerte nicht fundamental unterscheiden und diese Annahme zulässig erscheinen lässt (Westerholt 2022). Für das PV-Dach werden die Abflussbeiwerte für Glasdächer verwendet.

Speziell für die Wirkindikatoren zu Wasserrückhalt wäre perspektivisch die Betrachtung von Retentions Gründächern, die explizit diesen Aspekt des Gründachs optimieren, äußerst interessant. Vorausgesetzt es liegen verlässliche Abflussbeiwerte für diesen Dachtyp vor, wäre dies über eine Erweiterung der im Wirk-Tool definierten technischen Varianten mit vergleichsweise geringem Aufwand möglich und könnte den Nutzen des Tools steigern. Auch die genauere Differenzierung zwischen reinen Gründächern und PV-Gründächern sollte weiterverfolgt werden, indem für letztere spezifische Abflussbeiwerte ermittelt und im Wirk-Tool hinterlegt werden.

Einsparungen bei der Kanalisation

Anhand der Berechnungen aus dem ersten Abschnitt kann der reduzierte Bedarf an Kanalisationsinfrastruktur ermittelt werden, der für den Spitzenabfluss eines Gebäudes erforderlich ist. Dazu sollen die Kosten für den Ausbau von Niederschlagswasserrückhalteräumen für die Entlastung des

Kanalnetzes eingesetzt werden. Für die Bewertung der Wasserregulierungsfunktion soll sich hier auf Maßnahmen der öffentlichen Abwasserkanalisation und nicht auf private Schutzmaßnahmen bezogen werden. Die Fähigkeit der Kanalisation, Starkniederschläge aufnehmen zu können, ist von einer hydraulisch guten Leistungsfähigkeit des Kanalnetzes abhängig. Eine Verbesserung dieser grundsätzlichen Leistungsfähigkeit ist jedoch nur schwer umsetzbar, bzw. schwer genau messbar. Daher liegt der Fokus bei der Bewertung hier auf zusätzlichen Entlastungs- und Rückhaltebauwerken, welche zusätzlich den Regenwasserabfluss im Kanalnetz unterstützen sollen (Brombach et al. 2013). Die genauen Kosten für die unterschiedlichen Rückhaltebauwerke variieren sehr stark und sind abhängig von ihrer Bauweise (geschlossen oder offen; Erd- oder Betonbauweise) und ihrem Volumen (mit steigendem Volumen sinkende Kosten pro m³). Um dennoch eine Annäherung der Kosten zu finden, wurden die Kosten von unterschiedlichen Regenrückhalteanlagen aus Leimbach et al. (2018) entnommen. Daraus wurden mittlere jährliche Kosten für geschlossene Rückhaltbauwerke von 87,80 €/m³ und für offene Rückhaltebauwerke 12,96 €/m³ ermittelt. Da Leimbach et al. (2018) bereits Lebensdauer, wie auch Investitions- und Betriebskosten miteinbezogen haben, müssen die Werte nicht mehr weiter umgerechnet werden.

Annahmen im Wirk-Tool, Limitationen und weiterer Forschungsbedarf

Eine Bewertung der monetären Einsparpotenziale ist bisher nicht umgesetzt, da es sich um eine andere Metrik des Wirkindikators zum Starkregenrückhalt handelt und keinen eigenständigen Indikator. Momentan werden diese Einsparpotenziale im Wirk-Tool zwar berechnet, jedoch nicht in der Benutzeroberfläche ausgewiesen, weil dies einer doppelten Aufführung des gleichen Indikators gleich käme. Perspektivisch wäre es jedoch denkbar, das Tool so weiterzuentwickeln, dass Umschaltmöglichkeiten der angezeigten Metriken bestünden. Dann könnten im Bereich Regenwasserrückhalt neben der von 0 bis 5 reichenden Skala bei Bedarf auch die errechneten physischen und monetären Größen angezeigt werden.

Einsparungen bei der Niederschlagswassergebühr

Dieser Indikator erfasst einen zusätzlichen betriebswirtschaftlichen Nutzen für die Dacheigentum innehabenden Personen, da viele Kommunen eine Reduktion der Niederschlagswassergebühren für begrünte Dächer gewähren. Wie hoch die Reduktion ist und welche Anforderungen das Gründach dafür erfüllen muss, unterscheiden sich von Kommune zu Kommune.

Dem Wirkindikator liegt eine Übersicht der Niederschlagswassergebühren für 160 Städte mit mindestens 50.000 Einwohnenden, sowohl in €/m² als auch in Prozent, zugrunde (Mann et al. 2022). Über die Postleitzahl wird im Wirk-Tool jedes Dach der entsprechenden Kommune zugeordnet. Für die Bewertung wird die Verteilung der prozentualen Einsparung aller Kommunen in Quintile unterteilt. (PV-)Gründächer in Kommunen, die die prozentual höchsten Einsparungen anbieten ($\geq 77\%$, oberstes Quintil der Verteilung), werden mit 5 bewertet, solche in Kommunen mit einer Einsparung unter 45% (unterstes Quintil) mit 1. PV-Dächer werden mit 0 bewertet.

Annahmen im Wirk-Tool, Limitationen und weiterer Forschungsbedarf

Im Wirk-Tool sind Niederschlagswassergebühren (Stand 2022) nur für eine begrenzte Anzahl von Städten hinterlegt (160, ~36% der Bevölkerung), da diese Gebühren von Gemeinde zu Gemeinde variieren und im Einzelfall abgefragt werden müssen. Darüber hinaus kann es je nach Stadt besondere Bedingungen für die Gebührenreduzierung geben, etwa eine bestimmte Mindestaufbauhöhe, dauerhafte Begrünung, eine geschlossene Pflanzendecke oder Kombinationen aus diesen und weiteren Parametern. Eine Prüfung dieser teils komplexen Kriterien ist im Wirk-Tool anhand der absichtlich einfach gehaltenen Eingabeparameter nicht möglich und daher nicht angelegt. Bei den Geldwerten handelt es sich daher um hypothetische maximale Einsparraten, die für einige Haushalte möglicherweise nicht

erreichbar sind. Darauf wird mit einer Notiz verwiesen. Perspektivisch ließe sich mit (optionalen) weiteren Eingabeparametern und Abfragen diese Prüfung in das Wirk-Tool integrieren.

Zu berücksichtigen ist, dass der hier gewählte Bewertungsansatz strenggenommen von der für die anderen Wirkindikatoren gewählten Referenz abweicht. Es wird nicht dasselbe Gebäude am gleichen Ort mit unterschiedlichen Dachausführungen verglichen, sondern vielmehr dasselbe Gebäude an unterschiedlichen Standorten. Dies geschieht, um hervorzuheben, dass dieselbe Dachausführung an unterschiedlichen Orten unterschiedlich vorteilhaft zu beurteilen ist.

Arbeitsproduktivität

Umwelteinflüsse auf die Arbeitsproduktivität können unter anderem in Form von Hitzestress auftreten, wenn die thermischen Bedingungen das Komfortniveau einer Person für Spitzenleistungen überschreiten. Fokus dieses Wirkindikators sind die Arbeitsbedingungen in dem (Büro)Gebäude, dessen Dach potenziell begrünt und oder mit einer PV-Anlage versehen werden soll.

Die Arbeitsproduktivitätseffekte von Hitzebelastung wurden bisher hauptsächlich in hochintensiven manuellen Arbeitsumfeldern im Freien wie der Landwirtschaft, dem Fertigungssektor oder dem Bauwesen größtenteils in Ländern des globalen Südens direkt untersucht (Hsiang 2010; Ioannou et al. 2017; Li et al. 2016; Sahu et al. 2013; Sett/Sahu 2014; Somanathan et al. 2021; Yi/Chan 2017). Während dies für manuelle Tätigkeiten im Freien an heißen Sommertagen auch in Deutschland relevant sein könnte, so ist es bedeutend schwieriger, Effekte für Wirtschaftssektoren mit weniger exponierten Arbeitsumgebungen und besseren Schutzmaßnahmen abzuschätzen, wie sie für diesen Wirkindikator relevant wären. Darüber hinaus gibt es in den Studien, in denen Produktivitätsverluste genau quantifiziert werden, keine Konsistenz bei der Basistemperatur, die für ideale Arbeitsbedingungen verwendet wird. Sie schwankt entweder zwischen 24 und 26 Grad Celsius oder wird überhaupt nicht angegeben. Es sollte auch beachtet werden, dass bei größeren Untersuchungen zu hitzebedingten Produktivitätseinbußen die direkten Verluste in den oben genannten Branchen oft mit indirekten Auswirkungen auf die Lieferketten der gesamten Wirtschaft verbunden sind, die sich langfristig noch verstärken (Borg et al. 2021; Zhao/Srebric 2012). Derartige Messungen liegen jedoch außerhalb des Rahmens des vorliegenden Projekts.

Da dieser Indikator in erster Linie von den Innentemperaturen beeinflusst wird, wird vereinfachend die gleiche Bewertungsmethode angewendet, wie für den verminderten Kühlbedarf (siehe Vermiedener Kühlbedarf). Daher werden Gründächer in der Skala mit 5 bewertet, PV-Gründächer mit 4, und PV-Dächer mit 1.

Temperaturminderung (Mikro- und Makroebene)

Stark erschlossene Gebiete wie Städte und Industriezonen verursachen ein Phänomen, das als städtische Wärmeinsel bekannt ist (engl. urban heat island, UHI). Aufgrund ihrer dichteren Bebauung, die Luftaustausch verringert, Wärme speichernden Baumaterialien und geringem Ausmaß an grüner und blauer Infrastruktur sowie industriellen und häuslichen Wärmeemissionen herrschen in diesen Gebieten höhere Temperaturen als in der ländlichen Umgebung. Dieser Effekt kann an unterschiedlichen Punkten gemessen werden: In Form von 1) Oberflächentemperaturen, 2) Lufttemperaturen bis zu den Dächern der städtischen Umgebung und 3) Lufttemperaturen weiter oben über den Dächern der Städte. Die Untersuchung der Auswirkungen von Gründächern auf die UHI erfolgt hauptsächlich durch die ersten beiden Messungen. Gründächer führen zu einer Temperaturminderung in einer städtischen Umgebung, indem sie Schatten spenden, mehr Sonnenstrahlung reflektieren als herkömmliche Dachflächen und die Luft durch Verdunstung kühlen.

