Hochschule Bremen

Fakultät 2, Abteilung Bau und Umwelt

Internationaler Studiengang Umwelttechnik B. Sc.

Bachelorthesis

Fassadennutzung im Flächenkonflikt zwischen Klimaschutz und Klimaanpassung

Erarbeitung einer Entscheidungsgrundlage zur Nutzung von Photovoltaik, Begrünung sowie einer Kombination aus beidem an städtischen Gebäudefassaden

Facades in the context of the land-use conflict of mitigating or adapting to climate change

Development of a decision-making basis for the application of photovoltaics, greening and their combination in urban building facades

Silvan Johannes Ostheimer

Matrikelnummer: 5015763

silvan.ostheimer@posteo.de

Prof. Dr. Jürgen Knies	Erstprüfer, Hochschule Bremen
Prof. Dr.-Ing. Silke Eckardt	Zweitprüferin, Hochschule Bremen
Vera Middendorf, M. Sc.	Betreuerin, Björnsen Beratende Ingenieure

Bonn/Bremen, 14.04.2021

Erklärung über das eigenständige Erstellen der Arbeit

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die anderen Werken dem Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen wurden, sind durch Angaben der Herkunft kenntlich gemacht.

Diese Erklärung erstreckt sich auch auf in der Arbeit enthaltene Grafiken, Skizzen, bildliche Darstellungen sowie auf Quellen aus dem Internet. Die Arbeit habe ich in gleicher oder ähnlicher Form auch auszugsweise noch nicht als Bestandteil einer Prüfungs- oder Studienleistung vorgelegt.

Ich versichere, dass die eingereichte elektronische Version der Arbeit vollständig mit der Druckversion übereinstimmt.

Silvan Johannes Ostheimer
Matrikelnummer: 5015763

Bonn, 14.04.2021	
(Ort, Datum)	(Unterschrift)

Vorwort und Danksagung

Als Bachelorthesis bildet die vorliegende Arbeit den Abschluss des internationalen Studiengangs Umwelttechnik B. Sc. an der Hochschule Bremen. Die dieser Arbeit zugrundeliegende Fragestellung ergab sich aus meinem vorhergehenden Praktikum bei Björnsen Beratende Ingenieure GmbH im Rahmen der Praxisphase meines Studiums. Dabei gliedern sich sowohl das Praktikum als auch die vorliegende Arbeit in das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderte Projekt VertiKKA. Mehr Klimaschutz und „grünere Städte“ sind mir ein grundsätzliches Anliegen und waren damit ebenso Motivation für die Arbeit an diesem Thema. Vor diesem Hintergrund wurde die Fragestellung nach bestem Wissen und Gewissen neutral und wissenschaftlich bearbeitet. Aufgrund der Breite des Themas und der Fragestellung konnten in der vorgegebenen Zeit nicht alle Teilaspekte mit der gleichen fachlichen Tiefe und Qualität bearbeitet werden.

Der Björnsen Beratende Ingenieure GmbH und ihren Mitarbeitenden danke ich für die strukturelle und fachliche Unterstützung. Auch den Mitarbeitenden der Hochschule Bremen möchte ich für die zuverlässige organisatorische Unterstützung, gerade auch in dieser Pandemiezeit, danken. Besonderer Dank gilt meiner Betreuerin bei Björnsen Beratende Ingenieure GmbH, Frau Vera Middendorf, für ihre intensive fachliche Betreuung und die Beantwortung der vielen Fragen, die bei der Bearbeitung des Themas aufkamen. Auch meinem Betreuer an der Hochschule Bremen, Herrn Prof. Dr. Jürgen Knies, danke ich dafür, dass er mir mit Interesse seinen wissenschaftlichen Rat und seine hilfreichen Anregungen zur Verfügung stellte, mir dabei aber große Freiheit bei der Ausgestaltung des Themas ließ, was ich nicht als selbstverständlich voraussetzen konnte. An dieser Stelle danke ich auch der Brede Stiftung, die mein Studium durch die Finanzierung eines Deutschlandstipendiums unterstützte. Nicht zuletzt möchte ich mich auch bei meiner Familie sowie meinen Freunden und Wohnungsteilenden für ihre motivierende Unterstützung bedanken. Sie alle waren mir besonders in den langen Zeiten des pandemiebedingten Homeoffice eine große Stütze und haben das Arbeiten sehr viel angenehmer gemacht.

Bonn, 14. April 2021

Silvan Johannes Ostheimer

Kurzfassung

Das gleichzeitige Erfüllen von Klimaschutzzielen bei Anpassung an bereits bestehende Klimafolgen stellt Städte vor besondere Herausforderungen. Photovoltaik und Begrünung stellen hier relevante Maßnahmen dar, die angesichts der Bodenknappheit auch an vertikalen Fassadenflächen umgesetzt werden können. Aufgrund potenzieller Flächenkonflikte zwischen Klimaschutz und Klimaanpassung wird neuerdings die Kombination von Photovoltaik und Begrünung in Betracht gezogen. Bislang fehlt es für die genannten Maßnahmen jedoch an einheitlichen Bewertungen der Klimaschutz- und Klimaanpassungswirkung.

Ziel dieser Arbeit ist daher die Erstellung einer wissenschaftlichen Grundlage, auf deren Basis Entscheidungen über die Nutzung einzelner Gebäudefassaden getroffen werden können. Dabei wird folgende Fragestellung beantwortet: Wie wirken sich eine Photovoltaik-Fassade, eine Fassadenbegrünung sowie eine Kombination aus beidem in Bezug auf Klimaschutz und Klimaanpassung im städtischen Umfeld sowohl auf Gebäude- als auch auf Quartiersebene aus?

Auf Basis einer qualitativen Literaturauswertung wurden relevante Wirkungsfelder herausgestellt. Darauf aufbauend wurde eine quantitative Bewertungsmethodik entwickelt, anhand der die Maßnahmen für repräsentative Szenarien bewertet wurden. Die Ergebnisse zeigen eine hohe Klimaschutzwirkung der Photovoltaik-Fassade bei hoher solarer Bestrahlung. Für die Fassadenbegrünung wurde eine hohe Klimaanpassungswirkung bei hoher mikroklimatischer Hitzebelastung und gleichzeitig hoher solarer Bestrahlung festgestellt. Damit ergibt sich für dieses Szenario ein potenzieller Flächenkonflikt zwischen Klimaschutz und Klimaanpassung. Die Kombination beider Maßnahmen zeigte insbesondere hier eine höhere Gesamtwirkung und kann daher als geeignete Lösung des Flächenkonfliktes gesehen werden.

Eine Anwendung der entwickelten Bewertungsmethodik für einzelne Fassaden auf der Gebäudeebene ist auf Basis frei zugänglicher Daten und ohne unverhältnismäßig großen Aufwand möglich. In einem nächsten Schritt könnte die Methodik für quantitative Betrachtungen auf der Quartiers- und Stadtebene zur Erstellung von integrierten Potenzialkatastern ausgeweitet werden.

Schlagwörter: Fassade, Flächenkonflikt, Klimaschutz, Klimaanpassung, städtische Wärmeinsel, Photovoltaik-Fassade, Fassadenbegrünung

Abstract

Simultaneously meeting climate change mitigation targets while adapting to the existing impacts of climate change, presents cities with a particular challenge. Photovoltaics and greening are relevant measures in this field and can be implemented on vertical facades in response to the land scarcity in cities. Regarding potential land-use conflicts between mitigating and adapting to climate change, the combination of photovoltaics and greening has recently been considered more frequently. To date, there are no uniform assessments on the climate change mitigation and adaptation effects of the above-mentioned measures.

Therefore, the aim of this work is to develop a scientific basis on which decisions about the use of individual building facades could be made. The following question is to be answered: What impact does a photovoltaic facade, a facade greening, or a combination of both have in terms of climate change mitigation and climate change adaptation in the urban environment, in respect to both a building and neighborhood level?

Based on a qualitative literature analysis, relevant fields of impact were identified. A quantitative assessment methodology was then developed, which was used to assess the measures for representative scenarios. The results show a high climate change mitigation effect of the photovoltaic facade for high solar irradiation. Concerning the facade greening, a high climate change adaptation effect was found for high microclimatic heat load coincident with high solar irradiation. This results in a potential land-use conflict between mitigating and adapting to climate change for this scenario. The combination of both measures showed a higher overall effect especially for the mentioned scenario and can therefore be seen as a suitable solution to this conflict.

An application of the developed assessment methodology for individual facades on the building level is possible based on freely available data and without disproportionate effort. In a next step, the methodology could be extended to quantitative assessments at the neighborhood and city level to create integrated maps with the potential of photovoltaics and greening on building facades.

Keywords: facade, land-use conflict, climate change mitigation, climate change adaptation, urban heat island, photovoltaic facade, facade greening

Inhaltsverzeichnis

Vorwort und Danksagung . . . . . **I**

Kurzfassung . . . . . **III**

Abstract . . . . . **V**

Abbildungsverzeichnis . . . . . **VIII**

Tabellenverzeichnis . . . . . **IX**

Abkürzungsverzeichnis . . . . . **X**

1. Motivation, Zielsetzung und Vorgehen **1**

2. Hintergrund zu Klimaschutz und Klimaanpassung **5**
2.1. Globaler und nationaler Rahmen 5
2.2. Die Rolle der Städte 8
2.3. Flächenkonflikte und Betrachtungsebenen 13

3. Wirkungspotenziale der betrachteten Maßnahmen **21**
3.1. Photovoltaik-Fassade 21
3.2. Fassadenbegrünung 31
3.3. Kombination der Photovoltaik und Begrünung an Fassaden 38

4. Methodisches Vorgehen **45**

5. Bewertungsmethodik und Maßnahmenbewertung **49**
5.1. Bildung der Proxyindikatoren 49
5.2. Definition der Szenarien 57
5.3. Ergebnisse der Maßnahmenbewertung 59

6. Diskussion der Bewertungsmethodik und der Maßnahmenbewertung **63**
6.1. Bewertung der Methodik und Interpretation der Bewertungsergebnisse 63
6.2. Übertragbarkeit der Bewertungsmethodik 70
6.3. Einordnung der Arbeit und Anknüpfungsmöglichkeiten 71

7. Fazit und Handlungsempfehlungen **75**

Literaturverzeichnis **79**

A. Ergänzendes Material . . . . . **XI**

B. Material zur Bestimmung der Indikatoren . . . . . **XIII**

C. Vollständige Berechnungsergebnisse der Proxyindikatoren . . . . . **XVII**

Abbildungsverzeichnis

2.1. Räumliche Verteilung der Wärmebelastung in Berlin und Umland 11
2.2. Flächenpotenziale zur Nutzung von Photovoltaik an Gebäudefassaden in Deutschland 15
2.3. Anzahl heißer Tage mit einem Tagesmaximum der Lufttemperatur über 30 °C in Deutschland 2020 19

3.1. Vertikaler Schnitt einer vorgehängten hinterlüfteten Photovoltaik-Fassade. . . . 22
3.2. Photovoltaik-Fassade aus polykristallinen Silizium-Modulen an einem Gebäude in Paris 24
3.3. Jährliche solare Bestrahlung auf eine Fläche bestimmter Neigung und Ausrichtung im Verhältnis zur Globalstrahlung auf eine horizontale Fläche in Berlin . . 29
3.4. Wandgebundene Fassadenbegrünung am Gebäude der Magistratsabteilung 48 in Wien 32
3.5. Unterteilung der Fassadenbegrünungssysteme 33
3.6. Kombination von Photovoltaik und Begrünung an einer Fassade in einer Ebene 39
3.7. Funktional getrennt integrierte Photovoltaik und Begrünung an der Fassade des Smart Material Hauses in Hamburg 40
3.8. Konzeptentwurf für die Kombination von Photovoltaik und Begrünung an der Fassade eines Verwaltungsgebäudes 41
3.9. Multifunktionale Systemlösung: Gebäudebegrünung und Photovoltaik 42
3.10. Versuchsaufbau einer Kombination aus wandgebundener Begrünung mit vorgehängten Photovoltaik-Modulen 43

4.1. Ebenen der Maßnahmenbewertung 46

5.1. Klimaschutzwirkung und Klimaanpassungswirkung der betrachteten Maßnahmen im Referenzszenario 60
5.2. Klimaschutzwirkung und Klimaanpassungswirkung der betrachteten Maßnahmen in Szenario$_{3,1}$ 61
5.3. Klimaschutzwirkung und Klimaanpassungswirkung der betrachteten Maßnahmen in Szenario$_{1,3}$ 61
5.4. Klimaschutzwirkung und Klimaanpassungswirkung der betrachteten Maßnahmen in Szenario$_{3,3}$ 62
5.5. Klimaschutzwirkung und Klimaanpassungswirkung der betrachteten Maßnahmen in Szenario$_{3,3\text{-Synergie}}$ 62

A.1. Durchschnittliche Lufttemperatur im Sommer in Deutschland im Referenzzeitraum von 1961 bis 1990 XII

B.1. Anzahl heißer Tage in Deutschland im Referenzzeitraum von 1961 bis 1990 . . XIV
B.2. Mittlere Jahressummen der Globalstrahlung für den Zeitraum von 1981 bis 2010 in Deutschland XV

Tabellenverzeichnis

3.1. Maximale Wirkungsgrade und typische Temperaturkoeffizienten für Photovoltaik-Module mit häufig verwendeten Zelltypen 26

4.1. Szenarien-Matrix für die Maßnahmenbewertung 47

5.1. Gewichtungen zu Relevanz und Wirkungspotenzialen der Wirkungsfelder 49
5.2. Proxyindikatoren zur Bestimmung der Bedarfe und Wirkungspotenziale der Maßnahmen in Bezug auf die Wirkungsfelder 51
5.3. Bestimmung der Proxyindikatoren P_1 bis P_7 und dafür verwendete Indikatoren sowie deren Wertebereiche und Gewichte 53
5.4. Ausprägung der für die Szenarien unterschiedlich gewählten Indikatoren 58
5.5. Klimaschutzwirkung und Klimaanpassungswirkung der betrachteten Maßnahmen unter den aufgestellten Szenarien 59

C.1. Vollständige Berechnungsergebnisse der Proxyindikatoren im Szenario$_{1,1}$ XVII
C.2. Vollständige Berechnungsergebnisse der Proxyindikatoren im Szenario$_{1,2}$ XVIII
C.3. Vollständige Berechnungsergebnisse der Proxyindikatoren im Szenario$_{1,3}$ XIX
C.4. Vollständige Berechnungsergebnisse der Proxyindikatoren im Szenario$_{2,1}$ XX
C.5. Vollständige Berechnungsergebnisse der Proxyindikatoren im Szenario$_{2,2}$ XXI
C.6. Vollständige Berechnungsergebnisse der Proxyindikatoren im Szenario$_{2,3}$ XXII
C.7. Vollständige Berechnungsergebnisse der Proxyindikatoren im Szenario$_{3,1}$ XXIII
C.8. Vollständige Berechnungsergebnisse der Proxyindikatoren im Szenario$_{3,2}$ XXIV
C.9. Vollständige Berechnungsergebnisse der Proxyindikatoren im Szenario$_{3,3}$ XXV
C.10. Vollständige Berechnungsergebnisse der Proxyindikatoren im Szenario$_{3,3\text{-Synergie}}$ XXVI

Abkürzungsverzeichnis

BMU Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

CO_2-eq CO_2-Äquivalente

DAS Deutsche Anpassungsstrategie

DWD Deutscher Wetterdienst

FBS Fassadenbegrünungssystem

GIPV Gebäudeintegrierte Photovoltaik

IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change

KAW Klimaanpassungswirkung

KSG Bundes-Klimaschutzgesetz

KSW Klimaschutzwirkung

KWVA Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalyse

MFS Multifunktionale Systemlösung: Gebäudebegrünung und Photovoltaik

PV Photovoltaik

PVF Photovoltaik-Fassade

SRU Sachverständigenrat für Umweltfragen

STC Standardtestbedingungen

THG Treibhausgas

UBA Umweltbundesamt

UHI urban heat island

VH-Fassade vorgehängte hinterlüftete Fassade

1. Motivation, Zielsetzung und Vorgehen

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Thematik Klimaschutz und Klimaanpassung in Städten. In diesem Kontext sollen Photovoltaik und Begrünung an Gebäudefassaden untersucht werden. Städten kommt eine besondere Rolle als Verursacher und Betroffene der globalen Erwärmung zu. Laut Deutschem Städtetag setzen sich die Städte bereits aktiv für Klimaschutz ein, jedoch führe die globale Erwärmung ebenso zu großen Herausforderungen bezüglich der Klimaanpassung von Städten (Deutscher Städtetag, 2019). Dabei sei es entscheidend, dass sich Maßnahmen zum Klimaschutz und zur Klimaanpassung nicht widersprechen. Vielmehr sollten Synergien zwischen den Maßnahmen genutzt werden, was eine Bewertung der Maßnahmen hinsichtlich Klimaschutz und Klimaanpassung erforderlich mache. Genannt werden vom Deutschen Städtetag zum Beispiel die Nutzung erneuerbarer Energien wie der Photovoltaik oder die Reduzierung der Hitzebelastung durch mehr Stadtgrün wie Gebäudebegrünungen. Ein weiteres Problem sei laut Deutschem Städtetag die Umsetzung der erforderlichen Klimaschutz- und Klimaanpassungsmaßnahmen trotz der hohen Nachfrage an Flächen und Wohnraum. Daher konzentrieren sich die Betrachtungen im Rahmen dieser Arbeit auf die Gebäudefassaden als vertikale Flächen. Gerade in größeren Städten haben Fassaden aufgrund der höheren Gebäude im Verhältnis zu Dächern ein großes Flächenpotenzial. Zudem liegen Fassaden näher an öffentlichen Aufenthaltsräumen wie Straßen, Wegen und Plätzen und können somit direkt das Wohlbefinden in diesen Räumen beeinflussen.

Die beiden Maßnahmen Photovoltaik und Gebäudebegrünung haben laut Peñaranda Moren (2018, S. 5) jeweils ihr größtes Wirkungspotenzial bei hoher Sonneneinstrahlung und stünden daher potenziell in Konkurrenz zueinander. Eine Lösungsmöglichkeit für die Flächenkonkurrenz an geeigneten Gebäudefassaden könne laut Peñaranda Moren (2018, S. 25) die Kombination aus Photovoltaik und Begrünung unter der Nutzung von Synergieeffekten darstellen. Um über die Nutzung einer Gebäudefassade hinsichtlich Klimaschutz als auch Klimaanpassung eine Entscheidung treffen zu können, fehlt es bislang an einer einheitlichen Bewertung relevanter Maßnahmen (vgl. Grafakos et al., 2019; Croce & Vettorato, 2020; Hoffmann et al., 2020).

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Methodik zur quantitativen Bewertung der Maßnahmen Photovoltaik-Fassade, Fassadenbegrünung sowie der Kombination aus Photovoltaik und Begrünung an einer Fassade hinsichtlich der Wirkung auf Klimaschutz und Klimaanpassung im städtischen Umfeld. In diesem Kontext sollen Effekte und potenzielle Konflikte auf Gebäude- und Quartiersebene betrachtet werden. Das Ergebnis soll eine wissenschaftliche Entscheidungsgrundlage für die Auswahl von Maßnahmen an einzelnen Gebäudefassaden darstellen. Dabei soll die Entscheidung auf Basis frei zugänglicher Daten und ohne unverhältnismäßig großen Aufwand erfolgen können. Die Betrachtungen in dieser Arbeit konzentrieren sich hinsichtlich der klimatischen, städtebaulichen und politischen Gegebenheiten auf die Situation in Deutschland.

Um die Zielsetzung zu erreichen, soll im Rahmend dieser Arbeit folgende zentrale Fragestellung beantwortet werden:

> Wie wirken sich eine Photovoltaik-Fassade, eine Fassadenbegrünung sowie eine Kombination aus Photovoltaik und Begrünung an einer Fassade in Bezug auf Klimaschutz und Klimaanpassung im städtischen Umfeld unter Betrachtung der Gebäude- und Quartiersebene aus?

Die Fragestellung kann in folgende Teilfragen in Bezug auf die dazugehörigen Hypothesen H 1 bis H 10 differenziert werden:

- Welche Wirkungsfelder sind als Indikatoren geeignet, um die Wirkung der Maßnahmen in Bezug auf Klimaschutz und Klimaanpassung qualitativ und quantitativ darzustellen?
  - H 1 Die Klimaschutzwirkung der Maßnahmen kann über die Produktion erneuerbaren Stroms, die Einsparung von Heiz- und Kühlenergie sowie die direkte Bindung von CO_2 aus der Atmosphäre qualitativ und quantitativ dargestellt werden.
  - H 2 Die Klimaanpassungswirkung der Maßnahmen kann über die Reduzierung der Hitzebelastung sowie die Reduzierung des Überflutungsrisikos durch Sturzfluten in Folge von Starkregenereignissen qualitativ und quantitativ dargestellt werden.
- Welche Bedingungen beeinflussen inwiefern die Ausprägung dieser Indikatoren auf Gebäude- und Quartiersebene?
  - H 3 Auf Gebäudeebene wird die Ausprägung der Indikatoren von der solaren Bestrahlung sowie von gebäudespezifischen Eigenschaften beeinflusst.
  - H 4 Auf Quartiersebene wird die Ausprägung der Indikatoren vom lokalen Mikroklima beeinflusst.
  - H 5 Für Fassaden mit einer hohen solaren Bestrahlung in einer mikroklimatischen Umgebung mit geringer Hitzebelastung stellt die Photovoltaik die geeignetste Lösung hinsichtlich Klimaschutz und Klimaanpassung dar.
  - H 6 Für Fassaden mit einer geringen solaren Bestrahlung in einer mikroklimatischen Umgebung mit hoher Hitzebelastung stellt die Begrünung die geeignetste Lösung hinsichtlich Klimaschutz und Klimaanpassung dar.
  - H 7 Auf Fassaden mit einer hohen solaren Bestrahlung in einer mikroklimatischen Umgebung mit hoher Hitzebelastung stehen Photovoltaik und Begrünung potenziell in Konflikt zueinander. Die Kombination beider Maßnahmen stellt in diesem Fall die geeignetste Lösung hinsichtlich Klimaschutz und Klimaanpassung dar.
- Auf welchen räumlichen Ebenen sind die Klimaschutzwirkung und Klimaanpassungswirkung der Maßnahmen verortet und welche Effekte können die Wirkung auf diesen Ebenen beeinflussen?
  - H 8 Die Klimaanpassungswirkung der Maßnahmen ist auf der Gebäude- und Quartiersebene zu verorten, die Klimaschutzwirkung auf der globalen Ebene.

H 9 Auf Quartiersebene können Skaleneffekte die Wirkung der Maßnahmen auf Klimaschutz und Klimaanpassung beeinflussen.

H 10 Aufgrund der unterschiedlichen Wirkungsebenen kann es zu Interessenkonflikten unter beteiligten Akteurinnen und Akteuren kommen.

Aufgrund der breiten Fragestellung stellt die Auswertung und Kombination von wissenschaftlich veröffentlichten Forschungsergebnissen wie auch von grauer Literatur zu den einzelnen Maßnahmen sowie zu Klimaschutz und Klimaanpassung ein geeignetes Vorgehen dar. Den Hauptbestandteil dieser Arbeit bildet daher eine qualitative Literaturauswertung zu den Themengebieten Klimaschutz und Klimaanpassung mit dem Fokus auf nationaler, städtischer und quartiersbezogener Ebene sowie Wirkungspotenziale der Maßnahmen Photovoltaik-Fassade, Fassadenbegrünung und einer Kombination aus beidem. Die Ergebnisse der Literaturauswertung mit Bezug auf die oben genannten Hypothesen sind als theoretischer Hintergrund in den Kapiteln 2 und 3 aufgeführt. Auf dieser Basis wurden die zu überprüfenden Wirkungsfelder (vgl. H 1 und H 2) gewichtet und für Wirkungsfelder mit einer hohen Gewichtung weitere Indikatoren zur quantitativen Bewertung der Maßnahmen abgeleitet. Zur Überprüfung der Hypothesen H 5 bis H 7 wurden Szenarien mit den Hypothesen entsprechenden Bedingungen hinsichtlich solarer Bestrahlung und mikroklimatischer Hitzebelastung aufgestellt, für die eine quantitative Bewertung der Maßnahmen erfolgte. Das methodische Vorgehen zur Entwicklung der quantitativen Bewertungsmethodik sowie zur Aufstellung der Szenarien und deren Anwendung für die Bewertung der Maßnahmen ist in Kapitel 4 beschrieben. Die resultierenden Ergebnisse in Form der Bewertungsmethodik, der Szenarien und der Bewertungsergebnisse der Maßnahmen sind in Kapitel 5 dargestellt. In Kapitel 6 erfolgt anschließend eine Bewertung und Interpretation der Ergebnisse aus den Kapiteln 2, 3 und 5 in Bezug auf die Hypothesen. Ebenfalls werden die Übertragbarkeit der Bewertungsmethodik betrachtet und mögliche anknüpfende Untersuchungen vorgeschlagen. Auf dieser Basis werden in Kapitel 7 die zentralen Erkenntnisse zusammengefasst und Handlungsempfehlungen gegeben.

2. Hintergrund zu Klimaschutz und Klimaanpassung

2.1. Globaler und nationaler Rahmen

2.1.1. Aktualität und Relevanz der globalen Erwärmung

Ein Grad Celsius klingt nach einer geringen Veränderung. Es ist der durchschnittliche Temperaturanstieg der Erdoberfläche, den die Menschheit bis heute[1] durch Emissionen von Treibhausgasen (THG)[2] laut dem Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), auch Weltklimarat genannt, verursacht hat (IPCC, 2018, S. 4–5). Die ausgestoßenen Treibhausgase verweilen laut IPCC für Jahrhunderte bis Jahrtausende in der Atmosphäre und führen zu langfristigen Veränderungen, wie dem Anstieg der Meeresspiegel, die sich noch auf zukünftige Generationen auswirken werden. Bereits heute führt die Erwärmung um ein Grad Celsius zu spürbaren Folgen wie extremer Hitze, starken Niederschlägen und Dürren (IPCC, 2018, S. 7–8). Diese werden sich laut dem IPCC bei einer fortlaufenden Erwärmung verstärken. Insbesondere Ökosysteme werden sich nur bedingt an eine weitere Erwärmung anpassen können. Der IPCC warnt davor, dass bei einem Anstieg der globalen Temperatur um mehr als 1,5 °C die Biodiversität sowie direkte Leistungen der Ökosysteme an Land, im Süßwasser, an den Küsten und in den Meeren gefährdet sind. Von diesen Leistungen sei die Menschheit direkt und indirekt abhängig. Eine Erwärmung um 1,5 °C verglichen mit einer Erwärmung um 2 °C führt zu einem niedrigeren Risiko negativer Folgen für Ökosysteme und Menschen inklusive deren Gesundheit, Nahrungsversorgung, Wasserversorgung, Sicherheit, Einkommen und wirtschaftlichen Wachstum (IPCC, 2018, S. 9–12). Um die globale Erwärmung mit einer 67-prozentigen Wahrscheinlichkeit auf unter 1,5 °C zu begrenzen, bleibt nach Berechnungen des IPCC noch ein CO_2-Budget von 420 Gt, das ab 2018 gerechnet insgesamt noch ausgestoßen werden darf. Die Einhaltung dieses Budgets bedürfe schneller und umfassender Änderungen in den Bereichen Energie, Landnutzung, Gebäude, Infrastruktur und Industrie. Die im Rahmen des Pariser Abkommens von 2015 getroffenen nationalen Verpflichtungen reichten insgesamt nicht aus, um die Emissionen innerhalb des CO_2-Budgets zu halten und damit die Erderwärmung auf unter 1,5 °C zu begrenzen (IPCC, 2018, S. 18).

[1] Als Referenzzeitraum wird hier das vorindustrielle Niveau von 1850 bis 1900 verwendet.

[2] Als Treibhausgase werden solche Gase bezeichnet, die sich auf die Energiebilanz der Erdatmosphäre auswirken können. Sie entstehen hauptsächlich bei der Verbrennung fossiler Energieträger und sind Hauptverursacher der beobachteten globalen Erwärmung, auch Erderwärmung oder umgangssprachlich „Klimawandel“ genannt. Kohlendioxid (CO_2) ist mengenmäßig das bedeutendste Treibhausgas und trägt am meisten zur globalen Erwärmung bei. Andere Treibhausgase wie Methan (CH_4), Distickstoffmonoxid (N_2O), auch Lachgas genannt, und fluorierte Treibhausgase, auch F-Gase genannt, werden zur besseren Vergleichbarkeit oft als CO_2-Äquivalente (CO_2-eq) angegeben. Diese beziehen sich auf die entsprechende Masse an CO_2, die demselben Treibhausgaspotenzial, sprich der gleichen Wirkung auf die Erwärmung der Atmosphäre in einem bestimmten Zeitraum, entspricht. (vgl. IPCC, 2014, S. 44–48)

2.1.2. Interdependenz von Klimaschutz und Klimaanpassung

In seinem letzten Synthesis Report legte der IPCC (2014, S. 26) dar, dass sowohl *Maßnahmen zur Reduktion von THG-Emissionen (Klimaschutz)* als auch *Maßnahmen zur Anpassung an die Folgen der globalen Erwärmung (Klimaanpassung)* erforderlich sind, um die Risiken der globalen Erwärmung für Menschen und Ökosysteme zu begrenzen. Eine Reduktion von THG-Emissionen kann die globale Erwärmung verringern und damit die Anpassung an Klimafolgen erleichtern (IPCC, 2014, S. 8, 17). Jedoch wird sich auch unter den günstigsten Szenarien die Erde weiter erwärmen, sodass Klimaanpassungsmaßnahmen gegen Auswirkungen wie Hitze, Dürre oder steigende Meeresspiegel in Zukunft vermehrt benötigt werden (IPCC, 2014, S. 10). Zwischen Klimaschutz- und Klimaanpassungsmaßnahmen kann es auf sowohl zu positiven Synergieeffekten als auch zu Zielkonflikten kommen (IPCC, 2014, S. 98). So könne zum Beispiel der Schutz von Ökosystemen oder das Pflanzen von Bäumen vor Überschwemmungen und Hitze schützen sowie gleichzeitig durch die Bindung von CO_2 einen Klimaschutz-Effekt haben, während die Verwendung von Klimaanlagen zum Schutz gegen Hitze in Gebäuden durch einen hohen Energiebedarf zu mehr THG-Emissionen führen könne.

2.1.3. Klimaschutzpolitik in Deutschland

Die Betrachtungen in dieser Arbeit beziehen sich auf die Situation in der Bundesrepublik Deutschland. 2015 verpflichtete Deutschland sich auf der Weltklimakonferenz in Paris dem völkerrechtlichen Übereinkommen, die globale Erwärmung auf deutlich unter 2 °C und möglichst auf 1,5 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen und entsprechende Anstrengungen zur Senkung der Treibhausgasemissionen zu unternehmen. Zur Umsetzung der Verpflichtungen aus Paris legte Deutschland 2016 mit dem Klimaschutzplan 2050 eine langfristige Strategie im Klimaschutz vor. Darin wurde das Ziel der weitgehenden Treibhausgasneutralität bis 2050 gesetzt (BMU, 2016, S. 7). Dies bedeutet die Herstellung eines Gleichgewichts zwischen den anthropogenen (vom Menschen verursachten) Emissionen von THG und deren Abbau in natürlichen oder künstlichen Senken. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen alle Energieformen fast ausschließlich aus erneuerbarem Strom gewonnen werden (BMU, 2016, S. 34–37). Dabei sind und werden laut dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) auch in Zukunft Wind- und Solarenergie die bedeutendsten erneuerbaren Stromquellen sein. Deutschland setzte sich 2019 mit dem Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) das verbindliche Ziel, seine THG-Emissionen bis 2030 um mindestens 55 % gegenüber 1990 zu senken (§ 3 Absatz 1 KSG[3]). Dazu wurden im KSG Jahresemissionsmengen für die Sektoren Energiewirtschaft, Industrie, Verkehr, Gebäude, Landwirtschaft sowie Abfallwirtschaft und Sonstiges festgelegt (§ 1 Absatz 1 KSG).

Im Klimaschutzprogramm 2030 wurden die nötigen Maßnahmen zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050 und zur Einhaltung des Bundes-Klimaschutzgesetzes konkretisiert. Die erneuerbaren Energien sollen demnach bis zum Jahr 2030 auf 65 % des brutto Stromverbrauchs ausgebaut werden (BMU, 2019a, S. 34–36). Die Stromerzeugung aus Photovoltaikanlagen soll

[3] Bundes-Klimaschutzgesetz vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S. 2513)

dazu 90 TWh betragen, was neben der Onshore-Windkraft das zweithöchste Ausbauziel darstellt. Aufgrund der fehlenden Sonneneinstrahlung bei Nacht muss laut BMU mit 98 GW jedoch eine im Verhältnis zur Windkraft entsprechend höhere Leistung installiert werden. Ein *direkter CO_2-Entzug* aus der Atmosphäre wird im Deutschen Klimaschutzprogramm 2030 lediglich durch die Förderung von Kohlenstoffsenken im Sektor Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft als wirksame Klimaschutzmaßnahme erwähnt (BMU, 2019a, S. 122). Laut IPCC (2014, S. 89) kann ein direkter CO_2-Entzug jedoch eine wichtige Rolle in Klimaschutzszenarien zur Kompensierung von schwer vermeidbaren THG-Emissionen spielen.

In einem Forschungsbericht des Öko-Instituts, Fraunhofer ISI und des Instituts für Ressourceneffizienz und Energiestrategien, der im Auftrag des BMU sowie des Umweltbundesamtes (UBA) zur Abschätzung der Treibhausgasminderungswirkung des Klimaschutzprogramms 2030 erstellt wurde, heißt es jedoch, dass die dort beschriebenen Maßnahmen nicht ausreichen, um die Klimaziele Deutschlands einzuhalten (Harthan et al., 2020, S. 29). Insbesondere durch Elektrifizierungen in anderen Sektoren wie Verkehr, Wärme oder Industrie könne der Strombedarf zusätzlich ansteigen, wodurch die erneuerbaren Energien entsprechend stärker ausgebaut werden müssten, als es im Klimaschutzplan 2030 festgelegt ist (Harthan et al., 2020, S. 89).

Hinzu kommt, dass die beschriebenen Klimaziele Deutschlands bei einer gerechten und mit dem Übereinkommen von Paris kompatiblen Verteilung aller CO_2-Emissionen zu niedrig angesetzt sind. Der Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) berechnete in seinem aktuellen Umweltgutachten die Menge an CO_2-Emissionen, die zur Einhaltung der Pariser Ziele von Deutschland ab 2020 noch ausgestoßen werden dürfte, auf 6,7 Gt (SRU, 2020, S. 51–55). Dieses sogenannte CO_2-Budget wurde dazu ab 2016 nach der Bevölkerungszahl auf alle Länder aufgeteilt. Das anhand der Klimaschutzziele für Deutschland abgeleitete implizite Budget ist laut den Berechnungen des SRU jedoch fast doppelt so groß. Die gesteckten Ziele reichten folglich nicht aus, um einen angemessenen Beitrag Deutschlands zur Erfüllung der Pariser Klimaziele zu leisten. Auch der SRU (2020, S. 59) plädiert für einen schnelleren und umfangreicheren Ausbau der erneuerbaren Energien.

Um die Verpflichtung für das 1,5- bzw. 2-Grad-Ziel einzuhalten, wird folglich bereits in den nächsten zehn Jahren ein deutlich stärkerer Ausbau an Photovoltaik- und Windenergieanlagen in Deutschland erforderlich sein, als im Klimaschutzplan 2030 beschrieben.

2.1.4. Deutschlands Klimaanpassungsstrategie

Mit der Deutschen Anpassungsstrategie (DAS) legte die Bundesregierung 2008 die Rahmenbedingungen zur Anpassung an die Folgen der globale Erwärmung *(Klimafolgen)* fest. Die DAS benennt mögliche Klimafolgen für Deutschland, schätzt deren Gefahren und Risiken und benennt Handlungsoptionen in 15 Handlungsfeldern. Damit wird versucht, ein Bewusstsein und eine Entscheidungsgrundlage für klimaangepasstes Handeln zu schaffen. Das Ziel der Klimaanpassung wird damit beschrieben „die Verletzlichkeit natürlicher, gesellschaftlicher und ökonomischer Systeme zu verringern beziehungsweise deren Anpassungsfähigkeit zu erhalten und zu steigern“ (Bundesregierung, 2008, S. 58). Zur Konkretisierung der Handlungsoptionen

wurden 2011 Anpassungsmaßnahmen im Aktionsplan Anpassung beschlossen. Die DAS und der Aktionsplan Anpassung werden kontinuierlich in Fortschrittsberichten weiterentwickelt.

Dem aktuellen Fortschrittsbericht (BMU, 2020b) liegen ein Monitoringbericht (UBA, 2019) zu den Klimafolgen und dem Fortschritt von Anpassungen an die Klimafolgen sowie eine Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalyse (KWVA) (Buth et al., 2015) zur Identifikation besonders gefährdeter Regionen und Systeme zugrunde.