Diese Effekte werden größtenteils von den Eigenschaften der Vegetation beeinflusst, es gibt z. B. positive Beziehungen zwischen Temperaturminderung, Feuchtigkeitsgehalt und Blattflächenindex

(Kumar/Kaushik 2005; Li et al. 2014; Yang et al. 2018). Zusätzlich zu den Vegetationsvariablen wirkt sich auch das städtische Layout in der Umgebung begrünter Dächer auf die Reduzierung von UHI aus. In dichter bebauten Stadtteilen mit begrünten Dächern sind die Kühlungseffekte in der Regel besser als in weniger dicht bebauten Stadtteilen, und das betrifft sowohl die Dachfläche als auch die Lufttemperatur darüber (de Munck et al. 2018; Imran et al. 2018; Morakinyo et al. 2017; Peng/Jim 2013; Sharma et al. 2016). Im Allgemeinen verbreiten sich diese Effekte nicht stark nach unten durch die urbane Landschaft (Knaus/Haase 2020; Lalosevic et al. 2018; Peng/Jim 2013), so dass höhere Gebäude keine großen Auswirkungen auf die bodennahen Lufttemperaturen oder den Komfort haben. Allerdings wird die Kühlung über dem Dach selbst nicht wesentlich von der Gebäudehöhe beeinflusst (Zonato et al. 2021).

Schließlich gibt es auch Studien über die Auswirkungen von PV-Anlagen auf UHI. Einige Studien deuten auf einen leicht kühlenden Effekt hin (Berardi/Graham 2020; Salamanca et al. 2016), aber es gibt auch Belege für den gegenteiligen Effekt (Zonato et al. 2021), allerdings bewegt sich die Bandbreite dieser Effekte zwischen $-0,8$ und $+0,25$ Grad Celsius. Alle zu diesem Thema gefundenen Studien wurden als Simulationen durchgeführt, daher ist es schwierig, die genauen Auswirkungen auf diesen Indikator in der realen Welt zu bestimmen. Zonato et al. (2021) untersuchten ebenfalls die Auswirkungen einer PV-Anlage auf Gründächern in verschiedenen städtischen Konfigurationen und stellten fest, dass die Lufttemperaturen in allen Varianten höher waren als bei reinen Gründächern, jedoch insgesamt eine geringfügige Abkühlung eintrat. Die Auswirkungen von PV-Modulen sind damit sicher noch nicht abschließend erforscht, aber eine Kombination aus PV- und Gründach scheint im Hinblick auf Temperaturminderung in der Umgebung tendenziell etwas weniger wirksam zu sein als reine Gründächer, was mit der verringerten Verdunstung im verschatteten Bereich unter den Paneelen zusammenhängen könnte (Jahanfar et al. 2016).

Idealerweise stünden zur Berechnung des Wirkindikators Temperaturminderung die Bebauungsdichte und der Gründachanteil in der Nachbarschaft zur Verfügung, ebenso Vegetationsvariablen wie Blattflächenindex und Feuchtigkeitsgehalt der Pflanzen und des Substrats. Grundlage für die Bewertung der Temperatursenkung im Wirk-Tool stellen die DWD-Daten zur Bodenfeuchte dar. Diese werden als Näherungswert für die Bodenfeuchte von Gründächern herangezogen. Dabei handelt es sich zwangsläufig um eine grobe Näherung, die jedoch den Vorteil aufweist in einem deutschlandweit einheitlichen Raster zur Verfügung zu stehen. Über die Lokalisierung anhand der Postleitzahl ist es so möglich, eine Berücksichtigung der lokalen Bodenfeuchtebedingungen in diesem Wirkindikator zu realisieren. Die Daten bestehen aus dreißigjährigen Durchschnittswerten für die Monate Juni, Juli und August. In diesem Zeitraum ist die größte Verringerung der Auswirkungen der städtischen Wärmeinsel zu erwarten.

Aus der Vielzahl an vorliegenden Studien wurden vereinfachte funktionale Zusammenhänge abgeleitet, um ausgehend vom Bodenwassergehalt, der Gebäudehöhe, der Bevölkerungsdichte (als Proxy für Bebauungsdichte) und dem PV-Layout drei Kennwerte zu ermitteln: die Dachflächentemperaturminderung, die Über-Dach-Lufttemperaturminderung und die Über-Boden-Lufttemperaturminderung.

Zunächst wurde eine einfache lineare Regression auf die durchschnittlichen Bodenfeuchtemessungen für die Sommermonate angewandt. Daten waren nur für die Formeln für die Dachflächen- und Über-Boden-Lufttemperatur verfügbar. Zur Berechnung der Formel für die Über-Dach-Lufttemperatur wurde das durchschnittliche Verhältnis zwischen Über-Dach-Lufttemperatur und Über-Boden-Lufttemperatur - unter Berücksichtigung der Gebäudehöhe - auf die Formel für die Über-Boden-Lufttemperatur angewendet.

Zweitens wurde die Auswirkung der städtischen Konfiguration auf die Temperaturminderungsleistung durch die Bevölkerungsdichte approximiert. Anhand der von der EU entwickelten 3-stufigen DEGURBA (degree of urbanisation, dt. Grad der Urbanisierung) Klassifizierungen (vgl. Eurostat 2011) wird ein Multiplikator auf die Ergebnisse der ersten Regression angewandt, wenn die Dichte hoch oder mittel ist;

eine niedrige Dichte bedeutet einen Multiplikator von 1. Lediglich für die Dachoberflächentemperatur lagen detaillierte Daten aus den oben genannten Studien zur Verfügung, um die Zusammenhänge zwischen unterschiedlichen urbanen Konfigurationen (niedriger, mittlerer und hoher Dichte) und der Temperaturminderung zu berechnen. Für die Über-Dach und Über-Boden-Lufttemperatur wurden die Werte analog zum Vorgehen oben bei der Feuchtigkeitsmessung ermittelt.

Abschließend wurde ein Multiplikator berechnet, um die mit der Gebäudehöhe abnehmende Wirkung auf die Über-Boden-Lufttemperatur zu berücksichtigen. Für diesen Faktor lagen ausreichend Daten zur direkten Berechnung vor. Der Faktor ist das Ergebnis einer einfachen linearen Regression mit einem Achsenabschnitt bei $y = 1$, d. h. bei einer Gebäudehöhe von 0 m gibt mindert die Höhe den Einfluss auf die bodennahe Lufttemperatur noch nicht, sondern erst mit positiver Gebäudehöhe.

Die Über-Boden-Lufttemperaturminderung wird als Wirkindikator „Temperaturminderung im Quartier“ als Makroebenenindikatoren (quartierbezogen) betrachtet. Die „Dachflächentemperaturminderung“ und die „Über-Dach-Lufttemperaturminderung“ haben hauptsächlich Einfluss auf die nötige Kühlung im Gebäude und werden daher zusammengefasst und als separater Wirkindikator „Dachtemperaturminderung“ auf der Mikroebene ausgewiesen (findet ebenso Eingang in die Abschätzung für den Wirkindikator „Vermiedener Kühlbedarf“). Die final berechneten Temperaturminderungseffekte werden zur Bewertung mit der Reduzierung derselben Dachfläche in einer dichten städtischen Konfiguration mit niedrigen Gebäuden verglichen, d. h. der Situation in der der Effekt maximal und von größter Bedeutung wäre. Bei größerer Gebäudehöhe und geringerer Bevölkerungsdichte reduziert sich dementsprechend die Bewertung entsprechend der Skala in Tabelle 6 im Endbericht.

Einfluss auf die Gesundheit

Der Einfluss begrünter Dächer auf die Gesundheit ergibt sich am unmittelbarsten aus der Absorption von Luftschadstoffen und der Senkung der Umgebungstemperatur.

Es gibt zahlreiche Schadstoffe in der Luft einer städtischen Umgebung, aber Feinstaub (PM_{2,5} und PM₁₀), Ozon (O₃), Stickstoffdioxid (NO₂), Schwefeldioxid (SO₂) und Kohlenmonoxid (CO) werden von der Weltgesundheitsorganisation (WHO) als die schwerwiegendsten für die menschliche Gesundheit betrachtet (vgl. WHO 2021). Diese werden stark mit erhöhten Sterblichkeits- und chronischen Krankheitsraten durch verschiedene kardiovaskuläre und respiratorische Erkrankungen in Verbindung gebracht, die sich im Endeffekt auf die Gesundheitskosten und die Arbeitsproduktivität auswirken (Friedrich/Kuhn 2011; vgl. REEEM Project 2019; Schulz et al. 2019; vgl. WHO 2013). Die Studien, die den Rückhalt von Luftschadstoffen durch Gründächer untersuchten, befassten sich hauptsächlich mit PM₁₀, NO₂, SO₂ und O₃, und die von der WHO empfohlenen Grenzwerte für diese Schadstoffe liegen bei Konzentrationen von jeweils 15, 10, 40 und 60 Mikrogramm pro Kubikmeter auf Jahresbasis (vgl. WHO, 2021). Das Umweltbundesamt (Matthey/Bünger, 2020) hat die Gesundheitskosten pro Tonne für verschiedene emittierte Luftschadstoffe tabellarisch dargestellt, die im Excel-Tool in einer einfachen algebraischen Formel aus den Ergebnissen von Schadstoffrückhaltstudien verwendet werden können, um einen Teil der Gesundheitskosteneinsparungen zu berechnen (siehe Einsparungen von Gesundheitskosten durch Luftschadstoffrückhalt).

Die hohen Temperaturen können nicht nur akute Erkrankungen wie Hitzschlag auslösen, sondern auch bereits bestehende Erkrankungen verschlimmern. Darüber hinaus können solche Bedingungen zu einer weiteren Verbreitung von durch Vektoren übertragenen Krankheiten führen (vgl. EEA 2022). Diese Auswirkungen werden am besten während verschiedener Hitzewellen beobachtet, wenn ein starker Anstieg der Sterblichkeitsrate und der Krankenhausaufenthalte stattfindet (Adélaïde et al. 2022; D'Ippoliti et al. 2010; Laaidi et al. 2012), aber die subtileren Auswirkungen von Hitzephänomenen wie städtischen Hitzeinseln sind noch nicht gründlich erforscht worden. Es gibt bisher keine eindeutigen Untersuchungen zu den Gesundheitskosten im Zusammenhang mit einem gradweisen

Temperaturanstieg, sondern vor allem Berechnungen zum erhöhten Sterberisiko (Heaviside et al. 2016). Es müssten zusätzliche Berechnungen durchgeführt werden, um Metriken wie verlorene Lebensjahre oder verringerte Produktionskapazitäten und die damit verbundenen Verluste monetär zu quantifizieren, dies geht jedoch über den Umfang des aktuellen Projektes weit hinaus.

Weil der Einfluss verschiedener Dachtypen auf die Gesundheit über Mechanismen geschieht, die bereits in anderen Wirkindikatoren abgebildet sind, kann der Wirkindikator Gesundheit über einen Durchschnitt jener Indikatoren bestimmt werden. Konkret wird er berechnet aus dem Durchschnitt des Luftschadstoffrückhalts, der Temperaturminderung im Quartier und des vermiedenen Kühlbedarfs. Dabei trägt die Quartierstemperaturminderung den gesundheitlichen Auswirkungen der Hitze im Außenbereich Rechnung, während der vermiedene Kühlbedarf als Proxy für verringerte Hitzebelastung innerhalb des Gebäudes agiert.

Treibhausgas-Emissionen durch die Herstellung

Während des gesamten Lebenszyklus einer PV-Anlage entsteht der größte Teil der THG-Emissionen bei der Herstellung, dem Transport und der Installation der Anlage. Hou et al. (2016) stellten fest, dass dies zwischen 85 und 89% der gesamten THG-Emissionen einer PV-Anlage ausmacht, wobei die Produktion von Solarsilizium mit etwa 40% der Emissionen in dieser Phase den größten Anteil ausmacht. Neben dem eigentlichen PV-Modul umfasst die PV-Anlage auch Wechselrichter, Unterkonstruktion und elektrische Leitungen. Aufgrund unterschiedlicher Produktionsstandards und -methoden verändert die Region, in der die Komponenten hergestellt werden, den anfänglichen Kohlenstoff-Fußabdruck der PV-Anlage. Laut Umweltbundesamt haben in der EU produzierte PV-Systeme die geringsten Emissionen, gefolgt vom asiatisch-pazifischen Raum ohne China (APAC), den USA und schließlich China. PV-Module auf Basis von mono- und multikristalline Silizium-Solarzellen (mono-c Si; multi-c Si) sind in der Produktion auf kWh-Basis energieintensiver als Dünnschichtsolarzellen aus beispielsweise Cadmium-Tellurid (CdTe) oder Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid (CIGS) (de Wild-Scholten 2013; Hengstler et al. 2021; Peng et al. 2013). Allerdings entfallen nur ca. 5% der globalen Modulproduktion auf Dünnschichtsolarzellen, wohingegen monokristallines Silizium alleine ca. 80% des Weltmarktes abdeckt (Philipps et al. 2023).

Bezogen auf die Installationsfläche ergeben sich je nach Herstellungsregion folgende technologieabhängige Spannen zur Herstellung der PV-Module, die die mit Abstand größten Umweltwirkungen im Lebenszyklus einer PV-Anlage aufweisen: Mono-c Si = 153–249 kg CO₂-Äq./m²; Multi-c Si = 114–175 kg CO₂-Äq./m²; CdTe = 45–57,2 kg CO₂-Äq./m²; CIGS = 69,2–102 kg CO₂-Äq./m² (Hengstler et al. 2021).

Die THG-Emissionen bei der Herstellung von Gründächern sind ebenfalls sehr unterschiedlich und hängen von der Spezifikation der Konstruktion ab. In der Regel sind natürliche Komponenten gegenüber künstlichen Optionen aufgrund des höheren Produktionsbedarfs der letzteren sehr vorteilhaft; eine Zwischenlösung kann recyceltes Material sein. Darüber hinaus liegt die Vermutung nahe, dass ein stärkerer lokaler Bezug, d. h. eine größere Nähe zum Installationsort, auch zu geringeren THG-Emissionen bei der Herstellung führt (Bozorg Chenani et al. 2015). Peri et al. (2012) deuten darauf hin, dass die Produktion der wasserspeichernden Schicht die meisten THG-Emissionen verursacht. Insgesamt lagen die THG-Emissionen von Gründächern pro Quadratmeter im Allgemeinen zwischen 15 und 38 kg CO₂/m² (Bozorg Chenani et al. 2015; Giamaa et al. 2021; Kuronuma et al. 2018; Peri et al. 2012).

Obwohl die verschiedenen technischen Ausführungsfaktoren, die die produktionsbedingten THG-Emissionen dieser Dachtypen beeinflussen, nicht genau berücksichtigt werden können, reichen die einzelnen Spannen aus, um qualitative Aussagen zu treffen, die als Bewertungsskala verwendet werden können. Begrünte Dächer sind am wenigsten THG-intensiv und können daher mit 5 bewertet werden, während PV-Dächer unabhängig vom Zellentyp deutlich mehr Emissionen aufweisen und daher mit 0 bewertet werden. Schließlich kann davon ausgegangen werden, dass das kombinierte PV-Gründach in

etwa die Summe der beiden vorgenannten Optionen pro Quadratmeter emittiert, wobei sich die PV-Fläche um den Flächennutzungsfaktor der Ausführung minimiert. Dadurch fällt die Gesamtemission bei den hier beispielhaft verwendeten Varianten (Ost-West = 65%, Süd = 45,6%) immer noch geringer aus als bei der reinen PV-Ausführung. Daraus ergibt sich eine Bewertung von 2 für die Ost-West Ausführung und von 3 für die Süd Ausführung.

Annahmen im Wirk-Tool, Limitationen und weiterer Forschungsbedarf

Da die technischen Freiheitsgrade im Wirk-Tool eingeschränkt sind, ergeben sich eher feste Einschätzungen zur Bewertung der Emissionen durch die Herstellung. Durch weitere Ausgestaltungsmöglichkeiten (z. B. Anpassung des Flächennutzungsgrades, Substratdicke, Modultechnologie) ließen sich die Ergebnisse detaillieren. Auch liegen für gekoppelte Systeme nur sehr begrenzt komplette Lebenszyklusanalysen vor. Eine Ausweitung der Datenbasis ist hier sinnvoll. Für Gründächer ist zu erwarten, dass generische Daten zu den Lebenszyklusemissionen unterschiedlichen Ausführungen in der ÖKOBAUDAT zeitnah ergänzt werden.

Vor-Ort Verbrauch und Netzaustausch

Je nachdem wie groß die PV-Leistung im Vergleich zum Stromverbrauch des Gebäudes ist, muss mehr oder weniger PV-Strom über den Netzanschlusspunkt des Gebäudes abgeführt werden (Einspeisung). Während die Wartung und Anlagenplanung innerhalb des Gebäudes auf die Eigentum innehabende Person zurückfällt, ist für die Verteilung des rückgespeisten PV-Stroms und die Wartung des dazu notwendigen Verteilnetzes der Netzbetreiber zuständig. In erster Linie muss dieser den stabilen Betrieb des Stromnetzes sicherstellen. Durch den vermehrten Anschluss von dezentralen Erzeugungs- und Verbrauchsanlagen mit schwankendem Profil wird diese Aufgabe zunehmend komplexer. Gegenüber PV-Anlage sind es dabei vor allem die schnell wachsende Zahl an E-Autos und Wärmepumpen, die durch ihre vergleichsweise hohen Leistungsanforderungen eine angepasste Netzplanung notwendig machen (werden) (Kegel et al. 2022). In jedem Falle ist es vorteilhaft, wenn auf lokaler Ebene ein Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch stattfindet, da dadurch nur ein kleiner Teil des Verteilnetzes beansprucht wird und Komponenten wie beispielsweise bestehende Transformatoren länger betrieben werden können. Bei der PV-Einspeisung ist es daher sinnvoll, die nähere Umgebung der Anlage mit zu betrachten, um eine Aussage darüber treffen zu können, inwiefern das Verteilnetz über die lokale Umgebung hinweg beansprucht werden wird. Dazu werden in der Regel Simulationen einzelner Netzstränge durchgeführt, denn die Netzstruktur (Länge, technische Umsetzung, Anzahl weiterer Verbraucher/Erzeuger) kann sich lokal stark unterscheiden (Meinecke et al. 2020).

Eine erste Abschätzung für den Vor-Ort Verbrauch kann jedoch unter der Annahme geschehen, dass die Gebäude der näheren Umgebung alle zum gleichen Netzstrang gehören. Ähnlich wie bei der Ermittlung des Eigenverbrauchs im Gebäude selbst, ist der Vor-Ort-Verbrauch dann durch die Gleichzeitigkeit von Erzeugung und Verbrauch zu bestimmen. Insofern es eine höhere Erzeugung als einen Vor-Ort Verbrauch gibt, muss das Stromnetz auch über die nähere Umgebung hinaus bemüht werden, was wiederum zu einer höheren Netzbelastung führt (abhängig vom individuellen Netzstrang). Für die Abschätzung des Vor-Ort Verbrauchs kann wie folgt vorgegangen werden: Zuerst folgt aus dem Eigenverbrauch im Gebäude, die Rückeinspeisung über den Anschlusspunkt des Gebäudes in die nähere Umgebung. Über das Jahr gesehen ergibt sich so ein Energiemenge, die Vor-Ort verbraucht werden kann. Mittels des spezifischen Ertrags der PV-Anlage (kWh/kWp) kann dann für diese Energiemenge eine zugehörige fiktive Leistung bestimmt werden. Wird folgend angenommen, dass sich diese Leistung gleich auf alle umgebenden Gebäude verteilt, ergeben sich somit fiktive PV-Anlagen mit jeweils gleicher Größe auf den umgebenden Gebäuden. Über die gleiche Berechnungsmethodik wie beim Eigenverbrauch und Einspeisung, wozu neben der symmetrischen Aufteilung der PV-Erzeugerleistung weiterhin das Lastprofil der angrenzenden Gebäude wichtig ist (hier der TABULA Gebäudetypologie folgend), kann dann eine Quote für den Eigenverbrauch und den Nicht-Verbrauch der angrenzenden

Gebäude berechnet werden. Am Ende können diese dann aufsummiert und daraus eine Energiemenge für den Austausch mit dem Netz über die nähere Umgebung hinweg ermittelt werden. Da dies jedoch bei stark unterschiedlichen Verbräuchen/Lastprofilen der Einzelgebäude zu einer Überbewertung geringerer Gebäudeverbräuche führt (z. B. Einfamilienhaus neben Verwaltung – die Verwaltung würde auch den Überschussstrom aus der fiktiven Anlage des Einfamilienhauses verbrauchen), werden zusätzlich Wichtungsfaktoren mittels der individuellen Gebäudeverbräuche eingeführt (Gebäudeverbrauch/Summe aller Verbräuche der nahliegenden Gebäude).