Der im Monitoringbericht beschriebene Anstieg der mittleren Lufttemperatur in Deutschland ist mit 1,5 °C höher, als das globale Mittel (UBA, 2019, S. 7–8). Als wesentliche beobachtete Auswirkungen der globalen Erwärmung in Deutschland nennt der Bericht lange Trockenperioden im Sommer, Extremwetterereignisse wie Stürme und heftiger Starkregen sowie insbesondere eine ansteigende Hitzebelastung, die sich durch einen Trend zunehmender Hitze-Extrema auszeichnet. Maßnahmen, die bereits vor allem in Städten gegen die zunehmende Hitzebelastung umgesetzt werden, sind laut dem Bericht Gesundheitsprävention sowie planerische und bautechnische Anpassungen. Für die Zukunft werden in der KWVA den Klimawirkungen Temperatur, Niederschlag, Sturmfluten und Hitze eine hohe Bedeutung für Deutschland zugemessen (Buth et al., 2015, S. 636). Davon hat laut der Analyse alleine die Belastung menschlicher Gesundheit durch Hitze bereits heute eine hohe Bedeutung. In einer Studie des Robert Koch-Instituts, des Deutschen Wetterdienstes und der Charité werden die hitzebedingten Todesfälle in Deutschland für die Hitzesommer 2003, 2006 und 2015 auf jeweils 7600, 6200 und 6100 Todesfälle geschätzt (an der Heiden et al., 2019). Als Handlungsfelder hoher Betroffenheit werden in der KWVA das Bauwesen sowie der Küsten- und Meeresschutz genannt (Buth et al., 2015, S. 638). Häufiger und intensiver auftretende Hitzewellen werden laut der Analyse vor allem Auswirkungen auf die Handlungsfelder Bauwesen und menschliche Gesundheit haben. Je nach Geschwindigkeit der globalen Erwärmung würden in Deutschland in naher Zukunft die Klimawirkungen „direkte Hitzebelastung von Personen“, „Beeinträchtigung des Stadtklimas“, „Luftqualität“ sowie „Innenraumklima in Gebäuden“ eine hohe Bedeutung haben.

Bei der nationalen Konferenz „Klimaresilient in die Zukunft“ zum aktuellen Fortschrittsbericht zur DAS wurde besonders auf die Entwicklung grüner und blauer Infrastruktur (Natur- und Wasserflächen) in Städten hingewiesen (Hoffmann et al., 2020, S. 3). Zudem wurde auf der Konferenz ein Bedarf an Lösungsansätzen für Nutzungskonflikte wie der um Flächen oder Wasser festgestellt.

2.2. Die Rolle der Städte

2.2.1. Städte als Verursacher

Laut den Vereinten Nationen lebten 2008 über die Hälfte der Weltbevölkerung in städtischen Räumen, in Europa waren es knapp drei Viertel (UN, 2019, S. XIX). Bis 2050 prognostizieren die Vereinten Nationen einen weltweiten Anstieg auf 68 %. Weltweit tragen Städte als größte Emissionquelle von Treibhausgasen aus Siedlungen zur globalen Erwärmung bei (Seto et al., 2014, S. 930). Dies liege an einem durchschnittlich höheren Energiebedarf in Städten im

Vergleich zum ländlichen Raum. In Deutschland kann dieses Verhältnis jedoch anders aussehen, wie eine Untersuchung aus Rheinland-Pfalz zeigte (Kramer, 2010). Dort wurde festgestellt, dass der Energiebedarf pro Einwohner in den ländlichen Räumen verglichen mit verdichteten und hoch verdichteten Räumen höher ausfällt. Dies liegt laut der Untersuchung an einem größeren Bedarf von Mobilität und Heizenergie aufgrund größerer Distanzen und Gebäude im ländlichen Raum. Der absolute Energiebedarf ist durch die höhere Zahl der Verbraucher jedoch in den verdichteten Räumen am höchsten (Kramer, 2010, S. 366–368). 2019 entfielen in Deutschland 30,6 % des Endenergiebedarfs auf den Verkehr, 28 % auf die Industrie, 26,5 % auf private Haushalte und 14 % auf Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (BMWI, 2020). Dabei machte laut BMWI die Raumwärme 68,2 % des Endenergiebedarfs der privaten Haushalte und 26,3 % des gesamten Endenergiebedarfs, hauptsächlich in Form von Gas und Öl, aus. Die Stadt Frankfurt am Main bilanzierte ihren Endenergiebedarf auf 31 % Industrie (hauptsächlich Ferndampf und Strom), 29 % Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (hauptsächlich Strom), 22 % Verkehr (hauptsächlich Kraftstoffe) und 19 % private Haushalte (hauptsächlich Erdgas) (Energiereferat Stadt Frankfurtam Main, 2020). Die Treibhausgasemissionen ergaben sich für Frankfurt laut der Bilanz hauptsächlich aus Strom (48 %), Kraftstoffen (21 %), Erdgas (15 %) und Ferndampf (10 %).

2.2.2. Klimaschutzmaßnahmen

Maßnahmen zur Reduktion der städtischen THG-Emissionen können hauptsächlich bei einer Verringerung des Energiebedarfs durch eine effizientere Nutzung oder der Umstellung der Primärenergie auf erneuerbaren Strom ansetzen (Sterchele et al., 2020, S. 4–6). Dabei seien insbesondere die energetische Gebäudesanierung sowie der Ausbau der Stromerzeugung aus Wind- und Sonnenenergie von großer Bedeutung. Handlungsfelder und Maßnahmen, die in Verbindung mit Klimaschutz in Städten wiederholt genannt werden, umfassen die Nutzung und den Ausbau der erneuerbaren Energien, die energetische Sanierung von Gebäuden zur Senkung des Energiebedarfs beim Heizen und Kühlen, eine klimaschonende Verkehrsentwicklung durch verkürzte Wege und eine Stärkung des öffentlichen Personennahverkehrs, des Rad- und Fußverkehrs und elektrisch angetriebener Fahrzeuge, die Steigerung der Effizienz von Lieferketten und Industrieprozessen, den Einsatz klimafreundlicher Materialien sowie eine Optimierung der Kreislaufwirtschaft (vgl. GERICS & KfW, 2015; Coalition for Urban Transitions, 2019, S. 30; Link et al., 2018, S. 25). Die genannten Maßnahmen finden sich in ähnlicher Form ebenfalls in Klimaschutzplänen deutscher Städte wie dem Berliner Stadtentwicklungsplan Klima wieder (vgl. Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, 2011, S. 56–57).

Die Verwendung und Erzeugung erneuerbarer Energien, insbesondere erneuerbaren Stroms, sowie die Einsparung von Heiz- und Kühlenergie stellen somit bedeutende Maßnahmen hinsichtlich Klimaschutz in Städten dar.

2.2.3. Städte als Betroffene

Städtische Räume mit einem hohen Anteil versiegelter Flächen und einer hohen Siedlungsdichte sind laut der KWVA besonders empfindlich gegenüber Hitze (Buth et al., 2015, S. 436–437). In Deutschland sind demnach insbesondere die Kernstädte der Ballungszentren und Teile der Rheinschiene betroffen, dort verortet die KWVA bereits heute deutliche Auswirkungen (siehe hierzu auch Abbildung 2.3 auf Seite 19). Städte heizen sich verglichen mit dem Umland tagsüber stärker auf und kühlen nachts weniger stark ab (UBA, 2019, S. 152–153). Durch die Ausbildung dieser *städtischen Wärmeinsel*, im Englischen *urban heat island (UHI)*, können sich laut dem UBA Temperaturunterschieden bis neun Kelvin ergeben, die abends und nachts am stärksten ausfallen. Dieser Effekt wird im Monitoringbericht durch mehrere Faktoren wie der Größe einer Stadt, der Dichte und Höhe ihrer Bebauung und den verwendeten Baumaterialien sowie dem Anteil von Grünflächen erklärt. Vereinfacht kann die Größenordnung von städtischen Wärmeinseln für eine Stadt in Zentraleuropa nach Wienert et al. (2013) über den dekadischen Logarithmus der Einwohnerzahl abgeschätzt werden, wie in Gleichung (2.1) dargestellt.

$$\text{Größenordung der städtischen Wärmeinsel} = 2,01 \cdot \log(\text{Anzahl Einwohner}) - 4,06 \quad (2.1)$$

Die Formel gibt die maximale Intensität einer städtischen Wärmeinsel als Temperaturdifferenz zum Umland in Kelvin an. Für eine Stadt mit 3,7 Millionen Einwohnern in der Größenordnung von Berlin ergibt sich damit eine maximale Temperaturdifferenz zum Umland von 9,1 K. Die tatsächliche Intensität ist von der Jahres- und Tageszeit abhängig und wird laut Wienert et al. von der Windgeschwindigkeit sowie dem Bewölkungsgrad abgeschwächt. In der KWVA wurde zur Beurteilung des Ausmaßes städtischer Wärmeinseln zusätzlich der Anteil versiegelter Flächen berücksichtigt (Buth et al., 2015, S. 436). Tervooren (2015) setzte die räumliche Temperaturverteilung auf städtischer Ebene mittels Satellitendaten zur Oberflächentemperatur in Relation zu detaillierten Landnutzungsinformationen. Dabei konnte festgestellt werden, dass Grünvolumen einen puffernden Effekt auf steigende Temperaturen habe während mehr Versiegelung der Flächen zu einer Temperaturerhöhung führe. Tervooren bestimmte anhand der untersuchten Daten das Temperaturreduktionspotenzial des spezifischen Grünvolumens auf 0,33 K je zusätzlichem $m^3\,m^{-2}$ Grünvolumen. Dagegen erhöhe sich die Temperatur um 0,03 K je zusätzlichem $\%$ versiegelter Fläche. Das größte spezifische Grünvolumen haben laut Meinel et al. (2006) Waldflächen mit 7,9 $m^3\,m^{-2}$. Eine Kombination der Ergebnisse von Tervooren und Meinel et al. ergibt somit einen maximalen Temperaturunterschied zwischen einer zu 100 $\%$ versiegelten Fläche ohne Grünvolumen und einer unversiegelten bewaldeten Fläche von $0{,}03\,K\,\%^{-1} \cdot 100\,\% + 0{,}33\,K\,m^{-3}\,m^2 \cdot 7{,}9\,m^3\,m^{-2} = 5{,}6\,K$.

Abbildung 2.1 zeigt die räumliche Verteilung der Hitzebelastung in Berlin und Umland. Dargestellt ist das Jahresmittel der Tage mit einer Wärmebelastung für den Bezugszeitraum von 1971 bis 2000. Der Begriff Wärmebelastung wird hier von Behrens und Grätz (2008) synonym zum Begriff Hitzebelastung verwendet und bezeichnet Tage, an denen die gefühlte Temperatur in mindestens drei Stunden zwischen 9 und 15 Uhr 32 °C oder mehr erreicht. Die gefühlte

Temperatur ist ein Maß für die thermische Belastung des menschlichen Körpers.[4] Diese wird durch die Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit sowie die Strahlungstemperatur beeinflusst (Höppe, 1999). Die Strahlungstemperatur hängt wiederum von den Temperaturen der umgebenden Objekte ab. Hohe Fassadentemperatur führen damit zu einer höheren thermische Belastung in deren Umfeld. Wie in Abbildung 2.1 zu sehen ist, unterscheidet sich

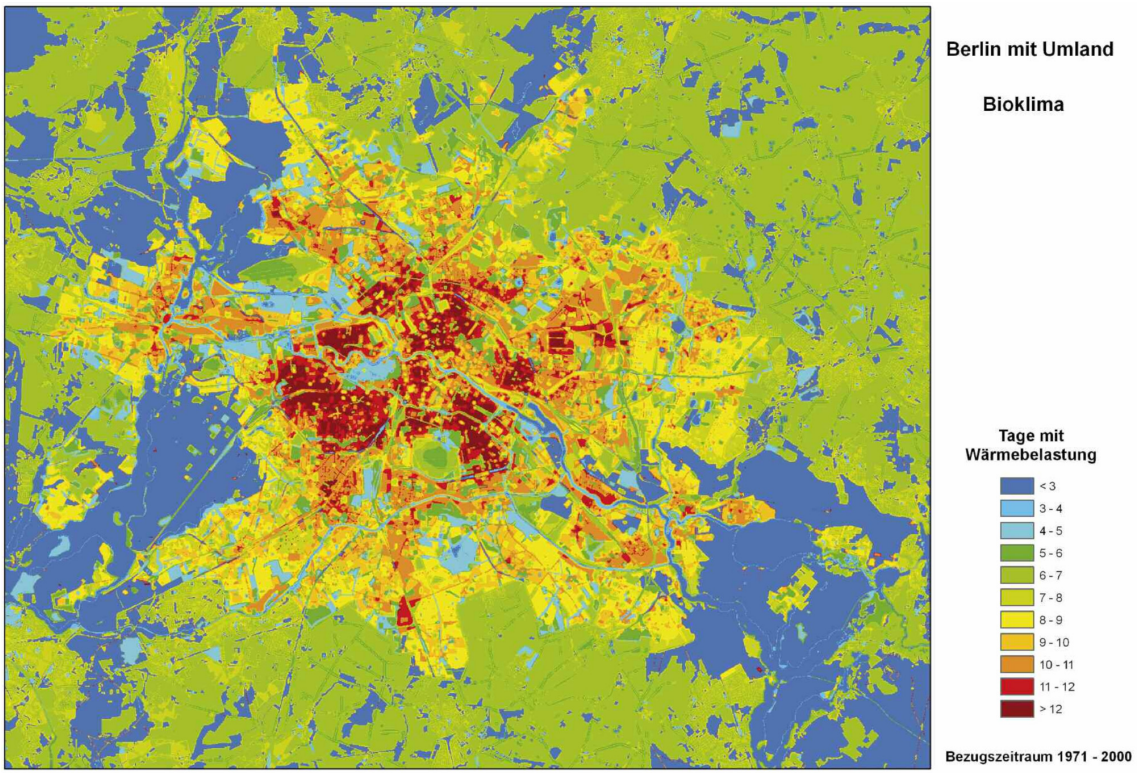


Abbildung 2.1.: *Räumliche Verteilung der Wärmebelastung in Berlin und Umland (Quelle: Behrens und Grätz, 2008, S. 31).*

die Hitzebelastung innerhalb der Stadt. Gebiete mit ähnlichen mikroklimatischen Bedingungen bilden dabei sogenannte *Klimatope* (Behrens & Grätz, 2008, S. 27–28). Diese seien abhängig von der Flächennutzung sowie der Höhenstruktur und Exposition. So könne die Hitzebelastung in einer Parkanlage deutlich unter der in einem Gebiet dichter Bebauung liegen. Um absolute Werte für das lokale *Mikroklima* zu erhalten, müssen die lokalen Verhältnisse additiv mit dem regionalen Klima, auch als *Hintergrundbelastung* bezeichnet, verknüpft werden (Behrens & Grätz, 2008, S. 30). Durch das Regionalklima liegen in Deutschland (bei Vernachlässigung des Alpenklimas) die durchschnittlichen Lufttemperaturen im Sommer um etwa 8 K auseinander (vgl. Abbildung A.1, Anhang A, S. XII). Laut Behrens und Grätz (2008, S. 32) sei in der Zukunft eine im Verhältnis zum Flächenschnitt stärkere Zunahme der Hitzebelastung für Gebiete mit einer bereits bestehenden hohen Belastung zu erwarten.

Als Indikatoren für Hitzebelastung verwendet das UBA im aktuellen Monitoringbericht die Anzahl *heißer Tage* und *Tropennächte*. Diese bezeichnen Tage mit einem Tagesmaximum der Lufttemperatur von 30 °C oder mehr respektive einem Tagesminimum der Lufttemperatur von

[4] Ein anderes Maß für die thermische Belastung ist zum Beispiel die *physiological equivalent temperature (PET)*.

20 °C oder mehr. Die Anzahl heißer Tage und Tropennächte ist in deutschen Großstädten in Bezug zum Flächenmittel deutlich erhöht (UBA, 2019, S. 152–153).

Das lokale Mikroklima innerhalb einer Stadt beeinflusst über die Gebäudehülle das Innenraumklima (Buth et al., 2015, S. 435–440). Durch bauliche Hitzeschutzmaßnahmen am Gebäude wie Beschattung oder Isolation könne das Innenraumklima positiv beeinflusst werden. Zudem gebe es Hinweise auf eine Verschlechterung der Luftqualität in Folge der globalen Erwärmung. Somit habe das Stadtklima direkte und indirekte Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit. Die betroffene Bevölkerung habe dabei einen Einfluss auf die Sensitivität (Empfindlichkeit) gegenüber Hitzebelastungen. Besonders vulnerabel (verletzlich) gegenüber Hitzebelastungen sind laut Buth et al. (2015, S. 602–603) Säuglinge, Kleinkinder, alte und kranke Menschen. Neben der Belastung durch extreme Hitze am Tag kann sich der menschliche Körper bei unzureichender Abkühlung nachts schlechter erholen (UBA, 2019, S. 152–153).

Laut der KWVA werden heiße Tage und Tropennächte in Deutschland zukünftig verbreiteter und häufiger auftreten (Buth et al., 2015, S. 658–659). Diese Entwicklung werde durch den Trend einer zunehmenden Versiegelung mit Siedlungs- und Verkehrsflächen zusätzlich verstärkt. Für die ferne Zukunft (2070-2100) ist in der KWVA eine Ausweitung der von Hitze betroffenen Gebiete auf die komplette Rheinschiene, das Ruhrgebiet, den Verdichtungsraum Südhessen, Nordwürttemberg und Nordbayern sowie auf die Großstädte im südlichen Ostdeutschland beschrieben. Verschärft werde das Problem zudem durch die demografisch älter werdende Bevölkerung.

Im zweiten Fortschrittsbericht zur deutschen Anpassungsstrategie wird daher die Handlungserfordernis für Stadtklima und Luftqualität sowie für die Belastung der menschlichen Gesundheit durch Hitze als hoch angesehen (BMU, 2020b, A1-4, A1-8).

Der städtische Raum ist somit besonders von Auswirkungen durch die globale Erwärmung betroffen. In Deutschland sind in städtischen Räumen die Auswirkungen durch Hitze am bedeutendsten. Die thermische Belastung in und um ein Gebäude hängt, neben den aktuellen Wetterverhältnissen, von den mikroklimatischen Bedingungen ab. Diese werden vom regionalen Klima, dem Effekt der städtischen Wärmeinsel, dem Grünvolumen und Anteil Versiegelter Flächen sowie der Aufheizung der umgebenden Oberflächen, wie Fassaden, beeinflusst. Die Auswirkungen der thermischen Belastung in einem Gebiet werden zudem durch die dortige Vulnerabilität der Bevölkerung beeinflusst.

Ein signifikanter Anstieg der Betroffenheit des Bauwesens durch Schäden an Gebäuden und Infrastruktur durch Sturzfluten sei jedoch erst bei einem starken Wandel des Klimas in Deutschland zu erwarten (Buth et al., 2015, S. 426–427). Aus diesem Grund konzentrieren sich die Betrachtungen hinsichtlich Klimaanpassung im Weiteren vor allem auf die Betrachtung der Hitzebelastung in städtischen Räumen.

2.2.4. Klimaanpassungsmaßnahmen

Das Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung nennt in einem Hintergrundpapier als Maßnahmen zur Anpassung von Städten an sommerliche Hitze die Schaffung von Grün- und Freiflächen

in der Stadt, das Pflanzen von Bäumen, die Verwendung heller Oberflächen für Plätze, Wege, Straßen, Fassaden und Dächer, die Verschattung von Aufenthaltsorten, die Entsiegelung von bebauten Flächen, die Schaffung von Grün- und Freiflächen am Stadtrand zur Erzeugung von Frischluft, die Reduktion aerodynamischer Hindernisse für den Luftaustausch, die Begrünung von Fassaden und Dächern sowie die Ausrichtung von Gebäudeachsen (BBSR, 2020). Des Weiteren werden in dem Hintergrundpapier als Maßnahmen gegen Sturzfluten in Städten die Entsiegelung bebauter Flächen, die dezentrale Versickerung von Regenwasser, die Schaffung von Retentionsspeichern und -räumen sowie das kontrollierte und verzögerte Ableiten von Regenwasser genannt. Ein Großteil der genannten und weitere Maßnahmen finden sich zum Beispiel im Berliner Stadtentwicklungsplan Klima (vgl. Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, 2011, S. 36, 55). In der Ergänzung des Stadtklimaplans wird der Fokus auf die beiden Leitthemen „hitzeangepasste Stadt“ und „wassersensible Stadtentwicklung“ gelegt (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt, 2016, S. 19).

Eine Studie von Li et al. (2019) kam mittels einer neuen Zuordnungs-Methode zu dem Ergebnis, dass die Fähigkeit, Wasser über Böden und Pflanzen zu verdunsten, den bedeutendsten Effekt auf die Bildung städtischer Wärmeinseln am Tag hat. Dagegen habe der aerodynamischer Widerstand, der sich auf den konvektiven Wärmeübergang von Oberflächen in die unteren Luftschichten auswirkt, einen geringeren Effekt. Da durch die Verdunstung von Wasser Energie in latente anstatt sensible Wärme übertragen wird, habe dies neben der Reduktion der Oberflächentemperatur zusätzlich einen positiven Effekt auf die bodennahe Lufttemperatur. Bei einer Verbesserung des konvektiven Übergangs werde lediglich mehr Wärme von Oberflächen in die unteren Luftschichten überführt. Li et al. (2019) empfehlen daher, zur Reduktion städtischer Wärmeinseln vermehrt Maßnahmen einzusetzen, die zu einer Entsiegelung und einem höheren Anteil grüner Infrastruktur führen.

Die Begrünung als Maßnahme der Städte gegen die Klimafolgen wird vom Bundesumweltministerium im „Grünbuch Stadtgrün“ (BMUB, 2015, S. 54–55) und im „Masterplan Stadtnatur“ (BMU, 2019b, S. 5) aufgegriffen. Dort wird auf die kühlende Wirkung von Stadtgrün durch Verdunstung und Verschattung sowie dessen Fähigkeit zur Speicherung und verzögerten Ableitung von Regenwasser hingewiesen. In New York kam eine Studie von Rosenzweig et al. (2009, S. 1306) zu dem Ergebnis, dass die Maximierung grüner Infrastruktur die effektivste Maßnahme zur Reduktion von Hitzebelastung sei.

Der Begrünung in Städten zum Schutz gegen Hitzebelastungen kommt damit als Klimaanpassungsmaßnahme eine hohe Relevanz zu.

2.3. Flächenkonflikte und Betrachtungsebenen

2.3.1. Flächenkonflikte zwischen Klimaschutz und Klimaanpassung

Als Verursacher und Betroffene der globalen Erwärmung haben Städte ein großes Potenzial zur Reduktion von THG-Emissionen als auch einen großen Bedarf zur Anpassung an Klimafolgen. Zunehmend mehr Städte erkennen die Notwendigkeit, Klimaschutz und Klimaanpassung im

Zusammenhang zueinander zu betrachten. In ihrer Studie identifizieren Grafakos et al. (2019) städtisches Grün, Siedlungswasserwirtschaft, urbane Landwirtschaft, Energiewirtschaft und Luftqualität als besonders relevante Bereiche, in denen Klimaschutz und Klimaanpassung kombiniert gedacht werden müssen. Dabei stelle die Priorisierung von Klimaschutz- und Klimaanpassungsmaßnahmen im städtischen Umfeld aufgrund der begrenzt zur Verfügung stehenden Flächen eine Herausforderung dar.

Ein beispielhafter Flächenkonflikt zwischen Klimaschutz und Klimaanpassung besteht bei der Solarenergienutzung und Begrünung in Städten. Um anderen Nutzungsansprüchen der Bodenflächen auszuweichen, bietet die Oberfläche von Gebäuden für beide Maßnahmen eine bislang weitgehend umgenutzte Fläche (Croce & Vettorato, 2020).

2.3.2. Flächenpotenziale der gebäudeintegrierten Photovoltaik

Gebäudeoberflächen bieten neben der Agrarwirtschaft laut Fraunhofer ISE (2020, S. 38–39) das größte Potenzial zur integrierten Nutzung von Solarenergie mittels Photovoltaik (PV). Gebäudeintegrierte Photovoltaik (GIPV) hat den Vorteil, dass erneuerbarer Strom in lokaler Nähe zum Bedarf produziert wird.

Als Vorteile der Fassadenflächen gegenüber Dachflächen hinsichtlich der PV nennen Redweik et al. (2013) neben deren größeren theoretischen Flächenpotenzial, insbesondere an höheren städtischen Gebäuden, deren geringere Anfälligkeit gegenüber Verschmutzungen und Schnee sowie deren bessere zeitliche Leistungsverteilung. Durch die effektivere Nutzung tieferer Sonnenstände im Winter (bei Südausrichtung) sowie in den Morgen- und Abendstunden (bei Ost- und Westausrichtung) ergebe sich eine zeitlich besser an den Bedarf angepasste Energiebereitstellung.

In einer Studie von Behnisch, Münzinger und Poglitsch (2020) wurde am Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung unter Verwendung dreidimensionaler Geodaten des Gebäudebestands das theoretische Flächenpotenzial für GIPV in Deutschland untersucht. Von insgesamt 53 Millionen Gebäuden waren die brutto Fassadenflächen mit 12,416 m^2 etwa doppelt so groß wie die Dachflächen mit 5,965 m^2. Dabei ist zu beachten, dass der verwendete Detailgrad die Gebäude als Klötzchen darstellt und nicht nutzbaren Teile der Flächen wie Fenster nicht ausgeschlossen wurden. Ausgeschlossen wurden jedoch Fassaden, die sich berührten. Das theoretisches Flächenpotenzial von Häuserfassade zur Nutzung von GIPV in Deutschland wird in Abbildung 2.2 gezeigt. Dargestellt ist die räumliche Verteilung in einem Raster als Summe der Fassadenfläche in km^2 für eine Zellgröße von 1 km $\times$ 1 km. Zu erkennen ist eine Konzentration des Flächenpotenzials auf Großstädte wie Berlin, München oder Stuttgart und Agglomerationsräume wie den Agglomerationsraum Rhein-Ruhr, das Rhein-Main-Gebiet oder das Sachsendreieck.

Auf kleinskaliger Ebene modellierten Behnisch, Münzinger und Poglitsch (2020) die direkte und diffuse solare Bestrahlung auf Grundlage eines semantischen dreidimensionalen Stadtmodells für beispielhafte Gebiete mit einem hohen Potenzial an Gebäudeoberflächen. Die Modellierung basierte auf dreidimensionalen Geodaten des Gebäudebestands, einem hochauflösendem Geländemodell sowie Daten aus amtlichen Laserscanbefliegungen. Mit diesen Daten konnte

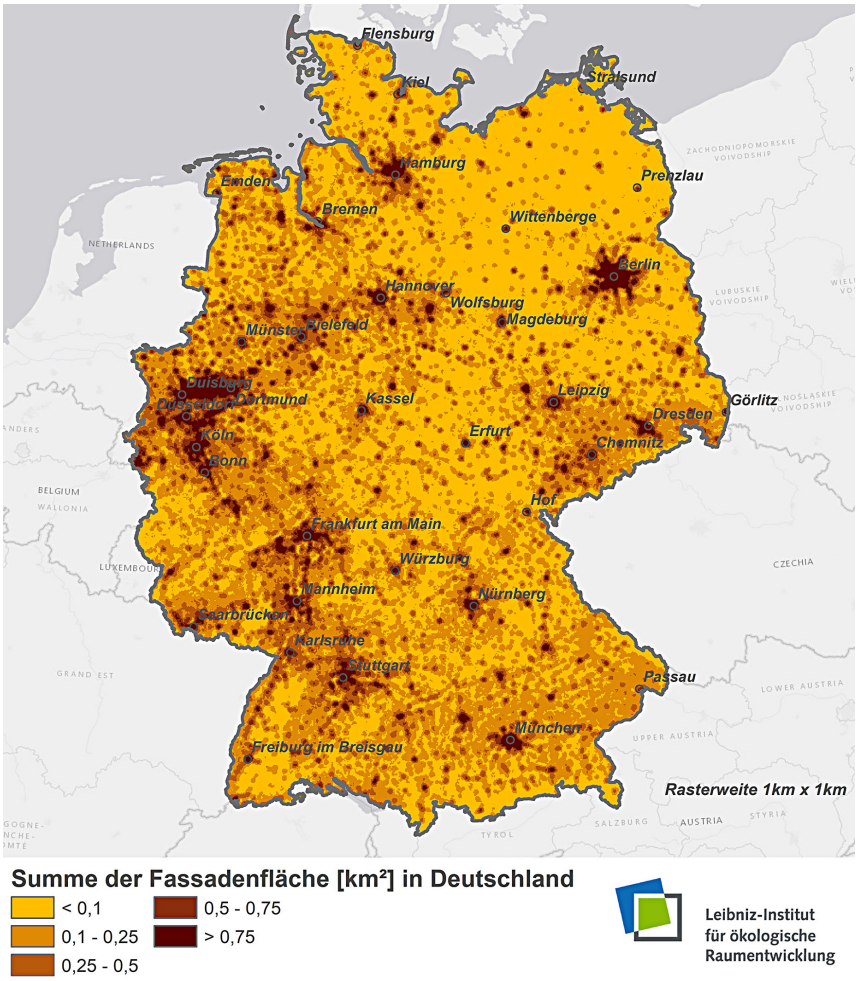


Abbildung 2.2.: *Flächenpotenziale zur Nutzung von Photovoltaik an Gebäudefassaden in Deutschland (Quelle: Behnisch, Münzinger und Poglitsch, 2020).*

die lokale Verschattung durch andere Gebäude, Bäume und das Gelände berechnet werden. Für Dresden war die flächenbezogene Einstrahlung auf Fassaden mit einer Ausrichtung von Ostsüdost bis Südwest und insbesondere für Südsüdwest am größten (Behnisch, Münzinger & Poglitsch, 2020).

Laut Poglitsch et al. (2018) haben Wohngebäude verglichen mit Nichtwohngebäuden in Deutschland insgesamt das größte Potenzial an Fassadenflächen. Aufgrund ihrer individuellen Gestaltung mit Fenstern, Türen oder Auskragungen sei dieses jedoch oft nicht technisch realisierbar. Große Gebäude wie Industriegebäude, Hallen, öffentliche Einrichtungen oder Hochhäuser seien laut Behnisch, Münzinger, Poglitsch et al. (2020) hingegen aufgrund großer zusammenhängender Flächen und eines hohen Gesamtenergieertrages besonders gut für die Verwendung von GIPV geeignet.

Aufgrund der für Fassaden im Verhältnis zu Dachflächen größeren Verschattung und schlechteren Ausnutzung hoher Sonnenstände sowie nicht nutzbarer Fassadenflächen aufgrund von Fenstern und Türen ergibt sich für das theoretische Flächenpotenzial der Fassadenflächen in Deutschland von 12,416 m^2 laut Eggers et al. (2020) jedoch nur eine potenzielle elektri-

sche Nennleistung unter Standard-Testbedingung von 400 GW verglichen mit 500 GW für die Dachflächen mit einem theoretischen Flächenpotential von 5,965 m^2.

2.3.3. Gegenüberstellung des Bedarfs an Gebäudebegrünung

Begrünungen und insbesondere Bäume werden von der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung (2011, S. 36–38) Berlin als bedeutendste Maßnahmen gegen Hitzebelastungen gesehen. In engen Straßen könnten Bäume jedoch eine zu große Verschattung verursachen oder zu einer Behinderung des Luftaustauschs führen. Zudem bieten einige enge Straßen und Höfe nicht genügend Platz, um Bäume zu pflanzen (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt, 2016, S. 36). In diesen Fällen bietet die Gebäudebegrünung eine Möglichkeit, die knappen Bodenflächen zu umgehen.

Auf der nationalen Konferenz zum Fortschrittsbericht zur DAS wurde besonders auf die Potenziale der Dach- und Fassadenflächen zur Begrünung der Städte gegen die Auswirkungen von Hitze und Starkregen hingewiesen (Hoffmann et al., 2020, S. 15–16). Dach- und Fassadenbegrünungen werden auch im Monitoringbericht zur DAS als Maßnahme zur Verringerung der Sonneneinstrahlung und Schaffung von Verdunstungskühlung genannt (UBA, 2019, S. 162–163).

Für die Begrünung wird das Flächenpotenzial der Fassaden in Innenstädten ähnlich dem Potenzial der GIPV auf das Zweifache des Gebäudegrundrisses geschätzt (Köhler, 2008, S. 426).

In Abbildung 2.3 wird die räumliche Verteilung der Hitzebelastung in Deutschland für das Jahr 2020 als durchschnittliche Anzahl heißer Tage in einem Raster von 1 km $\times$ 1 km dargestellt. Zur gleichmäßig flächigen Darstellung wurden die von den Stationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) erfassten Messwerte unter Beachtung der topografischen Höhe für jede Rasterzelle interpoliert. Stark betroffen zeigen sich die Metropolregionen Berlin/Brandenburg, Rhein-Ruhr, Frankfurt/Rhein-Main, Rhein-Neckar und Stuttgart. Die räumliche Verteilung gleicht in etwa der Verteilung im Referenzzeitraum von 1961 bis 1990 (vgl. Abbildung B.1, Anhang B, S. XIV). Dabei liegt der Flächenmittelwert der Anzahl heißer Tage für Deutschland im Jahr 2020 knapp unter dem geglätteten 30-jährigen Mittelwert, der sich zum Referenzzeitraum mehr als verdoppelt hat DWD (o. D. a). Auch die Anzahl der Tropennächte ist ähnlich verteilt, jedoch insgesamt weniger stark ausgeprägt. Die entsprechenden Karten werden im „Deutschen Klimaatlas“ vom DWD (o. D. a) bereitgestellt. Vergleicht man Abbildung 2.3 mit Abbildung 2.2 ist zu erkennen, dass sich Fassadenflächen mit einem Potenzial für Klimaschutz durch Solarstromerzeugung mit dem Bedarf an Klimaanpassung gegen Hitzebelastung durch Fassadenbegrünung in städtischen Räumen wie Berlin, Düsseldorf, Köln, Frankfurt, Mannheim oder Stuttgart überlagern und somit potenziell in einer Konkurrenz zueinander stehen. Verstärkt wird diese räumliche Überlagerung durch die Ausbildung städtischer Wärmeinseln.

Im Stadtentwicklungsplan Klima setzt sich die Berliner Senatsverwaltung für Stadtentwicklung (2011, S. 5–6) das Ziel, zur Verbesserung des Stadtklimas Fassaden dort, wo es möglich ist, zu begrünen. Gleichzeitig wird im Stadtentwicklungsplan das Ziel gesetzt, den Einsatz erneuerbarer Energien, insbesondere der Solarenergie, weiter auszubauen. Dazu solle die Priorität bei Fassaden

mit einer Ausrichtung nach Süden auf der energetischen Nutzung liegen (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt, 2016, S. 24).

Croce und Vettorato (2020) schlagen einen analytischen Rahmen zur Charakterisierung und Einteilung von Flächen und der Auswahl geeigneter Flächennutzungen vor. Dabei kommen sie zu der Empfehlung, Photovoltaik bevorzugt dort einzusetzen, wo das Solarpotenzial sowie der Bedarf an erneuerbarem Strom am größten sind. Begrünungen sollen dort zum Einsatz kommen, wo deren Wirkung abhängig vom Bedarf zur Reduzierung der Hitzebelastung am größten ist. Dabei sollen nach Croce und Vettorato (2020) bevorzugt kombinierte Nutzungen etwa aus Photovoltaik und Begrünung zum Einsatz kommen.

Für Photovoltaik-Fassaden und Fassadenbegrünung existiert somit ein relevantes Flächenpotenzial für das beide Maßnahmen potenziell im Flächenkonflikt bezüglich Klimaschutz und Klimaanpassung stehen.

2.3.4. Skaleneffekte, Synergien und Interessenkonflikte auf Quartiersebene

Das *Quartier* gerät bei der energetischen Gebäudesanierung sowie bei der Erzeugung erneuerbarer Energien vor Ort verstärkt in den Fokus, da es oft effizienter ist, Konzepte und Kooperationen für ein Quartier zu entwickeln anstatt für einzelne Gebäude (BMUB, 2017, S. 14–15). Effekte auf Quartiersebene sollen daher im Rahmen dieser Arbeit mit betrachtet werden.

Der SRU bezeichnet mit dem Quartier eine „räumliche Einheit zwischen der Gebäude- und Stadtebene“ (SRU, 2020, S. 405). Diese kann auf Basis sozialer Strukturen oder auf Basis von Bau- und Infrastrukturen abgegrenzt sein. Die genaue Abgrenzung eines Quartiers kann dabei je nach betrachteter Struktur (z.B. der Versorgung mit Strom, Wärme, Wasser oder auch Grünraum) unterschiedlich ausfallen. Oft überlagern sich jedoch mehrere Strukturen in einem Quartier, sodass eine integrierte Betrachtung sinnvoll ist (SRU, 2020, S. 405–407).

In der Betriebswirtschaftslehre wird mit *Skaleneffekten*, auch *Economies of Scale* genannt, die „Reduzierung von Durchschnittskosten eines Produktes durch die Erhöhung der Produktmenge“ (Hutzschenreuter, 2015, S. 413) bezeichnet. Dabei bezieht sich Hutzschenreuter auf die Aufteilung fixer Kosten sowie den weiteren Nutzen einmal gemachter Erfahrungen.

Mit *Synergien* bezeichnet der SRU (2020, S. 407–411) einen Mehrwert, der über die Summe des Wertes einzelner Teile hinausgeht. Beim Klimaschutz entstehen Synergien im Quartier laut SRU vor allem durch eine große Anzahl unterschiedlicher Strukturen und Akteure. Dabei können Skaleneffekte oder Verknüpfungen eine Rolle spielen. So ist eine Sanierung pro Gebäude kostengünstiger, wenn Baustoffe gesammelt beschafft werden können (Skaleneffekt). Zu Synergien durch Verknüpfungen kann es etwa bei der energetischen Vernetzung durch einen Ausgleich des Energiebedarfs über den Tag zwischen Wohn- und Arbeitsgebäuden kommen. Synergien können laut SRU ebenfalls durch die Bündelung von Bedarfen oder die Mehrfachnutzung von Flächen entstehen. Auch soziale Effekte wie Mitmacheffekte oder die gegenseitige Hilfe können im Quartier eine Rolle spielen (SRU, 2020, S. 407–411). Auf Quartiersebene ist es möglich, für die Gesamtbilanz einzelne Defizite zu kompensieren. So kann eine erschwerte energetische Sanierung denkmalgeschützter Gebäude durch eine entsprechend umfangreichere

Sanierung dafür gut geeigneter Gebäude ausgeglichen werden. Durch die stärkere Ausnutzung solcher Potenziale kann eine Bilanz auf Quartiersebene insgesamt höher ausfallen als bei der Betrachtung auf Gebäudeebene (SRU, 2020, S. 431).