Annahmen im Wirk-Tool, Limitationen und weiterer Forschungsbedarf

Physikalisch wird der eingespeiste PV-Strom durch den nächstliegenden Verbraucher genutzt werden. Die Annahme einer symmetrischen Aufteilung in fiktive PV-Anlagen und festen Lastprofilen der Gebäude stellt eine grobe Vereinfachung dar. Das Gesamtlastprofil der näheren Umgebung bzw. des energetischen Quartiers müsste analysiert werden und mit dem Erzeugerprofil der PV-Anlage abgeglichen werden. Hierfür sind Energieflusssimulationen wie beispielsweise mittels des Energie Prosumer Modells (EProM) des IÖW sinnvoll. Auch basiert die Abschätzung des Vor-Ort Verbrauchs bereits auf der Abschätzung der Eigenverbrauchsquote. Dort auftretende Ungenauigkeiten pflanzen sich hier fort. Außerdem ist zur genauen Berechnung der Wirkungen auf der Netzebene auch die Kenntnis zum Ausbau- und Komponentenstand des Netzstranges notwendig. Hier könnten zukünftig GIS-Daten zur Energieinfrastruktur (wie z. B. der Berliner Energieatlas) einen Mehrwert für ein Berechnungstool darstellen.

Regionalökonomische Wertschöpfung

Ein Aspekt, der in seiner Dimension über die einzelne betrachtete Dachfläche hinausgeht, ist die regional verbleibende Wertschöpfung, die durch die Nachfrage nach Produkten und Dienstleistungen entsteht. Diese beinhaltet etwa zusätzliches Beschäftigteneinkommen und die Schaffung neuer Arbeitsplätze, Unternehmensgewinne und kommunale Steuereinnahmen. Gerade bei größer angelegten Nachrüstungen von Photovoltaik, Grün- und PV-Gründächern im Hausbestand im Rahmen der Quartiersentwicklung, kann diese regionale Wertschöpfung vor Ort spürbar positive Wirkung entfalten.

Berechnet werden können diese Effekte über eine regionalisierte Input-Output-Analyse. Als etablierter ökonomische Modellansatz ist die Input-Output-Analyse ein wichtiger Bestandteil der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung (vgl. z. B. Kuhn 2010). Dabei werden als Inputs sowohl eingesetzte physische Güter als auch die Produktionsfaktoren Arbeit und Kapital berücksichtigt. Die Outputs umfassen sowohl Güter als auch Dienstleistungen. Der Kern der Input-Output-Rechnung ist die Input-Output-Tabelle, eine Darstellung der Volkswirtschaft als umfangreiche Matrix. Sie enthält Informationen über die Produktionsverflechtungen der Wirtschaftsbereiche. Mit einem Nachfrageimpuls als Input, lassen sich die Güterströme von den Primärintputs bis hin zur Endnachfrage der produzierten Outputs nachvollziehen. So lässt sich zuordnen, in welchen Wirtschaftsbereichen der eingesetzte Nachfrageimpuls zu Aktivitäten führt; wo also Lohneinkommen, Unternehmensgewinne und Steuereinnahmen anfallen.

Grundsätzlich lässt sich eine Input-Output-Analyse auf unterschiedlichen geografischen Skalen durchführen: etwa auf nationaler Ebene, der Ebene der Bundesländer oder noch kleineren Regionen. Maßgebliche Voraussetzung ist hier, dass für die betrachtete Einheit eine entsprechende Input-Output-Tabelle vorliegt. Vorprodukte von außerhalb der Region sowie Outputs, die in andere Regionen abfließen, können neben der lokal verbleibenden Wertschöpfung problemlos abgebildet werden. Das Statistische Bundesamt stellt die für eine solche Analyse notwendigen Input-Output-Tabellen derzeit nur auf nationaler Ebene zur Verfügung (vgl. Fachserie 18, Reihe 2 des Statistischen Bundesamtes). Grundsätzlich könnten diese Tabellen auch für kleinere regionale Einheiten verwendet werden. Jedoch ergeben sich Verzerrungen, wenn sich wirtschaftsstrukturelle Aspekte deutlich von der nationalen Ebene

unterscheiden. Schröder und Zimmermann (2014) beschreiben verschiedene Ansätze, wie sich diese Problematik durch die Regionalisierung nationaler Input-Output-Tabellen mindern lässt.

Ist eine geeignete regionalisierte Input-Output-Tabelle gegeben, sind für die Berechnung regionaler Wertschöpfung möglichst genaue Maßnahmendefinitionen sowie deren Kosten relevant. Ebenso muss definiert werden, in welchen Wirtschaftszweigen diese Nachfrage entsteht, zum Beispiel der Bauinstallation oder dem Garten- und Landschaftsbau. Für möglichst aktuelle lokale Herstellungs- und Pflegekosten bieten sich etwa das Baupreislexikon (vgl. f:data GmbH 2023), Herstellerangaben von PV-Gründachsystemen oder auf das aktuelle Preisniveau fortgeschriebene Übersichtsstudien an (z. B. Pfoser et al. 2013).

Das IÖW verwendet ein eigens entwickeltes und um derivative Regionalisierung erweitertes Input-Output-Modell (vgl. Hirschl et al. 2015; Schröder/Zimmermann 2014), das bereits spezifisch zur Berechnung von Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekten von Klimaanpassungsmaßnahmen angewandt wurde. Für die Berechnung im Projekt Klimaresiliente Zukunftsstadt Bremen beispielsweise wurden umfassende Kosten für die Herstellung und Pflege extensiver Dachbegrünung unter anderem aus den oben genannten Quellen zusammengetragen. Diese reichen im Detailgrad vom benötigten Kies des Sicherheitsstreifens über die verschiedenen Vliese und Matten bis hin zum notwendigen Wasser- und Düngereinsatz.

Auf Basis der aktuellen nationalen Input-Output-Tabelle des Statistischen Bundesamtes kann im Wirk-Tool somit die regionale Wertschöpfung für Dachbegrünung approximativ berechnet werden. Weiter unterteilt wird diese in die Effekte aus der einmalig anfallenden Investition und der regelmäßigen jährlichen Pflege/Instandhaltung. Explizit berechnet werden die Wertschöpfungsbestandteile der Nettobeschäftigteneinkommen, die Nettounternehmensgewinne, kommunale Steuereinnahmen sowie Beschäftigungseffekte in Form der geschaffenen Vollzeitäquivalente. Da die Berechnung pro m² Dachfläche stattfindet, können diese Effekte schließlich auf die Größe der konkreten Dachfläche skaliert werden.

Für die Berechnung der Effekte von Installation und Wartung von Photovoltaikanlagen auf Dachflächen wird dagegen ein anderer Berechnungsansatz herangezogen. Mangels Differenzierbarkeit fossiler und erneuerbarer Energieerzeugungsanlagen in der Wirtschaftszweigsystematik WZ2008 kann die Berechnung hier nicht über Input-Output Tabellen erfolgen. Vor diesem Hintergrund hat das IÖW 2010 erstmals ein Wertschöpfungskettenmodell beschrieben, in welchem die Wertschöpfungseffekte für verschiedene EE-Anlagen additiv, also als Summe der oben beschriebenen Wertschöpfungsbestandteile aus den Umsätzen berechnet werden, die bei der Anlagenherstellung, -Installation und im Betrieb ausgelöst werden (für eine Darstellung der Berechnungsmethodik vgl. Hirschl et al. 2010 sowie Hirschl et al. 2015). Im Vergleich zur oben beschriebenen Input-Output-Analyse kann dieser Wertschöpfungskettenansatz zu vergleichbaren Ergebnissen gelangen, sofern die mit der Input-Output-Tabelle bewerteten wirtschaftlichen Tätigkeiten hinreichend genau einem passenden Wirtschaftszeit zugeordnet werden können (vgl. Salecki 2017).

Für die Berechnung der Wertschöpfungsindikatoren wird die Dachalternative mit der höchsten Gesamtwertschöpfung als Referenz herangezogen. Dies geschieht für Wertschöpfung aus einmaliger Investition und jährlicher Pflege getrennt, sodass die Referenzdacharten zwischen beiden Indikatoren nicht übereinstimmen müssen. Das PV-Gründach weist bei der Erstinstallation durchgehend die höchste regionale Wertschöpfung auf. Weil in die jährliche Wertschöpfung der PV-Anlagen sowohl Pflegekosten als auch die Gewinne der Eigentum innehabenden Person einfließen, kann hier je nach konkreter Ausgestaltung das PV-Gründach oder das reine PV-Dach die höchsten Werte aufweisen.

Annahmen im Wirk-Tool, Limitationen und weiterer Forschungsbedarf

Eine Anpassung der hinterlegten Input-Output-Tabelle ist leider nicht simpel analog zu anderen Indikatoren über die Postleitzahlabfrage durchführbar. Vielmehr wären dazu detaillierte

regionalökonomische Daten und eine manuelle Kalibrierung notwendig. Die Verwendung der nationalen anstatt einer regionalen Input-Output-Tabelle, stellt daher eine wichtige Einschränkung in der Validität der berechneten Wertschöpfungseffekte dar. In dem Grad wie die Wirtschaftsstruktur in der Region um die betrachtete Dachfläche von der nationalen Struktur abweicht, ergeben sich dadurch Verzerrungen. Einen Unterschied im Verbleib der Wertschöpfung macht zum Beispiel, ob notwendige Bauteile wie PV-Module oder Wechselrichter innerhalb der Region produziert oder von außerhalb importiert werden. Die Produktion dieser spezifischen Bauteile ist regional deutlich ungleich verteilt (vgl. z. B. SolarPower Europe 2021, Abb 12.). Für Handwerksleistungen hingegen dürfte die Annahme unkritisch sein, dass diese von lokal ansässigen Betrieben erbracht werden.

Eine weitere Aufgabe für eine zukünftige Verbesserung der Berechnungen ist die Zusammenstellung spezifischer Kostendaten für das PV-Gründach. Um diesen Dachtyp darzustellen, werden in der aktuellen Umsetzung die PV- und Gründachkomponente aus bestehenden separaten Kostenaufstellungen kombiniert. Durch die Integration beider Prozesse könnten sich hier im Detail sowohl abweichende Kosten als auch Verschiebungen der relevanten Wirtschaftszweige ergeben. Dies beträfe zum Beispiel den Bedarf an PV-Gründach-spezifischen PV-Modulaufständern und deren Aufbau durch Garten- und Landschaftsbaubetriebe im Rahmen der Gründachherstellung anstelle der Installation durch Solar-Fachbetriebe.

Schließlich sollten Skaleneffekte bei einer dedizierten Analyse explizit berücksichtigt werden. Die vorliegende Implementierung beruht auf Mittelwerten für die Kosten. Realistischerweise sind bei großen Dachflächen über mehrere hundert m² jedoch Skaleneffekte zu erwarten, sodass Installationskosten und die damit verbundene Wertschöpfung nicht linear zunehmen.

Im Wirk-Tool betrachtete technische Varianten

Zur Anwendung der Methodik – und damit zur Abschätzung der Wirkungen – wurde sich innerhalb des Projektverbundes auf gängige Ausgestaltungsoptionen für PV-Dächer, Gründächer und PV-Gründächer geeinigt. Das Festlegen auf diese Varianten ermöglicht eine Eingrenzung der technischen Freiheitsgrade auf ein handhabbares Maß. Folgend sind die Informationen der gewählten Varianten in Form von Steckbriefen, die sich besonders als Begleitinformation für das Wirk-Tool eignen, aufgeführt.

Steckbrief PV

Hintergrund: Photovoltaikanlagen sind für die Energieversorgung unerlässlich. Die Wirtschaftlichkeit einer PV-Anlage wird derzeit maßgeblich durch den Ertrag bestimmt. Daher ist die gängigste Ausrichtung nach Süden (50% aller Anlagen < 40 kWp sind laut Marktstammdatenregister direkt nach Süden ausgerichtet). In vielen Fällen werden die Anlagen dachparallel, das heißt mit der entsprechenden Ausrichtung und Neigung des Daches installiert. Hier ist in den letzten Jahren ein Trend zu anderen Ausrichtungen zu beobachten (z. B. Ost/West), da sich hier Stromerzeugung und -verbrauch besser überlagern. Dies steigert den Eigenverbrauch – im Gebäudebereich oftmals die zweite wichtige Wirtschaftlichkeitsgröße. Für die Analysen der Wirkungen werden in dieser Studie bei geneigten Dächern ($\geq 10^\circ$) alle Ausrichtungen betrachtet und es wird von einer dachparallelen Montage ausgegangen. Bei Flachdächern sind dagegen aufgeständerte Anlagen üblich, die überwiegend nach Süden oder Ost/West ausgerichtet sind. Dabei muss wegen der Verschattung auf entsprechende Abstände zwischen den Modulreihen geachtet werden. Für die Analysen der Wirkungen werden in dieser Studie für Flachdächer (0° und 5° ; in der Studie Abstufung in 5° -Schritten) beide Optionen betrachtet.

Technische Merkmale und verwendete Annahmen:

- PV-Modul: Glas-Folie. Maße: 1,722 x 1,134 m
- Leistung pro PV-Modul: 405 Wp
- Modulverlegung: horizontal (landscape)

- Belegung bis Mindestabstände nach Musterbauverordnung
- Performance Ratio: 0,85

Montage Schrägdach:

- Alu-Unterkonstruktion dachparallel
- Ausrichtung: im Tool alle Ausrichtungen möglich
- Neigung: im Tool ab $\geq 10^\circ$
- Vereinfachung: kein Abstand zw. Modulen

Montage Flachdach:

- Auflastgetragen; aufgeständert, Alu-Unterkonstruktion
- Ausrichtung und Neigung: 30° (Süd); 15° (Ost/West)
- Abstand Modulreihen (Süd): 1,5 m
- Abstände (Ost/West): zwischen Modulreihen Oberkante 10 cm; zwischen Modulreihen Unterkante 15 cm
- Flächennutzungsgrad: 45,6% (Süd); 92,9% (Ost/West)

Exkurs technische Innovationen: Auf begrenzten Flächen steht bezüglich der PV-Module eine hohe Leistung/ein gesteigerter Ertrag im Fokus. Diesbezüglich sind Trends zur Verbreitung von hocheffizienten PV-Modulen, die vor allem durch die physikalische Weiterentwicklung der Solarzellen möglich sind, und bifazialen PV-Modulen, bei denen eine transparente Rückseite zur Stromgewinnung beiträgt, zu erkennen. Die Preise für beide Technologien sind derzeit noch z. T. deutlich über denen von Standard PV-Modulen. Aufgrund der noch geringen Marktdurchdringung werden diese Konzepte in dieser Studie nicht betrachtet. Bei der Auslegung von PV-Anlagen kommen zudem vermehrt Modulwechselrichter und Leistungsoptimierer zum Einsatz, die vor allem bei stärkeren Verschattungen für höhere Erträge sorgen können (verglichen mit herkömmlichen Anlagen mit einem / wenigen Wechselrichter/n). Gleichzeitig entstehen aber auch höhere Kosten. Der Einsatz dieser Komponenten ist jedoch stark objektspezifisch und bedarf genauen Berechnungen. Daher wird für die einfachen Abschätzungen dieser Studie nicht auf diese Komponenten zurückgegriffen. In der Studie werde auch keine Sektorkopplungstechnologien betrachtet (z. B. Batteriespeicher, Wärmepumpe, E-Auto). Diese machen die Bewertung der Wirkungen deutlich komplexer. Im Zusammenspiel dieser Technologien mit einer PV-Anlage sollte eine genauere Energieflussanalyse angestrebt werden.

Steckbrief Gründach

Hintergrund: Dachbegrünungen gewinnen aufgrund ihrer Klimaanpassungsleistung und weiteren positiven Wirkungen zunehmend an Bedeutung. Jedes Jahr wächst der Markt um etwa 7,5%. Dachbegrünungen lassen sich vereinfacht in zwei Hauptkategorien einteilen: extensive Dachbegrünung und intensive Dachbegrünung. Die extensiven Gründächer zeichnen sich durch eine geringe Aufbauhöhe (ca. 8–15 cm), geringes Gewicht (ca. 80–170 kg/m²) und eine trockenheitsverträgliche und pflegeleichte Vegetation aus. Im Rahmen der Studie wurde ein Gründachaufbau mit einer Aufbaustärke von 12 cm gewählt, da die Artenvielfalt bereits recht hoch, gleichzeitig vergleichsweise wenig Auflasten notwendig sind und zudem viele Kommunen eine Förderung für diesen Aufbau anbieten. Für die Analyse werden Dachneigungen bis 10 Grad für die extensive Begrünung empfohlen, da höhere Neigungen häufig, vor allem im Bestand, zusätzliche Kosten erfordern. Intensive Dachbegrünung sind zumeist nutzbare Dachgärten, bei denen viele zusätzliche Parameter, wie Zusatzlasten, Absturzsicherung, Zugänglichkeit und Bewässerung, zu beachten sind. Dies macht eine Umsetzung auf Bestandsgebäuden nur in seltenen Fällen möglich, weshalb diese Gründachlösung im Wirk-Tool nicht mit aufgegriffen wird.

Technische Merkmale und verwendete Annahmen:

- Gründachsystem: Extensive Dachbegrünung
- Aufbaustärke: 12 cm (2 cm Drainage, 10 cm Substrat)
- Gewicht ca. 110 kg/m²
- Vegetation: Kräuter, Gras, Sedum
- Neigungswinkel Dach: bis/inkl. 10°
- Flächennutzungsgrad: 100%
- Lebenserwartung mindestens 40 Jahre

Exkurs technische Innovationen: Im Bereich der Dachbegrünung bestehen viele Lösungen mit jeweiligen Nutzungszielen. Sogenannte Leichtdachbegrünungen sind insbesondere für Bestandsgebäude und Leichtbauweisen interessant, da das Gewicht dieser Systeme nur zwischen 20 und 60 kg/m² beträgt. Da es sich jedoch um Sonderformen der Begrünung handelt und die Eignung auch hinsichtlich der Windverhältnisse nur an wenigen Objekten besteht, wird auf die Betrachtung dieser Bauweise in der Studie verzichtet. Biodiversitätsgründächer und Retentionsgründächer sind Erweiterungen der typischen Extensivbegrünung. Ziel des Biodiversitätsgründaches ist eine erhöhte Artenvielfalt auf dem Dach. Das geschieht über zusätzliche Biodiversitätsbausteine (z. B. Totholz, Nistkästen, Steinhaufen und Sand- und Kieslinsen). Dadurch entstehen Punktlasten auf dem Dach, die vor der Einbringung zu prüfen sind. Beim Retentionsgründach wird stattdessen eine zusätzliche Retentionsebene unter den Gründachaufbau eingeführt. Diese erfordert eine hohe Lastreserve des Daches.

Steckbrief PV-Gründach

Hintergrund: PV-Gründächer verbinden Klimaschutz mit Klimaanpassung. Durch die Kombination von Dachbegrünung und Anlagen zur solaren Energiegewinnung werden Zielkonflikte auf Flachdächern entschärft und die Vorteile beider Systeme flächeneffizient genutzt, da sich die PV-Anlage oberhalb der Dachbegrünung befindet. Hervorzuheben sind dabei auflastgehaltene PV-Gründächer, deren Photovoltaikaufständerungen durch die Auflast des Gründachs lagesicher gehalten werden. Solche Anlagen sind sowohl in Süd-Ausrichtung als auch in der Ost-West-Verlegung mit unterschiedlichen Modulneigungswinkeln umsetzbar, womit eine optimale Anpassung an die Standortverhältnisse und Nutzungsbedürfnisse gegeben wird. Um die Lagesicherheit zu gewährleisten, eignen sich diese Systeme nur für Dachneigungen bis zu 5° (in der Studie Abstufung in 5°-Schritten). Insbesondere die statischen Lastreserven für ein PV-Gründach müssen gegeben sein.

Technische Merkmale und verwendete Annahmen:

- PV-Modul: Glas-Folie. Maße: 1,722 x 1,134 m
- Leistung pro PV-Modul: 405 Wp
- Modulverlegung: horizontal (landscape)
- Belegung bis Mindestabstände nach Musterbauverordnung
- Performance Ratio²: 0,85
- Gründachaufbau: 10 cm (2 cm Drainage, 8 cm Substrat)
- Gewicht Gesamtsystem: 140 kg/m²

Montage PV-Gründach auf Schrägdach:

- Nicht möglich

- im Wirk-Tool keine Berücksichtigung (vereinfachend im Wirk-Tool Schrägdach $\geq 10^\circ$ - für Konsistenz bei Flachdach-Unterscheidung bei PV-Dach)

Montage PV auf Flachdach:

- Auflastgetragen durch Substrat; Abstand Modulunterkante-Substrat = 30 cm, Alu-Unterkonstruktion verbunden mit Basisplatte
- Ausrichtung und Neigung: 30° (Süd); 15° (Ost/West)
- Abstand Modulreihen (Süd): 1,5 m
- Abstände (Ost/West): zwischen Modulreihen Unterkante 50 cm; zwischen Modulreihen Oberkante 80 cm
- Flächennutzungsgrad: 45,6% (Süd); 65% (Ost/West)

Exkurs technische Innovationen: Aufgrund der starken Zunahme von PV-Gründächern werden noch immer neue Lösungen für eine optimale Kombination aus beiden Systemen entwickelt. Eine Alternative können zukünftig bifaziale Module darstellen. Zum einen kann durch die Wahl der Pflanzen die Rückreflexion in diese Modulart erhöht werden. Zum anderen können diese Module bei verträglichen Ertragseinbußen auch vertikal montiert werden, was einen geringen Reihenabstand gewährleistet. Aufgrund der noch geringen Marktdurchdringung werden diese Systeme in dieser Studie allerdings nicht betrachtet. Bei Flachdächern mit nur wenig statischen Lastreserven kann es vorkommen, dass die PV-Anlage und Dachbegrünung jeweils separat auf der Dachfläche aufgebracht werden. Diese Lösung wird in der Studie nicht berücksichtigt, da die Kombination der beiden Systeme auf einer Fläche nicht besteht. Ebenso wird die nachträgliche Installation einer PV-Anlage auf einem Gründach nicht mit betrachtet. Diesbezüglich werden Systeme entwickelt, eine Umsetzbarkeit wird vermutlich jedoch i.d.R. auch bei einer Nachrüstung einer PV-Anlage auf einem begrünten Flachdach nur bis 5° möglich sein. Im Bereich der Schrägdächer ($\geq 10^\circ$) existieren derzeit keine marktgängigen Lösungen für die Kombination aus PV-Anlage und Dachbegrünung.