Die Akteursvielfalt in den Quartieren kann laut dem SRU (2020, S. 411–415) auch zu Interessenkonflikten führen. Die oft heterogene Mischung der Eigentumsverhältnisse und Nutzung der Gebäude im dicht bebauten Stadtkern könne durch unterschiedliche Interessen die gemeinsame Umsetzung von Maßnahmen erschweren. Ein vom SRU genantes Beispiel ist das sogenannte „Mieter-Vermieter-Dilemma“, welches ausdrückt, dass Investitionen zur Energieeinsparung durch Vermietende und die dadurch herbeigeführten Kosteneinsparungen bei den Mietparteien oft nicht auf der selben Seite liegen. Der SRU nennt hier die warmmietenneutrale energetische Gebäudesanierung als einen möglichen Lösungsansatz.

Laut den statistischen Ämtern des Bundes und der Länder (2021c) waren 2011 84,4 % aller deutschen Gebäude Eigentum von Privatpersonen, 9,3 % gehörten Wohnungseigentümergemeinschaften und nur 1,8 % der Gebäude lag in Hand der Kommunen. Dabei waren 96,5 % aller Gebäude Wohngebäude (Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2021b) von denen mehr als die Hälfte zu Wohnzwecken vermietet wurde (Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2021d). Je nach Besitz- und Nutzungsverhältnis können bei der Entscheidung für oder gegen eine Sanierung unterschiedliche Faktoren eine Rolle spielen. Vor allem für professionell Vermietende sind finanzielle Faktoren relevanter, während bei Selbstnutzenden und Vermietenden in kleinem Maßstab auch nicht-ökonomische Faktoren wie die Einstellung gegenüber Klimaschutz oder der Kenntnisstand entscheidend sein können (Weiß et al., 2018, S. 12–21).

Klimaanpassungsmaßnahmen können sich auf Ebene der Stadt (Stadtklima) sowie auf Gebäude- und Quartiersebene (Mikroklima) auswirken, wobei sich die Ebenen gegenseitig beeinflussen (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, 2011, S. 36). Maßnahmen wie klimawirksame Freiflächen und Kaltluftschneisen könnten sich direkt auf das Stadtklima auswirken, während sehr lokale Maßnahmen wie Dach- und Fassadenbegrünungen sich primär auf das Mikroklima auswirken würden. Werden lokale Maßnahmen jedoch in großem Maße umgesetzt, könnten sie laut der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung auch auf höheren Ebenen eine Wirkung zeigen. Das so verbesserte Stadt- oder Mikroklima könne sich dann wiederum positiv auf die Umgebung und das Innenraumklima einzelner Gebäude auswirken.

Durch Skaleneffekte und Verknüpfungen kann es auf der Quartiersebene somit zu positiven Synergieeffekten hinsichtlich Klimaschutz- und Klimaanpassungsmaßnahmen kommen. Aufgrund unterschiedlicher Interessen sowie einer ungleichen Verteilung von Kosten und Nutzen, auch hinsichtlich der unterschiedlichen Wirkungsebenen der Maßnahmen, kann es jedoch auch zu Interessenkonflikten kommen.

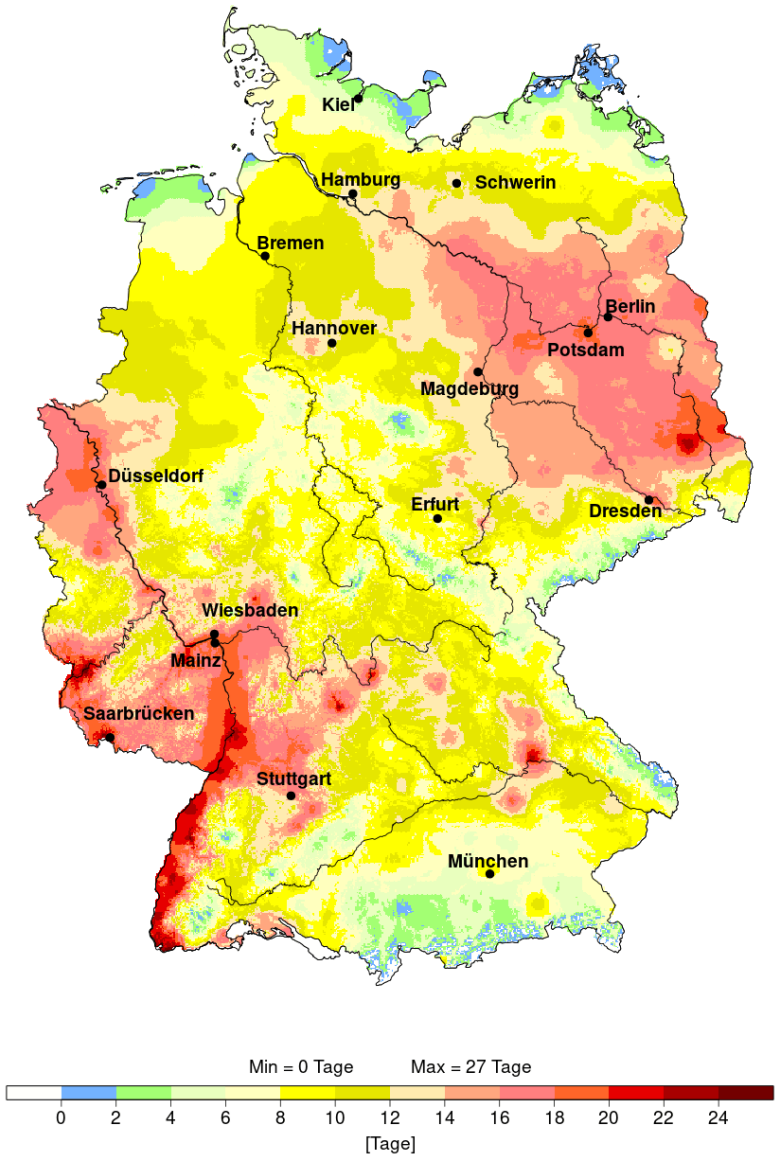


Abbildung 2.3.: *Anzahl heißer Tage mit einem Tagesmaximum der Lufttemperatur über* 30 °C *in Deutschland 2020 (Quelle: DWD, o. D. a).*

3. Wirkungspotenziale der betrachteten Maßnahmen

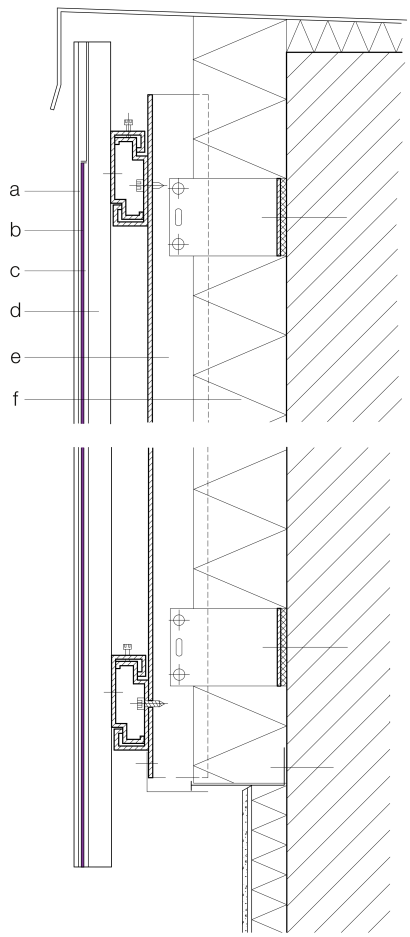
3.1. Photovoltaik-Fassade

3.1.1. Photovoltaik-Fassadenkonstruktionen

Die Konstruktionsarten von Photovoltaik-Fassade (PVF) können nach Art der Anbringung unterschieden werden, wie im Folgenden nach Henemann (2008) beschrieben: Werden PV-Module in die Gebäudeoberfläche (Dächer oder Fassaden) integriert und übernehmen zum Teil deren Funktion, spricht man von *gebäudeintegrierter Photovoltaik*, kurz *GIPV*. Gebräuchlich ist auch die englische Abkürzung *BIPV* für *building integrated photovoltaics*. Die integrierten PV-Module ersetzen in diesem Fall andere Baumaterialien. Dem gegenüber steht die herkömmliche Anbringung der PV-Module an Fassaden oder Dächern, wie die Aufdach-Montage, ohne dass diese Funktionen der Gebäudeoberfläche übernehmen, im Englischen existiert hierfür der Begriff *building applied photovoltaics*, kurz *BAPV*.

Mögliche PV-Fassadenkonstruktionen werden im Folgenden auf Basis des praxisorientierten Leitfadens *Photovoltaik: Technik - Gestaltung - Konstruktion* von Weller et al. (2009, S. 62–65) beschrieben: Bei der Verwendung von PV zur aktiven Energiegewinnung an Gebäudefassaden wird nach der Bauweise in vorgehängte hinterlüftete Fassaden und Pfosten-Riegel-Fassaden unterschieden. Bei einer *vorgehängten hinterlüfteten Fassade*, kurz *VH-Fassade*, ist die Außenbekleidung durch eine Luftschicht von der tragenden Außenwand und der Wärmedämmschicht getrennt. Die Außenbekleidung dient dem Witterungsschutz und der optischen Gestaltung und wird über eine Unterkonstruktion an der Außenwand angebracht. Abbildung 3.1 zeigt beispielhaft den vertikalen Schnitt einer PV-VH-Fassade. Dabei handelt es sich um eine Konstruktion, bei der die Befestigung von außen nicht sichtbar ist. Eine VH-Fassade ist gut für die Verwendung von PV-Modulen geeignet, da die Hinterlüftung für eine Kühlung der Module sorgt. Abgestimmte Komplettsysteme für PV-VH-Fassaden mit bauaufsichtlicher Zulassung sind auf dem Markt erhältlich. Bei *Pfosten-Riegel-Fassaden* werden alle Funktionen des Raumabschlusses in einer Schicht kombiniert. Sie bestehen aus vertikalen Pfosten, die den Hauptlastabtrag übernehmen, und horizontalen Riegeln, welche die Last der Füllelemente auf die Pfosten übertragen. Die PV-Module können hier in die Füllelemente integriert werden. Auch für PV-Pfosten-Riegel-Fassaden haben sich bereits Bausysteme bewährt. Pfosten-Riegel-Fassaden werden bevorzugt vor opaken Bereichen eingesetzt, können aber auch mit teiltransparenten PV-Modulen im Bereich von Oberlichtern eingesetzt werden. Weitere mögliche Bauweisen sind Doppelfassaden oder Elementfassaden, für die jedoch weniger Beispiele der GIPV existieren.

Eine weitere Möglichkeit, PV an Gebäudefassaden zu integrieren, ist die Verwendung in Sonnenschutzsystemen, wie nach Weller et al. (2009, S. 66–69) im Folgenden beschrieben:



a Deckglas
b Photovoltaikzelle
c Substratglas
d Trägerplatte
e T-Profil
f Wärmedämmung

Abbildung 3.1.: *Vertikaler Schnitt einer vorgehängten hinterlüfteten Photovoltaik-Fassade. (Quelle: Weller et al., 2009, S. 64).*

Als Schutz gegen Hitze und Blendung durch Sonneneinstrahlung in Gebäuden werden insbesondere vor transparenten Bereichen außenliegende Verschattungselemente angebracht, die nach der vorherrschenden Richtung der Sonneneinstrahlung orientiert sind. Meist handelt es sich dabei um horizontale Lamellen vor Fensteröffnungen, es werden aber auch andere Formen des Sonnenschutzes verwendet. Aufgrund ihrer Ausrichtung und Hinterlüftung eignen sich Verschattungselemente gut für die Verwendung von PV-Modulen. Durch die Verwendung teiltransparenter Module kann ein gewünschter Anteil an Licht durchgelassen werden. Eine Nachführung der Elemente am Sonnenstand kann die Verschattungswirkung und den Energieertrag erhöhen, führt aber auch zu höheren Kosten für Herstellung, Installation und Wartung. Vorgefertigte Sonnenschutzsysteme mit PV-Modulen sind auf dem Markt erhältlich.

Weiter kann nach der verwendeten Zelltechnologie und Form beziehungsweise Anwendungsart der GIPV unterschieden werden. Es werden Zellen auf Basis von kristallinem Silizium sowie Dünnschicht-Module aus amorphem Silizium, Cadmiumtellurid oder auf der Basis von Kupfer, Indium, Gallium und Selen verwenden (Petter Jelle et al., 2012). Daraus ergeben sich Produkte in Form von Modulen, Folien, Verglasungen (in unterschiedlichen Transparenzgraden und Färbungen) oder Dachziegeln. Eine Transparenz der Module wird erreicht, indem bei kristallinen Zellen aus Silizium Abstände zwischen den Zellen gelassen werden und auch die Rückseite des Moduls aus Glas besteht (Weller et al., 2009, S. 46). Bei Dünnschicht Modulen können mit Lasern kleine Löcher in die Schicht geschnitten werden, wodurch sich eine gleichmäßigere Lichtdurchlässigkeit ergibt. Dadurch ist auch eine Nutzung in oder vor Fenstern möglich (Chae et al., 2014). Es ergibt sich somit ein großer gestalterischer Spielraum zur Integration der PV in die Gebäudehülle. Ein Beispiel für die Gestaltung einer PVF wird in Abbildung 3.2 gezeigt. Zu sehen ist eine Fassade aus individuell gestalteten grün gefärbten polykristallinen Silizium-Modulen an einem Gebäude in Paris.

Wird die Hinterlüftung der Module aktiv betrieben und die erwärmte Luft zur Beheizung der Innenräume im Winter genutzt, spricht man von *building integrated photovoltaics-thermal systems*, kurz *BIPVT* (Biyik et al., 2017). Als Wärmeübertragungsmedium können auch Flüssigkeiten oder Latentwärmespeicher (vgl. hierzu auch Horn, 2017, S. 260) verwendet werden (Lai & Hokoi, 2015). Dadurch könne auch die Hitzeaufnahme der Gebäude reguliert werden, sodass sich diese im Sommer weniger stark erhitzen.

3.1.2. Funktionsprinzip der Photovoltaik

Die folgenden Abschnitte 3.1.2, 3.1.3 sowie 3.1.4 beschreiben im Wesentlichen bereits in der Praxis genutztes Wissen und basieren daher größtenteils auf dem Standardwerk *Regenerative Energiesysteme: Technologie - Berechnung - Klimaschutz* von Quaschning (2019).

Die erste Photovoltaik-Zelle wurde 1954 gebaut, die weitere Entwicklung wird im Folgenden nach Quaschning (2019, S. 188–189) dargestellt: Das Wort *Photovoltaik* ist zusammengesetzt aus den Wörtern Photo für Licht und Volta für die elektrische Spannung und bezeichnet die *direkte Umwandlung von Sonnenlicht in Elektrizität*. Erste Anwendung fand die Photovoltaik (PV) in der Raumfahrt. Seit 1990 wird die PV in größerem Maßstab zur Stromerzeugung für die

Abbildung 3.2.: *Photovoltaik-Fassade aus polykristallinen Silizium-Modulen an einem Gebäude in Paris (Quelle: Heinstein et al., 2013, S. 151).*

öffentliche Energieversorgung eingesetzt. Die Förderung durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz führte in Deutschland ab dem Jahr 2000 zu einem großen Wachstum des PV-Marktes. Die PV unterliegt einer stetigen Weiterentwicklung und Senkung der Produktionskosten.

Das Funktionsprinzip der PV beruht auf dem *inneren Photoeffekt* und wird nach Quaschning (2019, S. 190–197) wie folgt beschrieben: Elektronen können bei Eintreffen von als *Photonen* bezeichneten Lichtteilchen einer bestimmten Energie in einen energetisch höheren Zustand angehoben werden. Sogenannte *Halbleiter* wie Silizium können durch diese Anhebung der Elektronen von einem elektrisch nicht leitenden in einen elektrisch leitenden Zustand überführt werden. Die Elektronen werden hier nach dem Bändermodell vom *Valenzband* in das *Leitungsband* angehoben. Dabei muss die Energie des Photons, welche von der Wellenlänge des Lichts abhängt, mindestens dem *Bandabstand* zwischen Valenzband und Leitungsband entsprechen. Dieser ist abhängig vom betrachteten Material. Durch unterschiedliche *Dotierung* des Halbleiters mit Elementen aus umgebenden Gruppen des Periodensystems der Elemente

wird eine elektrische Spannung über den Halbleiter erzeugt. Diese *Diffusionsspannung* sorgt dafür, dass die angehobenen Elektronen sowie die dadurch entstandenen positiv geladenen „Elektronenlöcher“ getrennt werden. Die getrennten Ladungen können dann über einen elektrischen Verbraucher wieder kombiniert werden, es fließt ein *elektrischer Strom*.

Je nach Herstellungsverfahren unterscheidet man in Photovoltaik-Zellen, beziehungsweise *Solarzellen*, aus polykristallinem, monokristallinen und amorphen Silizium[1]. Deren Eigenschaften sowie die Zusammenfassung mehrerer Solarzellen zu einem Modul werden im Folgenden kurz nach Quaschning (2019, S. 200–207) beschreiben: *Polykristalline* Solarzellen weisen aufgrund unterschiedlich ausgerichteter Kristalle sogenannte Korngrenzen auf, welche zu energetischen Verlusten führen. Diese Verluste lassen sich durch die aufwändigere Herstellung *monokristalliner* Zellen vermeiden. Solarzellen aus *amorphem* Silizium können in wesentlich dünneren Schichten hergestellt werden. Module aus amorphem Silizium werden daher auch als *Dünnschichtmodule* bezeichnet. Durch die Materialeinsparung sind diese Zellen günstiger herzustellen, sie weisen jedoch deutlich geringere Wirkungsgrade auf. Eine Übersicht über typische Modulwirkungsgrade der Zelltypen ist in Tabelle 3.1 auf Seite 26 gegeben.

Eine Solarzelle bezeichnet laut Quaschning das elektrische Bauelement aus den dotierten Siliziumschichten, Rückseiten- und Frontkontakten sowie einer Antireflexionsschicht, welche auch die Farbe der Zelle bestimmt. Mehrere Zellen werden in Reihe geschaltet zu einem *Modul* kombiniert. Dabei werden die Zellen zum Schutz vor äußeren Einwirkungen mit einer Kunststoffschicht überzogen, mit Glas abgedeckt in einen Rahmen gesetzt. Die Module haben, resultierend aus Montageaufwand und Handhabbarkeit, meist eine Fläche von etwa 1,6 m^2. Für ein optimales Verhältnis von Spannung und Strom werden in den Modulen meist 60 Zellen in Reihe geschaltet.

Die elektrische Leistung eines PV-Moduls ergibt sich als Produkt aus deren Spannung und Strom im Betrieb (Quaschning, 2019, S. 217–218). Dabei ergibt sich abhängig von den Betriebsbedingungen eine bestimmte Betriebsspannung, bei der eine maximale Leistung erbracht werden kann. Diese Spannung wird auch als *Punkt maximaler Leistung* bezeichnet.

Beim Betrieb mehrerer PV-Module in einer PV-Anlage kommt es zu weiteren Verlusten durch Modulerwärmung, Verschattung, Verschmutzung, Reflexionen oder elektrische Bauteilen wie Leitungen, Dioden oder Wechselrichter (Quaschning, 2019, S. 276–277). Diese Verluste werden durch die *Performance Ratio* zusammengefasst, die sich aus dem Verhältnis des realen zum idealen Energieertrag ergibt. Die Performance Ratio liegt laut Quaschning für durchschnittliche PV-Anlagen bei 75 %. Für einen Vergleich der Standortbedingungen ähnlicher PV-Anlage wird laut Quaschning der spezifische Ertrag verwendet. Dieser gibt das Verhältnis des realen Ertrags zur Nennleistung der Anlage an und entspricht den Volllaststunden.

Für die Nutzung des erzeugten Strom bestehen nach entsprechender Aufbereitung prinzipiell mehrere Möglichkeit. Neben dem direkten Verbrauch vor Ort kann der Strom zum Beispiel in das Öffentliche Netz eingespeist oder in Batterien gespeichert werden (Quaschning, 2019, S. 282–283). Auf die elektrischen Eigenschaften von PV-Zellen, -Modulen und -Anlagen sowie

[1] Es sind auch Solarzellen aus anderen Halbleitermaterialien möglich, Silizium wird jedoch am häufigsten verwendet.

Speicherung und Netzeinspeisung der gewonnen elektrischen Energie soll an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden. Für die weiteren Betrachtungen ist jedoch die Leistungsabhängigkeit von der Bestrahlungsstärke, der Temperatur sowie von Verschattungseffekten relevant, die in den folgenden Abschnitten betrachtet wird.

3.1.3. Temperaturabhängigkeit

Zur besseren Vergleichbarkeit von Solarmodulen wird deren maximale Leistung unter *Standardtestbedingungen (STC)* angegeben. STC steht für die englische Bezeichnung *Standard Test Conditions*. Diese sind durch eine Bestrahlungsstärke von $1000\,\mathrm{W\,m^{-2}}$, eine Modultemperatur von $25\,^{\circ}\mathrm{C}$ sowie eine spektrale Zusammensetzung der Bestrahlung von AM1,5g[2] definiert (Quaschning, 2019, S. 218–219). Der *elektrische Wirkungsgrad* einer Solarzelle ergibt sich laut Quaschning aus deren erbrachter Leistung pro Bestrahlungsstärke und Solarzellenfläche und wird meist für STC angegeben. Für Module liege der Wirkungsgrad aufgrund der Zellzwischenräume und des Modulrahmens unter den Wirkungsgraden der entsprechenden Zellen. Tabelle 3.1 gibt die maximalen Modulwirkungsgrade für in Serie produzierte PV-Module aus monokristallinem, polykristallinem und amorphem Silizium an.

Tabelle 3.1.: *Maximale Wirkungsgrade und typische Temperaturkoeffizienten für Photovoltaik-Module mit häufig verwendeten Zelltypen (Quelle: In Anlehnung an Quaschning, 2019, S. 219, 221).*

Zelltyp	Modulwirkungsgrad	Einheit	Temperaturkoeffizient	Einheit
Monokristallines Silizium	21,5	%	−0,32 bis −0,51	$\%\,\mathrm{K^{-1}}$
Polykristallines Silizium	17,4	%	−0,32 bis −0,51	$\%\,\mathrm{K^{-1}}$
Amorphes Silizium	7,4	%	−0,18 bis −0,23	$\%\,\mathrm{K^{-1}}$

Mit steigender Modultemperatur[3] sinkt die Leistung einer Solarzelle wie nach Quaschning (2019, S. 221–222) im Folgenden erläutert: Die Temperaturabhängigkeit der Leistung unterscheidet sich unter den verschiedenen Zelltechnologien. Sie wird mit einem Temperaturkoeffizienten in $\%\,\mathrm{K^{-1}}$ als Leistungsveränderung proportional zur Temperaturabweichung von den STC ausgedrückt. Negative Werte stehen für eine Abnahme der Leistung bei höheren Temperaturen. Beträgt der Temperaturkoeffizient eines PV-Moduls zum Beispiel $-0{,}4\,\%\,\mathrm{K^{-1}}$, so führt eine Erhöhung der Modultemperatur um 45 K über STC auf 70 °C zu einer Leistungsabnahme um 18 %. Typische Temperaturkoeffizienten für PV-Module aus monokristallinem, polykristallinem und amorphem Silizium sind in Tabelle 3.1 angegeben. Zu erkennen ist, dass Zellen aus amorphem Silizium einen deutlich geringen Wirkungsgrad, aber auch einen niedrigeren Temperaturkoeffizienten aufweisen.

[2] AM1,5g bezeichnet die spektrale Zusammensetzung der globalen Bestrahlung, die sich bei einem Verhältnis von 1,5 der zurückgelegten Weglänge durch die Erdatmosphäre zur kürzest möglichen Weglänge bei senkrechtem Einfall ergibt. AM steht für Air Mass. Ein Verhältnis von 1,5 ergibt sich in etwa bei einem Einfallswinkel bezogen auf die Senkrechte von 48°.

[3] Es soll an dieser Stelle näherungsweise angenommen werden, dass die Temperatur der PV-Zelle der Temperatur des Moduls entspricht.

Die Modultemperatur kann laut Quaschning näherungsweise über die Umgebungstemperatur und die Bestrahlungsstärke abgeschätzt werden wie in Gleichung 3.1 dargestellt.

$$\text{Modultemperatur} = \text{Umgebungstemperatur} + c \cdot \frac{\text{Bestrahlungsstärke}}{\text{Bestrahlungsstärke unter STC}} \tag{3.1}$$

Somit verhält sich die Differenz zwischen Modultemperatur und Umgebungstemperatur proportional zur Bestrahlungsstärke. Die Proportionalitätskonstante c ist abhängig von der Einbauvariante des PV-Moduls und wird in °C angegeben. Für eine freie Aufständerung des Moduls beträgt c 22 °C, für ein fassadenintegriertes Modul mit guter Hinterlüftung 35 °C, für ein fassadenintegriertes Modul mit schlechter Hinterlüftung 39 °C und für ein fassadenintegriertes Modul ohne Hinterlüftung 55 °C (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, 2008, zitiert nach Quaschning, 2019, S. 222). Die reale Modultemperatur ist laut Quaschning weiterhin abhängig von den Windverhältnissen sowie dem Wirkungsgrad der PV-Zelle, da der nicht genutzte Strahlungsanteil in Wärme umgewandelt wird.

Der Einfluss von Bestrahlungsstärke und Hinterlüftung auf die Modultemperatur von PVF wurde von Horn (2017, S. 165) experimentell untersucht. Die Temperaturdifferenz zur Umgebungstemperatur verhielt sich ebenfalls proportional zur Bestrahlungsstärke, wobei sich die Module einer PVF in Pfosten-Riegel-Konstruktion ohne Hinterlüftung schneller aufheizten, als die einer vorgehängten PVF mit Hinterlüftung. Bei fehlender Hinterlüftung können laut Horn (2017, S. 159) Modultemperaturen von mehr als 70 °C erreicht werden, die untersuchte PVF mit Hinterlüftung erreichte maximale Modultemperaturen zwischen 65 °C und 70 °C. Dies führte laut Horn im Vergleich zwischen den betrachteten PVF mit und ohne Hinterlüftung tagsüber zu einem Unterschied des Jahresdurchschnitts der Modultemperaturen von 4 K bis 9 K. Decker et al. (1997) weisen darauf hin, dass es durch den Kamineffekt bei höheren PVF zu höheren Modultemperaturen der oberen Module im Vergleich zu weiter unten liegenden Modulen kommen kann.

Haselhuhn (2010, S. 6–11) fasst den Temperatureinfluss auf die Leistung von PV-Modulen abhängig von geografischer Lage, Jahreszeit und Aufstellungsart in einem Faktor zusammen. So reduziere sich zum Beispiel für ein im Dach integriertes PV-Modul ohne Hinterlüftung im Sommer in Berlin die Leistung um 10 %.

Alternativ kann die Modultemperatur über die *nominelle Zellbetriebstemperatur* eines PV-Moduls abgeschätzt werden. Diese wird für eine Bestrahlungsstärke von 800 W m^{-2}, eine Umgebungstemperatur von 20 °C sowie eine Windgeschwindigkeit von 1 m s^{-1} angegeben und liegt für Module aus kristallinem Silizium in einem Bereich von 45 °C bis 50 °C (Mertens, 2020, S. 173–174). Bei dieser Variante wird ebenfalls angenommen, dass die Erhöhung der Modultemperatur gegenüber der Umgebungstemperatur proportional mit der Bestrahlungsstärke ansteigt.

3.1.4. Bestimmung der Bestrahlungsstärke

Die Abhängigkeit der Leistung von der Bestrahlungsstärke kann näherungsweise als proportional betrachtet werden (Quaschning, 2019, S. 218). Zur Beschreibung eines Standortes für eine

PV-Anlage ist die im Folgenden nach Quaschning (2019, S. 73–79) beschriebene *Globalstrahlung* entscheidend: Die Bestrahlungsstärke an der Erdoberfläche wird durch Absorption, Streuung und Reflektion durch Gase, Moleküle, Partikel und Witterungseinflüsse etwa durch Wolken, Niederschlag oder Nebel beeinflusst. Integriert man die Bestrahlungsstärke über die Zeit ergibt sich die Bestrahlung für den entsprechenden Zeitraum. Die Summe aus direkter und diffuser Bestrahlung wird als Globalstrahlung bezeichnet und für eine horizontale Fläche angegeben. Über die Daten von Wettersatelliten lässt sich die Globalstrahlung flächendeckend auch für zurückliegende Zeiträume bestimmen (Quaschning, 2019, S. 103). Für einen beliebigen Ort in Deutschland kann die durchschnittliche Jahressumme der Globalstrahlung in Abbildung B.2 auf Seite XV in Anhang B abgelesen werden. Dargestellt ist dort die räumliche Verteilung der mittleren Jahressummen der Globalstrahlung für den Zeitraum von 1981 bis 2010. Zu erkennen ist ein Süd-Nord-Gefälle mit (von lokal begrenzten extremen Bedingungen abgesehen) einer maximalen jährlichen Globalstrahlung von etwa $1200\,\mathrm{kWh\,m^{-2}}$ im Süd-Osten und einer minimalen jährlichen Globalstrahlung von etwa $960\,\mathrm{kWh\,m^{-2}}$ im Nord-Westen und. Der Mittelwert für ganz Deutschland beträgt $1054\,\mathrm{kWh\,m^{-2}}$ im Jahr.

Auf eine geneigte Ebene fällt zusätzlich ein Bestrahlungsanteil aus Reflektionen, der von den Albedowerten der umgebenden Oberflächen abhängt (Quaschning, 2019, S. 88). Die Berechnung der gesamten Bestrahlung auf eine geneigte (Elevation) Fläche einer bestimmten Ausrichtung nach der Himmelsrichtung (Azimut) an einem bestimmten geografischen Ort muss auf Basis stündlicher Werte der Bestrahlungsstärke für diesen Ort durchgeführt werden (Quaschning, 2019, S. 92). Aus Abbildung 3.3 kann im Verhältnis zur Globalstrahlung auf eine horizontale Fläche für den Standort Berlin die jährliche solare Bestrahlung auf eine Fläche abhängig von ihrer Neigung und Ausrichtung abgelesen werden.

Da sich mit der geografischen Position die Sonnenbahn und das Verhältnis zwischen direkter und diffuser Strahlung ändern, wirkt sich eine veränderte Neigung und Ausrichtung der Solarmodule je nach geografischer Position unterschiedlich auf die Bestrahlung aus (Quaschning, 2019, S. 80–87). Für genaue Ertragsprognosen werden meist Simulationsprogramme verwendet (Quaschning, 2019, S. 57). Näherungsweise können die Werte aus Abbildung 3.3 jedoch als konstant für ganz Deutschland angenommen werden (vgl. Quaschning, 2019, S. 91).

Sollen bei der Berechnung der Bestrahlung Verluste durch Verschattungen berücksichtigt werden, bedarf es der geometrischen Daten aller umgebenden Objekte (Quaschning, 2019, S. 92–96). Soll bei der Verschattung auch die diffuse Strahlung berücksichtigt werden, bedürfe es bei einer anisotropen Strahlungsverteilung numerischer Verfahren.

Wie nach Quaschning (2019, S. 225–227) im Folgenden dargestellt, können Leistungsverluste durch Verschattungen über das Verhältnis zur verschatteten Modulfläche hinausgehen: Die Verschattung einzelner in Reihe geschalteter PV-Zellen kann diese „blockieren“, sodass die Zellen als Verbraucher betrieben werden. Dadurch kann sich die Leistung des gesamten Moduls drastisch reduzieren. Die verschatteten Zellen können sich stark aufheizen und im Extremfall zerstört werden. Um dem vorzubeugen, werden *Bypassdioden* über meist 18 bis 24 in Reihe geschalteter Zellen antiparallel geschaltet. Diese leiten im Fall einer Verschattung den Strom am Abschnitt mit den verschatteten Zelle vorbei. Da es bislang zu aufwändig ist, eine Bypassdiode für

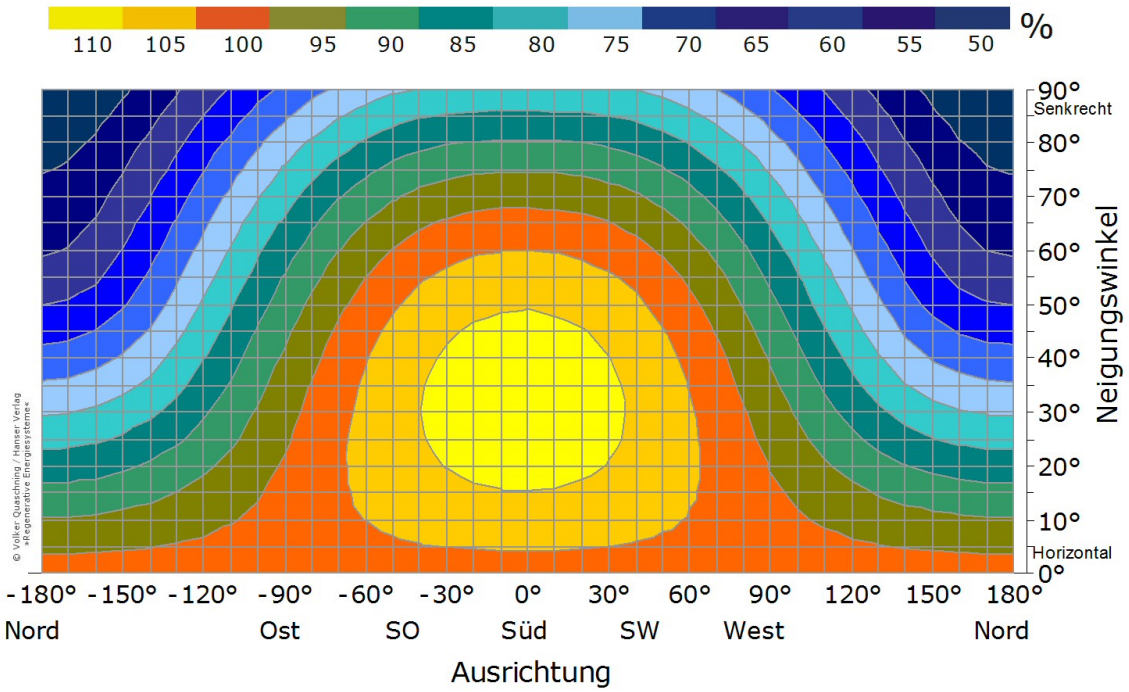


Abbildung 3.3.: *Jährliche solare Bestrahlung auf eine Fläche bestimmter Neigung und Ausrichtung im Verhältnis zur Globalstrahlung auf eine horizontale Fläche in Berlin (Quelle: Quaschning, 2019, S. 91).*

jede Zelle zu integrieren, führt eine *Teilabschattung* weiterhin zu deutlichen Leistungsverlusten. Die Verluste durch Verschattungen sind laut Mertens (2020, S. 59) insbesondere für PV-Systeme an Fassaden relevant. Treten Verschattungen an Fassaden auf, könnten Dünnschichtmodule auf Basis amorphen Siliziums laut Weller et al. (2009) aufgrund ihrer geringeren Anfälligkeit gegenüber Verschattungen eine gute Alternative zu Modulen aus kristallinem Silizium sein. Zudem reagieren dieser weniger stark auf Temperaturveränderungen (siehe Tabelle 3.1 auf Seite 26).

3.1.5. Wirkungspotenzial Klimaschutz

Die folgende überschlägige Rechnung soll eine grobe Einordnung des Wirkungspotenzials bezüglich Klimaschutz von PVF ermöglichen. Angenommen wird eine PV-Anlage mit einer Modulfläche von 100 m^2, einer Ausrichtung zu 50 % nach Süden und jeweils 25 % nach Osten und Westen, einer Neigung von 90°, einem Modulwirkungsgrad von 20 % sowie einer Performance Ratio von 80 %, welche bereits Einflüsse durch Temperatur und Abschattungen berücksichtigt. Weiterhin wird die mittlere jährliche Globalstrahlung für Deutschland von 1054 kWh m^{-2} (vgl. Abbildung B.2) angenommen. Durch die Ausrichtung und Neigung ergibt sich eine jährliche solare Bestrahlung von 75 % (Mittelwert aus einer reinen Süd- und einer reinen Ostausrichtung bei 90° Neigung, vgl. Abbildung 3.3 aus Abschnitt 3.1.4) der Globalstrahlung auf horizontaler Ebene. Insgesamt ergibt sich daraus ein jährlicher Stromertrag von 1054 kWh m^{-2} · 75 % · 100 m^2 · 20 % · 80 % = 12 648 kWh (vgl. hierzu auch Quaschning, 2019, S. 276). Laut AGEE-Stat (2021, S. 18) betrugen die durch den Einsatz von PV-Anlagen vermiedenen netto THG-Emissionen im Jahr 2020 in Deutschland 34,9 Mio t CO_2-eq. Bezogen auf die gesamte Stromerzeugung

aus PV-Anlagen von 50,6 Mrd. kWh im selben Jahr sind das 689,7 g kWh^{-1} vermiedene CO_2-eq. Angewandt auf das vorige Beispiel könnten durch die 100 m^2 PVF 8,72 t CO_2-eq im Jahr vermieden werden. Dies entspräche 75,1 % der jährlichen pro Kopf THG-Emissionen in Deutschland von 11,61 t CO_2-eq (BMU, 2020a, S. 54).