Eingabeparameter und beispielhafte Anwendung des „Wirk-Tools“

Für die Abschätzung der Wirkungen eines jeden Wirkindikators, sind einige Eingaben zu den relevanten Einflussfaktoren notwendig, die in der detaillierten Vorstellung der Wirkindikatoren oben bereits beschrieben wurden. Bei der Umsetzung im Wirk-Tool wurde darauf geachtet, dass unterschiedliche Detailgrade der Eingaben verwertet werden können. So sind bestimmte Eingaben, die zur Berechnung der Wirkung notwendig sind, den Nutzenden des Tools oftmals nicht genau bekannt. Durch die Vorgabe von Wertspannen und einer internen Umwandlung in eine Proxyvariable können auch diese eher groben Eingaben verarbeitet werden. Als Beispiel einer solchen Eingabe sei hier die Verschattung der Dachfläche genannt. Wenn auch für eine genaue Wirkanalyse eine Schattenwurfsimulation die höchste Genauigkeit liefern würde, reicht als erste Näherung auch eine grobe Angabe zur Häufigkeit der Verschattung. In der Eingabemaske können die Nutzenden die Häufigkeit qualitativ angeben (hier: Keine, Gelegentlich, Häufig, Dauerhaft). Für die eigentlichen Berechnungen werden diese Angaben in eine relative Angabe umgewandelt (0%, 10%, 20%, 50%), mit denen beispielsweise bei der Berechnung des PV-Ertrags weitergerechnet wird.

Tabelle A 27 bietet eine Übersicht zu den im Wirk-Tool abgefragten Eingabeparametern und wie diese für die Wirkanalyse weiterverwendet werden. Die Weiterverwendung in den entsprechenden Berechnungen geschieht intern und kann vom Nutzenden nicht beeinflusst werden. Einige der Eingabeparameter greifen zudem Aspekte der Eignungs- und Notwendigkeitsanalyse der Arbeitsschritte AS1 und AS2 auf. Das Aufgreifen von Eingabeparametern wie „Statische Lastreserven“ oder der „Häufigkeit von Parkplätzen“ sind im Wirk-Tool vorgehalten, um Hinweise zu Eignung einer Dachfläche und der Notwendigkeit von PV, Gründach oder PV-Gründach im jeweiligen Quartier zu geben. Die

Implementierung der Eignungs- und Notwendigkeitsprüfung konnte jedoch innerhalb der Projektlaufzeit nicht mehr realisiert werden, insbesondere auch da es sich bei dem Wirk-Tool im Allgemeinen um eine Zusatzleistung auf Initiative der Auftragnehmer handelt.

Die einzelnen Eingabeparameter sind im Wirk-Tool zum Großteil vorkonfektioniert und durch Dropdown-Menüs auswählbar (siehe Abbildung A 5). Bei einigen Parametern (z. B. Größe der Dachfläche) können auch exakte Werte angegeben werden. Dem Nutzenden wird zudem eine kurze Beschreibung zu den Eingabeparametern und ggf. bestimmten Einschränkungen und den Verwendungshinweisen angezeigt.

Tabelle A 27

Abgefragte Eingabeparameter im Wirk-Tool und deren weitere Verwendung in der Wirkanalyse.

Eingabeparameter	Nutzung des Eingabeparameters
Gebäudetyp	Ermöglicht zusammen mit dem Gebäudealter eine Einschätzung zum energetischen Zustand der Gebäudehülle / der Dachfläche. Zusammen mit der Gebäudenutzung und dem Gebäudealter lässt sich zudem auch der Stromverbrauch abschätzen. Dieser ist essenziell zu Bewertung der Energieflüsse im Gebäude und im Quartier (solare Deckung).
Gebäudealter	Ermöglicht zusammen mit dem Gebäudetyp eine Einschätzung zum energetischen Zustand der Gebäudhülle/der Dachfläche. Zusammen mit der Gebäudenutzung und dem Gebäudetyp lässt sich zudem auch der Stromverbrauch abschätzen. Dieser ist essenziell zu Bewertung der Energieflüsse im Gebäude und im Quartier (solare Deckung).
Gebäudehöhe	Es werden zum Teil unterschiedliche Ansprüche an die Ausgestaltung der Dachfläche in Abhängigkeit der Gebäudehöhe gestellt. Ebenso zeigen vorallem globalere Wirkungen wie Lärm- und Temperaturminderung und die Schadstoffbindung Abhängigkeiten von der Gebäudehöhe.
Gebäudenutzung	Bestimmt die Art des Lastprofils beim Stromverbrauch und hat somit Einfluss auf den Eigenverbrauch und die Einspeisung des Solarstroms aus einer PV-Anlage.
Neigung der Dachfläche	Wichtige Eingangsgröße zur Abschätzung des PV-Ertrags. Eignungskriterium gerade für (PV-)Gründächer (zu starke Dachneigungen sind oftmals gerade aus wirtschaftlichen Beweggründen nur schwer begrünbar).
Dacheindeckung	Die Dacheindeckung bestimmt maßgeblich die Temperatur(minderungs)effekte, die durch eine Begrünung im Vergleich zum Status-Quo des Daches erreicht werden können. Daher dient sie auch als Einschätzung darüber, wie hoch die zu erwartenden Ertragsgewinne durch den Kühlungseffekt einer Dachbegrünung sein können. Die Dacheindeckung stellt zudem ein Eignungskriterium dar (z. B. keine PV auf bestehenden Asbestdächern).
Voll- oder Teileinspeisung	Dieser Eingangsparameter ist essenziell um die Einnahmen und Einsparungen durch den PV-Ertrag abschätzen zu können.
Möglichkeiten Photovoltaik	Die Ausführungsmöglichkeiten einer PV-Anlage sind vielfältig, gerade in Bezug auf die Ausrichtung und Neigung der Module. Die sich dadurch ergebenden Freiheitsgrade sind in einfachen Abschätzungen nur schwer abbildbar. Daher definiert dieser Eingangsparameter 3 vorgefertigte Konfigurationen – dachparallele Montage, aufgeständert nach Ost-West (15° Neigung) oder aufgeständert nach Süden (30° Neigung). Letztere beiden sind speziell für Flachdächer von Relevanz. Ähnlich wie die Eingabeparameter Ausrichtung und Neigung haben diese

Eingabeparameter	Nutzung des Eingabeparameters
	Möglichkeiten Auswirkungen auf den PV-Ertrag und alle damit in Verbindung stehenden Indikatoren.
Größe der Dachfläche (m ²)	Globale Eingangsgröße zur Abschätzung der Wirkungen – hat Einfluss auf alle Indikatoren.
Ausrichtung der Dachfläche	Wichtige Eingangsgröße zur Abschätzung des PV-Ertrags.
Nutzbare Dachfläche	Globale Eingangsgröße zur Abschätzung der Wirkungen – hat Einfluss auf alle Indikatoren.
Häufigkeit der Verschattung	Gerade für den PV-Ertrag und damit die Wirtschaftlichkeit von Relevanz. Auch einige Wirkungen von (PV-)Gründächern (z. B. Lärmminimierung und Schadstoffbindung) korrelieren je nach Pflanzenart schwächer/stärker mit dem Grad der Verschattung.
Postleitzahl	Viele Wirkungen zeigen eine hohe Abhängigkeit der lokalen Gegebenheiten (Wetter, Bebauung etc.). Für Indikatoren wie beispielsweise den Regenwasserrückhalt, Temperatureffekte oder den PV-Ertrag kann auf Grundlage verfügbarer GIS-Daten eine lokale Abschätzung erfolgen.
Statische Lastreserven	Wichtigstes Eignungskriterium für die Ausführung von insbesondere (PV-)Gründächern.
Quartierstyp	Der Quartierstyp zählt auf den Vor-Ort Verbrauch oder Netzaustausch des erzeugten Solartstroms ein und definiert die Ansprüche und Notwendigkeiten einer Begrünung.
Häufigkeit Parkplätze	Eingabe zur Abschätzung von Flächen, die alternativ zu Dachflächen mit PV ausgestattet werden könnten.
Eigentumsstruktur	Eingabe zur Abschätzung der Durchführbarkeit von Quartiersstromprojekten.

Quelle: Institut für ökologische Wirtschaftsforschung 2023

Die Einstellungen in Abbildung A 5 sollen im Folgenden als Veranschaulichung der Wirkweise des Tools dienen. Das gewählte Mehrfamilienhaus könnte einem typischen Gebäude der 1960er Jahre entsprechen, welches ausschließlich zu Wohnzwecken genutzt wird. Zu dieser Bauperiode waren auch Flachdächer gängig (in den Eingabeparametern Dachneigung = 0° und Dachbedeckung = Kies). Dadurch werden im Tool auch die Wirkindikatoren für die Varianten Gründach und PV-Gründach berechnet. Bei letzterer Variante ist zudem erwähnenswert, dass anhand der Eingaben eine nach Ost-West ausgerichtete, teileinspeisende Anlage mit einer Modulneigung von 15° berechnet wird (siehe auch Im Wirk-Tool betrachtete technische Varianten). Auch die Variante „nur PV“ wird mit dieser Ausrichtung und Neigung berechnet, zeichnet sich aber gegenüber der PV-Gründachvariante durch geringere Abstände der Modulreihen aus (aufgrund der Instandhaltung des Gründaches, muss bei PV-Gründächern auf ausreichend Platz zur Begehung geachtet werden).

Abbildung A 5
Screenshot aus dem Wirk-Tool: Eingabeparameter zum Gebäude.