Neben den potenziellen Energieerträgen sollte für PVF laut Horn (2017, S. 262) auch deren Deckungsgrad bezüglich des zeitlichen Energiebedarfs betrachtet werden. Dieser läge für PV-Anlagen an Fassaden über dem an Dächern und führe durch einen höheren Eigennutzungsgrad zu einem geringeren Speicher- und Transportbedarf des Stroms, was sich positiv auf die Energiewende auswirke.

3.1.6. Wirkungsebenen und weitere Wirkungspotenziale

Bei der Betrachtung von PVF auf Quartiersebene weist Horn (2017, S. 263) darauf hin, dass insbesondere durch deren stark unterschiedliche Ausrichtung ein Ausgleich der Stromproduktion über mehrere Anlagen und Gebäude zu einer besseren Anpassung an den zeitlichen Bedarf der Eigennutzung führen kann. Zudem konnte von Horn (2017, S. 244–245) für eine PVF mit Südausrichtung eine gleichmäßigere Verteilung der Erträge über die Jahreszeiten durch die bessere Ausnutzung tieferer Sonnenstände im Winter verglichen mit einer PV-Dachanlage experimentell nachgewiesen werden. Eine dezentrale und diverse Energieversorgung ist zudem weniger anfällig für Extremwetterereignisse und kann somit auch in kleinem Rahmen zur Klimaanpassung beitragen (UBA, 2019, S. 176–177)

Durch eine Kombination von GIPV-Systemen mit einer thermischen Nutzung, wie in Abschnitt 3.1.1 beschrieben, kann zusätzlich Wärmeenergie bereitgestellt und somit die Fläche effizienter genutzt sowie ein ökonomische Vorteil erzielt werden. Laut Debbarma et al. (2017) können so Effizienzwerte der Wärmenutzung von 55 % erreicht werden.

Die Integration der PV in die Gebäudehülle bietet eine Vielfalt an Gestaltungsmöglichkeiten (Weller et al., 2009, S. 41–43). Durch eine Abweichung von standardisierten PV-Modulen könne es zu höheren Kosten bei geringeren Energieerträgen kommen. Diese müssen laut Weller et al. zur Substitution anderer Baumaterialien der Fassadenverkleidung sowie zu optischen Gestaltungskriterien ins Verhältnis gesetzt werden. Weitere Vorteile, die im Zusammenhang mit GIPV genannt werden, umfassen Witterungsschutz, Regulierung des Lichteinfalls, Sichtschutz, Schallschutz, elektromagnetische Abschirmung sowie die Repräsentation des Gebäudes. (vgl. Weller et al., 2009, S. 49; Decker et al., 1997; Heinstein et al., 2013; Debbarma et al., 2017).

3.1.7. Forschungsstand und Ausblick

Nach einem Review von Biyik et al. (2017) kann der Forschungsstand zu GIPV wie folgt zusammenfasst werden: Es existiert eine breite Basis theoretischer und experimenteller Studien zur Energiegewinnung durch GIPV. Dabei basieren die untersuchten Systeme größtenteils auf Silizium. In den betrachteten Studien wurden häufig Verluste bei hohen Temperaturen festgestellt. Daher untersuchten viele experimentelle Studien Möglichkeiten zur Kühlung der Module. Dies kann durch die Ableitung der Wärme über die Modulrückseite mittels Konvektion

von Luft oder Flüssigkeiten, anderen Hinterlüftungskonzepten, aktiver Hinterlüftung oder der Verwendung von Latentwärmespeichern erfolgen. Die GIPV stelle noch einen kleinen Marktanteil im PV-Sektor dar, biete jedoch großes Potenzial mit Blick auf die zur Umsetzung der Energiewende benötigten Gebäudesanierungen. Hierfür sei die Entwicklung umfassender Konzepte multifunktionaler GIPV-Lösungen unter Betrachtung wirtschaftlicher, gestalterischer, technischer und struktureller Anforderungen notwendig.

Laut Debbarma et al. (2017) sind bereits viele Produkte im Bereich der GIPV auf dem Markt. Durch die Kombination der PV mit einer thermischen Nutzung sehen Debbarma et al. ein großes Potenzial im Bereich der Passivhäuser sowie Null- und Plusenergiehäuser. Es bestehe jedoch noch ein Forschungsbedarf zu Simulationen des energetischen Verhaltens der Systeme. Zur doppelten Funktion der Heizung und Kühlung durch *building integrated photovoltaics-thermal systems* existieren laut Lai und Hokoi (2015) nur wenige Studien.

Zukünftige Entwicklungen werden in der Kostenreduktion und Effizienzsteigerung bestehender Zelltypen sowie in der Entwicklung neuer Zelltypen wie organischen PV-Zellen oder Dünnschicht-Laminaten und Farben zum Aufsprühen gesehen (vgl. Lai & Hokoi, 2015; Shukla et al., 2017)

3.2. Fassadenbegrünung

3.2.1. Fassadenbegrünungssysteme

In den letzten Jahren lässt sich laut Pfoser (2018, S. 13–20) ein zunehmendes Interesse an Fassadenbegrünungen verzeichnen. Dieses komme durch einem starken Anstieg an Veröffentlichungen, seit 2006 vor allem zu den Themen Gestaltung und Forschung, zum Ausdruck. Dabei liegt laut Pfoser der Fokus immer mehr auf energetischen und ökologischen Eigenschaften. Mit wandgebundenen Fassadenbegrünungen eröffne sich zudem ein sich stetig weiterentwickelndes Forschungsfeld.

In ihrer Dissertation „Fassade und Pflanze. Potenziale einer neuen Fassadengestaltung“ fasst Pfoser (2016) den Stand der Fassadenbegrünungstechniken hinsichtlich ihrer Ausführungsmöglichkeiten und Leistungspotenziale systematisch zusammen. Fassadenbegrünungssysteme, im Folgenden abgekürzt mit FBS, können nach Pfoser (2016, S. 54–65) wie folgt unterteilt werden: Nach dem Wurzelort der Pflanzen wird in *bodengebundene* und *wand-* beziehungsweise *fassadengebundene* FBS unterteilt. Bei der bodengebundenen Fassadenbegrünung bezieht die Pflanze Wasser und Nährstoffe direkt aus dem Boden. Es wird hier weiter unterteilt in einen Direktbewuchs der Fassade mit Selbstklimmern wie dem gemeinen Efeu *(Hedera helix)* oder wildem Wein sowie in einen leitbaren Bewuchs mit Gerüstkletterpflanzen wie Blauregen, welche eine Sekundärkonstruktion aus Stäben, Gittern, Seilen oder Netzen als Kletterhilfe benötigen.

Pfoser unterteilt wandgebundene Fassadenbegrünungen in solche mit horizontaler und vertikaler Wuchsebene. In FBS mit horizontaler Wuchsebene wachsen die Pflanzen in linear angeordneten horizontalen Pflanzbehältern, die als Regalsysteme bezeichnet werden. Diese sind über Vorkonstruktionen an der Fassade befestigt. Die Versorgung mit Wasser und Nährstoffen erfolgt über die Pflanzbehälter. Regalsysteme können mit Kletter- oder Hängepflanzen kombi-

niert werden. Wandgebundene FBS mit vertikaler Wuchsebene werden in modulare und flächige Systeme unterteilt. Modulare Systeme bestehen aus rechteckigen Modulen mit einer Tiefe von 10 cm bis 20 cm, die mit Substraten wie Bims, Steinwolle oder Torfmoos befüllt sind. Substrat und Pflanzen werden mithilfe von Gittern, Rinnen oder Geotextilien mit Schlitzungen oder Taschen gehalten. Auch direkte Begrünungen von Stein- oder Betonplatten sind möglich. Flächige Systeme zeichnen sich im Gegensatz zu modularen Systemen durch eine flächig homogene Bauweise aus und können je nach Statik direkt an der Fassade oder an vorgelagerten Sekundärkonstruktionen angebracht werden. Die Systeme bestehen aus Geotextilien in Kombination mit Substraten. Auch flächige Systeme aus Metallblechen oder direkt begrünten Wandschalen sind möglich. Alle wandgebundenen FBS benötigen laut Pfoser in der Regel eine Bewässerungsanlage für der Versorgung der Pflanzen mit Wasser und Nährstoffen. Abbildung 3.4 zeigt das Gebäude der Magistratsabteilung 48 in Wien als Beispiel für eine wandgebundene Fassadenbegrünung mit horizontaler Wuchsebene (Regalsystemen).

Abbildung 3.4.: *Wandgebundene Fassadenbegrünung am Gebäude der Magistratsabteilung 48 in Wien (Quelle: Green4Cities, 2014).*

Unter den genannten Arten der Fassadenbegrünungssysteme sind Zwischenstufen möglich, die individuell an ein Gebäude angepasst werden können (Pfoser, 2016, S. 54–65; Köhler & Rares Nistor, 2018, S. 184).

In englischsprachiger Literatur werden FBS als *vertical greening systems*, abgekürzt mit *VGS*, bezeichnet und abweichend von der deutschsprachigen Literatur nach ihrem technischen Aufbau unterschieden. Als *green facades* werden nach Brune et al. (2017, S. 9–10) Kletter- oder Hängepflanzen bezeichnet, wobei ein direkter Bewuchs mit Selbstklimmern als *traditional*

green facade und ein Bewuchs mit Gerüstkletterpflanzen an einer Vorkonstruktion als *double-skin green facade* bezeichnet wird. Flächige und modulare Systeme werden laut Brune et al. als *living walls* bezeichnet. Eine Übersicht über die Unterteilung von FBS in deutsch- und englischsprachiger Literatur wird in Abbildung 3.5 gegeben.

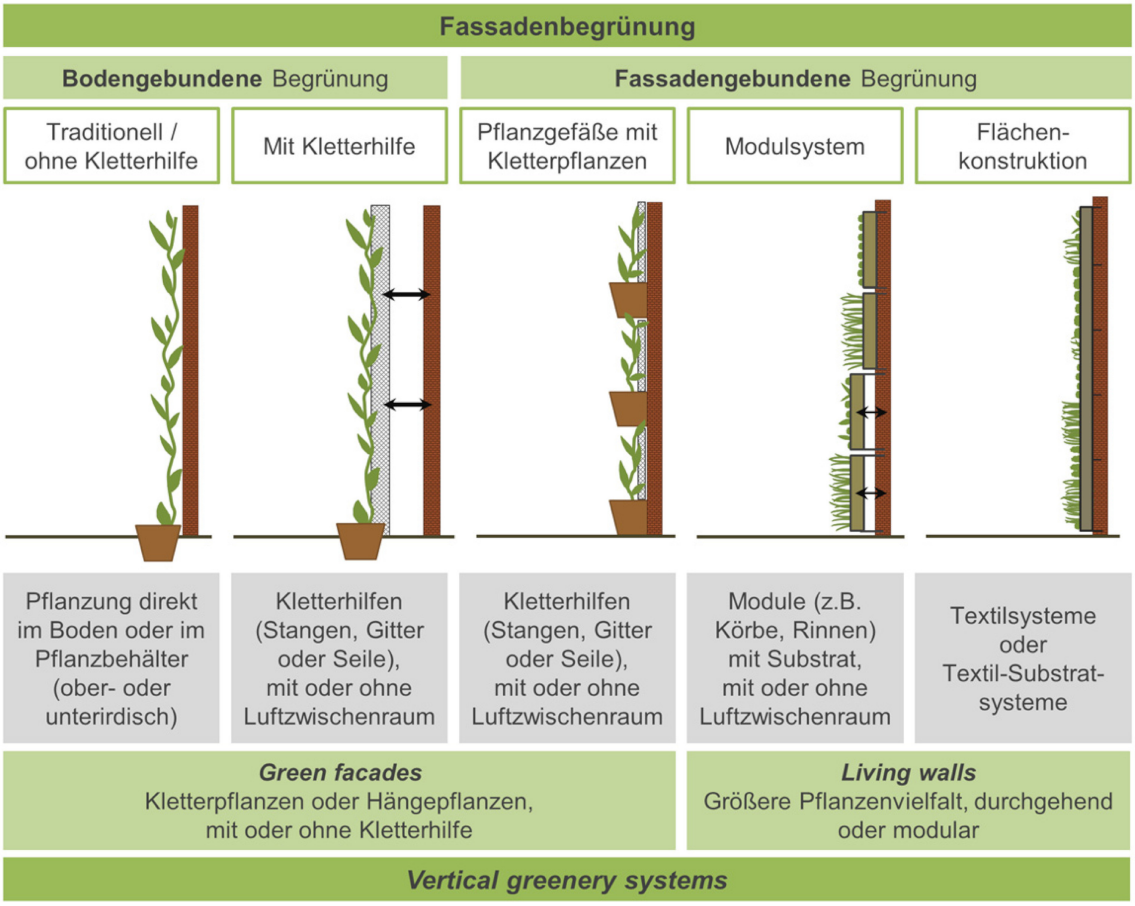


Abbildung 3.5.: *Unterteilung der Fassadenbegrünungssysteme (Quelle: Brune et al., 2017, S. 10).*

3.2.2. Wirkungspotenzial auf das Mikroklima

Fassadenbegrünungen können laut Pfoser et al. (2013, S. 109–114) über folgende Effekte eine Temperaturreduktion der Fassade, der Innenräume und der Umgebungsluft bewirken: Durch Reflektion und Absorption der solaren Einstrahlung werden mit einer Begrünung Fassadenoberfläche und, wenn gewollt, Fenster verschattet (*Verschattungseffekt*). Durch die Verwendung laubabwerfender Pflanzen kann die Sonneneinstrahlung im Winter genutzt werden. Ein weiterer Effekt ist die adiabate Kühlung durch Verdunstung von Wasser (*Verdunstungskühlung*). Diese findet durch die Transpiration der Pflanzen sowie bei wandgebundenen Begrünungen zusätzlich durch Evaporation über das Substrat statt (Evapotranspiration). Durch den Wechsel des Aggregatzustands werden der Umgebung pro verdunstetem Liter Wasser etwa 0,68 kWh Energie in Form von Wärme entzogen.

Zusätzlich beeinflussen FBS über die Dämmwirkung ihrer Schichten sowie den Einfluss auf die

Windströmung (Bildung eines Luftpolsters) die Energiebilanz einer Gebäudefassade (Pérez et al., 2014). Der Einfluss auf die Energiebilanz sei vor allem abhängig von der Art des verwendeten FBS, der verwendeten Pflanzenarten, der Dichte der Begrünung, der Klimaregion und Jahreszeit sowie der Fassadenausrichtung. Aufgrund dieser Abhängigkeiten stellten Pérez et al. (2014) in ihrem Review große Unterschiede zwischen den Ergebnissen der betrachteten Studien fest: Für bodengebundene FBS mit Direktbewuchs lagen die Ergebnisse für eine Reduktion der maximalen Tagestemperatur der Fassadenoberfläche bei 1,2 K bis 16,0 K, für bodengebundene FBS mit leitbarem Bewuchs bei 1,0 K bis 15,2 K und für wandgebundenen FBS bei 1,0 K bis 20,8 K.

Djedjig et al. (2013) maßen an einem kleinskaligen Modellaufbau einer Straßenschlucht eine Reduktion der Strahlungstemperatur[4] durch die Begrünung der Westfassade um 4 K. Eine Verbesserung der thermischen Belastung konnte ebenfalls von Becker et al. (2019) mittels einer Modellierung für eine bodengebundene Fassadenbegrünung in einer Straßenschlucht mit Nord-Süd-Ausrichtung in Berlin festgestellt werden.

Die Wirkung einer Fassadenbegrünung auf das Mikroklima steigt mit der begrünten Fläche und ist umso höher, je enger die Straßenschlucht ist (Alexandri & Jones, 2008)

3.2.3. Äußere Einflüsse auf das Wirkungspotenzial

Das höchste Wirkungspotenzial von FBS zur Reduzierung von Hitzebelastungen wird dort festgestellt, wo der Bedarf aufgrund einer hohen Umgebungstemperatur sowie einer hohen solaren Einstrahlung und damit einer hohen Oberflächentemperatur der Fassade am höchsten ist (vgl. Croce & Vettorato, 2020; Kontoleon & Eumorfopoulou, 2010; Sieker et al., 2019, S. 44–45; Herrmann, 2011, S. 51–52). Dies sei je nach Sonnenstand an Fassaden mit Ost-, Süd- und insbesondere Westausrichtung der Fall. Für die Abhängigkeit der Fassadentemperatur von der Umgebungstemperatur und der solaren Einstrahlung soll an dieser Stelle näherungsweise auf die Temperaturabhängigkeit von PV-Modulen in Abschnitt 3.1.3 verwiesen werden.

Zu weiteren äußeren Einflüssen wie der Klimazone, Jahreszeit, Licht- und Windverhältnisse sowie der Luftfeuchte können, wie in Abschnitt 3.2.7 nach Pérez et al. (2014) und Hunter et al. (2014) erläutert, aufgrund des Forschungsstands keine gesicherten Aussagen getroffen werden.

3.2.4. Wirkungsebenen

Der Nutzen einer Fassadenbegrünung kann laut Pfoser (2016, S. 70) sowohl auf Gebäude- als auch auf Quartiersebene liegen, wobei auch Überschneidungen möglich sind. Dabei könne sich die Verteilung des Nutzens je nach FBS unterscheiden. So könne sich eine wandgebundene Begrünung stärker auf das Stadtklima auswirken, während eine bodengebundene Begrünung auf der Gebäudeebene ein besseres Preis-Leistungsverhältnis habe.

Mittels einer mikroskaligen Simulation auf Gebäudeebene über einen 90-Tage-Zeitraum für einen heißen Sommer in Berlin kamen Sieker et al. (2019, S. 44–45) zu folgenden Ergebnissen:

[4] Eine Reduktion der Strahlungstemperatur führt zu einer Reduktion der thermischen Belastung (vgl. Abschnitt 2.2.3).

Durch eine bodengebundene Fassadenbegrünung konnte die Innenraumtemperatur im Schnitt um 2 K bis 3 K gesenkt werden. Die Temperaturreduktion konnte mit einer zusätzlichen Bewässerung der Begrünung leicht verbessert werden. Im Vergleich führte die Umgebung des Gebäudes mit Bäumen zu einer Reduktion der Innenraumtemperatur um 3 K bis 5 K, eine Dachbegrünung führte zu einer Reduktion um 0,5 K bis 1 K, welche sich vor allem im Dachgeschoss bemerkbar machte.

Dieselbe Simulation wurden von Sieker et al. (2019, S. 49–55) auf Quartiersebene mit folgenden Ergebnissen durchgeführt: Die wirksamste der betrachteten Maßnahmen[5] war die Baumrigole. Diese führte zu einer Reduktion der Hitzebelastung, gemessen an Stunden mit einem UTCI[6] über 32 °C, um durchschnittlich 160 h. Die Fassadenbegrünung führte zu einer durchschnittlichen Reduktion der Hitzebelastung um 70 h in der direkten Nähe zum Gebäude (bis 8 m Entfernung von der Gebäudevorderseite) und in den Hinterhöfen. Dabei führte der Wind zu einer Vermischung der abgekühlten Luft und damit zu einer Abschwächung der Wirkung auf der windzugewandten Seite. Auf der windabgewandten Seite konnte eine Kühlwirkung noch in weiterer Entfernung vom Gebäude festgestellt werden. Für die Dachbegrünung konnte vor allem in Bodennähe kaum eine Wirkung festgestellt werden. Auch die anderen untersuchten Maßnahmen zeigten schwächere Wirkungen. Tagsüber führte insgesamt eine Verschattung zur größten Reduktion der Hitzebelastung, während nachts die Reduktion der am Tag in der Bausubstanz gespeicherten Wärme ausschlaggebend war. Die größte Wirkung zur Reduktion von Tropennächten zeigte die Fassadenbegrünung. Eine Auswirkung war noch bis zu einer Entfernung von 100 m feststellbar. Durch die Begrünung der Fassaden heizten sich diese am Tag weniger stark auf und gaben nachts weniger Wärme an die Umgebung ab.

Zu vergleichbaren Ergebnissen kam Herrmann (2011, S. 51–52) in einer mikroskaligen Simulation der Wirkung unterschiedlicher Maßnahmen auf die oberflächennahe Lufttemperatur. Fassadenbegrünungen könnten vor allem in direkter Nähe zur Fassade eine Reduktion der Lufttemperatur von mehr als 10 K bewirken. Die Wirkung betrüge bei einer Entfernung von 6 m bis 8 m noch 5 K. Nur bei großflächiger Anwendung der Fassadenbegrünung sei eine hohe Wirkung auf die bodennahe Lufttemperatur bis zu einer Höhe von 2 m sowie auf die Umgebungsluft ab einer Höhe von 24 m feststellbar.

Sieker et al. (2019, S. 55–57) führten ebenfalls eine mesoskalige Simulation auf gesamtstädtischer Ebene durch. Für das betrachtete Siedlungsgebiet und die betrachtete Wetterlage ergab sich für eine Kombination aus Maßnahmen der grünen und blauen Infrastruktur eine durchschnittliche Abkühlung der bodennahen Lufttemperatur um 0,9 K. Aufgrund der hohen Individualität der Städte ließen sich jedoch keine generellen Aussagen treffen. In Städten mit hoher Siedlungsdichte seien Gebäudebegrünungen aufgrund des geringen Potenzials an blauer und grüner Infrastruktur mit hohem Flächenbedarf besonders relevant. Alexandri und Jones (2008) zeigten in einer Modellierung, dass die Begrünung von Fassaden eine höhere Wirkung

[5] Betrachtet wurden folgende Maßnahmen: Dachbegrünung extensiv und extensiv mit Anstau, Dachbegrünung intensiv, bodengebundene Fassadenbegrünung, Entsiegelung der Fläche um 30 %, vollständige Entsiegelung der Fläche, Versickerungsmulde, urban wetlands, Baumrigolen

[6] Universal thermal climate index, äquivalente Temperatur als Maß für die thermisch-physiologische Belastung eines Menschen im Freien

auf die Lufttemperatur in Straßenschluchten hat, als die Begrünung von Dächern. Beide Maßnahmen gemeinsam könnten laut Alexandri und Jones großflächig umgesetzt Auswirkungen auf der Stadtebene zeigen.

3.2.5. Energieeinsparungen am Gebäude

Aufgrund der puffernden Wirkung von FBS auf Temperaturschwankungen können diese zu einer Reduzierung des Kühl- und Heizbedarfs im Gebäude und damit potenziell zu Energieeispaarungen führen (vgl. Pfoser et al., 2013, S. 104–107; Pérez et al., 2014). Wie in Abschnitt 3.2.2 beschrieben können FBS im Sommer Temperaturreduktionen der Umgebungsluft sowie der Fassadenoberfläche bewirken. Das Mikroklima außerhalb der Gebäudes beeinflusst durch die Gebäudehülle das Innenraumklima (Buth et al., 2015, S. 439–440). Im Winter führen Fassadenbegrünungen zu höheren Temperaturen an der Fassade selbst (Pfoser et al., 2013, S. 104–107). Dieser Effekt sei auf die Bildung eines Luftpolsters durch die Begrünung sowie je nach FBS eine zusätzliche Dämmschicht durch das Substrat und damit einen insgesamt niedrigeren Wärmedurchgangskoeffizienten der Fassade zurückzuführen.

In einem Review stellten Charoenkit und Yiemwattana (2016) fest, dass mit wandgebundenen FBS eine Reduktion des Kühlbedarfs von 1 % bis 50,6 % und eine Reduktion des Heizbedarfs von 6 % bis 33,5 % erreicht werden kann. Das Reduktionspotenzial sei abhängig von der Klimazone, dem Anteil begrünter Fläche an der Gebäudehülle, deren Orientierung, der Art und dem Aufbau des FBS sowie den verwendeten Pflanzenarten und Substraten. Zur Reduktion des Heizbedarfs lag dem Review nur eine Studie vor. Für bodengebundene FBS wurden von Coma et al. (2017) ebenfalls potenzielle Energieeinsparungen durch eine Reduktion des Kühlbedarfs festgestellt. Diese seien verglichen mit wandgebundenen FBS etwa um die Hälfte geringer. Insbesondere das Einsparpotenzial von Heizenergie im Winter ist jedoch stark abhängig vom Gebäude und kann bei einer bereits gut gedämmten Fassade auch in kalten Klimazonen sehr gering ausfallen, wie eine Simulation von Feng und Hewage (2014a) zeigte.

Es soll an dieser Stelle angemerkt werden, dass die tatsächlichen Energie- und damit THG-Einsparung abhängig vom verwendeten Kühl- und Heizsystem ist.

3.2.6. Weitere Wirkungspotenziale

Über Photosynthese können Pflanzen in ihrer Biomasse *Kohlenstoff binden*. Für wandgebundenen FBS werden Werte von 0,14 kg m^{-2} bis 0,98 kg m^{-2} gebundenem Kohlenstoff pro begrünter Fläche im Jahr angegeben (Charoenkit & Yiemwattana, 2016). Die Werte beziehen sich auf die brutto Bindung von Kohlenstoff und berücksichtigen somit keine THG-Emissionen durch biologische Abbauprozesse der gebildeten Biomasse. Die angegebenen Werte sollten daher lediglich für eine grobe Einschätzung der Größenordnung verwendet werden. Charoenkit und Yiemwattana weisen darauf hin, dass die Bindung von Kohlenstoff abhängig von Pflanzenart und Substrat ist und weiterer Forschungsbedarf zur Bindung von Kohlenstoff durch FBS besteht. Aufgrund der dünneren Substratschichten könnten FBS verglichen mit Dachbegrünungen weniger Biomasse bilden. Die von Charoenkit und Yiemwattana angegebenen Werte entsprechen

einer Bindung von 0,51 kg m^{-2} bis 3,59 kg m^{-2} CO_2 pro begrünter Fläche im Jahr. Für ein angenommenes Einfamilienhaus mit einer Fassadenbegrünung von 100 m^2 entspräche dies einer Bindung von 51 kg bis 359 kg CO_2 im Jahr und damit 0,44 % bis 3,09 % der jährlichen pro Kopf THG-Emissionen in Deutschland von 11,61 t CO_2-eq (BMU, 2020a, S. 54). Verglichen mit den potenziell vermiedenen THG-Emissionen durch eine PVF gleicher Fläche (siehe hierzu Abschnitt 3.1.5) ist die CO_2-Bindung der Fassadenbegrünung damit um ein bis zwei Zehnerpotenzen geringer.

Ein weiteres Wirkungspotenzial ergibt sich aus der Bewässerung von FBS. Bei der Verwendung von Regenwasser wird dieses über die Dachflächen gesammelt und in Zisternen temporär gespeichert (vgl. Sieker et al., 2019, S. 24; Pfoser, 2016, S. 90). Zusammen mit der Wasseraufnahmekapazität des FBS etwa in den Pflanzbehältern ergebe sich ein Potenzial zur *Regenwasserretention*. Dabei seien Einschränkungen durch die Aufnahme chemischer Stoffe über die Dachfläche und deren Auswirkungen auf die Pflanzen zu beachten. Gill (2006, S. 324–327) weißt darauf hin, dass grüne Infrastruktur zwar eine effektive Maßnahme gegen Hitze und Sturzfluten sei, alleine jedoch nicht ausreiche, um die größer werdenden Regenmengen aus Sturzfluten zu kompensieren. Die Verdunstung des gesammelten Regenwasser über die Pflanzen und das Substrat wirkt sich zudem positiv auf den *kleinen Wasserkreislauf* aus (Pfoser et al., 2013, S. 153). Dieser werde durch die Versiegelung von Flächen gestört, was zu einer Verringerung regionaler Niederschläge führe. Neben der Verwendung von Regenwasser zur Bewässerung von FBS wird aktuell die Verwendung von Abwasserteilströmen untersucht (Wißmann et al., 2019). Dies habe den Vorteil einer konstanten Verfügbarkeit von Wasser und Nährstoffen und könne abhängig von der *Reinigungsleistung* der verwendeten Pflanzen und Substrate gleichzeitig die Kanalisation und Kläranlagen entlasten.

Weitere Wirkungspotenziale, die im Zusammenhang mit FBS genannt werden, sind unter anderem die Verbesserung der Luftqualität durch Absorption und Adsorption von Luftschadstoffen wie Stickoxiden und Feinstaub sowie eine Anreicherung der Luft mit Sauerstoff, die Reduktion von Lärmbelastung durch Absorption und Reflektion von Schallwellen, die Erhöhung der Biodiversität durch die Schaffung von Lebensräumen, die Aufwertung des städtischen Umfeldes durch Gestaltungsmöglichkeiten und die Verbesserung der Behaglichkeit sowie die Einsparung von Ressourcen durch die Substitution von Sichtverkleidungen und den Schutz der Bausubstanz (vgl. Pfoser, 2016, S. 45–47; Kraus et al., 2019, S. 14–15).

3.2.7. Forschungsstand und Ausblick

Bodengebundene FBS finden in Deutschland laut Köhler (2008) bereits seit dem 19. Jahrhundert Anwendung und werden seit den 1980er-Jahren hinsichtlich ihrer Leistungen wie Wärmedämmung, Kühlung, Verbesserung der Luftqualität und Schaffung von Lebensräumen untersucht. Wandgebundene FBS werden in Deutschland dagegen erst seit wenigen Jahren erforscht und vermarktet, sodass hier noch ein größerer Forschungsbedarf zu technischer Gestaltung und Wirkungspotenzialen besteht (Köhler & Rares Nistor, 2018, S. 183–184).

Es besteht generell ein Bedarf an systematischen und einheitlichen Untersuchungen zu FBS,

um vergleichbare Daten zu erheben und Wirkungen auf Quartiers- und Stadtebene bei einer großskaligen Umsetzung abschätzen zu können (vgl. Sieker et al., 2019, S. 72–73; Jaafar et al., 2011, S. 7–8). Bei bestehenden klimatischen und energetischen Untersuchungen zu FBS in Form von Experimenten, Untersuchungen an Gebäuden oder Modellierungen existiert kein standardisiertes Studiendesign (vgl. Pérez et al., 2014; Hunter et al., 2014). So würden oft keine oder unzureichende Angaben zu beeinflussenden Bedingungen wie der Klimazone, Jahreszeit, Licht- und Windverhältnisse, Luftfeuchte, Ausrichtung der Fassade, Art und Zustand der Pflanzen, Dichte des Blattwerkes, Art und Aufbau des FBS, Bewässerung sowie zu physikalischen und chemischen Parametern des Substrats gemacht. Versuche würden oft über einen zu geringen Zeitraum und mit einer zu geringen Wiederholung durchgeführt. Modellierungen basierten auf unterschiedlichen Annahmen und würden nicht immer mit realen Daten validiert.

Aktuelle Forschungen zu FBS beschäftigen sich vor allem mit deren Wirkungspotenzial auf das Mikroklima sowie Energieeinsparungen am Gebäude (Nugroho, 2020).

3.3. Kombination der Photovoltaik und Begrünung an Fassaden

3.3.1. Kombinationsmöglichkeiten

Durch eine Kombination von Photovoltaik-Fassaden mit Fassadenbegrünungssystemen können sich Synergieeffekte wie zum Beispiel die Kühlung der PV-Module durch die Begrünung ergeben. Diese Effekte sind in Abschnitt 3.3.2 näher beschrieben.

Laut Pfoser et al. (2013, S. 122–125) kann es sinnvoll sein, eine Unterkonstruktion für beide Systeme, PV und Begrünung, an Fassaden zu nutzen. Dabei könnten PV und FBS in einer Ebene übereinander angeordnet werden, sodass durch den Kamineffekt an der Fassade aufsteigende warme Luft von der Begrünung gekühlt wird, bevor sie die PV-Module erreicht (siehe Abbildung 3.6). Es seien, zum Zeitpunkt der Publikation der Arbeit 2013, für solche Kombinationen jedoch noch keine Systeme auf dem Markt verfügbar.

Realisierte Bauprojekte wie das „Smart Material Haus“ (vgl. zillerplus Architekten und Stadtplaner GmbH, o. D.) integrieren bereits PV und Begrünung in die Fassade. Dabei handelt es sich jedoch um funktional getrennte Flächen ohne gezielte Nutzung von Synergieeffekten. Das „Smart Material Haus“ wurde von zillerplus Architekten entworfen und als Teil der Internationalen Bauausstellung in Hamburg 2013 umgesetzt. An der Fassade sind PV-Module und wandgebundenen Gerüstkletterpflanzen in die Balkonbrüstung integriert (siehe Abbildung 3.7).

Bott et al. (2017) zeigen unterschiedliche Gestaltungsmöglichkeiten zur Kombination von PV und FBS unter Nutzung von Synergieeffekten auf. So könne mittels teiltransparenter PV-Module und boden- oder wandgebundener Gerüstkletterpflanzen ein ausgeglichenes Verhältnis zwischen Sonnenschutz und Lichteinfall vor transparenten Fassadenflächen geschaffen werden. Durch hervorstehende Elemente vor opaken Fassadenflächen könnten neue Flächen zur Nutzung von PV oder Begrünung geschaffen werden. Für ein Verwaltungsgebäude erarbeiteten Bott et al. ein Fassadenkonzept aus einer wandgebundenen Begrünung sowie über die horizontale Achse nachführbare teiltransparente PV-Module, die als Sonnenschutz dienen (siehe Abbildung 3.8).

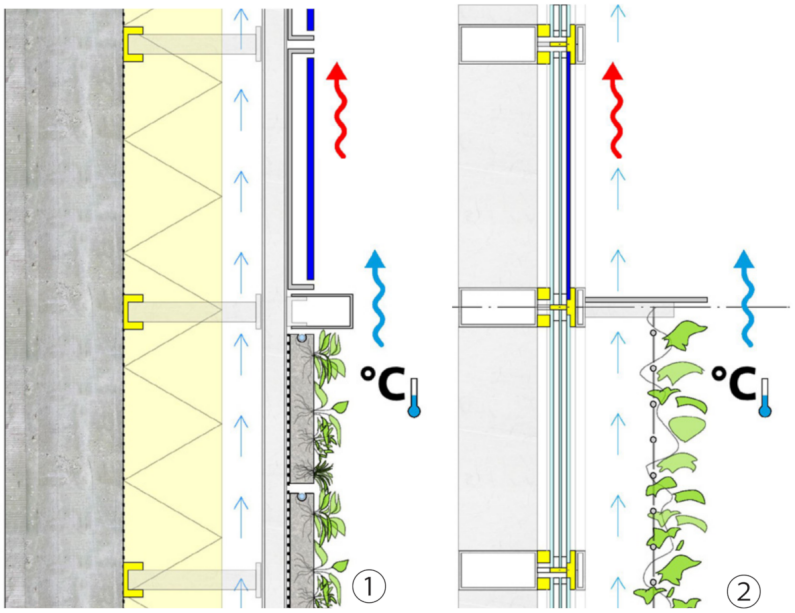


Abbildung 3.6.: *Kombination von Photovoltaik und Begrünung an einer Fassade in einer Ebene. Variante 1 zeigt Photovoltaik-Module und eine wandgebundene Fassadenbegrünung an einer vorgehängten hinterlüfteten Fassade, Variante 2 zeigt Photovoltaik-Module in einer Pfosten-Riegel-Fassade und eine bodengebundene Fassadenbegrünung mit Gerüstkletterpflanzen. (Quelle: Pfoser et al., 2013, S. 123).*

Aus ihren Betrachtungen schlussfolgern Bott et al., dass auch für Bestandsgebäude große Potenziale in der Kombination von PV und Begrünung an Fassaden liegen, welche bislang noch wenig genutzt seien.

Eine Kombination von PV und FBS in mehreren Ebenen wurde von Peñaranda Moren (2018) im Rahmen einer Dissertation untersucht. Die Ergebnisse wurden in zwei Publikationen veröffentlicht (Peñaranda Moren & Korjenic, 2017a; Peñaranda Moren & Korjenic, 2017b). Die Untersuchungen waren Teil des Wiener Projektes „GrünPlusSchule@Ballungszentrum“ aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Stadt der Zukunft“ des österreichischen Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie. Abbildung 3.9 zeigt das untersuchte System, das aus einer Begrünung mit in Pflanztrögen wurzelnden Gerüstkletterpflanzen sowie davor installierten teiltransparenten PV-Modulen aus monokristallinen Siliziumzellen im Glas-Glas-Laminat besteht. Es wurden einer Variante mit einer Restlichtdurchlässigkeit der PV-Module von 30 % (vgl. Aufbau 3 in Abbildung 3.9) sowie eine Variante mit einer Restlichtdurchlässigkeit von 5,2 % (vgl. Aufbau 4 in Abbildung 3.9) untersucht. Peñaranda Moren (2018, S. II) spricht mit Bezug auf die untersuchte Kombination von einer *Multifunktionalen Systemlösung: Gebäudebegrünung und Photovoltaik*, kurz *MFS*. Die MFS solle die Wirkungspotenziale der PV und Begrünung an Fassaden vereinen und sowohl an Neubauten als auch bei Gebäudesanierungen von Ein- und Mehrfamilienhäusern und Gebäuden mit mehreren Stockwerken eingesetzt werden können (Peñaranda Moren, 2018, S. 7, 12). Laut Peñaranda Moren (2018, S. 5–6) sei die untersuchte MFS nach dem Stand der Technik die erste Systemlösung, die PV und Begrünung unter maximaler Flächennutzung auf mehreren Ebenen an der Fassade kombiniert. Neben der dargestellten MFS gebe es weitere Kombinationsmöglichkeiten mit boden- und wandgebundenen

Abbildung 3.7.: *Funktional getrennt integrierte Photovoltaik und Begrünung an der Fassade des Smart Material Hauses in Hamburg (Quelle: zillerplus Architekten und Stadtplaner GmbH, o. D.).*

FBS, wobei darauf zu achten sei, dass die verwendeten Pflanzen keine Selbstklimmer sind und je nach Restlichtdurchlässigkeit der PV-Module Halbschatten vertragen. Dabei solle der Aufwand für Installation und Wartung vergleichbar mit dem der Einzelsysteme sein (Peñaranda Moren & Korjenic, 2017a).

Ebenfalls im Projekt „GrünPlusSchule@Ballungszentrum“ wurde eine Kombination aus wandgebundener Fassadenbegrünung und davor installierten PV-Modulen aus monokristallinem Silizium mit einer Restlichtdurchlässigkeit von 32 % an einer städtischen Südfassade untersucht (Korjenic et al., 2018, S. 81). Durch einen klappbaren Mechanismus bei der Anbringung der PV-Module konnte die dahinter liegende Begrünung besser gewartet werden. Es wurden eine Variante mit einem Abstand von 25 cm (Gesamttiefe 38,5 cm) und eine Variante mit einem Abstand von 44 cm (Gesamttiefe 57,5 cm) zwischen PV-Modul und Begrünungsmodul untersucht. Als Referenz diente ein gleiches PV-Modul, das direkt vor der Fassade angebracht wurde. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 3.10 dargestellt. Korjenic et al. (2018, S. 95–96) empfehlen einen Mindestabstand von 45 cm zwischen Begrünung und PV-Modul, um die Erreichbarkeit der Begrünung für Pflege- und Wartungsarbeiten sowie eine ausreichende Hinterlüftung der PV-Module zu gewährleisten.

3.3.2. Synergieeffekte

Mit der Kombination von Photovoltaik und Begrünung an der Fassade ergeben sich Synergieeffekte, die über die Wirkungen der Einzelsysteme hinausgehen. Diese neuen Effekte umfassen den Schutz der Pflanzen vor extremer Witterung wie Hitze, Frost, starker Sonneneinstrahlung oder Hagel durch die PV-Module sowie die Kühlung der PV-Module durch die Pflanzen (vgl. Peñaranda Moren, 2018, S. 9–12; Wißmann et al., 2019). Durch diese Effekte könne die

Abbildung 3.8.: *Konzeptentwurf für die Kombination von Photovoltaik und Begrünung an der Fassade eines Verwaltungsgebäudes (Quelle: Bott et al., 2017).*

Wirkung der Einzelsysteme wie die Produktion erneuerbaren Stroms, der Temperaturausgleich im Sommer und Winter sowie der Witterungsschutz der Fassade verstärkt werden.

Peñaranda Moren und Korjenic (2017a) konnten durch Untersuchungen am in Abschnitt 3.3.1 beschriebenen MFS mit Gerüstkletterpflanzen folgende Ergebnisse gewinnen: Gemessen wurden über ein Jahr zehnminütig die Oberflächentemperatur an der Fassade und am PV-Modul, die Lufttemperatur und Luftfeuchte im Pufferraum zwischen Begrünung und PV-Modul sowie Wetterdaten der lokalen Wetterstation auf dem Gelände der Testfassade in Wien. Die Fassade war nach Osten ausgerichtet. Es konnte bestätigt werden, dass ein Pflanzenwachstum auch bei Verwendung der PV-Module mit einer Restlichtdurchlässigkeit von 5,2 % möglich ist. Die folgenden Ergebnisse beziehen sich auf die MFS-Variante mit einer Restlichtdurchlässigkeit von 30 %. Im Mittel konnte eine Senkung der Monatsdurchschnittstemperatur der Module um 1 K bis 2 K sowie eine Senkung der Monatsmaximaltemperatur um 2 K bis 4 K zur Referenz ohne Begrünung nachgewiesen werden. Diese war umso stärker, je ausgeprägter die Pflanzen hinsichtlich Pflanzengröße und Dichte des Blattwerkes waren. Es konnte eine Erhöhung der Leistungserträge der PV durch die kühleren Modultemperaturen im Vergleich zur Referenz ohne Begrünung nachgewiesen werden. Dieser Effekt trat unter extremen Betriebsbedienungen, wie einer hohen Umgebungstemperatur oder hoher solarer Bestrahlung, und somit zu Zeiten hoher Leistung auf. Auch bei hoher solarer Bestrahlung und niedrigen Umgebungstemperaturen im Winter konnte der Effekt nachgewiesen werden. Die beschriebene Erhöhung der Leistungserträge betrug im Mittel 2 % bis 4 % und in Einzelfällen 15 % bis 24 %. Wider Erwarten konnte eine Erhöhung der Leistungserträge, trotz geringerer Modultemperaturen im Vergleich zur Referenz ohne Begrünung, außerhalb extremer Betriebsbedingungen nur für die erste Jahreshälfte nachgewiesen werden.

Mittels des ebenfalls in Abschnitt 3.3.1 beschriebenen Versuchsaufbau von Korjenic et al.

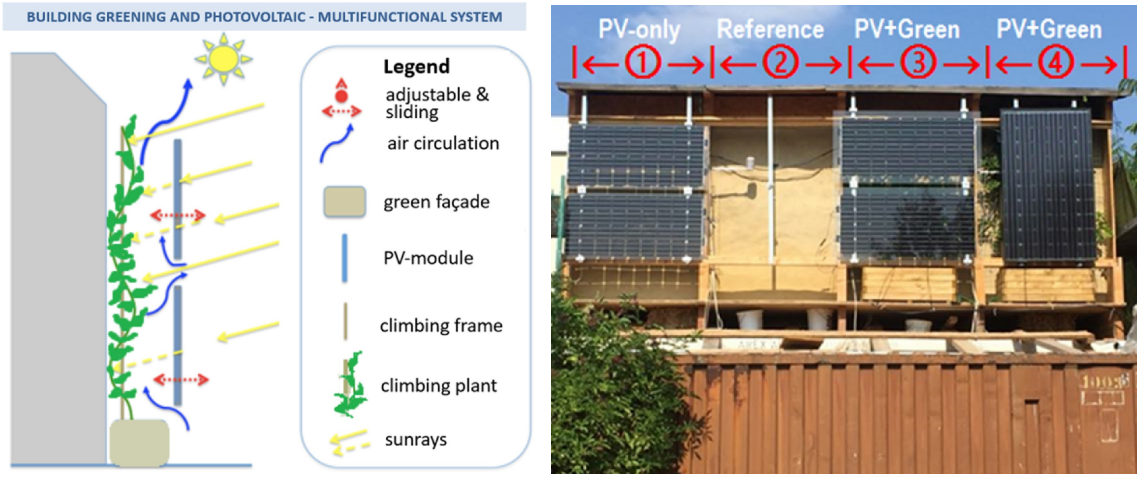


Abbildung 3.9.: *Multifunktionale Systemlösung: Gebäudebegrünung und Photovoltaik (Quelle: Peñaranda Moren und Korjenic, 2017a).*

(2018, S. 81–87) mit einer wandgebundenen Begrünung wurden folgende Ergebnisse gewonnen: Im Vergleich zur Referenz ohne Begrünung konnte eine kühlende Wirkung auf die Temperatur der PV-Module festgestellt werden. Bei hoher solarer Bestrahlung und hoher Umgebungstemperatur war diese stärker ausgeprägt . Im Sommer wurde eine Reduktion der Modultemperatur um bis zu 8 K nachgewiesen. Durch einen Ausfall der automatischen Bewässerung und Dünung der Pflanzen und dem damit verbundenen Vegetationsrückgang seien jedoch keine validen Messergebnisse zur Auswirkung der Begrünung auf den Energieertrag der PV möglich gewesen. Ohne den Ausfall seien stärkere Auswirkungen auf die Modultemperatur zu erwarten gewesen. Es konnte jedoch für den Sommer und Winter eine puffernde Wirkung der Kombination auf die Temperaturen an der Fassade nachgewiesen werden (Korjenic et al., 2018, S. 90)

Der Kühleffekt einer Begrünung auf die Temperatur von PV-Modulen an Fassaden konnte von Korjenic et al. (2018, S. 96–97) zusätzlich in Labormessungen mittels eines Sonnensimulators mit einer durchschnittlichen Leistung von 521 $W\,m^{-2}$ bestätigt werden. Dabei stieg die Lufttemperatur im Zwischenraum zwischen Begrünung und PV-Modul verglichen mit dem Referenzmodul direkt vor einer Reibputzfassade mit zunehmender Höhe des Moduls an. Es konnte ein Temperaturunterschied direkt im PV-Modul von etwa 4 K im Vergleich zum Referenzmodul gemessen werden.

Peñaranda Moren und Korjenic (2017b) konnten für die untersuchte MFS mit Gerüstkletterpflanzen ebenfalls eine puffernde Wirkung auf die Oberflächentemperatur der Fassade feststellen wie im Folgenden beschrieben: Die Oberflächentemperatur lag deutlich unter der der Referenzfassade mit einem PV-Modul ohne Begrünung und war im Vergleich zur Variante mit einer geringeren Restlichtdurchlässigkeit leicht geringer. Die monatlichen Höchsttemperaturen konnten verglichen mit der Referenzwand ohne PV und ohne Begrünung im Mittel um 21,4 K verringert werden, bei Temperaturspitzen betrug die Temperaturdifferenz bis zu 30 K. Im Winter konnte die Abkühlung der Fassade bei Umgebungstemperaturen unter 0 °C im Mittel um 3 K reduziert werden.

Für die Kombination einer PV-Dachanlage mit einer extensiven Dachbegrünung (ebenfalls

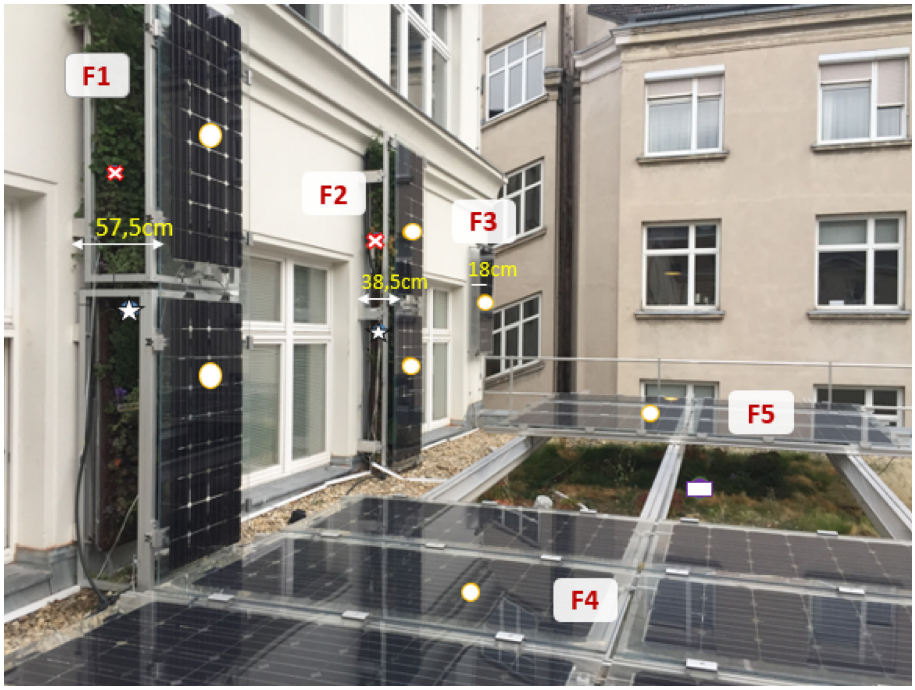


Abbildung 3.10.: *Versuchsaufbau einer Kombination aus wandgebundener Begrünung mit vorgehängten Photovoltaik-Modulen. Variante F2 hat im Vergleich zu Variante F1 einen geringeren Abstand zwischen Begrünung und Photovoltaik-Modul. Variante F3 stellt eine Referenz ohne Begrünung dar. (Quelle: Korjenic et al., 2018, S. 40).*

dargestellt in Abbildung 3.10) konnte von Peñaranda Moren und Korjenic (2018) eine Verbesserung der puffernden Wirkung auf Temperaturschwankungen zwischen der Dachabdichtung und dem Substrat im Vergleich zur Dachbegrünung ohne PV nachgewiesen werden. Jedoch wurde die aufgenommene Wärme im Sommer abends langsamer an die Umgebung abgegeben.

3.3.3. Forschungsstand und Ausblick

Kombinationen von PV-Anlagen und Begrünungen sind auf dem Markt bereits für Flachdächer verfügbar, wobei auf deren Synergieeffekte wie die Reduktion der Modultemperatur durch die Begrünung und eine damit einhergehende Ertragssteigerung hingewiesen wird (vgl. Optigrün, o. D.; Mann & Mollenhauer, 2020; ZinCo GmbH, 2020; BuGG, 2020; Pfoser, 2019). Die sogenannten *Solargründächer* werden zum Beispiel von der Stadt Hamburg gefördert (BUKEA, 2019).

Das in Abschnitt 3.3.1 beschriebenen MFS soll laut Peñaranda Moren (2018, S. 26) zum Patent angemeldet werden und wäre bei einer Vermarktung das erste auf dem Markt verfügbare seiner Art. Als Lösung für die Flächenkonkurrenz an Fassaden sei das MFS prinzipiell geeignet, für die Weiterentwicklung bestehe laut Peñaranda Moren und Korjenic (2017a) jedoch noch weiterer Forschungsbedarf. So müssten insbesondere die Auswirkung einer anderen Ausrichtung der Fassade sowie die Effekte unterschiedlicher FBS und PV-Systeme untersucht werden. Laut Peñaranda Moren und Korjenic könne eine Fassadenausrichtung nach Süden oder Südwesten zu deutlich ausgeprägteren Effekten aufgrund häufiger auftretenden extremen Betriebsbedingungen

führen. Des Weiteren seien Messungen über längere Zeiträume von mindestens drei Jahren nötig, um Auswirkungen unterschiedlich ausgeprägter Jahreszeiten zu kompensieren.

4. Methodisches Vorgehen

Die in dieser Arbeit untersuchte Wirkung der Maßnahmen PVF, FBS und MFS[1] auf Klimaschutz und Klimaanpassung, hier bezeichnet mit den Begriffen *Klimaschutzwirkung (KSW)* und *Klimaanpassungswirkung (KAW)*, ist keine direkt messbare Größe. Daher ist es notwendig, die KSW und KAW durch *Indikatoren* messbar zu machen. Dieser Prozess wird als *Operationalisierung* bezeichnet.

Das methodische Vorgehen ist zu Teilen angelehnt an die von Buth et al. (2015, S. 45) in der KWVA verwendete Methodik zur Aufstellung sogenannter *Proxyindikatoren*. Die in der KWVA durchgeführte multiplikative Verknüpfung von Klimasignal und Sensitivität zur Ermittlung der Klimawirkung wurde auf die multiplikative Verknüpfung von Bedarf und Wirkungspotenzial zur Ermittlung der Klimaschutz- und Klimaanpassungswirkung übertragen. Zur Bestimmung des Bedarfs und der Wirkungspotenziale wurden auf letzter Ebene angelehnt an die KWVA Indikatoren *normalisiert* und zusammengefasst. Im Folgenden wird das genauere methodische Vorgehen der vorliegenden Arbeit zur Entwicklung der quantitativen Bewertungsmethodik sowie zur Aufstellung der Szenarien und deren Anwendung für die Bewertung der Maßnahmen dargestellt.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Proxyindikatoren dazu verwendet, eine zu bestimmende und nicht direkt messbare Größe abzuschätzen. Hierfür wurden fünf Ebenen eingeführt, auf denen Proxyindikatoren zur Bestimmung weiterer Proxyindikatoren der jeweils nächsthöheren Ebene gebildet wurden. Insgesamt wurde vereinfacht ein linearer Zusammenhang zwischen den Proxyindikatoren nachfolgender Ebenen angenommen. Die Bezeichnung „Proxyindikator“ selbst wurde nur für Ebene 3 verwendet, für die anderen Ebenen wurden nach deren Charakteristik entsprechende Begriffe gewählt. Abbildung 4.1 zeigt die verwendeten Ebenen.

Auf der obersten Ebene (Ebene 0) stehen die Begriffe *KSW* und *KAW*, anhand derer die betrachteten Maßnahmen bewertet werden. Um die Größen dieser Begriffe zu bestimmen, wurden auf Ebene 1 die *Wirkungsfelder* in Bezug auf die zu prüfenden Hypothesen H 1 und H 2 gewichtet. Für die Gewichtung wurden auf Basis von Kapitel 2 die Relevanz der Wirkungsfelder für Klimaschutz und Klimaanpassung sowie auf Basis von Kapitel 3 das Wirkungspotenzial der betrachteten Maßnahmen auf die Wirkungsfelder qualitativ bewertet. Die Gewichtung erfolgte mit „hoch“, wenn in der untersuchten Literatur das Wirkungsfeld häufig mit einer hohen Relevanz für Klimaschutz oder Klimaanpassung beziehungsweise mit einem hohen Wirkungspotenzial der betrachteten Maßnahme in Zusammenhang gebracht wird. Wird ein Zusammenhang nur in einem geringen Anteil der entsprechenden Literatur dargestellt oder wird

[1] die im Folgenden verwendeten Abkürzungen PVF, FBS und MFS beziehen sich auf eine Photovoltaik-Fassade, eine Fassadenbegrünung sowie eine multifunktionale Kombination aus Photovoltaik und Begrünung jeweils an einer Gebäudefassade.

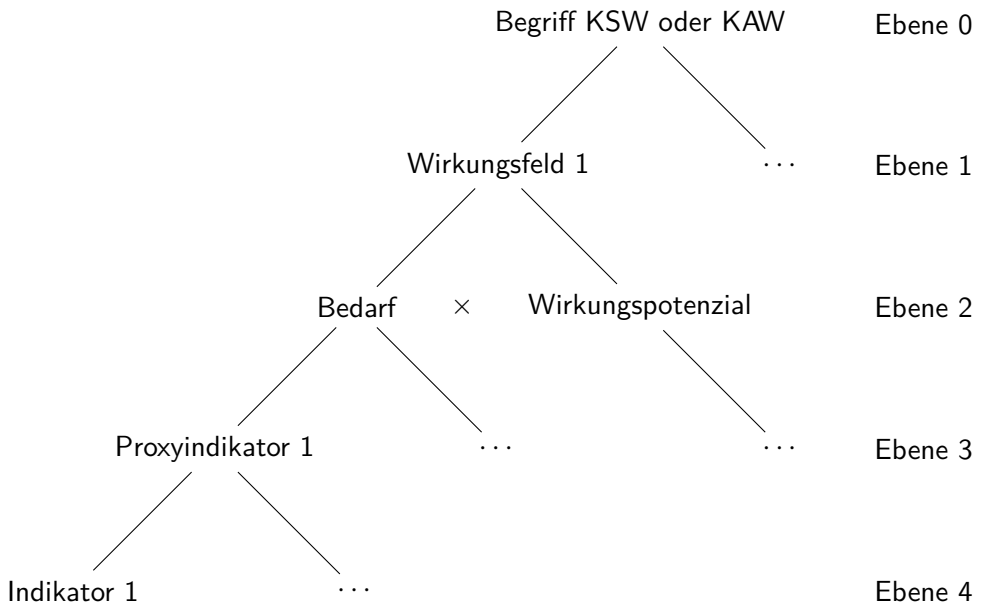


Abbildung 4.1.: *Ebenen der Maßnahmenbewertung (Quelle: Eigene Darstellung).*

in der Literatur die Relevanz des Wirkungsfeldes oder das Wirkungspotenzial der Maßnahmen als gering angegeben, erfolgte eine Gewichtung des Wirkungsfeldes mit „gering“. Werden Relevanz oder Wirkungspotenziale der Maßnahmen weder konsistent als gering oder hoch angegeben oder wird eine starke Abhängigkeit der Wirkungspotenziale von schwer beeinflussbaren Bedingungen beschrieben, erfolgte die Gewichtung mit „mittel“. Die Kombination der Wirkungsfelder zur Ermittlung der Größen auf Ebene 0 erfolgte durch Bildung des anhand der aufgestellten Gewichtungen gewichteten arithmetischen Mittels.

Aufgrund der starken Abhängigkeiten der mit „mittel“ gewichteten Wirkungspotenziale sowie des geringen Einflusses der mit „gering“ gewichteten Wirkungspotenziale wurden für die darauf folgenden feineren Ebene nur Wirkungspotenziale mit der Gewichtung „hoch“ betrachtet. Wirkungsebenen ohne ein mit „hoch“ gewichtetes Wirkungspotenzial von einer der Maßnahmen wurden somit nicht weiter betrachtet.

Die Größe der Wirkungsfelder auf Ebene 1 wurde anhand des *Bedarfs* in Bezug auf das Wirkungsfeld sowie des *Wirkungspotenzials* der betrachteten Maßnahme ebenfalls in Bezug auf das Wirkungsfeld bestimmt. Die Kombination des Bedarfs und des Wirkungspotenzials erfolgte multiplikativ. Auf Ebene 3 wurden auf Basis der Literaturrecherche *Proxyindikatoren* aufgestellt, die im Zusammenhang mit den Bedarfen beziehungsweise Wirkungspotenzialen der Wirkungsfelder stehen. Die Kombination der Proxyindikatoren auf Ebene 3 zur Bildung der Bedarfe und Wirkungspotenziale auf Ebene 2 erfolgte individuell auf Basis des in der Literatur beschriebenen Zusammenhangs. Um die Proxyindikatoren der Ebene 3 schließlich bestimmen zu können, wurden für diese auf der 4. Ebene *Indikatoren* ermittelt, welche in der untersuchten Literatur als geeignet zur Beschreibung der jeweiligen Proxyindikatoren der 3. Ebene dargestellt werden. Als Indikatoren werden im Rahmen dieser Arbeit Größen bezeichnet, die direkt gemessen oder mittels verfügbarer Daten direkt modelliert oder abgeschätzt werden können. Diese bilden

die unterste Ebene der Operationalisierung. Die Kombination der Indikatoren auf Ebene 4 zur Bildung der Proxyindikatoren auf Ebene 3 erfolgte individuell auf Basis des in der Literatur beschriebenen Zusammenhangs. Um verschiedene Größen der Indikatoren untereinander vergleichbar zu machen, wurden deren Wertebereiche auf einen einheitlichen Bereich von null bis eins skaliert. Dieser Prozess wird auch als *Normalisierung* bezeichnet. Die Festlegung der zur Normalisierung benötigten minimalen und maximalen Werte, die ein Indikator annehmen kann, erfolgte auf Basis der verwendeten Literatur.

Im letzten Schritt wurde, anhand der identifizierten Proxyindikatoren auf allen Ebenen, eine quantitative Bewertung der Maßnahmen vorgenommen. Die Bewertung erfolgte für Szenarien, die, in Bezug auf die Hypothesen H 5 bis H 7 (vgl. Kapitel 1), wie folgt aufgestellt wurden: Zunächst wurde auf Basis der Literatur ein repräsentatives Referenzszenario mit mittleren Werten für solare Bestrahlung und mikroklimatische Hitzebelastung definiert. Davon ausgehend wurde eine Matrix in Richtung jeweils geringer und hoher solarer Bestrahlung und mikroklimatischer Hitzebelastung aufgespannt. Die sich so ergebenden 3×3 Matrix ist in Tabelle 4.1 dargestellt. Die neun möglichen Szenarien werden als $\text{Szenario}_{\text{s. B.,m. H.}}$ mit den Indizes s. B. für die solare Bestrahlung und m. H. für die mikroklimatische Hitzebelastung bezeichnet. Für eine jeweils geringe, mittlere und hohe solare Bestrahlung beziehungsweise mikroklimatische Hitzebelastung erhalten die Indizes jeweils die Werte 1, 2 und 3. $\text{Szenario}_{2,2}$ stellt somit das Referenzszenario dar. Das $\text{Szenario}_{3,1}$ repräsentiert die Bedingungen in Bezug auf Hypothese H 5 mit einer hohen solaren Bestrahlung und einer geringen mikroklimatischen Belastung, das $\text{Szenario}_{1,3}$ repräsentiert die Bedingungen in Bezug auf Hypothese H 6 mit einer geringen solaren Bestrahlung und einer hohen mikroklimatischen Belastung und das $\text{Szenario}_{3,3}$ repräsentiert die Bedingungen in Bezug auf Hypothese H 7 mit einer hohen solaren Bestrahlung und einer hohen mikroklimatischen Belastung. Die Werte für eine repräsentative jeweils geringe und hohe solare Bestrahlung und mikroklimatische Hitzebelastung wurden anhand der Literatur beziehungsweise anhand der festgelegten Wertebereiche der entsprechenden Indikatoren gewählt.

Tabelle 4.1.: *Szenarien-Matrix für die Maßnahmenbewertung (Quelle: Eigene Darstellung).*

s. B.[1] \ m. H.[2]	1 (gering)	2 (mittel)	3 (hoch)
1 (gering)	$\text{Szenario}_{1,1}$	$\text{Szenario}_{1,2}$	$\text{Szenario}_{1,3}$
2 (mittel)	$\text{Szenario}_{2,1}$	$\text{Szenario}_{2,2}$	$\text{Szenario}_{2,3}$
3 (hoch)	$\text{Szenario}_{3,1}$	$\text{Szenario}_{3,2}$	$\text{Szenario}_{3,3}$

[1] solare Bestrahlung; [1] mikroklimatische Hitzebelastung

5. Bewertungsmethodik und Maßnahmenbewertung

5.1. Bildung der Proxyindikatoren

5.1.1. Gewichtung der Wirkungsfelder

Die Relevanz von Klimaschutz und Klimaanpassung kann auf Basis der in Kapitel 2 untersuchten Literatur als jeweils „hoch“ angesehen werden. Daher werden Klimaschutzwirkung und Klimaanpassungswirkung im Rahmen dieser Arbeit als gleichrangig betrachtet.

Insgesamt konnte für alle fünf der, in Bezug auf die zu prüfenden Hypothesen H 1 und H 2, betrachteten Wirkungsfelder eine Überschneidung der Relevanz für Klimaschutz oder Klimaanpassung mit den Wirkungspotenzialen mindestens einer der betrachteten Maßnahmen festgestellt werden. Die entsprechenden Gewichtungen zu Relevanz und Wirkungspotenzialen der Wirkungsfelder sind in Tabelle 5.1 dargestellt.

Tabelle 5.1.: *Gewichtungen zu Relevanz und Wirkungspotenzialen der Wirkungsfelder (Quelle: Eigene Darstellung auf Basis der Kapitel 2 und Kapitel 3, die entsprechenden Abschnitte sind in Klammern unter den jeweiligen Gewichtungen angegeben.)*

Wirkungsfeld	Relevanz	Wirkungspotenziale der Maßnahmen		
		PVF	FBS	MFS
Wirkungsfelder im Zusammenhang mit Klimaschutz				
Produktion erneuerbarer Strom	hoch (2.1.3, 2.2.2)	**hoch** (3.1.5)	-	**hoch** (3.3.2)
Einsparung Heiz- und Kühlenergie	hoch (2.1.3, 2.2.2)	mittel (3.1.1, 3.1.7)	mittel (3.2.5)	mittel (3.3.2)
Direkter CO_2-Entzug	mittel (2.1.3, 2.2.2)	-	gering (3.2.6)	gering (3.2.6)
Wirkungsfelder im Zusammenhang mit Klimaanpassung				
Reduzierung Hitzebelastung	hoch (2.1.4, 2.2.3)	gering (3.1.1, 3.1.6)	**hoch** (3.2.2, 3.2.4)	**hoch** (3.3.2)
Reduzierung Sturzflut Starkregen	mittel (2.1.4, 2.2.3)	-	mittel (3.2.6)	mittel (3.2.6)

Die Relevanz der *Produktion erneuerbaren Stroms* wurde aufgrund der hohen Ausbauerfordernis erneuerbarer Energien (vgl. Abschnitt 2.1.3 und Abschnitt 2.2.2) mit „hoch“ gewichtet. Für die Wirkungspotenziale der Maßnahmen erfolgte, bis auf das FBS, ebenfalls eine Gewichtung mit „hoch“ (vgl. Abschnitt 3.1.5 und Abschnitt 3.3.2). Auch die Relevanz der *Einsparung von Heiz- und Kühlenergie* wurde mit „hoch“ gewichtet (vgl. Abschnitt 2.1.3 und Abschnitt 2.2.2).

Es besteht zudem für alle Maßnahmen ein Wirkungspotenzial zur Einsparung von Heiz- und Kühlenergie, dieses wurde aufgrund der jeweils starken Abhängigkeiten von der Art der Maßnahme sowie den Gebäudeeigenschaften wie Dämmung und der verwendeten Heiz- und Kühlanlage für alle Maßnahmen nur mit „mittel“ gewichtet (vgl. Abschnitte (3.1.1, 3.1.7, 3.2.5 und 3.3.2). Ein *direkter CO_2-Entzug* aus der Atmosphäre wird in der betrachteten Literatur nicht als relevantes Wirkungsfeld bezüglich Klimaschutz in Städten betrachtet (vgl. Abschnitt 2.1.3 und Abschnitt 2.2.2), wirkt sich jedoch direkt auf die CO_2-Konzentration der Atmosphäre aus und kann den Klimaschutz somit unterstützen. Die Relevanz des Wirkungsfeldes wurde daher mit „mittel“ gewichtet. Für die PVF trifft ein direkter CO_2-Entzug nicht zu, da deren Klimaschutzwirkung auf der Produktion erneuerbaren Stroms und damit der indirekten Vermeidung von THG-Emissionen, welche ansonsten durch die Verbrennung fossiler Energieträger ausgestoßen würden, beruht. Die Wirkungspotenziale der Begrünungsmaßnahmen FBS und MFS wurden in Bezug auf einen direkten CO_2-Entzug mit „gering“ gewichtet (vgl. Abschnitt 3.2.6).

Für das Wirkungsfeld *Reduzierung von Hitzebelastungen* wurde die Relevanz mit „hoch“ gewichtet (vgl. Abschnitt 2.1.4 und Abschnitt 2.2.3). Bis auf die PVF wurden die Wirkungspotenziale der Maßnahmen ebenfalls mit „hoch“ gewichtet (vgl. Abschnitt (3.2.2, Abschnitt 3.2.4 und Abschnitt 3.3.2). Für die PVF wird ein entsprechendes Wirkungspotenzial lediglich auf Gebäudeebene im Zusammenhang mit Verschattung als Sonnenschutz oder in Kombination mit einer aktiven Hinterlüftung oder Kühlung mittels Flüssigkeiten oder Latentwärmespeicher genannt (vgl. Abschnitt 3.1.1 und Abschnitt 3.1.6). Daher erfolgte eine Gewichtung mit „gering“. Das Überflutungsrisiko durch Sturzfluten in Folge von Starkregenereignissen kann im Vergleich zur Hitzebelastung als weniger relevant eingeschätzt werden (vgl. Abschnitt 2.1.4 und Abschnitt 2.2.3). Die Relevanz des Wirkungsfeldes *Reduzierung Sturzfluten Starkregen* wurde daher mit „mittel“ gewichtet. Für die PVF konnte kein Wirkungspotenzial für dieses Wirkungsfeld nachgewiesen werden. Das Wirkungspotenzial der Begrünungsmaßnahmen FBS und MFS zur Reduzierung der Überflutungsgefahr durch Starkregen ist stark abhängig von der Gestaltung des Bewässerungssystems in Kombination mit der Sammlung von Regenwasser über (Grün-)Dachflächen und der vorhandene Speicherkapazität für das gesammelte Regenwasser (vgl. Abschnitt 3.2.6) und wurde daher mit „mittel“ gewichtet.

Wirkungsfelder, welche aufgrund eines mit „hoch“ gewichteten Wirkungspotenzials einer der Maßnahmen weiter betrachtet wurden, sind in Tabelle 5.1 unterstrichen. Im Zusammenhang mit Klimaschutz ist dies das Wirkungsfeld *Produktion erneuerbaren Stroms* und im Zusammenhang mit Klimaanpassung das Wirkungsfeld *Reduzierung von Hitzebelastungen*. Da im Weiteren nur diese beiden Wirkungsfelder in Bezug auf Klimaschutz und Klimaanpassung quantitativ betrachtet werden, entfällt eine Gewichtung der Wirkungsfelder. Die KSW entspricht somit dem berechneten Wert des Wirkungsfeldes Produktion erneuerbarer Strom. Die KAW entspricht entsprechend dem berechneten Wert des Wirkungsfeldes Reduzierung Hitzebelastung.

5.1.2. Gewählte Proxyindikatoren der Ebene 3

Zur Bestimmung der Bedarfe und Wirkungspotenziale der Maßnahmen in Bezug auf die Wirkungsfelder wurden auf der 3. Ebene insgesamt sieben Proxyindikatoren aufgestellt. Jedem Proxyindikator, beschrieben mit der Variable P, wurde ein Laufindex i zugeordnet, sodass die sieben Proxyindikatoren mit P_1 bis P_7 angegeben werden können. In Tabelle 5.2 sind die aufgestellten Proxyindikatoren dem jeweiligen Bedarf und Wirkungspotenzial der Wirkungsfelder *Produktion erneuerbarer Strom* sowie *Reduzierung Hitzebelastung* zugeordnet.

Tabelle 5.2.: *Proxyindikatoren zur Bestimmung der Bedarfe und Wirkungspotenziale der Maßnahmen in Bezug auf die Wirkungsfelder (Quelle: Eigene Darstellung auf Basis der Kapitel 2 und Kapitel 3, die entsprechenden Abschnitte sind in Klammern unter den jeweiligen Proxyindikatoren angegeben.)*

Wirkungsfeld	Bedarf	Wirkungspotenzial
Produktion erneuerbarer Strom	Bedarf Solarstrom (P_1) (2.1.3, 3.1.6)	solare Bestrahlung Fassade (P_2) (3.1.3, 3.1.4)
		Temperatureinfluss PV (P_3) (3.1.3, 3.3.2)
		Stromerzeugungspotenzial Maßnahme (P_4) (3.1.3, 3.3.2)
Reduzierung Hitzebelastung	mikroklimatische Hitzebelastung (P_5) (2.2.3)	Kühlpotenzial Maßnahme (P_7) (3.2.2, 3.3.2)
	Solare Bestrahlung Fassade (P_2) (2.2.3)	
	Vulnerabilität Bevölkerung (P_6) (2.2.3)	

Für den Bedarf an der Produktion erneuerbaren Stroms wurde eine über den Jahres- sowie Tagesverlauf zeitliche Abhängigkeit festgestellt (vgl. Abschnitt 3.1.6). Dieser individuelle *Bedarf an Solarstrom* (P_1) bezieht sich insbesondere auf den Eigenbedarf von Gebäuden und kann je nach Nutzungsart, Energiespeichermöglichkeiten und sonstiger Stromversorgung unterschiedlich ausfallen. Aufgrund der generellen Ausbauerfordernis an PV-Anlagen (vgl. Abschnitt 2.1.3) sowie der prinzipiellen Verteilungs- und Speichermöglichkeit des erzeugten Stroms (vgl. Abschnitt 3.1.2) soll der Bedarf im Folgenden für alle betrachteten Szenarien als maximal angenommen werden. Das Wirkungspotenzial zur Produktion erneuerbaren Stroms ist sowohl abhängig von den Bedingungen an der Fassade hinsichtlich verfügbarer Strahlungsenergie und Einflüssen auf die Temperatur der Module als auch von den Eigenschaften der gewählten Maßnahme (vgl. Abschnitt 3.1.3, Abschnitt 3.1.4 und Abschnitt 3.3.2). Hier wurden die Proxyindikatoren *solare Bestrahlung Fassade* (P_2), *Temperatureinfluss PV* (P_3) und *Stromerzeugungspotenzial Maßnahme* (P_4) aufgestellt.

Der Bedarf einer Reduzierung der Hitzebelastung kann über die lokale *mikroklimatische Hitzebelastung* (P_5) (vgl. Abschnitt 2.2.3) und die Erwärmung der Fassade durch die *solare Bestrahlung der Fassade* (P_2) (vgl. Abschnitt 2.2.3) sowie die *Vulnerabilität der Bevölkerung* (P_6) gegenüber extremen Hitzebedingungen (vgl. Abschnitt 2.2.3) beschrieben werden. Das Wirkungspotenzial zur Reduzierung von Hitzebelastungen ist vom *Kühlpotenzial der verwendeten Maßnahme* (P_7) abhängig (vgl. Abschnitt 3.2.2 und Abschnitt 3.3.2).

Die Verknüpfung der Proxyindikatoren P_2, P_3 und P_4 zur Bestimmung des Wirkungspotenzials der Produktion erneuerbaren Stroms erfolgt aufgrund des proportionalen Zusammenhangs der Bestrahlung, des Temperaturkoeffizienten sowie des Modulwirkungsgrades zur Leistung einer PV-Anlage (vgl. Abschnitt 3.2.2 und Abschnitt 3.3.2) multiplikativ. Die Verknüpfung der Proxyindikatoren P_5, P_2 und P_6 zur Bestimmung des Bedarfs an einer Reduzierung der Hitzebelastung erfolgt in Anlehnung an die multiplikative Verknüpfung von Klimasignal und Sensitivität in der KWVA (vgl. Buth et al., 2015, S. 45) ebenfalls multiplikativ. Für die Proxyindikatoren P_1 und P_7 entfällt eine Verknüpfung, sie bilden direkt den entsprechenden Bedarf beziehungsweise das Wirkungspotenzial ab.