Eingaben zum Gebäude		Beschreibung
Bitte wählen Sie aus		
<i>Beschreibungen, bitte das "*" über Spalte H.k.k.</i>		
Gebäudetyp	Mehrfamilienhaus	Hier ist ein Gebäudetyp aus den Vorgaben zu wählen. Bestimmt zusammen mit dem Gebäudealter die energetischen Parameter des Gebäudes.
Gebäudealter	1958 ... 1968	Jahr der Fertigstellung des Gebäudes. Bestimmt zusammen mit dem Gebäudetyp die energetischen Parameter des Gebäudes. EFH, RH, MFH; jede Bauperiode liefert andere Werte. Großes MFH, Hochhaus: nur für bestimmte Bauperioden Werte hinterlegt. Büro/Verwaltung/Produktion; jeweils nur ein energetischer Verbrauchswert unabh. von der Bauperiode. U-Werte für Hallen nur geschätzt.
Gebäudehöhe	12 und 22 m	Vertikaler Abstand vom Boden bis zur Dachkante. Relevant für Temperaturminderung und potenziell weitere momentan nur qualitativ bewertete Indikatoren (Biodiversität, Verminderung). Kein Einfluss auf energetische Parameter.
Gebäudenutzung	Wohnung	Gebäudenutzungsart dient der Abschätzung des Stromverbrauchs in Abhängigkeit von Gebäudetyp und Alter.
Neigung der Dachfläche (*)	0	Winkel in Grad, um den die Dachfläche von der Horizontalen abweicht. Geben Sie den besten Wert auszuwählen oder genauen Wert eingeben. Annahme: bei >5° keine gekoppelten Systeme (PV-Gründach), bei >10° keine Gründachverklebung der Dachhaut.
Dacheindeckung	Klebefolie	
Voll- oder Teileinspeisung	Teileinspeisung	Angabe, ob die gesamte oder ein Teil der von der PV-Anlage erzeugten Energie in das Stromnetz eingespeist wird. Dies hat Einfluss auf die Höhe der Einspeisevergütung (ct/kWh).
Möglichkeiten Photovoltaik	Ost-West	Ab einer Neigung der Dachfläche von 5° wird die PV-Anlage dachparallel verlegt (der Neigung und Ausrichtung der Dachfläche entsprechend). **Diese muss immer manuell aktualisiert werden, wenn der Dachwinkel über oder unter 5° geändert wird. **
Größe der Dachfläche (m²)	450	Gesamtfläche bis zum Rand des Daches. Es kann ein genauer Wert in m² eingegeben werden. Ansonsten wird der jeweilige Mittelwert der Spanne als Rechenwert verwendet. Es werden nur Größen bis ca. 1500 m² sinnvoll vom Tool verarbeitet.
Ausrichtung der Dachfläche	Süd-West	Die Himmelsrichtung, in die die PV-Anlage bei dachparalleler Verlegung ausgerichtet wird. Bei Dachflächenneigungswinkeln <10° wird diese Eingabe nicht beachtet.
Nutzbare Dachfläche	Fast vollständig	Dachaufbauten wie Schornsteine, Abzüge, Antennen, Dachfenster etc. verringern die für PV und Gründach nutzbare Fläche. Optionen: komplett = 100%; der Dachfläche nutzbar; Fast vollständig = 90%; Überwiegend = 80%; Gering = 60%; sehr gering = 30%; Keine = 0%
Häufigkeit Verschattung	Gelegentlich	Wie oft ein Dach im Laufe des Jahres durch andere Gegenstände, Pflanzen oder Gebäude beschattet wird. Grobe Richtwerte: Keine = 0%, Gelegentlich = 10%, Häufig = 20%, Dauerhaft = 50%
Postleitzahl	99998	Postleitzahlgebiet (d.h. grober Standort) des Gebäudes. Erlaubt die Berücksichtigung lokal verschiedener Werte für jährliche Strahlungssummen, Niederschlag, Versiegelungsgrad, Bevölkerungsdichte, etc.
Statische Lastreserven	Mittel	Diese Eingabe dient nur zur Prüfung der Eignung. Grobe Richtwerte: sehr gering < 30 kg/m²; gering > 30 kg/m²; mittel > 60 kg/m²; hoch > 90 kg/m²; sehr hoch > 120 kg/m²

Quelle: Institut für ökologische Wirtschaftsforschung 2023

Des Weiteren kann davon ausgegangen werden, dass sich ein solches Gebäude in einer sehr ähnlichen Siedlungsstruktur wiederfinden lässt. Dadurch lässt sich auch die Quartierstruktur beispielhaft abbilden. Hierfür können im Tool vier zusätzliche Gebäude definiert werden (Typ, Alter, Nutzung, Eigentumsstruktur). Wenn, wie im Beispiel, diese Gebäude dem Beispielgebäude entsprechen, kann das im Tool angegeben werden (siehe Abbildung A 6). Dann werden automatisch die Werte des Beispielgebäudes als Defaultwerte übertragen und zur weiteren Verwendung bei der Abschätzung der Wirkungen genutzt.

Abbildung A 6
Screenshot aus dem Wirk-Tool: Eingabeparameter zum Quartier.

Eingaben zum Quartier		
	<i>Bitte wählen Sie aus</i>	
Quartierstyp	Zeilenbebauung niedriger bis mittlerer Geschossigkeit	
Häufigkeit Parkplätze		
Gebäude im Quartier:	Gebäude 1	
<i>für zusätzliche Gebäude, bitte das "*" beachten</i>	Eingaben	Default
Wie Beispielgebäude?	Ja	
Gebäudetyp	Hochhaus	Mehrfamilienhaus
Gebäudealter	1949 ... 1957	1958 ... 1968
Gebäudenutzung	Gewerbe	Wohnen
Eigentümerstruktur	Sehr viele Eigentümer*innen	Mehrere Eigentümer*innen
	Gebäude 2	
Wie Beispielgebäude?	Ja	
Gebäudetyp	Einfamilienhaus	Mehrfamilienhaus
Gebäudealter	1949 ... 1957	1958 ... 1968
Gebäudenutzung	Gewerbe	Wohnen
Eigentümerstruktur	Sehr viele Eigentümer*innen	Mehrere Eigentümer*innen
	Gebäude 3	
Wie Beispielgebäude?	Ja	
Gebäudetyp	Einfamilienhaus	Mehrfamilienhaus
Gebäudealter	1949 ... 1957	1958 ... 1968
Gebäudenutzung	Gewerbe	Wohnen
Eigentümer	Sehr viele Eigentümer*innen	Mehrere Eigentümer*innen
	Gebäude 4	
Wie Beispielgebäude?	Ja	
Gebäudetyp	Büro/Verwaltungsgebäude	Mehrfamilienhaus
Gebäudealter	2002 ... 2009	1958 ... 1968
Gebäudenutzung	Verwaltung / Büro	Wohnen
Eigentümer	Sehr viele Eigentümer*innen	Mehrere Eigentümer*innen

Quelle: Institut für ökologische Wirtschaftsforschung 2023

Wenn alle Eingabeparameter konfiguriert worden, zeigt ein Spinnennetzdiagramm in der Mitte der Eingaben/Ausgabenblattes die Ausprägung der einzelnen Varianten aufgeteilt in Wirkebenen. Diese Wirkebenen sollen dem/der Nutzenden einen schnellen Überblick zu den Ergebnissen verschaffen und einen ersten Anhaltspunkt für die weitere Beschäftigung mit den Detailergebnissen liefern.

Für das Beispielgebäude bzw. -quartier ist dieses Diagramm in Abbildung A 7 dargestellt. In den fünf Wirkebenen sind unterschiedliche Wirkindikatoren zusammengefasst, die sich sowohl aus Indikatoren der Mikro- als auch der Makroebene ergeben können. Beispielhaft sei hier der Indikator „Vor-Ort Verbrauch im Quartier“ genannt. Dieser Wirkindikator der Makroebene wird zusammen mit den Mikro-Wirkindikatoren „PV-Ertrag pro kWp“, „PV-Ertrag pro m²“, „Eigenverbrauch“, „Einspeisung“, „Dämmwirkung“, „Vermiedener Kühlbedarf“ in der Wirkebene „Energetisch“ betrachtet. Dabei findet unter den einzelnen Indikatoren keine Wichtung statt, sondern alle Indikatoren gehen gleichermaßen in den Mittelwert ein.

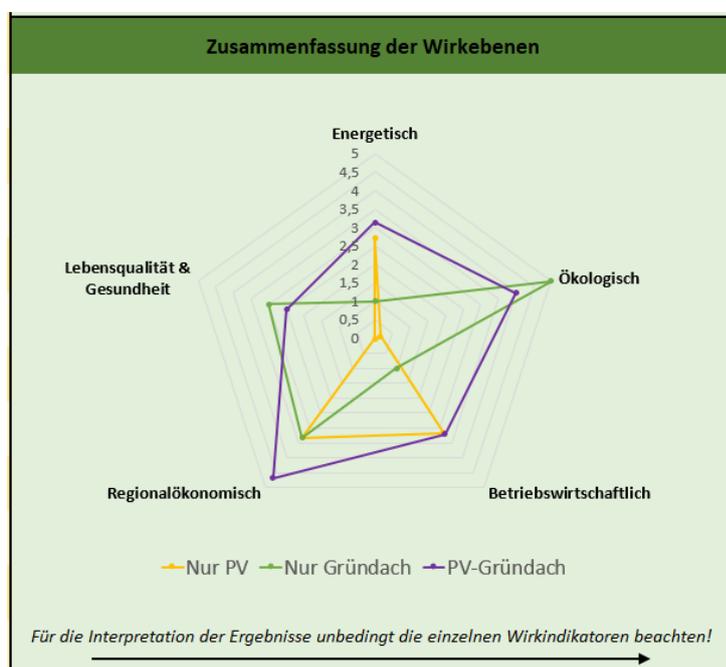
Diese einleitende Betrachtung der Wirkebenen mag in den Ergebnissen zum Teil überraschend sein. So könnte sich der/die Nutzende bei genauerer Betrachtung des Beispiels fragen, warum ein PV-Gründach denn energetisch besser als eine reine PV-Anlage abschneidet, obwohl auf dem Dach weniger PV-

Leistung installiert werden kann (aufgrund der höheren Modulreihenabstände für die Instandhaltung). Oder warum das PV-Gründach anscheinend bei der Betriebswirtschaftlichkeit ebenso gut performt wie die PV-Anlage, obwohl doch die Investitionskosten höher ausfallen.