Die solare Bestrahlung der Fassade (P_2) sowie das Kühlpotenzial der verwendeten Maßnahme (P_7) sind jeweils auf die Fassadenfläche bezogen. Eine großflächigere Umsetzung der Maßnahmen führt somit zu einem größeren absoluten Wirkungspotenzial (vgl. Abschnitt 3.1.4 und Abschnitt 3.2.2). Die Betrachtungen dieser Arbeit beziehen sich, soweit nicht anders angegeben, auf die flächenspezifischen Wirkungspotenziale, wobei ein linearer Zusammenhang angenommen wird.

5.1.3. Bestimmung der Proxyindikatoren der Ebene 3

Die Bestimmung der Proxyindikatoren auf Ebene 3 erfolgt auf unterschiedliche Arten. Einige Proxyindikatoren werden individuell, direkt auf einer Skala von 0 bis 1, angegeben oder direkt aus anderen Proxyindikatoren berechnet. Alle weiteren Proxyindikatoren werden aus Indikatoren der Ebene 4 berechnet. Diese Indikatoren werden mit der Variablen I und einem Index j bezeichnet. Dieser setzt sich aus dem Laufindex i des zu berechnenden Proxyindikators sowie einem weiteren, je Proxyindikator über die jeweiligen Indikatoren laufenden, Laufindex zusammen. Zum Beispiel wird mit den Indikatoren $I_{2.1}$, $I_{2.2}$ und $I_{2.3}$ der Proxyindikator P_2 berechnet. Die Bestimmung der Indikatoren und deren Wertebereiche wird in Abschnitt 5.1.4 näher beschrieben.

Tabelle 5.3 zeigt die Bestimmung der Proxyindikatoren P_1 bis P_7 und die dafür verwendeten Indikatoren der Ebene 4 sowie deren Wertebereiche für die Normalisierung. Werden die Indikatoren zur Berechnung des jeweiligen Proxyindikators über ein gewichtetes arithmetisches Mittel verknüpft, ist das entsprechende Gewicht g_j angegeben. Ist kein Wert für g_j angegeben, erfolgt die Verknüpfung multiplikativ. In der Spalte „Abschnitt“ wird auf den jeweiligen Abschnitt (oder Anhang) verwiesen, auf dessen Basis der Indikator und die genannten Werte für diesen Indikator gewählt wurden. Für einige Proxyindikatoren wurden keine Indikatoren aufgestellt. Diese werden individuell direkt auf einer Skala von 0 bis 1 angegeben oder direkt aus anderen Proxyindikatoren berechnet.

Tabelle 5.3.: *Bestimmung der Proxyindikatoren P_1 bis P_7 und dafür verwendete Indikatoren sowie deren Wertebereiche und Gewichte (Quelle: Eigene Darstellung auf Basis der Kapitel 2 und Kapitel 3, die entsprechenden Abschnitte sind in der Spalte „Abschnitt“ angegeben, für einige Wertebereiche wird auf Anhang B verwiesen.)*

j	Indikator	$I_{j\,\text{min}}$	$I_{j\,\text{max}}$	Einheit	g_j	Abschnitt
Bedarf Solarstrom (P_1)						
individuell, Annahme: $P_1 = 1$						
Solare Bestrahlung Fassade (P_2)						
2.1	Globalstrahlung	0	1200	kWh m^{-2}	-	3.1.4, B
2.2	Bestrahlungsverhältnis	0	80	%	-	3.1.4
2.3	Verschattungsgrad	100	0	%	-	3.1.4
Temperatureinfluss PV (P_3)						
Berechnung mittels P_2, P_5 und P_7 nach Gleichung (5.3)						
Stromerzeugungspotenzial Maßnahme (P_4)						
4.1	Modulwirkungsgrad	0	21,5	%	-	3.1.3
Mikroklimatische Hitzebelastung (P_5)						
5.1	Hitze Regionalklima	0	10	Tage	8	2.2.3, B
5.2	UHI-Index	0	9,1	K	9,1	2.2.3
5.3	Grünvolumenanteil	100	0	%	5,6	2.2.3
Vulnerabilität Bevölkerung (P_6)						
individuell, Annahme abhängig vom betrachteten Szenario						
Kühlpotenzial Maßnahme (P_7)						
individuell, Annahme abhängig vom betrachteten Szenario						

Die Normalisierung der Indikatoren anhand der in Tabelle 5.3 angegebenen Wertebereiche von $I_{j\,\text{min}}$ bis $I_{j\,\text{max}}$ erfolgt anhand Gleichung (5.1). Die minimalen Werte $I_{j\,\text{min}}$ sind teilweise so gewählt, dass der minimal mögliche Wert des normalisierten Indikators $I_{j\,\text{n min}}$ größer als 0 ausfällt, wenn dies die Realität besser abbildet. Da sich die Indikatoren sowohl positiv als auch negativ auf einen Proxyindikator auswirken können, sind für manche Indikatoren die minimalen Werte für die Normalisierung $I_{j\,\text{min}}$ größer als die maximalen Werte $I_{j\,\text{max}}$.

$$I_{j\,\text{n}} = \frac{I_j - I_{j\,\text{min}}}{I_{j\,\text{max}} - I_{j\,\text{min}}} \tag{5.1}$$

Die Verknüpfung der Indikatoren I_j, zur Berechnung des zugehörigen Proxyindikators P_i, durch ein gewichtetes arithmetisches Mittel erfolgt anhand der Gewichte g_j und der jeweils normalisierten Indikatoren $I_{j\,\text{n}}$ nach Gleichung (5.2).

$$P_i = \frac{\sum_j g_j \cdot I_{j\,\text{n}}}{\sum_j g_j} \tag{5.2}$$

Der Bedarf an Solarstrom (P_1) wird, wie in Abschnitt 5.1.2 beschrieben, mit $P_1 = 1$ angenommen und bedarf daher keiner Indikatoren auf Ebene 4.

Die solare Bestrahlung einer Fassade (P_2) ist proportional Abhängig von der Globalstrahlung der geographischen Position, dem Bestrahlungsverhältnis zur Globalstrahlung abhängig von der Ausrichtung und Neigung der Fassade sowie dem Verschattungsgrad der Fassade (vgl. Abschnitt 3.1.4). P_2 wird daher multiplikativ über die aufgestellten, jeweils normalisierten, Indikatoren $I_{2.1\,\mathrm{n}}$, $I_{2.2\,\mathrm{n}}$ und $I_{2.3\,\mathrm{n}}$ berechnet.

Der Temperatureinfluss auf die Stromerzeugung (P_3) ist proportional zur Erhöhung der Modultemperatur über STC (vgl. Abschnitt 3.1.3). Die Differenz zwischen Umgebungstemperatur und Modultemperatur ist, wie in Abschnitt 3.1.3 beschrieben, wiederum proportional zur Bestrahlungsstärke. Die Umgebungstemperatur wird für die Berechnung von P_3 näherungsweise über das Mikroklima (P_5) abgebildet, die Bestrahlungsstärke über die solare Bestrahlung der Fassade (P_2). Für die Berechnung von P_3 werden weiterhin folgende Annahmen getroffen:

- Eine maximale Modultemperatur von 70 °C (45 K über STC) (vgl. Abschnitt 3.1.3) wird an einem heißen Tag mit einer Umgebungstemperatur von 35 °C (10 K über STC) erreicht. Die Bestrahlung trägt zu den restlichen 35 K Temperaturerhöhung bei. Das Verhältnis des Einflusses der Bestrahlung auf die Erhöhung der Modultemperatur über STC zum Einfluss der Umgebungstemperatur liegt somit bei 3,5 zu 1.

- Bei einer Modultemperatur von 45 K über STC und einem Temperaturkoeffizienten von $-0{,}4\,\%\,\mathrm{K}^{-1}$ über STC ergibt sich eine Leistungsabnahme von 18 % (vgl. Abschnitt 3.1.3). Da sich die maximale Leistungsabnahme aufgrund der Bestrahlungsstärke mit der maximalen Leistung überlagert, wird für die ungünstigsten Bedingungen ($P_2 = 1$ sowie $P_5 = 1$) eine Leistungsreduktion der PV-Fassade aufgrund des Temperatureinflusses von insgesamt 10 % im Jahr angenommen. Für die entsprechend günstigsten Bedingungen wird von keiner temperaturbeeinflussten Leistungsreduktion ausgegangen.

- Für die Maßnahme MFS mit einer wandgebundenen modularen Begrünung wird eine Leistungserhöhung durch die Reduktion der Modultemperatur um 5 % (leicht höher im Vergleich zur Leistungserhöhung durch den Synergieeffekt einer MFS mit Gerüstkletterpflanzen, vgl. Abschnitt 3.2.2 und Abschnitt 3.3.2) angenommen. Dieser Synergieeffekt wird über die Halbierung des maximalen Temperatureinflusses von 10 % bei einem maximalen Kühlpotenzial der Maßnahme von $P_7 = 1$ abgebildet.

Basierend auf den genannten Annahmen wird der Temperatureinfluss (P_3) mittels P_2, P_5 und P_7 nach Gleichung (5.3) berechnet. Da P_3 zur Berechnung des Wirkungspotenzials in Bezug auf die Produktion erneuerbaren Stroms multiplikativ mit P_2 und P_4 verknüpft wird, soll ein nicht vorhandener Temperatureinfluss unter günstigsten Bedingungen durch $P_3 = 1$ ausgedrückt werden. Ein maximaler Temperatureinfluss von 10 % soll entsprechend über $P_3 = 0,9$ ausgedrückt werden. Dies wird erreicht, indem der maximale Temperatureinfluss von 0,1 von 1 abgezogen wird. Der Einfluss der Bestrahlung und der Umgebungstemperatur wird über das im Verhältnis 3,5 zu 1 gewichtete arithmetische Mittel abgebildet. Der Synergieeffekt

der MFS wird über den Faktor $1 - 0,5P_7$ abgebildet, sodass ein maximaler Temperatureinfluss von 0,1 bei $P_7 = 1$ halbiert wird und bei $P_7 = 0$ unbeeinflusst bleibt.

$$P_3 = 1 - 0,1 \cdot \frac{3,5P_2 + P_5}{4,5} \cdot (1 - \frac{P_7}{2}) \tag{5.3}$$

Das Stromerzeugungspotenzial der Maßnahme (P_4) wird über den normalisierten Modulwirkungsgrad ($I_{4.1\,\mathrm{n}}$) abgebildet (vgl. Abschnitt 3.1.3).

Das Mikroklima (P_5) setzt sich aus dem Regionalklima, dem Stadtklima und den lokalen mikroklimatischen Verhältnissen zusammen (vgl. Abschnitt 2.2.3). Zur Beschreibung des Mikroklimas wurden die Indikatoren $I_{5.1}$, $I_{5.2}$ und $I_{5.3}$ aufgestellt. Wie in Abschnitt 2.2.3 beschrieben, kann das Regionalklima zu Unterschieden der durchschnittlichen Lufttemperaturen im Sommer von etwa 8 K führen, das Stadtklima kann sich für eine Stadt wie Berlin mit gerundet 3,7 Millionen Einwohnern um 9,1 K aufheizen und lokale mikroklimatischen Verhältnissen können durch Änderungen des Grünvolumens und der versiegelten Fläche zu Temperaturunterschieden bis 5,6 K führen. Aufgrund der in Abschnitt 2.2.3 beschriebenen additiven Verhältnisse werden die Indikatoren $I_{5.1\,\mathrm{n}}$, $I_{5.2\,\mathrm{n}}$ und $I_{5.3\,\mathrm{n}}$ über ein gewichtetes arithmetisches Mittel verknüpft. Die Gewichte wurden anhand der beschriebenen jeweiligen maximalen Temperaturauswirkungen der Indikatoren in K mit $g_{5.1} = 8$, $g_{5.2} = 9,1$ und $g_{5.3} = 5,6$ festgelegt.

Die Vulnerabilität der Bevölkerung (P_6) bildet die potenzielle Betroffenheit von Menschen durch eine Hitzebelastung über den Aufenthalt vulnerabler Bevölkerung, wie Kindern oder Menschen mit einem hohen Alter oder Erkrankungen, in räumlicher Nähe zu der betrachteten Fassade ab (vgl. Abschnitt 2.2.3). Für eine grobe Einordnung kann der Aufenthalt vulnerabler Bevölkerung direkt auf einer Skala von $P_6 = 0$ für keinen Aufenthalt von Menschen im Innen- oder Außenraum bis $P_6 = 1$ für einen Aufenthalt besonders vulnerabler Menschen abgeschätzt werden.

Das Kühlpotenzial der jeweils untersuchten Maßnahme (P_7) konnte auf Grundlage der untersuchten Literatur nicht quantitativ beschrieben werden. Insgesamt kann, wie in den Abschnitten 3.2.2, 3.2.4 und 3.3.2 beschrieben, jedoch ein relevantes Kühlpotenzial für die Maßnahmen FBS und MFS angenommen werden, welches tendenziell für wandgebundene FBS am höchsten ist. Je nach Maßnahme soll daher eine Einschätzung von $P_7 = 0$ für kein Kühlpotenzial bis $P_7 = 1$ für ein maximales Kühlpotenzial unter den möglichen Maßnahmen getroffen werden. Für wandgebundene FBS soll somit $P_7 = 1$ gesetzt werden.

5.1.4. Bestimmung der Indikatoren auf Ebene 4

Insgesamt wurden auf der untersten Ebene (Ebene 4) sieben Indikatoren zur Berechnung der Proxyindikatoren aufgestellt.

Die jährliche *Globalstrahlung* ($I_{2.1}$) beträgt innerhalb Deutschlands je nach geografischer Position 951 kWh m^{-2} bis 1261 kWh m^{-2} und kann in Abbildung B.2 auf Seite XV in Anhang B für einen beliebigen Ort in Deutschland abgelesen werden. Da auch bei einer geringeren Globalstrahlung elektrischer Strom mittels PV erzeugt werden kann, wurde der minimale Wert für

die Normalisierung jedoch mit $I_{2.1\ \text{min}} = 0\,\text{kWh}\,\text{m}^{-2}$ festgelegt. Da Werte über $1200\,\text{kWh}\,\text{m}^{-2}$ in Deutschland ausschließlich unter räumlich stark begrenzten extremen Bedingungen in den Alpen vorkommt, wurde der maximale Wert für die Normalisierung mit $I_{2.1\ \text{max}} = 1200\,\text{kWh}\,\text{m}^{-2}$ festgelegt.

Das *Bestrahlungsverhältnis* ($I_{2.2}$) gibt das Verhältnis der solaren Bestrahlung zur Globalstrahlung für eine Fläche abhängig von deren Ausrichtung und Neigung an und kann in Abbildung 3.3 auf Seite 29 abgelesen werden. Die Neigung einer Fassade wird für die weitere Bewertung der Maßnahmen mit 90° angenommen. Für diese Neigung beträgt das Bestrahlungsverhältnis 50 % bis 80 %. Da ebenfalls Flächen mit einem theoretisch geringeren Bestrahlungsverhältnis ein Stromerzeugungspotenzial haben, wurde der minimale Wert für die Normalisierung mit $I_{2.2\ \text{min}} = 0\,\%$ festgelegt, der maximale Wert für die Normalisierung wurde mit $I_{2.2\ \text{max}} = 80\,\%$ festgelegt.

Eine Reduzierung der Bestrahlung durch Verschattungen wird über den *Verschattungsgrad* ($I_{2.3}$) abgebildet. Dieser gibt an, welcher Anteil der direkten und diffusen Bestrahlung im Verhältnis zur Bestrahlung ohne Verschattungen zurückgehalten wird. Ein Verschattungsgrad von $I_{2.3\ \text{max}} = 0\,\%$ bedeutet keine Verschattungen und wurde somit als maximaler Wert gesetzt (es trifft maximal viel Bestrahlung auf die Fassade), ein Verschattungsgrad von $I_{2.3\ \text{min}} = 100\,\%$ bedeutet keine direkte oder diffuse Bestrahlung der Fläche und wurde somit als minimaler Wert gesetzt. Da, je nach Strahlungsbedingung und gewünschter Genauigkeit, insbesondere unter Einbeziehung der diffusen Bestrahlung, die Ermittlung des Verschattungsgrades verhältnismäßig aufwendig sein kann (vgl. Abschnitt 3.1.4), soll auf dessen Bestimmung nicht weiter eingegangen werden. Für eine grobe Einordnung kann der Verschattungsgrad direkt auf der Skala von 0 % für keine Verschattungen bis 100 % für keine direkte oder diffuse Bestrahlung der Fassade aufgrund von Verschattungen abgeschätzt werden.

Der *Modulwirkungsgrad* ($I_{4.1}$) gibt den elektrischen Wirkungsgrad des PV-Moduls in % an. Der Wertebereich für die Normalisierung wurde, nach den in Tabelle 3.1 genannten maximalen Modulwirkungsgraden, auf $I_{4.1\ \text{min}} = 0\,\%$ für kein Stromerzeugungspotenzial bis $I_{4.1\ \text{max}} = 21{,}5\,\%$ für ein maximales Stromerzeugungspotenzial festgelegt.

Der Indikator *Hitze Regionalklima* ($I_{5.1}$) stellt die Hitzebelastung einer Region als durchschnittliche Anzahl heißer Tage im Referenzzeitraum von 1961 bis 1990 dar (vgl. Abschnitt 2.2.3 und Abschnitt 2.3.3). Die Hitzebelastung kann in Abbildung B.1 im Anhang B auf Seite XIV für eine beliebige Region in Deutschland abgelesen werden und kann zwischen 0 Tagen und 12 Tagen betragen. Da Werte über 10 Tagen jedoch nur an zwei räumlich stark begrenzten Gebieten am Oberrhein auftreten, wurde der Wertebereich für die Normalisierung auf $I_{5.1\ \text{min}} = 0$ Tage bis $I_{5.1\ \text{max}} = 10$ Tage festgelegt.

Das Stadtklima wird über den Effekt der städtischen Wärmeinsel abgebildet, welcher über eine vereinfachte Form des *UHI-Index* ($I_{5.2}$) beschrieben werden kann (vgl. Abschnitt 2.2.3). Der UHI-Index kann mittels Gleichung (2.1) auf Seite 10 anhand der Einwohnerzahl einer Stadt berechnet werden und gibt die maximale Intensität einer städtischen Wärmeinsel als Temperaturdifferenz zum Umland in Kelvin an. Der minimale Wert zur Normalisierung wurde auf $I_{5.2\ \text{min}} = 0\,\text{K}$ für eine Stadt unter 100 Einwohnern festgelegt, der maximale Wert mit

$I_{5.2\ \mathrm{max}} = 9{,}1\,\mathrm{K}$ für Berlin mit grob gerundet 3,7 Millionen Einwohnern.

Um räumliche mikroklimatische Unterschiede innerhalb der Stadt zu berücksichtigen, wurde der Indikator *Grünvolumenanteil* ($I_{5.3}$) aufgestellt (vgl. Abschnitt 2.2.3). Dieser gibt das Verhältnis von Grünvolumen zu versiegelter Fläche in direkter Umgebung zur betrachteten Fassade (Wohnblock, Straßenzug oder Quartier) wieder. Der Grünvolumenanteil kann für eine grobe Einordnung direkt auf der Skala von $0\,\%$ für eine komplett versiegelte Umgebung ohne Grünvolumen („Betonwüste“) bis $100\,\%$ für eine maximal begrünte Umgebung ohne versiegelte Flächen („dichter Wald“) abgeschätzt werden. Da ein höherer Grünvolumenanteil zu einem kühleren Mikroklima und damit einem geringeren Bedarf an einer Reduzierung der Hitzebelastung führt, wurde der minimale Wert zur Normalisierung mit $I_{5.3\ \mathrm{min}} = 100\,\%$ und der maximale Wert mit $I_{5.3\ \mathrm{max}} = 0\,\%$ festgelegt.

Aufgrund der Normierung der Indikatoren auf einer Skala von 0 bis 1, können sich durch deren Verknüpfung über Multiplikation oder ein gewichtetes arithmetisches Mittel theoretisch wiederum Größen von 0 bis 1 ergeben. Die normierten Indikatoren sowie die daraus berechneten Proxyindikatoren der höheren Ebenen werden daher im Folgenden in $\%$ des theoretisch maximal möglichen Wertes von 1 angegeben, auch wenn dieser praktisch nicht ganz erreicht werden kann. Für die Klimaschutzwirkung ist dies zum Beispiel aufgrund des Temperatureinflusses der Fall, für die Klimaanpassungswirkung aufgrund der Tatsache, dass sich in Deutschland die Städte mit maximalen Einwohnerzahlen nicht mit dem wärmsten Regionalklima sowie den Regionen der höchsten Globalstrahlung überlagern (vgl. Abbildung B.1 und Abbildung B.2).

5.2. Definition der Szenarien

Um die betrachteten Maßnahmen miteinander zu vergleichen, wurde das *Referenzszenario* (Szenario$_{2,2}$) wie folgt festgelegt: Da im Rahmen dieser Arbeit Flächenkonflikte in städtischen Räumen betrachtet werden sollen, wurde eine Großstadt mit einer Millionen Einwohnern ($I_{5.2} = 8\,\mathrm{K}$) und für Deutschland durchschnittlichen regionalen Werten der Globalstrahlung und des Regionalklimas von $I_{2.1} = 1054\,\mathrm{kWh\,m^{-2}}$ (vgl. Abbildung B.2) und $I_{5.1} = 5\,\mathrm{Tage}$ (vgl. Abbildung B.1) gewählt. Die genannten Bedingungen sind beispielsweise vergleichbar mit denen der Stadt Köln. Das Bestrahlungsverhältnis wurden für eine Fassade mit Ost- beziehungsweise Westausrichtung ($I_{2.2} = 70\,\%$) gewählt. Der Verschattungsgrad und der Grünvolumenanteil wurden mit jeweils pauschal mit $I_{2.3} = 30\,\%$ und $I_{5.3} = 30\,\%$ gewählt, da sich Werte von $100\,\%$ auf Situationen (völlige Abschattung der direkten und diffusen Strahlung sowie dichter Wald) beziehen, die in städtischer Umgebung nicht realistisch sind. Die für die Szenarien unterschiedlich gewählten Indikatoren sind in Tabelle 5.4 dargestellt.

Um die Szenarien mit einer geringen solaren Bestrahlung abzubilden, wurden eine Globalstrahlung von $I_{2.1} = 960\,\mathrm{kWh\,m^{-2}}$ (vgl. Abbildung B.2) sowie eine Fassade mit Nordausrichtung ($I_{2.2} = 50\,\%$) und einem Verschattungsgrad von $I_{2.3} = 60\,\%$ gewählt. Für die Szenarien mit einer hohen solaren Bestrahlung wurden entsprechend eine Globalstrahlung von $I_{2.1} = 1200\,\mathrm{kWh\,m^{-2}}$ sowie eine Fassade mit Südausrichtung ($I_{2.2} = 80\,\%$) und einem Verschattungsgrad von $I_{2.3} = 0\,\%$ gewählt.

Tabelle 5.4.: *Ausprägung der für die Szenarien unterschiedlich gewählten Indikatoren (Quelle: Eigene Darstellung).*

j	Indikator	I_j			Einheit
	s. B.[1]	1 (gering)	2 (mittel)	3 (hoch)	
2.1	Globalstrahlung	960	1054	1200	kWh/m^2
2.2	Bestrahlungsverhältnis	50	70	80	%
2.3	Verschattungsgrad	60	30	0	%
	m. H.[2]	1 (gering)	2 (mittel)	3 (hoch)	
5.1	Hitze Regionalklima	1	5	10	Tage
5.2	UHI-Index	6	8	9,1	K
5.3	Grünvolumenanteil	60	30	0	%

[1]solare Bestrahlung , [2]mikroklimatische Hitzebelastung

Um die Szenarien mit einer geringen mikroklimatischen Hitzebelastung abzubilden, wurden eine Hitzebelastung durch das Regionalklima von $I_{5.1} = 1$ Tag (vgl. Abbildung B.1), eine Stadt mit 100 000 Einwohnern ($I_{5.2} = 6$ K) sowie ein Grünvolumenanteil von $I_{5.3} = 60\,\%$ gewählt. Für die Szenarien mit einer hohen mikroklimatischen Hitzebelastung wurden eine Hitzebelastung durch das Regionalklima von $I_{5.1} = 10$ Tagen, eine Stadt mit 3,7 Millionen Einwohnern ($I_{5.2} = 9{,}1$ K) sowie ein Grünvolumenanteil von $I_{5.3} = 0\,\%$ gewählt.

Um den Flächenkonflikt zwischen PV und Begrünung zu verdeutlichen, wurden der Bedarf an Solarstrom sowie die Vulnerabilität der Bevölkerung für alle betrachteten Szenarien mit $P_1 = 1$ und $P_6 = 1$ gewählt.

Das Stromerzeugungspotenzial sowie das Kühlpotenzial der Maßnahme P_4 und P_7 ergeben sich aus den, im Folgenden näher definierten, betrachteten Maßnahmen. Diese wurden, ebenfalls um den Flächenkonflikt zu verdeutlichen, jeweils mit einem maximalen Stromerzeugungspotenzial beziehungsweise Kühlpotenzial gewählt:

PVF Vorgehängte hinterlüftete Photovoltaik-Fassade mit monokristallinen Siliziumzellen und einem Modulwirkungsgrad von $I_{4.1} = 21{,}5\,\%$. $P_7 = 0$.

FBS Wandgebundene modulare Fassadenbegrünung mit einem Kühlpotenzial von $P_7 = 1$. $I_{4.1} = 0\,\%$.

MFS Kombination aus einer wandgebundenen modularen Fassadenbegrünung und, auf einer zweiten Ebene mit einem Abstand von 45 cm vorgehängten, Photovoltaik-Modulen aus monokristallinen Siliziumzellen und einer Restlichtdurchlässigkeit von 30 %, womit sich im Vergleich zur PVF ein Modulwirkungsgrad von $I_{4.1} = 15\,\%$ ergibt. $P_7 = 1$

5.3. Ergebnisse der Maßnahmenbewertung

Da der Bedarf im Wirkungsfeld Produktion erneuerbarer Strom über $P_1 = 1$ als Maximal gewählt wurde, entspricht der berechnete Wert dieses Wirkungsfeldes und damit der Klimaschutzwirkung (KSW) dem Produkt aus den Proxyindikatoren P_2, P_3 und P_4. Da für das Wirkungsfeld Reduzierung von Hitzebelastungen das Wirkungspotenzial der Begrünungsmaßnahmen über $P_7 = 1$ als Maximal gewählt wurde, entspricht für diese Maßnahme der berechnete Wert dieses Wirkungsfeldes und damit der Klimaanpassungswirkung (KAW) dem gewichteten arithmetischen Mittel der Proxyindikatoren P_5, P_2 und P_6. Die PVF hat keine KAW.

Die berechneten Werte der KSW und KAW für die Betrachteten Maßnahmen PVF, FBS und MFS in Szenario$_{1,1}$ bis Szenario$_{3,3}$ sind in Tabelle 5.5 dargestellt. In der Tabelle grau hinterlegt sind das Referenzszenario (Szenario$_{2,2}$) mit einer jeweils mittleren solaren Bestrahlung und mikroklimatischen Hitzebelastung sowie die in Bezug auf die Hypothesen H 5 bis H 7 betrachteten Szenarien mit einer hohen solaren Bestrahlung und einer geringen mikroklimatischen Hitzebelastung (Szenario$_{3,1}$), mit einer geringen solaren Bestrahlung und einer hohen mikroklimatischen Hitzebelastung (Szenario$_{1,3}$) sowie mit einer hohen solaren Bestrahlung und einer hohen mikroklimatischen Hitzebelastung (Szenario$_{3,3}$). Um den Synergieeffekt der MFS in Bezug auf die Verminderung des Temperatureinflusses zu verdeutlichen, wurde in Szenario$_{3,3\text{-Synergie}}$ die MFS mit einer PVF gleicher Restlichtdurchlässigkeit ($I_{4.1} = 15\,\%$, vgl. Tabelle C.10) betrachtet. Die genannten Szenarien werden im Folgenden genauer betrachtet und sind in Abbildung 5.1 bis Abbildung 5.5 grafisch dargestellt. Die berechneten Werte aller Proxyindikatoren für die betrachteten Szenarien sind in Tabelle C.1 bis Tabelle C.10 in Anhang C aufgeführt.

Tabelle 5.5.: *Klimaschutzwirkung (KSW) und Klimaanpassungswirkung (KAW) der betrachteten Maßnahmen unter den aufgestellten Szenarien (Quelle: Eigene Darstellung).*

s. B.[1] \ m. H.[2]		1 (gering)		2 (mittel)		3 (hoch)	
	Maßn.[3]	KSW	KAW	KSW	KAW	KSW	KAW
1 (gering)	PVF	20 %	0 %	19 %	0 %	19 %	0 %
	FBS	0 %	8 %	0 %	14 %	0 %	20 %
	MFS	14 %	8 %	14 %	14 %	14 %	20 %
2 (mittel)	PVF	51 %	0 %	51 %	0 %	50 %	0 %
	FBS	0 %	21 %	0 %	38 %	0 %	54 %
	MFS	37 %	21 %	36 %	38 %	36 %	54 %
3 (hoch)	PVF	91 %	0 %	91 %	0 %	90 %	0 %
	FBS	0 %	40 %	0 %	70 %	0 %	100 %
	MFS	67 %	40 %	67 %	70 %	66 %	100 %

[1] solare Bestrahlung; [2] mikroklimatische Hitzebelastung; [3] Maßnahme
Zeilenindex s. B. und Spaltenindex m. H. ergeben Szenario$_{\text{s. B.,m. H.}}$

Für das Referenzszenario (Szenario$_{2,2}$) ergab sich eine KSW von 51 % für die PVF und 36 % für die MFS sowie eine KAW von 38 % für das FBS und die MFS (siehe Abbildung 5.1).

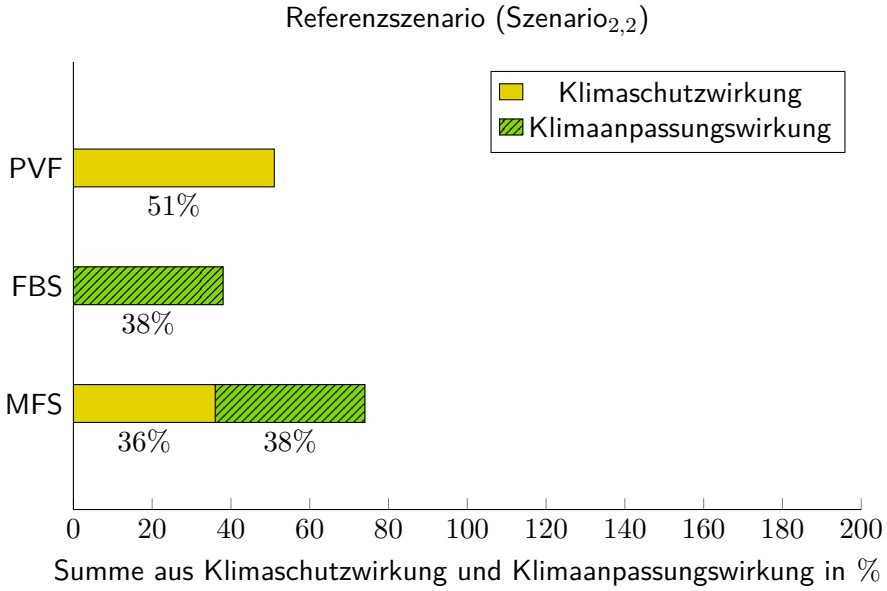


Abbildung 5.1.: *Klimaschutzwirkung und Klimaanpassungswirkung der betrachteten Maßnahmen (Photovoltaik-Fassade (PVF), Fassadenbegrünung (FBS) sowie eine Kombination aus Photovoltaik und Begrünung an einer Fassade (MFS)) im Referenzszenario (Szenario$_{2,2}$ mit einer mittleren solarer Bestrahlung und mittleren mikroklimatischen Hitzebelastung) (Quelle: Eigene Darstellung).*

Insgesamt zeigte sich bei steigender solarer Bestrahlung eine Zunahme der KSW als auch der KAW. Die KSW betrug für das Szenario$_{1,2}$ mit geringer solarer Bestrahlung 19 % für die PVF und 14 % für die MFS sowie für das Szenario$_{3,2}$ mit hoher solarer Bestrahlung 91 % für die PVF und 67 % für die MFS. Somit ergab sich eine Differenz von maximal 72 % für die PVF und 53 % für die MFS. Die KAW betrug unter den genannten Szenarien 14 % und 70 % für das FBS als auch die MFS. Die maximale Differenz lag somit bei 56 %.

Die mikroklimatische Hitzebelastung hatte auf die KSW nur einen geringen Einfluss von maximal 1 %. Für die KAW zeigte sich eine deutlich, wenn auch im Vergleich zum Einfluss der solaren Bestrahlung geringere, Zunahme um 33 %. Diese lag für die Begrünungsmaßnahmen zwischen 21 % in Szenario$_{2,1}$ mit einer geringen mikroklimatischen Hitzebelastung und 54 % in Szenario$_{2,3}$ mit einer hohen mikroklimatischen Hitzebelastung.

Für das Szenario$_{3,1}$ mit hoher solare Bestrahlung und geringer mikroklimatischen Hitzebelastung ergab sich eine KSW von 91 % für die PVF und 67 % für die MFS. Die KAW fiel mit jeweils 40 % für die Begrünungsmaßnahmen geringer aus (siehe Abbildung 5.2). Für das Szenario$_{1,3}$ mit geringer solaren Bestrahlung und hoher mikroklimatischen Hitzebelastung ergab sich eine KSW von 19 % für die PVF und 14 % für die MFS. Die KAW fiel mit jeweils 20 % für die Begrünungsmaßnahmen leicht höher aus (siehe Abbildung 5.3). In Szenario$_{3,3}$ mit jeweils hoher solare Bestrahlung und mikroklimatische Hitzebelastung zeigte sich eine KSW von 90 % für die PVF und 66 % für die MFS. Die KAW fiel mit jeweils 100 % für die Begrünungsmaßnahmen höher aus (siehe Abbildung 5.4). In Szenario$_{3,3\text{-Synergie}}$ zeigte die PVF mit 63 % eine leicht geringere KSW im Vergleich zur MFS (siehe Abbildung 5.5).

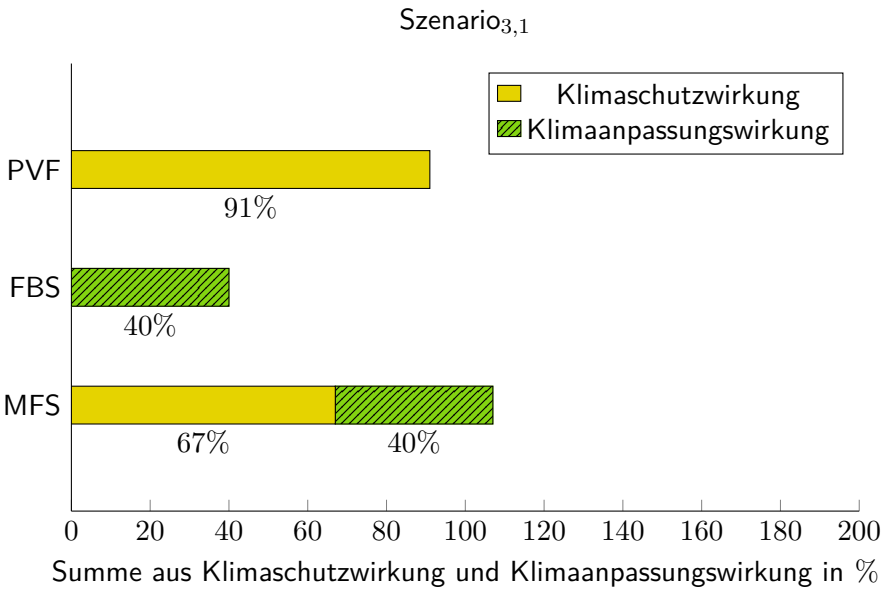


Abbildung 5.2.: *Klimaschutzwirkung und Klimaanpassungswirkung der betrachteten Maßnahmen (Photovoltaik-Fassade (PVF), Fassadenbegrünung (FBS) sowie eine Kombination aus Photovoltaik und Begrünung an einer Fassade (MFS)) in Szenario$_{3,1}$ (hohe solare Bestrahlung und geringe mikroklimatische Hitzebelastung) (Quelle: Eigene Darstellung).*

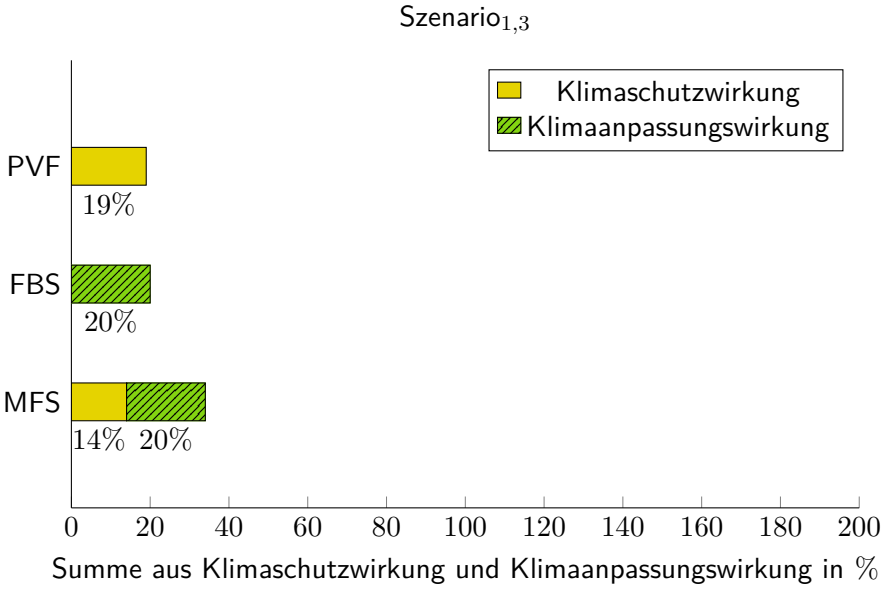


Abbildung 5.3.: *Klimaschutzwirkung und Klimaanpassungswirkung der betrachteten Maßnahmen (Photovoltaik-Fassade (PVF), Fassadenbegrünung (FBS) sowie eine Kombination aus Photovoltaik und Begrünung an einer Fassade (MFS)) in Szenario$_{1,3}$ (geringe solare Bestrahlung und hohe mikroklimatische Hitzebelastung) (Quelle: Eigene Darstellung).*

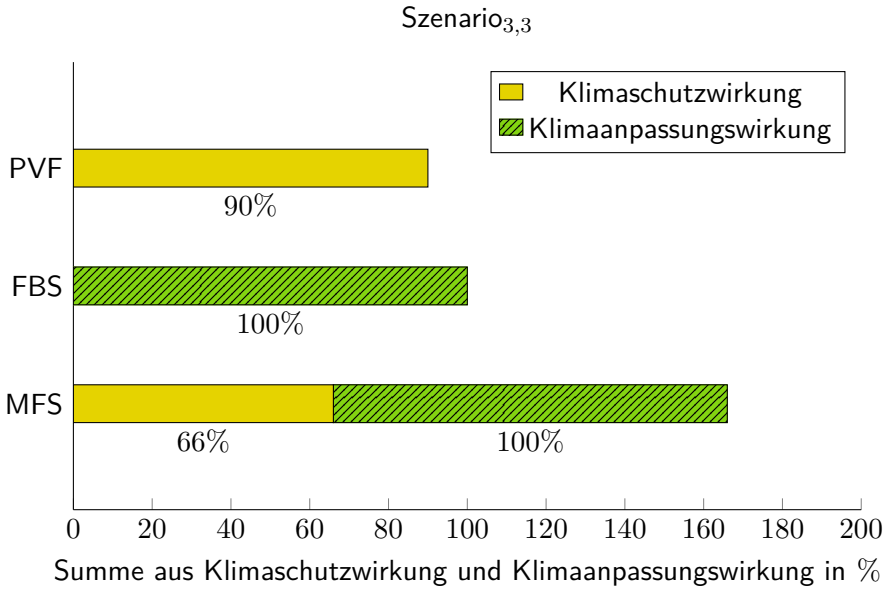


Abbildung 5.4.: *Klimaschutzwirkung und Klimaanpassungswirkung der betrachteten Maßnahmen (Photovoltaik-Fassade (PVF), Fassadenbegrünung (FBS) sowie eine Kombination aus Photovoltaik und Begrünung an einer Fassade (MFS)) in Szenario$_{3,3}$ (hohe solare Bestrahlung und hohe mikroklimatische Hitzebelastung) (Quelle: Eigene Darstellung).*

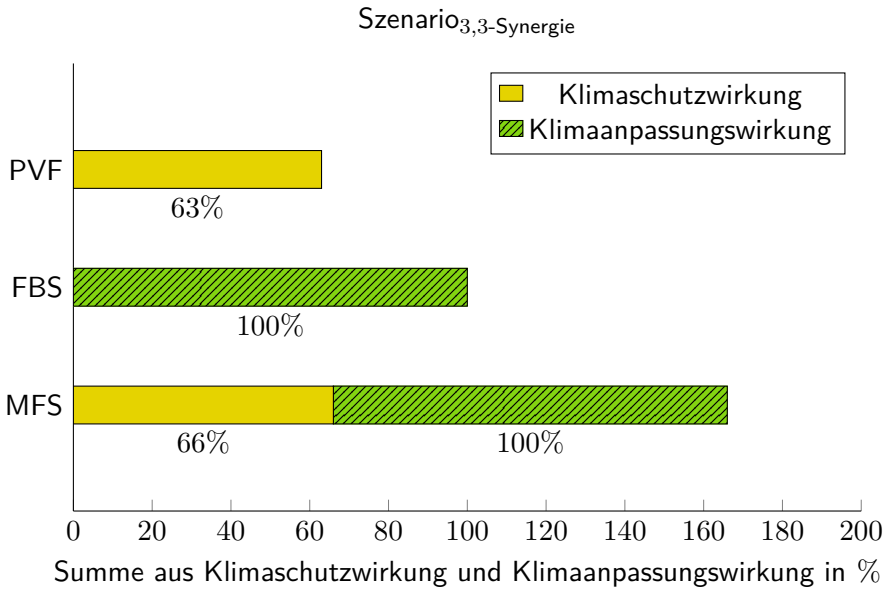


Abbildung 5.5.: *Klimaschutzwirkung und Klimaanpassungswirkung der betrachteten Maßnahmen (Photovoltaik-Fassade (PVF), Fassadenbegrünung (FBS) sowie eine Kombination aus Photovoltaik und Begrünung an einer Fassade (MFS)) in Szenario$_{3,3\text{-}Synergie}$ (hohe solare Bestrahlung und hohe mikroklimatische Hitzebelastung bei gleichem Modulwirkungsgrad der PVF und MFS) (Quelle: Eigene Darstellung).*

6. Diskussion der Bewertungsmethodik und der Maßnahmenbewertung

6.1. Bewertung der Methodik und Interpretation der Bewertungsergebnisse

6.1.1. Überprüfung der Hypothesen H 1 und H 2 in Bezug auf die betrachteten Wirkungsfelder

Durch die Aufstellung und Bestimmung von Proxyindikatoren konnten für definierte Szenarien an einer theoretischen städtischen Gebäudefassade die Klimaschutzwirkung (KSW) und Klimaanpassungswirkung (KAW) der betrachteten Maßnahmen Photovoltaik, Begrünung und einer Kombination aus beidem quantitativ bestimmt werden. Dabei soll darauf hingewiesen werden, dass ihm Rahmen dieser Arbeit lediglich die Wirkungsfelder *Produktion erneuerbarer Strom* sowie *Reduzierung von Hitzebelastungen* in die quantitative Betrachtung eingeflossen sind.

Für die Wirkungsfelder *Einsparung von Heiz- und Kühlenergie* sowie *Überflutungsrisiko durch Sturzfluten in Folge von Starkregenereignissen* wurde eine starke Abhängigkeit von individuellen gebäudespezifischen Bedingungen, wie dem Zustand der Gebäudedämmung oder der Möglichkeit zum Sammeln und Speichern von Regenwasser, festgestellt. Je nach Ausprägung dieser Bedingungen, kann auch in diesen Wirkungsfeldern eine relevante KSW und KAW der Maßnahmen bestehen. Für das Wirkungsfeld *direkter CO_2-Entzug aus der Atmosphäre* zeigte sich jedoch nur ein, im Vergleich zu den anderen Wirkungsfeldern, geringes Wirkungspotenzial unter den betrachteten Maßnahmen.

Die Hypothesen H 1 und H 2 konnten damit insoweit bestätigt werden, als alle genannten Wirkungsfelder qualitativ in Zusammenhang mit den betrachten Maßnahmen als auch mit Klimaschutz und Klimaanpassung gebracht werden konnten. Eine quantitative Bestimmung der Einsparungen von Heiz- und Kühlenergie sowie der Reduzierung eines Überflutungsrisikos durch Sturzfluten in Folge von Starkregenereignissen ist aufgrund der starken Abhängigkeit von individuellen gebäudespezifischen Bedingungen jedoch nur bedingt möglich und war daher nicht Teil dieser Arbeit. Der direkte CO_2-Entzug aus der Atmosphäre wurde aufgrund des geringen Wirkungspotenzials nicht in die quantitative Betrachtung einbezogen.

Neben den auf Basis der Hypothesen untersuchten Wirkungsfeldern konnten infolge der Literaturrecherche weitere Wirkungsfelder, wie die Verbesserung der Luftqualität durch eine Begrünung, die Regulierung des kleinen Wasserkreislaufs durch die Verdunstung von Regenwasser oder die Dezentralisierung der Energieversorgung durch den Einsatz von Photovoltaik an

Gebäuden (vgl. Abschnitte 2.2.3, 3.2.6 und 3.1.6), festgestellt werden, die sich potenziell auf die KAW der betrachteten Maßnahmen auswirken könnten. Neben der Wirkung auf Klimaschutz und Klimaanpassung stehen zudem weiter Wirkungspotenziale in Zusammenhang mit den betrachteten Maßnahmen, wie zum Beispiel eine Verbesserung der Lebensqualität und der Gesundheit, eine Reduktion von Luftschadstoffen und Lärmbelästigung sowie optische Gestaltungsmöglichkeiten am Gebäude. Photovoltaik und Begrünung können somit in vielen Fällen als „No Regret"-Maßnahmen betrachtet werden.

In Bezug auf die berechnete KSW der Maßnahmen ist zu beachten, dass sich diese jeweils nur auf die Bruttowirkung bezieht. Somit wurde eine *Ökobilanz* bezüglich der bei Herstellung, Transport, Installation und Wartung der Maßnahmen anfallenden Energiebedarfe und THG-Emissionen nicht einbezogen. Da bei der Herstellung von PV-Modulen je nach Zelltyp hohe Energiebedarfe und damit THG-Emissionen anfallen können, ist die Betrachtung der sogenannten *Energy-Payback-Time* in Bezug auf die netto KSW relevant (vgl. Shukla et al., 2017). Diese gibt die Zeit an, die benötigt wird, um die für die Herstellung eines PV-Moduls benötigte Energie zu erzeugen und ist somit abhängig vom Modul selbst als auch von den Standortbedingungen der PV-Anlage. Auch für Begrünungsmaßnahmen fallen im Rahmen einer Ökobilanz THG-Emissionen an, die sich unter den FBS stark unterscheiden können (vgl. Feng & Hewage, 2014b).

6.1.2. Überprüfung der Hypothesen H 3 und H 4 in Bezug auf die Einflüsse der solaren Bestrahlung und mikroklimatischen Hitzebelastung

Die solare Bestrahlung zeigte eine deutliche Wirkung sowohl auf die KSW als auch auf die KAW der betrachteten Maßnahmen. Ausgehend vom Referenzszenario konnten Unterschiede der KSW, zwischen Szenarien mit einer jeweils hohen und geringen solaren Bestrahlung, von 53 % für die MFS bis 72 % für die PVF quantifiziert werden. Für die KAW ergab sich ein maximaler Unterschied von 56 % für das FBS als auch für die MFS. Abgesehen von der regional unterschiedlichen Globalstrahlung wird die solare Bestrahlung von Bedingungen auf der Gebäudeebene in Form von Ausrichtung und Verschattung der Fassade beeinflusst. Die Hypothese H 3 konnte damit insofern bestätigt werden, als die Wirkungsfelder als Proxyindikatoren zur Beschreibung der KSW und KAW auf der Gebäudeebene von der solaren Bestrahlung beeinflusst wurden. Ein Einfluss gebäudespezifischer Bedingungen konnte, wie oben beschrieben, für die Einsparung von Heiz- und Kühlenergie sowie die Retention von Regenwasser bei Starkregenereignissen festgestellt werden. Dieser wurde jedoch nicht weiter quantifiziert.

Der Einfluss des lokalen Mikroklimas konnte ebenfalls quantitativ bestätigt werden. Er fiel bei den Berechnungen im Vergleich zu dem der solaren Bestrahlung jedoch geringer aus. Für die KSW ergab sich, zwischen Szenarien mit einer jeweils hohen und geringen mikroklimatischen Hitzebelastung, ein maximaler Unterschiede von 1 % bei der PVF und der MFS, für die KAW ergab sich für das FBS und die MFS jeweils ein maximaler Unterschied von 33 %. Das Mikroklima selbst hängt von lokalen Gegebenheiten auf der Quartiersebene, wie dem Versiegelungsgrad und dem Grünvolumen, ab, wird aber auch von den klimatischen Gegebenheiten auf städtischer und

regionaler Ebene beeinflusst. Hypothese H 4 konnte damit insofern bestätigt werden, als das lokale Mikroklima die KAW auf Quartiersebene beeinflusst. Jedoch konnte ein entsprechender Einfluss auf die KSW nicht bestätigt werden.

Der geringe Einfluss des lokalen Mikroklimas auf die KSW lässt sich mit der geringeren Gewichtung des entsprechenden Proxyindikators P_5 bei der Bestimmung des Temperatureinflusses mittels Gleichung (5.3) sowie der generellen Begrenzung des Temperatureinflusses auf 10 % erklären (vgl. Abschnitt 5.1.3). Der, im Vergleich zum Mikroklima, größere Einfluss der solaren Bestrahlung auf die KAW lässt sich zum einen über die Definition der Szenarien erklären. Hier wurden die Proxyindikatoren solare Bestrahlung (P_2) und mikroklimatische Hitzebelastung (P_5) nicht direkt festgelegt, sondern ergaben sich aus der Wahl der Ausprägung der jeweils zugrundeliegenden Indikatoren. Diese waren für P_2 die Globalstrahlung, das Bestrahlungsverhältnis und der Verschattungsgrad ($I_{2.1}$ bis $I_{2.3}$) sowie für P_5 die Hitzebelastung des Regionalklimas, der UHI-Index und der Grünvolumenanteil ($I_{5.1}$ bis $I_{5.3}$). Da für diese Indikatoren unabhängig voneinander jeweils möglichst realistische Werte für Szenarien jeweils geringer und hoher solarer Bestrahlung und mikroklimatischer Hitzebelastung angenommen wurden, ergaben sich für die daraus gebildeten Proxyindikatoren P_2 und P_5 unterschiedlich große Wertebereiche. So war $P_2 = 0{,}2$ im Szenario mit geringer solarer Bestrahlung und $P_2 = 1$ im Szenario mit hoher solarer Bestrahlung (vgl. Tabelle C.2 und Tabelle C.8). Hingegen war $P_5 = 0{,}4$ im Szenario mit geringer mikroklimatischer Hitzebelastung und $P_5 = 1$ im Szenario mit hoher mikroklimatischer Hitzebelastung (vgl. Tabelle C.4 und Tabelle C.6). Da generell städtische Räume betrachtet wurden, wurde die Einwohnerzahl (Einfluss über den UHI-Index) für das Szenario mit geringer mikroklimatischer Hitzebelastung mit 100 000 Einwohnern gewählt. Wäre für dieses Szenario eine kleinere Einwohnerzahl gewählt worden, hätte sich somit ein größerer Wertebereich für P_5 ergeben.

Zum anderen lässt sich der größere Einfluss der solaren Bestrahlung über die Art der Verknüpfung der jeweiligen Proxyindikatoren mikroklimatische Hitzebelastung (P_2) und solare Bestrahlung (P_5) zur Bildung des Bedarfs in Bezug auf eine Reduzierung der Hitzebelastung erklären. Die multiplikative Verknüpfung führte bei einer mittleren solaren Bestrahlung ($P_2 = 0{,}54$, vgl. Tabelle C.5) zu einer beinahe Halbierung der Auswirkung durch die mikroklimatische Hitzebelastung (P_5). Hier ist weiter zu prüfen, ob die gewählte Art der Verknüpfung den realen Verhältnissen entspricht. So ist auch ohne solare Bestrahlung der Fassade ein Bedarf an Reduktion der Hitzebelastung vorstellbar. Auf der anderen Seite wurde in der untersuchten Literatur auch eine Abhängigkeit der Kühlwirkung von Fassadenbegrünungen von den Lichtverhältnissen genannt (vgl. Abschnitt 3.2.7), welche über das Kühlpotenzial der Maßnahme (P_7) hier nicht berücksichtigt wurde.

6.1.3. Überprüfung der Hypothesen H 5 bis H 7 in Bezug auf die betrachteten Szenarien

In Szenario$_{3,1}$ mit einer hohen solaren Bestrahlung und einer geringen mikroklimatischen Hitzebelastung konnte mit 91 % eine mehr als doppelt so große KSW der PVF im Vergleich zur

KAW des FBS mit 40 % festgestellt werden. Hier wäre die PVF hinsichtlich der gesamtheitlich betrachteten Wirkung auf Klimaschutz und Klimapassung somit dem FBS vorzuziehen. Die MFS erreichte mit 67 % KSW und 40 % KAW jedoch die höchste Gesamtwirkung von 107 %. Durch die Kombination von PV und Begrünung lassen sich somit Gesamtwirkungen als Summe der KSW und KAW von über 100 % in Bezug auf die maximal mögliche Wirkung der jeweiligen Einzelmaßnahmen auf derselben Fläche erreichen. Die Hypothese H 5, dass für Fassaden mit einer hohen solaren Bestrahlung in einer mikroklimatischen Umgebung mit geringer Hitzebelastung die Photovoltaik die geeignetste Lösung unter den betrachteten Maßnahmen hinsichtlich Klimaschutz und Klimaanpassung darstelle, lässt sich damit insoweit bestätigen, als auf Basis der genannten Ergebnisse die Photovoltaik in diesem Fall einer Begrünung, jedoch nicht der Kombination beider Maßnahmen vorzuziehen ist.

Für das Szenario$_{1,3}$ mit einer geringen solaren Bestrahlung und einer hohen mikroklimatischen Hitzebelastung konnte im Vergleich zur KSW des PVF nur eine leicht höhere KAW der FBS von 20 % nachgewiesen werden. An dieser Stelle soll auf die oben beschriebene Unsicherheit in Bezug auf die Verknüpfung der mikroklimatische Hitzebelastung (P_2) mit der solaren Bestrahlung (P_5) zur Bildung des Bedarfs einer Reduzierung der Hitzebelastung verwiesen werden. Würde diese anders gewählt, könnten sich deutlich höhere Werte für die KAW auch bei geringer solarer Bestrahlung ergeben. Auf Basis der vorliegenden Ergebnisse ist eine Bestätigung der Hypothese H 6, dass bei geringer solarer Bestrahlung und hoher mikroklimatischer Hitzebelastung an einer Fassade die Begrünung einer Photovoltaik vorzuziehen sei, somit nur begrenzt möglich. Die Kombination beider Maßnahmen zeigte in Szenario$_{1,3}$ ebenfalls eine höhere Gesamtwirkung von 34 %, jedoch sollte insbesondere bei geringer solarer Bestrahlung die oben erwähnte Energy-Payback-Time berücksichtigt werden.

Die Hypothese H 7, dass auf Fassaden mit einer hohen solaren Bestrahlung in einer mikroklimatischen Umgebung mit hoher Hitzebelastung, Photovoltaik und Begrünung potenziell in Konflikt zueinander stünden und daher die Kombination beider Maßnahmen in diesem Fall die geeignetste Lösung hinsichtlich Klimaschutz und Klimaanpassung darstelle, konnte auf Basis der vorliegenden Ergebnisse bestätigt werden. Bei einer hohen solaren Bestrahlung und einer hohen mikroklimatischen Hitzebelastung in Szenario$_{3,3}$ wurden für die PVF und die MFS eine KSW von 90 % und 66 % berechnet sowie für das FBS und die MFS eine KAW von jeweils 100 %. Damit konnte eine hohe Wirksamkeit und damit eine potenzielle Konkurrenz der Maßnahmen PV und Begrünung für dieses Szenario aufgezeigt werden. Die Kombination beider Maßnahmen in der MFS erreichte mit 166 % eine deutlich höhere Gesamtwirkung im Vergleich zu den Einzelmaßnahmen. Auf Basis der oben genannten Ergebnisse lässt sich zudem schließen, dass die MFS auch in Situationen einer geringeren Flächenkonkurrenz zwischen Photovoltaik und Begrünung, vor allen bei geringerer mikroklimatischer Hitzebelastung, den Einzelmaßnahmen vorzuziehen sein könnte.

Zudem konnte im Szenario$_{3,3\text{-Synergie}}$ eine leicht höhere KSW der MFS im Vergleich zur PVF bei gleichem Modulwirkungsgrad von $I_{4.1} = 15\,\%$ beider Maßnahmen nachgewiesen werden. Je nach Restdurchlässigkeit der Maßnahme kann die KSW der MFS im Vergleich zur PVF somit bezogen auf die Fassadenfläche geringer ausfallen, bezogen auf die Zellfläche kann die KSW

der MFS, und damit die Energy-Payback-Time, jedoch günstiger ausfallen.

6.1.4. Überprüfung der Hypothesen H 8 bis H 10 in Bezug auf die Wirkungsebenen

Die Klimaanpassungswirkung kann, in Bezug auf eine Reduzierung der Hitzebelastung durch die Fassadenbegrünung, auf Basis der betrachteten Literatur (vgl. Abschnitt 3.2.4), sowohl auf der Gebäude- als auch der Quartiersebene verortet werden. Bei großflächiger Umsetzung in Kombination mit weiteren Begrünungsmaßnahmen sind jedoch auch Effekte auf Stadtebene feststellbar (vgl. hierzu auch Abschnitt 2.3.4). Aufgrund der Wirkung über die THG-Konzentrationen in der Atmosphäre, wirkt sich die Substitution fossiler Energieträger durch einen vermehrten Einsatz der Photovoltaik auf globaler Ebene aus (vgl. Abschnitt 3.1.5 und Abschnitt 2.1.1). Die Hypothese H 8, dass die Klimaanpassungswirkung der Maßnahmen auf der Gebäude- und Quartiersebene zu verorten sei sowie die Klimaschutzwirkung auf der globalen Ebene, konnte somit bestätigt werden.

Für beide Maßnahmen, PVF und FBS und damit auch für die MFS, kann aus Abschnitt 2.3.4 gefolgert werden, dass sich durch die Betrachtung der Quartiersebene Synergien infolge von Verknüpfungen und Skaleneffekten ergeben können, welche die Wirkung und insbesondere die Umsetzung der Maßnahmen beeinflussen. In Anlehnung an die in Abschnitt 2.3.4 betrachtete energetische Sanierung auf Quartiersebene, kann für die hier betrachteten Maßnahmen vermutet werden, dass sich Defizite der Umsetzungsmöglichkeiten, etwa an denkmalgeschützten Gebäuden oder an Fassaden geringer solarer Bestrahlung, auf der Quartiersebene durch eine entsprechend umfangreichere Umsetzung der Maßnahmen an gut geeigneten Gebäudefassaden ausgleichen lassen. So ließen sich entsprechende Potenziale, gerade in Hinblick auf die betrachteten Szenarien mit einer hohen solaren Bestrahlung, stärker nutzen. Damit könnte auf Quartiersebene insgesamt eine höhere KSW und KAW erreicht werden. Für die PVF können zudem, durch eine energetische Vernetzung, Bedarf und Erzeugung besser aneinander angepasst werden, wodurch sich höhere Eigennutzungsgrade ergeben können (vgl. auch Abschnitt 3.1.6).

Bei Betrachtung der Wirtschaftlichkeit einer Umsetzung der Maßnahmen können auf Quartiersebene insbesondere Kostensenkungen durch Skaleneffekte eine Rolle spielen, etwa bei einer gesammelten Beschaffung der Maßnahmen, der Baumaterialien oder benötigter Baugeräte. Für die Begrünung konnte auf Basis der untersuchten Literatur ein Zusammenhang zwischen der Gesamtfläche begrünter Fassaden und der Gesamtreduzierung der Hitzebelastung in deren Umgebung, wie einer Straßenschlucht, festgestellt werden (vgl. Abschnitt 3.2.2 und Abschnitt 3.2.4). Jedoch konnten keine Aussagen in Bezug auf einen Einfluss der Gesamtfläche begrünter Fassaden auf die flächenbezogene Wirkung getroffen werden. Ob bei großskaliger Umsetzung von Fassadenbegrünungen auf Quartiers- oder Stadtebene auch emergente Verhaltensweisen, im Sinne von Effekten, die nur aus den Eigenschaften der einzelnen Maßnahmen nicht vorhersehbar waren (vgl. Goldstein, 1999), auftreten können, ist bisher noch nicht hinreichend untersucht, um hier Aussagen treffen zu können. Die Hypothese H 9, dass auf Quartiersebene Skaleneffekte die Wirkung der Maßnahmen auf Klimaschutz und Klimaanpassung beeinflussen könnten, konnte

somit nur bedingt bestätigt werden, da sich die beschriebenen Skaleneffekte auf Quartiersebene mehr auf die Umsetzung der Maßnahmen, als auf deren Wirkung auswirkten. Durch die beschriebenen Verknüpfungen kann es auf Quartiersebene jedoch potenziell zu höheren Gesamtwirkungen der KSW und KAW kommen.

In Abschnitt 2.3.4 konnten ebenfalls potenzielle Interessenkonflikte auf Gebäude- und Quartiersebene am Beispiel der energetischen Gebäudesanierung festgestellt werden. Diese basieren auf unterschiedlichen Eigentums- und Nutzungsverhältnissen der Gebäude. Dabei spielen insbesondere für professionell Vermietende finanzielle Faktoren eine entscheidende Rolle. Auf die im Rahmen der Arbeit betrachteten Maßnahmen bezogen, kann daraus gefolgert werden, dass auch hier Kosten und Nutzen nicht zwangsläufig bei derselben Partei liegen und sich somit potenzielle Interessenkonflikte ergeben können. So fallen Kosten etwa für Beschaffung, Installation und Wartung an, während der Nutzen etwa bei geringeren Stromkosten durch eine Eigennutzung des PV-Stroms, geringeren Kosten für Heiz- und Kühlenergie oder einer geringeren thermischen Belastung der Gebäudenutzenden aber auch der Passierenden liegen kann. Insbesondere durch eine KAW der Begrünungsmaßnahmen über das Gebäude hinaus auf der Quartiersebene, ist eine genaue Zuordnung des Nutzens hier zusätzlich erschwert. Die Förderung entsprechender Maßnahme, wie zum Beispiel in Hamburg (vgl. BUKEA, 2019), kann hier finanzielle Anreize schaffen. Während für Photovoltaik-Fassaden eine Kostenbilanz über einen entsprechenden Strompreis sowie Klimafolgekosten der vermiedenen Treibhausgasemissionen (vgl. Bünger & Matthey, 2020, S. 8–10) ermittelt werden kann, ist eine finanzielle Quantifizierung der Reduzierung von Hitzebelastungen durch Begrünungsmaßnahmen bisher nicht oder nur unzureichend möglich (vgl. Perini & Rosasco, 2013). Hypothese H 10, dass es aufgrund der unterschiedlichen Wirkungsebenen zu Interessenkonflikten unter beteiligten Akteurinnen und Akteuren kommen kann, konnte somit bestätigt werden.

6.1.5. Gesamtbetrachtung der Methodik, Szenarien und Bewertungsergebnisse

Insgesamt können die Methodik zur quantitativen Bestimmung der Wirkung der betrachteten Maßnahmen auf Klimaschutz und Klimaanpassung sowie die gewählten Szenarien als bedingt geeignet zur Prüfung der Hypothesen H 1 bis H 7 angesehen werden. So konnten quantitative Werte der KSW und KAW ermittelt sowie unter Verwendung der Szenarien Einflüsse auf diese Werte erkannt und die Maßnahmen im Vergleich zueinander bewertet werden. Jedoch konnten nicht alle relevanten Wirkungsfelder in die quantitative Bewertung einbezogen werden. Zudem ergaben sich sowohl bei der Anwendung der Methodik als auch bei der Wahl der Szenarien Unsicherheiten. Diese entstanden infolge von Annahmen zur Bildung und Verknüpfung der Proxyindikatoren auf Ebene 3 und Ebene 4 sowie bei der Wahl von realistischen Bedingungen für die betrachteten Szenarien. So wurden bei multiplikativen Verknüpfungen vereinfacht proportionale Abhängigkeiten angenommen und bei Verknüpfungen anhand gewichteter arithmetischer Mittel die Gewichte grob anhand von Literaturwerten oder pauschaler Annahmen abgeschätzt (vgl. Abschnitt 5.1.2 und Abschnitt 5.1.3).

Bei der Bestimmung des Temperatureinflusses wurden ebenfalls grobe Annahmen getroffen

(vgl. Abschnitt 5.1.3). Hier besteht insbesondere mit Blick auf die MFS weiterer Forschungsbedarf zu Einflussfaktoren auf den Temperatureinfluss des Jahresenergieertrags. Die Reduktion der Leistungsverluste aufgrund hoher Modultemperaturen wurde hier optimistisch angenommen, da, im Vergleich zur von Peñaranda Moren und Korjenic (2017a) untersuchten Variante mit Gerüstkletterpflanzen, eine Kombination der PVF mit einer wandgebundene FBS angenommen wurde, für die generell höhere Kühlwirkungen angenommen werden können (vgl. Abschnitt 3.2.2). Zudem wurde eine stärkere Aufheizung von Süd- und Westfassaden infolge einer höheren Umgebungstemperatur in den Mittags- und Nachmittagsstunden nicht mit einbezogen. Bei der Wahl der Indikatoren für die Szenarien mussten insbesondere für Verschattungsgrad und Grünvolumenanteil pauschale Annahmen getroffen werden (vgl. Abschnitt 5.2). Nicht alle theoretisch betrachteten Szenarien sind für Deutschland praktisch möglich. So liegt die Stadt mit der größten Einwohnerzahl (Berlin) nicht in einer Region mit maximalen Werten der Globalstrahlung und regionalen Hitzebelastung. Das Szenario$_{3,3}$ wird somit in der Praxis nicht im selben Ausmaß erreicht werden können. Es sollte weiterhin beachtet werden, dass bei der Festlegung der maßnahmenbezogenen Proxyindikatoren jeweils ideale Maßnahmen angenommen wurden.

Ebenfalls wurden der Bedarf zur Produktion erneuerbaren Stroms, die Wirkungspotenziale der Maßnahmen (bis auf das Stromerzeugungspotenzial der MFS) sowie die Vulnerabilität der Bevölkerung für alle untersuchten Szenarien als maximal betrachtet. Diese Größen können sehr individuell ausfallen und waren quantitativ nur schwer zu bestimmen. Der Bedarf an Solarstrom kann zum Beispiel je nach Tages- und Jahreszeit variieren, wodurch sich auch ein Einfluss der Fassadenausrichtung hinsichtlich des zeitlichen Leistungsverlaufs ergibt (vgl. Abschnitt 3.1.6), der hier nicht berücksichtigt wurde. Es wurden keine Unterschiede unter den jeweiligen Maßnahmenarten wie PVF unterschiedlicher Zelltechnologien oder Konstruktionsweisen, boden- oder wandgebundenen FBS sowie MFS unterschiedlicher Begrünungsysteme und Restlichtdurchlässigkeiten der PV-Module quantitativ betrachtet. Hier besteht insbesondere für FBS und MFS noch weiterer Forschungsbedarf (vgl. Abschnitt 3.2.7 und Abschnitt 3.3.3). Die Festlegung der maximalen Wirkungspotenziale der Maßnahmen beruhte auf der Gewichtung der Wirkungsfelder in Abschnitt 5.1.1. Die Wirkungspotentiale sollten so interpretiert werden, dass die Maßnahmen ein relevantes Wirkungspotenzial auf die relevanten Wirkungsfelder haben, eine maximale Umsetzung der Wirkungsfelder jedoch der Kombination mehrerer Maßnahmen unterschiedlicher Bereiche bedarf. Die KSW und KAW der betrachteten Maßnahmen können somit nicht als absolute Wirkungen interpretiert werden, sondern nur in Bezug auf die maximal mögliche Wirkung an einer Fassade.

Die auf vier Unterebenen aufgestellten Proxyindikatoren verdeutlichen die Vielschichtigkeit der Einflüsse auf die KSW und KAW der betrachteten Maßnahmen. Dabei konnte eine konsistente Trennung der Proxyindikatoren auf Ebene 3 und der Indikatoren auf Ebene 4 jedoch nicht in allen Fällen erreicht werden. Dies war zum Beispiel für den Temperatureinfluss auf die Produktion erneuerbaren Stroms (P_3) der Fall. Da trotz dieser strukturellen Inkonsistenz alle Proxyindikatoren bestimmt werden konnten, hatte dies jedoch keinen weiteren Einfluss auf die letztendliche Bewertung der KSW und KAW.

Insgesamt betrachtet sollten die berechneten Werte der KSW und KAW als Größenordnung der Bruttowirkung idealer Maßnahmen in Bezug auf die maximal auf gleicher Fassadenfläche mögliche Wirkung unter optimalen Bedingungen interpretiert werden. Diese maximal mögliche Wirkung kann jedoch unter realen Bedingungen, in Gegensatz zur KAW in Szenario$_{3,3}$, nicht vollständig erreicht werden. Für die KSW wäre hierfür zudem eine vollständige Kompensierung des Temperatureinflusses erforderlich.

6.2. Übertragbarkeit der Bewertungsmethodik

Mit der entwickelten Methodik ist für beliebige theoretische oder reale Szenarien an Fassaden eine individuelle Bewertung der betrachteten Maßnahmen hinsichtlich Klimaschutz- und Klimaanpassungswirkung möglich. Diese kann auf Basis frei zugänglicher Daten sowie anhand der in dieser Arbeit enthaltenen Formeln, Tabellen und Abbildungen ohne unverhältnismäßig großen Aufwand vorgenommen werden.

Laut Poglitsch et al. (2018) haben Wohngebäude verglichen mit Nichtwohngebäuden in Deutschland insgesamt das größte Potenzial an Fassadenflächen. Aufgrund ihrer individuellen Gestaltung mit Fenstern, Türen oder Auskragungen sei dieses jedoch, in Hinblick auf GIPV, oft nicht technisch realisierbar. Große Gebäude wie Industriegebäude, Hallen, öffentliche Einrichtungen oder Hochhäuser seien laut Behnisch, Münzinger, Poglitsch et al. (2020) hingegen aufgrund großer zusammenhängender Flächen und eines hohen Gesamtenergieertrages besonders gut für die Verwendung von GIPV geeignet. Bei der Übertragung der Ergebnisse dieser Arbeit ist somit die Größe der nutzbaren Fassadenfläche zu beachten. Insbesondere in Hinblick auf fixe Kosten, etwa für Wechselrichter der PVF oder eine Bewässerungsalge der FBS, muss individuell abgeschätzt werden, ob sich eine Umsetzung der Maßnahme auf einer Fläche bestimmter Größe wirtschaftlich lohnt. Bei Betrachtung der KSW ist zu beachten, dass PV-Maßnahmen unter einer gewissen solaren Bestrahlung oft nicht wirtschaftlich betrieben werden können. Eggers et al. (2020) nahmen bei ihren Untersuchungen zum Flächenpotenzial der GIPV pauschal eine Wirtschaftlichkeitsgrenze von 500 kWh m^{-2} im Jahr an. Die Umsetzung der Maßnahmen PVF und MFS könnte damit bereits unter den betrachteten Szenarien mit einer mittleren solaren Bestrahlung von $0,7 \cdot 0,7 \cdot 1054$ kWh m^{-2} $= 516$ kWh m^{-2} im Jahr nicht mehr wirtschaftlich sein. Zudem müssen Kriterien zur Umsetzbarkeit hinsichtlich der Statik, Bauweise und Zustand der Fassade sowie rechtliche Gegebenheiten wie Denkmalschutz, Grenzabstände oder Brandschutz beachtet werden (vgl. Pfoser, 2016, S. 120–127).

Die Wahl der Indikatoren, vor allem zur Bestimmung der solaren Bestrahlung sowie zur Bestimmung der mikroklimatischen Hitzebelastung, basierte auf dem Ziel, dass die Berechnung der KSW und KAW auf Basis frei zugänglicher Daten und ohne unverhältnismäßig großen Aufwand erfolgen kann. Dieses Ziel wurde, für die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Bewertungsmethodik, erreicht. Sollen jedoch die Fassadenflächen größerer Gebäudekomplexe oder Quartiere betrachtet werden, kann eine aufwändigere aber dafür präzisere Bestimmung der solaren Bestrahlung und mikroklimatischen Hitzebelastung mittels dreidimensionaler Modellierungen sinnvoll sein. Solche Modellierungen können mittels verfügbarer Software, wie zum Beispiel

„ENVI-MET“, durchgeführt werden. So könnte auch die Fassadentemperatur, zur Abbildung des Temperatureinflusses auf die PV und des Bedarfs einer Reduktion der Hitzebelastung, direkt modelliert werden. Neben einer geeigneten Software und den entsprechenden Anwendungskenntnissen sind für eine entsprechende Modellierung auch zusätzliche Informationen, wie die genauen Gebäudegeometrien oder Angaben zur Oberflächenbeschaffenheit, erforderlich. Zur Erfassung des Grünvolumens und schattenwerfender Objekte können, je nach Größe des betrachteten Quartiers, zusätzlich Daten aus Laserscanbefliegungen erforderlich sein (vgl. Meinel et al., 2006; Behnisch, Münzinger & Poglitsch, 2020; Redweik et al., 2013). Für die Übertragung der entwickelten Bewertungsmethodik auf Betrachtungen der Quartiersebene mittels modellierter Daten wäre dann eine entsprechende Anpassung der Proxyindikatoren nötig.