Diese Art der Fragen treten unweigerlich bei der Nutzung des Wirk-Tools auf. Sie kommen zum einen von der wichtungsfreien Zusammenfassung der Indikatoren in den Wirkebenen. Zum anderen auch durch die Intention der entwickelten Methodik, unterschiedliche Perspektiven von Akteuren zuzulassen, denn je nach Sichtweise und Zielstellung wiegen unterschiedliche Wirkindikatoren verschieden schwer. Daher wird im Tool auch auf die genaue Betrachtung der einzelnen Wirkindikatoren hingewiesen, sodass eine akteurspezifische Lesart möglich wird. Worauf sich diese akteurspezifischen Lesarten beziehen können, soll folgend beispielhaft anhand der in Abbildung A 8 aufgeführten Detailergebnisse der Wirkindikatoren und den Perspektiven von Eigentum innehabenden Personen und Stadtplanenden verdeutlicht werden. In Bezug auf Abbildung A 8 ist noch anzumerken, dass die Referenz/Bewertung für jeden Indikator im Tool jeweils noch als Beschreibung danebensteht. Aus Platzmangel wurde in dieser Dokumentation darauf verzichtet.

Abbildung A 7

Spinnendiagramm der Wirkebenen für das Beispielgebäude bzw. -quartier.



Quelle: Institut für ökologische Wirtschaftsforschung 2023

Angenommen, eine Eigentum innehabende Person interessiert sich ausschließlich für die energetisch-betriebswirtschaftliche Perspektive seines Gebäudes. So würde sie aus der Detailbetrachtung erkennen, dass auf der Mikroebene, das PV-Gründach den höchsten Mittelwert bei „energetisch“ aufweist. Bei genauerer Betrachtung wird er/sie feststellen, dass im Vergleich mit einer PV-Anlage, die energetischen Indikatoren sehr ähnlich sind. Größere Unterschiede bestehen nur beim vermiedenen Kühlbedarf. Dieser mag jedoch für die Eigentum innehabende Person aufgrund der passiven Kühlung des Gebäudes von niedriger Wichtigkeit sein. Dementsprechend sind von der energetischen Sicht des Gebäudeeigentümers bzw. der -eigentümerin die Varianten PV und PV-Gründach gleichrangig, das Gründach jedoch aufgrund seiner nur geringen Dämmwirkung und der nicht vorhandenen Stromproduktion ggf. nicht relevant. An diesem Beispiel wird der Einfluss der Mittelwertbildung für die Wirkebenen und die Lesart der Ergebnisse deutlich. Je nach Wichtigkeit für die Betrachtenden der Ergebnisse, sind einzelne Wirkindikatoren

relevanter oder können trotz hoher Punktzahl – und damit hohem Beitrag zum Mittelwert der Wirkebene – unwichtig sein.

Schaut die Eigentum innehabende Person sich nun die betriebswirtschaftlichen Mikroebene an, so fällt auf, dass gerade die laufenden Kosten und die Gesamtstromgestehungskosten bei der PV-Anlage geringer sind. Sie mag sich nach dieser, sehr eingeschränkten Betrachtung, also im Nachhinein eher mit der Anschaffung einer PV-Anlage beschäftigen.

Anders mag sein Urteil jedoch ausfallen, wenn für die Eigentum innehabende Person noch weitere Faktoren von Interesse sind. Faktoren, auf die beispielsweise auch Stadtplanende ggf. mehr Wert legen könnten. Diesen könnten z. B. der Wasserrückhalt oder die Erhöhung der Lebensqualität im Quartier interessieren. Dazu trägt eine PV-Anlage jedoch nur in geringem Maße bei und im Gegensatz zur Betrachtung der Eigentum innehabenden Person wäre das Gründach nun auch von Interesse.

Abbildung A 8

Screenshot der Auflistung der semi-quantitativen Bewertung der einzelnen Wirkindikatoren für das Beispielgebäude bzw. -quartier.

Ausgabe: Wirkindikatoren Mikroebene (Gebäude)				Ausgabe: Wirkindikatoren Makroebene (Quartier)			
	Nur PV	Nur Gründach	PV-Gründach		Nur PV	Nur Gründach	PV-Gründach
Energetisch				Energetisch			
	2,3	1,0	2,8		5,0	0,0	5,0
PV-Ertrag pro kWp	3	0	3	Vor Ort Verbrauch im Quartier	5	0	5
PV-Ertrag pro m²	4	0	3	Ökologisch			
Eigenverbrauch	3	0	3	THG durch Herstellung	0	5	2
Einspeisung	3	0	3	THG-Senke	0	5	5
Dämmwirkung	0	1	1	Schadstoffbindung	0	5	5
Vermiedener Kühlbedarf	1	5	4	Biodiversität	0	5	4
Betriebswirtschaftlichkeit				Wasserrückhalt (Jährlicher Regen)			
	3,8	0,8	3,2		1	5	4
LCOE des Gesamtstromverbrauchs	5	0	4	Wasserrückhalt (Spitzregen)	0	5	4
Investitionen pro m²	3	2	3	Regionalökonomisch			
Laufende Kosten der Ausführung pro m²	5	2	3		3,3	3,3	4,7
Einnahmen (PV-Einspeisevergütung)	3	0	3	Wertschöpfung (einmalige Investitionen)	4	3	5
Einsparungen: PV-Eigenverbrauch	3	0	3	Wertschöpfung (jährliche Pflege / Unterhalt)	5	2	5
Einsparungen: Niederschlagsgebühr	0	Keine Daten	Keine Daten	Arbeitsproduktivität	1	5	4
Lebensqualität & Gesundheit				Lebensqualität & Gesundheit			
	0,0	3,0	2,0		0,0	3,0	3,0
Lärminderung	0	4	3	Temperaturminderung im Quartier	0	2	2
Dachtemperaturminderung	0	2	1	Einfluss auf die Gesundheit	0	4	4

Quelle: Institut für ökologische Wirtschaftsforschung 2023

Zur Veranschaulichung der Funktionalität der Wirk-Tools soll noch ein zweites Beispielgebäude bzw. -quartier aufgeführt werden: ein großes Verwaltungsgebäude (Flachdachfläche von 1100 m² fast vollständig nutzbar und unverschattet) umgeben von Einfamilienhäusern in Augsburg. Als PV-Variante wird die Ost-West-Aufständering gewählt. Die Detailergebnisse sind in Abbildung A 9 wiedergegeben. An diesem Beispiel soll auf einige Effekte in Abhängigkeit der nutzbaren Fläche und des Standorts hingewiesen werden.

Durch die große Fläche fallen sowohl die spezifischen Investitions- als auch laufende Kosten (€/m²) für den Gründachaufbau an. Dadurch gleichen sich die Varianten stärker an, was zu einer guten Betriebswirtschaftlichkeit für alle Varianten führt. Interessant in dieser Wirkebene ist zudem der Einfluss der Einsparungen für die Regenwassergebühr. Da diese in Augsburg recht hoch ausfällt, ergeben sich dementsprechend hohe Bewertungen für das Gründach und das PV-Gründach. Wie bereits beim ersten Beispielgebäude angesprochen, ist dies jedoch ein Indikator, der für unterschiedliche Akteure sehr stark unterschiedlich gewichtet sein kann. In die Mittelwertbildung der Wirkebene fließt dieser Indikator jedoch gleichrangig ein. Auch sind die Einflüsse auf die Temperatur abhängig von Standort des Gebäudes, gerade in hochverdichteten Städten können größere Grünflächen zu einer Abkühlung beitragen. Dadurch fallen – verglichen mit dem ersten Beispielgebäude die Indikatoren „Dachtemperaturminderung“ und „Temperaturminderung im Quartier“ deutlich höher bewertet aus.

Bei den regionalökonomischen und ökologischen Wirkindikatoren ergeben sich verglichen mit dem ersten Beispielgebäude keine Änderungen. Dies liegt großteilig an den verwendeten Referenzen dieser

Wirkindikatoren, die der Variante mit der höchsten Wirkung entspricht. Die anderen Varianten werden dann mit ihren Wirkungen jeweils im Verhältnis dazu betrachtet. Theoretisch gäbe es hier Standortabhängigkeiten (z. B. Schadstoffbelastung, Grundgesamtheit der Artenvielfalt in einem Gebiet, regionale Unterschiede in der Gewerbesteuer), die Aufarbeitung dieser Unterschiede für Gesamtdeutschland auf der Ebene von Postleitzahlengebieten ist jedoch sehr komplex und war im Rahmen dieser Studie nicht umsetzbar.

Abbildung A 9
Screenshot der Auflistung der semi-quantitativen Bewertung der einzelnen Wirkindikatoren für das zweite Beispielgebäude bzw. -quartier (Verwaltungsgebäude in einer Einfamilienhausumgebung).

Ausgabe: Wirkindikatoren Mikroebene (Gebäude)				Ausgabe: Wirkindikatoren Makroebene (Quartier)			
	Nur PV	Nur Gründach	PV-Gründach		Nur PV	Nur Gründach	PV-Gründach
Energetisch	2,5	1,2	3,2	Energetisch	3,0	0,0	4,0
PV-Ertrag pro kWp	4	0	4	Vor Ort Verbrauch im Quartier	3	0	4
PV-Ertrag pro m ²	4	0	3	Ökologisch	0,2	5,0	4,0
Eigenverbrauch	3	0	4	THG durch Herstellung	0	5	2
Einspeisung	3	0	2	THG-Senke	0	5	5
Dämmwirkung	0	2	2	Schadstoffbindung	0	5	5
Vermiedener Kühlbedarf	1	5	4	Biodiversität	0	5	4
Betriebswirtschaftlichkeit	3,5	2,2	4,3	Wasserrückhalt (Jährliche Regen)	1	5	4
LCOE des Gesamtstromverbrauchs	5	0	5	Wasserrückhalt (Spitzregen)	0	5	4
Investitionen pro m ²	5	4	5	Regionalökonomisch	3,3	3,3	4,7
Laufende Kosten der Ausführung pro m ²	5	4	5	Wertschöpfung (einmalige Investitionen)	4	3	5
Einnahmen (PV-Einspeisevergütung)	3	0	2	Wertschöpfung (jährliche Pflege / Unterhalt)	5	2	5
Einsparungen: PV-Eigenverbrauch	3	0	4	Arbeitsproduktivität	1	5	4
Einsparungen: Niederschlagsgebühr	0	5	5	Lebensqualität & Gesundheit	0,0	4,5	3,5
Lebensqualität & Gesundheit	0,0	4,5	3,5	Temperaturminderung im Quartier	0	4	3
Lärminderung	0	4	3	Einfluss auf die Gesundheit	0	5	4
Dachtemperaturminderung	0	5	4				

Quelle: Institut für ökologische Wirtschaftsforschung 2023