Auf Ebene der Stadt wäre die Erstellung integrierter Potenzialkataster in Bezug auf Photovoltaik und Begrünung an Fassaden mittels Geodaten denkbar. Zur Bestimmung der stadtklimatischen und mikroklimatischen Hitzebelastung können bioklimatische Faktoren, wie die Oberflächen- und Strahlungstemperatur oder der *Universelle Thermische Klimaindex UTCI* verwendet werden. Diese können für feine räumliche Auflösungen mithilfe von Geoinformationssystemen bereits mit relativ wenig benötigten Geodaten, wie digitalen Höhenmodellen, Farbinfrarotbildern und Vektordaten zu Gebäudegeometrien, berechnet werden (vgl. Back et al., 2021). Laut Frie und Hensel (2009) kann der Versiegelungsgrad neben der Verwendung von Satelliten- und Luftbildern, städtebaulichen Strukturtypen oder topografisch-kartographischen Geodaten auch über die Art der Flächennutzung und die Siedlungsdichte abgeschätzt werden. Räumliche Informationen zur Flächennutzung sind im *Amtlichen Liegenschaftskatasterinformationssystem (ALKIS)* enthalten (vgl. Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2019). Zur genaueren Bestimmung der Vulnerabilität können Angaben zum Altersdurchschnitt der Bevölkerung auf Gemeindeebene über den Zensus bezogen werden (vgl. Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2021a). Auf feinerer Ebene, zum Beispiel auf Stadtbezirksebene, können entsprechende Angaben je nach Gemeinde über die Statistischen Ämter der Städte und der Länder bezogen werden (vgl. Amt für Statistik Berlin-Brandenburg, 2021). Das Grünvolumen kann, neben der Abschätzung über die Art der Flächennutzung, auch, wie oben beschreiben, anhand von Daten aus Laserscanbefliegungen dreidimensional modelliert werden (vgl. Meinel et al., 2006). Auch die solare Bestrahlung kann mittels Geoinformationssystemen auf städtischer Ebene für Gebäudefassaden abgeschätzt werden, wobei, je nach gewünschtem Detailgrad, größere Datenmengen und dreidimensionale Modellierungen erforderlich sein können (vgl. Catita et al., 2014; Behnisch, Münzinger, Poglitsch et al., 2020).

6.3. Einordnung der Arbeit und Anknüpfungsmöglichkeiten

In den in Kapitel 3 untersuchten Arbeiten wurden oft nur entweder die Klimaschutzwirkung oder die Klimaanpassungswirkung der hier betrachteten Maßnahmen untersucht. Zudem wurde, bis auf in den in Abschnitt 3.3 aufgeführten Arbeiten, jeweils nur eine der Maßnahme untersucht. In den in Abschnitt 3.3 aufgeführten Arbeiten wurden jedoch nur die Kombination einer Photovoltaik und Begrünung mit einer Photovoltaik ohne Begrünung an Fassaden verglichen.

Auch erfolgte keine einheitliche Bewertung der Maßnahmen hinsichtlich Klimaschutz und Klimaanpassung.

Der dieser Arbeit zugrunde liegende systematische Vergleich zwischen einer Photovoltaik-Fassade, einer Fassadenbegrünung sowie der Kombination aus Photovoltaik und Begrünung an einer Fassade hinsichtlich ihrer Klimaschutzwirkung und Klimaanpassungswirkung stellt daher eine grundlegend neue Betrachtungsweise dar. Damit konnte, in Hinblick auf die in Kapitel 1 angeführte Forschungslücke (vgl. Grafakos et al., 2019; Croce & Vettorato, 2020; Hoffmann et al., 2020), ein Beitrag zur einheitlichen Bewertung relevanter Maßnahmen für die Nutzung von Gebäudefassaden hinsichtlich Klimaschutz als auch Klimaanpassung geleistet und damit eine wissenschaftliche Entscheidungsgrundlage in diesem Bereich geschaffen werden.

Zudem konnte die Relevanz von Klimaschutz und Klimaanpassung als auch ein relevantes Wirkungspotenzial der Photovoltaik, der Begrünung und Kombinationen aus beidem an Fassaden hinsichtlich Klimaschutz und Klimaanpassung bestätigt werden. Über den hohen Einfluss der solaren Bestrahlung auf die berechnete KSW und KAW der Photovoltaik-Fassade und der Fassadenbegrünung konnte der in Kapitel 1 sowie in Abschnitt 2.3.3 aufgeführte potenzielle Flächenkonflikt beider Maßnahmen bestätigt werden. Die von Peñaranda Moren (2018, S. 25) vorgeschlagene Kombination aus Photovoltaik und Begrünung konnte zudem als potenzielle Lösungsmöglichkeit in ihrer Relevanz bekräftigt werden.

Die in dieser Arbeit identifizierten Unsicherheiten und herausgestellten Forschungslücken bieten Anknüpfungspunkte für folgende weiterführende Untersuchungen:

- Die Abbildung des Bedarfs einer Reduzierung der Hitzebelastung anhand der mikroklimatischen Hitzebelastung und solaren Bestrahlung mit verhältnismäßig geringem Aufwand und auf Basis frei zugänglicher Daten könnte Gegenstand weiterer Untersuchungen sein. Hier könnte zum Beispiel der jeweilige Einfluss auf bioklimatische Faktoren wie den Universellen Thermischen Klimaindex jeweils für den Innenraum und die direkte Umgebung der Gebäudefassade untersucht werden.

- In weiteren Untersuchungen könnte zudem betrachtet werden, inwieweit sich die Position zwischen Stadtkern und Stadtrand auf den Effekt der städtischen Wärmeinsel (UHI-Index) auswirkt und inwieweit mehrere Städte in Ballungsräumen in Bezug auf diesen Effekt zusammengefasst werden können. Neben dem Grünvolumen und der Versiegelung könnte zudem auch die Art der Bebauung hinsichtlich Stadtstrukturtypen in die Bestimmung der mikroklimatischen Hitzebelastung einbezogen werden. Auf regionaler Ebene sollte auch die zukünftige klimatische Entwicklung betrachtet werden.

- Weiterhin könnte untersucht werden, ob bei großskaliger Umsetzung von Fassadenbegrünungen auf Quartiers- oder Stadtebene auch emergente Verhaltensweisen, im Sinne von Effekten, die nur aus den Eigenschaften der einzelnen Maßnahmen nicht vorhersehbar waren (vgl. Goldstein, 1999), auftreten können.

- Insbesondere für die MFS sollte weiter untersucht werden, welche Faktoren den Tempera-

tureinfluss auf den Jahresenergieertrag beeinflussen.

- Für die FBS und MFS stehen weitere Untersuchungen zur quantitativen Beschreibung der Unterschiede der Wirkungspotenziale unter den jeweiligen Maßnahmenarten aus.
- Ausstehend ist zudem die quantitative Betrachtung der Wirkungsfelder Einsparung von Heiz- und Kühlenergie sowie Überflutungsrisiko durch Sturzfluten in Folge von Starkregenereignissen hinsichtlich der Klimaschutzwirkung und Klimaanpassungswirkung der betrachteten Maßnahmen. Auch die Nettowirkung hinsichtlich Ökobilanzen könnte in zukünftige Betrachtungen einbezogen werden.
- Hinsichtlich der Fassadenausrichtung könnte weiterhin die stärkere Aufheizung von Süd- und Westfassaden infolge einer höheren Umgebungstemperatur in den Mittags- und Nachmittagsstunden sowie ein individueller Bedarf an Solarstrom abhängig von der Tages- und Jahreszeit mit Blick auf den zeitlichen Leistungsverlauf der PV-Anlage einbezogen werden.
- Auch eine individuelle Betrachtung der Sensitivität könnte weiter einbezogen werden. Der Aufenthalt vulnerabler Bevölkerung könnte beispielsweise geringer für einen höheren Fassadenabschnitt gewählt werden, da dieser weiter entfernt von öffentlichen Aufenthaltsorten wie Straßen, Wegen oder Plätzen liegt. Hier könnte dann die PVF, auch in Hinblick geringerer Verschattung, eine entsprechend geeignetere Maßnahme darstellen. Ähnliches könnte auch für Industriegebiete gelten. In weiteren Untersuchungen könnte auch der Einfluss bereits bestehender Hitzeschutzmaßnahmen an einem Gebäude auf den Bedarf einer Reduktion der Hitzebelastung einbezogen werden.

Nächste Schritte zur Validierung, Weiterentwicklung und Anwendung der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Bewertungsmethodik könnten wie folgt aussehen:

- Ein nächster Schritt könnte die Ermittlung realistischer Szenarien auf Basis einer breiten Auswertung realer Daten, insbesondere zu Verschattungsgraden und Grünvolumen, sein. Die Erhebung solcher Daten erfolgte zum Beispiel durch Behnisch, Münzinger und Poglitsch (2020) sowie Meinel et al. (2006). Darauf aufbauenden könnte die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methodik auf die neuen Szenarien angewandt und in einem weiteren Schritt mittels Modellierungen oder realen Messungen an Gebäudefassaden, zum Beispiel in Bezug auf den Jahresenergieertrag oder die Reduzierung der thermischen Belastung im Umfeld der Fassade, für die entsprechenden Szenarien und Maßnahmen überprüft werden.
- Die in einem ersten Durchgang validierte Methodik könnte dann an exemplarischen Gebäuden auf ihre Anwendbarkeit hin geprüft werden.
- Ein weiterer Schritt wäre die Anpassung der Methodik zur Betrachtung ganzer Gebäudekomplexe, Quartiere oder Stadtteile mittels dreidimensionaler Modellierungen oder der Verwendung von Geodaten und Geoinformationssystemen (vgl. hierzu den vorherigen

Abschnitt 6.2). So könnten passende Maßnahmen auf unterschiedliche Fassaden verortet oder integrierte Potenzialkataster für Photovoltaik und Begrünung an Fassaden erstellt werden.

- Die Betrachtungen könnten durch die Einbeziehung weiterer Maßnahmen, wie Solarthermie oder die Erhöhung von Albedowerten, ausgeweitet werden. Die Solarthermie könnte etwa sinnvoll sein, wenn ein hoher Wärmebedarf besteht. Hier sind jedoch potenziell negative Synergieeffekte in Kombination mit einer Begrünung zu erwarten, da bei der Solarthermie eine Aufheizung der Solarkollektoren gewünscht ist (vgl. Pfoser et al., 2013, S. 126–127). Einer Erhöhung der Albedowerte könnte dort sinnvoll sein, wo keine Begrünung möglich ist (vgl. Herrmann, 2011, S. 43–44).
- Zudem könnten die Betrachtungen auf Dachflächen ausgeweitet werden. Da hier höhere solare Bestrahlungen möglich sind (vgl. Abbildung 3.3 in Abschnitt 3.1.3) und der Abstand zum öffentlichen Aufenthaltsraum geringer ist, sind hier im Vergleich zu Fassadenflächen höherer KSW und geringere KAW in Bezug auf die Produktion erneuerbaren Stroms sowie die Reduzierung der Hitzebelastung zu erwarten. Hier wäre es interessant zu untersuchen, ob mit einer Aufteilung der Maßnahmen auf FBS an Fassaden und Photovoltaik auf Dächern im Vergleich zu einer jeweiligen Kombination von Begrünung und Photovoltaik insgesamt eine höheren Wirkungen in Bezug auf Klimaschutz und Klimaanpassung erreicht werden kann. Dabei sollte jedoch auch das größere Wirkungspotenzial von Dachbegrünungen zur Retention von Regenwasser in Hinblick auf die KAW beachtet werden (vgl. Sieker et al., 2019, S. 25).

7. Fazit und Handlungsempfehlungen

Auf Basis der Literaturauswertung konnten die Produktion erneuerbaren Stroms, die Einsparung von Heiz- und Kühlenergie, die Reduzierung von Hitzebelastungen sowie die Reduzierung des Überflutungsrisikos durch Sturzfluten in Folge von Starkregenereignissen als relevante Wirkungsfelder in Bezug auf die Klimaschutzwirkung und Klimaanpassungswirkung einer Photovoltaik-Fassade, einer Fassadenbegrünung sowie einer Kombination aus Photovoltaik und Begrünung an Gebäudefassaden bestätigt werden. Für alle drei Maßnahmen konnte auf Basis der Literaturauswertung ein relevantes Wirkungspotenzial auf mindestens eins der genannten Wirkungsfelder festgestellt werden. Anhand der Wirkungsfelder Produktion erneuerbaren Stroms und Reduzierung von Hitzebelastungen konnte eine Bewertungsmethodik zur quantitativen Bestimmung der Klimaschutz- und Klimaanpassungswirkung der betrachteten Maßnahmen entwickelt werden. Bei der Aufstellung der Bewertungsmethodik mussten an einigen Stellen Annahmen getroffen werden, die zu Unsicherheiten in den Ergebnissen führen. Diese bieten Anknüpfungspunkte für mögliche weiterführende Untersuchungen. Die anhand der Bewertungsmethodik berechneten Werte der Klimaschutz- und Klimaanpassungswirkung können als Größenordnung der Bruttowirkung idealer Maßnahmen in Bezug auf die maximal auf gleicher Fassadenfläche mögliche Wirkung unter optimalen Bedingungen interpretiert werden.

Die Anwendung der entwickelten Bewertungsmethodik auf repräsentative Szenarien führte zu folgenden Kernerkenntnissen:

- Die solare Bestrahlung hat einen starken Einfluss auf die Produktion erneuerbaren Stroms sowie auf den Bedarf zur Reduzierung von Hitzebelastungen und damit auf die Klimaschutz- und Klimaanpassungswirkung der betrachteten Maßnahmen.
- Das lokale Mikroklima hat einen deutlichen Einfluss auf die Reduzierung von Hitzebelastungen und damit die Klimaanpassungswirkung der Maßnahmen.
- Bei einer hohen solaren Bestrahlung zeigt die untersuchte fiktive Photovoltaik-Fassade im Vergleich zur untersuchten fiktiven Fassadenbegrünung eine höhere Gesamtwirkung in Bezug auf Klimaschutz und Klimaanpassung.
- Bei einer hohen mikroklimatischen Hitzebelastung zeigt die untersuchte fiktive Fassadenbegrünung im Vergleich zur untersuchten fiktiven Photovoltaik-Fassade eine höhere Gesamtwirkung in Bezug auf Klimaschutz und Klimaanpassung.
- Bei einer hohen solaren Bestrahlung und einer hohen mikroklimatischen Hitzebelastung stehen eine Photovoltaik-Fassade und eine Fassadenbegrünung hinsichtlich Klimaschutz und Klimaanpassung in Konkurrenz zueinander.

- Die Kombination aus Photovoltaik und Begrünung an Gebäudefassaden kann im Vergleich zu den Einzelmaßnahmen insbesondere bei einer hohen solaren Bestrahlung und einer hohen mikroklimatischen Hitzebelastung eine höhere Gesamtwirkung in Bezug auf Klimaschutz und Klimaanpassung erzielen.
- Bei einer geringen solaren Bestrahlung und einer geringen mikroklimatischen Hitzebelastung zeigt keine der untersuchten Maßnahmen eine hohe Gesamtwirkung.
- Die Klimaanpassungswirkung der Maßnahmen ist auf der Gebäude- und Quartiersebene zu verorten, die Klimaschutzwirkung auf der globalen Ebene.
- Durch die Betrachtung der Quartiersebene können sich infolge von Verknüpfungen und Skaleneffekten Synergien ergeben, welche die Wirkung und insbesondere die Umsetzung der Maßnahmen positiv beeinflussen.
- Aufgrund der unterschiedlichen Wirkungsebenen kann es durch eine ungleiche Verteilung von Aufwand und Nutzen zu Interessenkonflikten unter beteiligten Akteurinnen und Akteuren kommen.

Die vorliegende Arbeit trägt durch einen erstmaligen systematischen Vergleich zwischen einer Photovoltaik-Fassade, einer Fassadenbegrünung sowie der Kombination aus Photovoltaik und Begrünung an einer Gebäudefassade hinsichtlich ihrer Klimaschutzwirkung und Klimaanpassungswirkung zur Bildung einer wissenschaftliche Entscheidungsgrundlage für die diesbezügliche Nutzung von Gebäudefassaden bei. Mit der entwickelten Bewertungsmethodik können, ohne unverhältnismäßig großen Aufwand und auf Basis öffentlich zugänglicher Daten, quantitative Bewertungen der Klimaschutzwirkung und Klimaanpassungswirkung der aufgeführten Maßnahmen für einzelne Gebäudefassaden vorgenommen werden. Bei entsprechender Anpassung kann die entwickelte Bewertungsmethodik in einem weiteren Schritt auch auf Quartiers- und Stadtebene unter Verwendung aufwändigerer Datenerhebung und -verarbeitung zur Verortung passender Maßnahmen oder zur Erstellung integrierter Potenzialkataster angewandt werden.

Auf Basis der vorliegenden Ergebnisse können folgende Handlungsempfehlungen gegeben werden:

- An Fassaden mit hoher solarer Bestrahlung und geringer mikroklimatischen Hitzebelastung der Umgebung stellt die Photovoltaik aufgrund ihrer Klimaschutzwirkung eine geeignete Lösung dar. Es bedarf hier weiterer Untersuchungen darüber, ob eine Kombinationen aus Photovoltaik und Begrünung der Einzelmaßnahme vorzuziehen ist.
- Für Fassaden mit geringer solarer Bestrahlung und hoher mikroklimatischer Hitzebelastung der Umgebung kann auf Basis der vorliegenden Ergebnisse keine klare Handlungsempfehlung gegeben werden. Hier bedarf es ebenfalls weiterer Untersuchungen. Insbesondere ist zu prüfen, ob die Begrünung trotz geringer solarer Einstrahlung eine relevante Kühlleistung erbringen kann. Für die Photovoltaik sollte bei geringer solarer Einstrahlung die Energy-Payback-Time berücksichtigt werden.

- An Fassaden mit hoher solarer Bestrahlung und hoher mikroklimatischen Hitzebelastung der Umgebung sollten aufgrund einer höheren Gesamtwirkung hinsichtlich Klimaschutz und Klimaanpassung sowie dem potenziellen Flächenkonflikt unter den Einzelmaßnahmen bevorzugt Kombinationen aus Photovoltaik und Begrünung eingesetzt werden.

- Soll an einer Fassade die größtmögliche Menge erneuerbaren Stroms erzeugt werden, stellen Photovoltaikmodule ohne zusätzliche Restdurchlässigkeit aufgrund ihrer höheren Wirkung die geeignetste Lösung dar. Die geringere Flächenausnutzung durch eine Restlichtdurchlässigkeit von 30 % der Photovoltaikmodule in der Kombinationslösung konnte in den Betrachtungen dieser Arbeit durch die Synergieeffekte nicht ausgeglichen werden. Es sollte hier weiter untersucht werden, inwieweit eine vergleichbare Kühlleistung von Kombinationslösungen geringerer Restlichtdurchlässigkeiten erbracht werden kann. Bei Betrachtung der spezifischen Stromerträge in Bezug auf die Photovoltaikzellen kann die Kombination aus Photovoltaik und Begrünung höhere Werte erzielen.

- Bei der Entscheidung für eine Maßnahme sollten neben der Betrachtung der Wirkung auf Klimaschutz und Klimaanpassung weitere Wirkungspotenziale, insbesondere in Bezug auf eine Verbesserung der Lebensqualität durch die Maßnahmen, beachtet werden.

- Aufgrund der potenziellen Skaleneffekte, sollte für alle untersuchten Maßnahmen eine Betrachtung auf Quartiersebene der Betrachtung auf Gebäudeebene vorgezogen werden.

- Für die Umsetzung der Maßnahmen ist es unter Berücksichtigung der potenziellen Interessenkonflikte sinnvoll, gerade bei Betrachtung der Quartiersebene, den Wirkungen der Maßnahmen auf Klimaschutz und Klimaanpassung entsprechende finanzielle Anreize entgegenzusetzen. Diese könnten durch einen finanziellen Ausgleich abhängig vom Nutzen der Maßnahmen erfolgen. Auf Gebäudeebene könnte dies zwischen mietender und vermietender Partei geschehen.[1] Auf Quartiersebene sollte auch der Nutzen für Personen im Umfeld der Fassade einbezogen werden. Hier könnten öffentliche Förderungen der Maßnahmen stärker an die Klimaschutz- und Klimaanpassungswirkung geknüpft werden. Es besteht jedoch noch Forschungsbedarf zur finanziellen Quantifizierung der Reduktion von Hitzebelastungen.

[1] Anmerkung des Autors: Dabei sollte jedoch darauf geachtet werden, dass eine Reduzierung der Hitzebelastung in den Gebäuden und deren Umgebung nicht zu unverhältnismäßig starken Mietpreissteigerungen führt und sie damit zu einem Luxusgut würde, welches sich nur bestimmte Bevölkerungsschichten leisten könnten.

Literaturverzeichnis

AGEE-Stat (Geschäftsstelle der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik am Umweltbundesamt). (2021). *Erneuerbare Energien in Deutschland: Daten zur Entwicklung im Jahr 2020*. Verfügbar 18. März 2021 unter https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/erneuerbare-energien-in-deutschland-2020

Alexandri, E. & Jones, P. (2008). Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. *Building and Environment*, *43*(4), 480–493. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.055

Amt für Statistik Berlin-Brandenburg. (2021). *Einwohnerinnen und Einwohner im Land Berlin am 31. Dezember 2020: LOR-Planungsräume zum Stand 31.12.2020* (Statistischer Bericht A I 16 - hj 2 / 20). Potsdam. Verfügbar 10. März 2021 unter https://www.statistik-berlin-brandenburg.de/publikationen/stat_berichte/2021/SB_A01-16-00_2020h02_BE.pdf

an der Heiden, M., Muthers, S., Niemann, H., Buchholz, U., Grabenhenrich, L. & Matzarakis, A. (2019). Schätzung hitzebedingter Todesfälle in Deutschland zwischen 2001 und 2015. *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz*, *62*(5), 571–579. https://doi.org/10.1007/s00103-019-02932-y

Back, Y., Bach, P. M., Jasper-Tönnies, A., Rauch, W. & Kleidorfer, M. (2021). A rapid fine-scale approach to modelling urban bioclimatic conditions. *Science of The Total Environment*, *756*(143732). https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143732

BBSR (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung). (2020). *Hitze und Starkregen: Wie sich Städte anpassen können: BBSR Hintergrundpapier August 2020*. Bonn. Verfügbar 4. Januar 2021 unter https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/startseite/topmeldungen/downloads/2020-hintergrundpapier-klimawandel.html

Becker, N., Kühle, L., Randrianarisoa, J., Ring, A.-M., Saad, R. & Voigt, F. (2019). *Simulating microclimatic conditions, thermal comfort and the effects of façade greening in a street canyon in Berlin*. Verfügbar 14. März 2021 unter https://www.klima.tu-berlin.de/surface/UrbanSurface

Behnisch, M., Münzinger, M. & Poglitsch, H. (2020). Die vertikale Stadt als solare Energiequelle? Theoretische Flächenpotenziale für bauwerksintegrierte Photovoltaik und Abschätzung der solaren Einstrahlung. *Transforming Cities*, *2020*(4), 58–62. Verfügbar 3. März 2021 unter https://www.transforming-cities.de/ausgabe-4-2020-staedtische-ressourcen/

Behnisch, M., Münzinger, M., Poglitsch, H., Willenborg, B. & Kolbe, T. H. (2020). Anwendungsszenarien von Geomassendaten zur Modellierung von Grünvolumen und Solarflächenpotenzial. In G. Meinel, U. Schumacher, M. Behnisch & T. Krüger (Hrsg.), *Flächennutzungsmonitoring XII mit Beiträgen zum Monitoring von Ökosystemleistungen und SDGs* (S. 251–261). Rhombos. Verfügbar 3. März 2021 unter https://www.ioer-monitor.de/fileadmin/user_upload/monitor/DFNS/2020_12_DFNS/025_behnisch.pdf

Behrens, U. & Grätz, A. (2008). Stadtplanung und Klimawandel: Eine Kooperation mit der Stadtentwicklungsverwaltung von Berlin. In Deutscher Wetterdienst (**typeredactor**), *Klimastatusbericht 2008* (S. 24–32). Verfügbar 22. März 2021 unter https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimastatusbericht/publikationen/ksb_2008.html

Biyik, E., Araz, M., Hepbasli, A., Shahrestani, M., Yao, R., Shao, L., Essah, E., Oliveira, A. C., del Caño, T., Rico, E., Lechón, J. L., Andrade, L., Mendes, A. & Atlı, Y. B. (2017). A key review of building integrated photovoltaic (BIPV) systems. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, *20*(3), 833–858. https://doi.org/10.1016/j.jestch.2017.01.009

BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit). (2016). *Klimaschutzplan 2050: Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung*. Berlin. Verfügbar 4. Januar 2021 unter https://www.bmu.de/publikation/klimaschutzplan-2050/

BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit). (2019a). *Klimaschutzprogramm 2030: Maßnahmen zur Erreichung der Klimaschutzziele 2030*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU). Berlin. Verfügbar 2. Februar 2021 unter https://www.bmu.de/publikation/klimaschutzprogramm-2030/

BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit). (2019b). *Masterplan Stadtnatur: Maßnahmenprogramm der Bundesregierung für eine lebendige Stadt* (Nr. 10043). Berlin. Verfügbar 16. Februar 2021 unter https://www.bmu.de/publikation/masterplan-stadtnatur/

BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit). (2020a). *Klimaschutz in Zahlen: Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimapolitik: Ausgabe 2020*. Berlin. Verfügbar 18. März 2021 unter https://www.bmu.de/publikation/klimaschutz-in-zahlen-2020/

BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit). (2020b). *Zweiter Fortschrittsbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel*. Verfügbar 4. Januar 2021 unter https://www.bmu.de/download/2583/

BMUB (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit). (2015). *Grün in der Stadt: Für eine lebenswerte Zukunft: Grünbuch Stadtgrün*. Berlin. Verfügbar 4. Januar 2021 unter https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/themen/bauen/wohnen/gruenbuch-stadtgruen.html

BMUB (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit). (2017). *Energetische Stadtsanierung in der Praxis I: Grundlagen zum KfW-Programm 432*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB). Verfügbar 25. Februar 2021 unter https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/themen/bauen/energetische-stadtsanierung-1.html

BMWI: (Bundeministerium für Wirtwschaft und Energie). (2020, 22. Juni). *Gesamtausgabe der Enrgiedaten - Datensammlung des BMWI*. Energiedaten: Gesamtausgabe. Verfügbar 24. Februar 2021 unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/energiedaten-gesamtausgabe.html

Bott, B., Krippner, R. & Fuchs, H. (2017). Fassadenbegrünung und Photovoltaik in der Bestandssanierung am Beispiel des Verwaltungsbaus von SUN. *Tagungsband 9. Forum Bauwerkintegrierte Photovoltaik*, 111–118. Verfügbar 26. März 2021 unter https://www.th-nuernberg.de/fakultaeten/ar/forschung/forschungsgebiet-konstruktion-und-technik/sun-studio-gruenfassade/

Brune, M., Bender, S. & Groth, M. (2017). *Gebäudebegrünung und Klimawandel: Anpassung an die Folgen des Klimawandels durch klimawandeltaugliche Begrünung* (Nr. 30). Climate Service Center Germany. Hamburg. Verfügbar 18. März 2021 unter https://www.gerics.de/products_and_publications/publications/detail/065742/index.php.de

BuGG (Bundesverband GebäudeGrün e. V.) (2020). *BuGG-Fokus Solar-Gründach: Auszüge aus der BuGG-Fachinformation Solar-Gründach*. Prospektanforderung Bundesverband GebäudeGrün e. V. BuGG. Verfügbar 26. März 2021 unter https://www.gebaeudegruen.info/kontakt/prospektanforderung

BUKEA (Behörde für Umwelt, Klima, Energie und Agrarwirtschaft). (2019, November). *Mehr Grün: Solar-Gründach: Vier Vorteile auf einmal*. Gründach und Grüne Fassaden. Verfügbar 6. Januar 2021 unter https://www.hamburg.de/gruendach

Bundesregierung. (2008). *Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel*. Berlin. https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/anpassung-auf-bundesebene/deutsche-anpassungsstrategie#die-deutsche-anpassungsstrategie-an-den-klimawandel

Bünger, B. & Matthey, A. (2020). *Methodenkonvention 3.1 zur Ermittlung von Umweltkosten - Kostensätze*. Umweltbundesamt. Verfügbar 9. April 2021 unter https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/methodenkonvention-umweltkosten

Buth, M., Kahlenborn, W., Savelsberg, J., Becker, N., Bubeck, P., Kabisch, S., Kind, C., Tempel, A., Tucci, F., Greiving, S., Fleischhauer, M., Lindner, C., Lückenkötter, J., Schonlau, M., Schmitt, H., Hurth, F., Othmer, F., Augustin, R., Becker, D., ... Kofler, C. (2015). *Vulnerabilität deutschlands gegenüber dem Klimawandel: Sektorenübergreifende Analyse des Netzwerks Vulnerabilität* (Nr. 24/2015). Umweltbundesamt. Verfügbar 16. Februar 2021 unter https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/vulnerabilitaet-deutschlands-gegenueber-dem

Catita, C., Redweik, P., Pereira, J. & Brito, M. (2014). Extending solar potential analysis in buildings to vertical facades. *Computers & Geosciences*, *66*, 1–12. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.01.002

Chae, Y. T., Kim, J., Park, H. & Shin, B. (2014). Building energy performance evaluation of building integrated photovoltaic (BIPV) window with semi-transparent solar cells. *Applied Energy*, *129*, 217–227. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.106

Charoenkit, S. & Yiemwattana, S. (2016). Living walls and their contribution to improved thermal comfort and carbon emission reduction: A review. *Building and Environment*, *105*, 82–94. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.05.031

Coalition for Urban Transitions. (2019). *Climate Emergency, Urban Opportunity: How national governments can secure economic prosperity and avert climate catastrophe by transforming cities*. Coalition for Urban Transitions. Verfügbar 2. März 2021 unter https://urbantransitions.global/en/publication/climate-emergency-urban-opportunity/

Coma, J., Pérez, G., de Gracia, A., Burés, S., Urrestarazu, M. & Cabeza, L. F. (2017). Vertical greenery systems for energy savings in buildings: A comparative study between green walls and green facades. *Building and Environment*, *111*, 228–237. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.014

Croce, S. & Vettorato, D. (2020). The definition of urban surface uses: A systemic approach for climate resilient and sustainable cities. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *588*(052035). https://doi.org/10.1088/1755-1315/588/5/052035

Debbarma, M., Sudhakar, K. & Baredar, P. (2017). Comparison of BIPV and BIPVT: A review. *Resource-Efficient Technologies*, *3*(3), 263–271. https://doi.org/10.1016/j.reffit.2016.11.013

Decker, B., Grimmig, B., Mencke, D. & Stellbogen, D. (1997). Besonderheiten bei der Projektierung von Photovoltaik-Fassadenanlagen. *Forschungsverbund Sonnenenergie Themen 97/98*, 95–103. Verfügbar 14. März 2021 unter https://www.fvee.de/index.php?id=195&sb_damorder%5Buid%5D=1785&cHash=622dab93ce7771422e61ae69775a1535

Deutscher Städtetag. (2019). *Anpassung an den Klimawandel in den Städten: Eine Handreichung mit Forderungen, Hinweisen und Anregungen*. Berlin und Köln. Verfügbar 31. März 2021 unter https://www.staedtetag.de/publikationen/weitere-publikationen/klimafolgenanpassung-staedte-2019

Djedjig, R., Bozonnet, E. & Belarbi, R. (2013). Experimental study of the urban microclimate mitigation potential of green roofs and green walls in street canyons. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, *10*(1), 34–44. https://doi.org/10.1093/ijlct/ctt019

DWD (Deutscher Wetterdienst). (o. D. a). *Deutscher Klimaatlas*. Wetter und Klima - Deutscher Wetterdienst - Deutscher Klimaatlas. Verfügbar 3. März 2021 unter https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaatlas/klimaatlas_node.html

DWD (Deutscher Wetterdienst). (o. D. b). *Globalstrahlungskarten, Mittlere Monats- und Jahressummen*. Wetter und Klima - Deutscher Wetterdienst - Leistungen. Verfügbar 3. März 2021 unter https://www.dwd.de/DE/leistungen/solarenergie/lstrahlungskarten_mi.html

Eggers, J.-B., Behnisch, M., Eisenlohr, J., Poglitsch, H., Phung, W.-F., Ferrara, C. & Kuhn, T. E. (2020). PV-Ausbauerfordernisse versus Gebäudepotenzial: Ergebnis einer gebäudescharfen Analyse für ganz Deutschland, 837–856. Verfügbar 4. Januar 2021 unter https://www.researchgate.net/publication/344376094_PV-Ausbauerfordernisse_versus_Gebaudepotenzial_Ergebnis_einer_gebaudescharfen_Analyse_fur_ganz_Deutschland

Energiereferat Stadt Frankfurtam Main. (2020). *Kommunale Energie- und Treibhausgasbilanzierung in Frankfurt am Main: Beschreibung der Methodik der kommunalen Treibhausgasbilanzierung in Frankfurt und Darstellung aktueller Ergebnisse und Entwicklungen: Kurzfassung*. Energiereferat Stadt Frankfurtam

Main. Verfügbar 25. Februar 2021 unter
https://frankfurt.de/themen/klima-und-energie/klimaschutz

Feng, H. & Hewage, K. (2014a). Energy saving performance of green vegetation on LEED certified buildings. *Energy and Buildings*, *75*, 281–289. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.10.039

Feng, H. & Hewage, K. (2014b). Lifecycle assessment of living walls: Air purification and energy performance. *Journal of Cleaner Production*, *69*, 91–99. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.041

Fraunhofer ISE. (2020). *Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland*. Verfügbar 2. Februar 2021 unter
https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.html
Fassung vom 29. Januar 2021

Frie, B. & Hensel, R. (2009). Schätzverfahren zur Bodenversiegelung: Ansatz der Umweltökonomischen Gesamt-rechnungen der Länder. In G. Meinel & U. Schumacher (Hrsg.), *Flä-chennutzungsmonitoring. Konzepte – Indikatoren – Statistik.* (S. 17–45). Shaker. Verfügbar 15. März 2021 unter
https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0168-ssoar-417678

GERICS & KfW. (2015). *Climate Focus Paper: Cities and Climate Change*. Climate Service Center Germany (GERICS) und KfW Development Bank. Hamburg and Frankfurt am Main. Verfügbar 2. März 2021 unter https://www.gerics.de/products_and_publications/fact_sheets/climate_focus_paper/cities/index.php.de

Gill, S. E. (2006). *Climate Change and Urban Greenspace* (Dissertation). University of Manchester, Faculty of Humanities, School of Environment and Development. Manchester. Verfügbar 24. Februar 2021 unter
http://www.greeninfrastructurenw.co.uk/resources/Susannah_PhD_Thesis_full_final.pdf

Goldstein, J. (1999). Emergence as a Construct: History and Issues. *Emergence*, *1*(1), 49–72. https://doi.org/10.1207/s15327000em0101_4

Grafakos, S., Trigg, K., Landauer, M., Chelleri, L. & Dhakal, S. (2019). Analytical framework to evaluate the level of integration of climate adaptation and mitigation in cities. *Climatic Change*, *154*(1-2), 87–106. https://doi.org/10.1007/s10584-019-02394-w

Green4Cities. (2014, 17. November). *MA 48 - Grüne Fassade*. Verfügbar 15. März 2021 unter
https://www.green4cities.com/?p=284&lang=de

Harthan, R. O., Repenning, J., Blanck, R., Böttcher, H., Bürger, V., Cook, V., Emele, L., Görz, W. K., Hennenberg, K., Jörß, W., Ludig, S., Matthes, F. C., Mendelevitch, R., Moosmann, L., Scheffler, M., Wiegmann, K., Brugger, H., Fleiter, T., Mandel, T., ... Steinbach, J. (2020). *Abschätzung der Treibhausgasminderungswirkung des Klimaschutzprogramms 2030 der Bundesregierung* (Teilbericht des Projektes „THG-Projektion: Weiterentwicklung der Methoden und Umsetzung der EU-Effort Sharing Decision im Projektionsbericht 2019 („Politikszenarien IX“)“ Nr. 33/2020). Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Verfügbar 3. Februar 2021 unter
https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/abschaetzung-der-treibhausgasminderungswirkung-des

Haselhuhn, R. (2010). *Leitfaden Photovoltaische Anlagen: Leitfaden für das Elektro- und Dachdeckerhandwerk, für Fachplaner, Architekte, Bauherren und Weiterbildungsinstitutionen* (DGS (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie), Hrsg.; 4., komplett überarbeitete Auflage). DGS Landesverband Berlin Brandenburg e.V.

Heinstein, P., Ballif, C. & Perret-Aebi, L.-E. (2013). Building Integrated Photovoltaics (BIPV): Review, Potentials, Barriers and Myths. *Green*, *3*(2), 125–156. https://doi.org/10.1515/green-2013-0020

Henemann, A. (2008). BIPV: Built-in solar energy. *Renewable Energy Focus*, *9*(6), 14–19. https://doi.org/10.1016/S1471-0846(08)70179-3

Herrmann, D. (2011). *Untersuchungen zum Klimawandel in Berlin: Dokumentation der im Rahmen des Stadtentwicklungsplan (StEP) Klima durchgeführten Modellrechnungen*. Berlin. Verfügbar 4. März 2021 unter https://www.stadtentwicklung.berlin.de/download/StEP_Klima/
Auftraggeber: Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin. Auftragnehmer: GEO-NET Umweltconsulting GmbH (Hannover)

Hoffmann, E., Rupp, J., Findler, F., Gnauck, U., Ihm, M. & Knill, V. (2020). Dokumentation zu: Klimaresilient in die Zukunft. Nationale Konferenz zum Fortschrittsbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie, 34. Verfügbar 17. Februar 2021 unter https://www.umweltbundesamt.de/service/termine/digitale-konferenz-klimaresilient-in-die-zukunft
Institut für ökologische Wirtschaftsforschung, Berlin, im Auftrag des Umweltbundesamts, Dessau-Roßlau, Version 1, 13.01.2021

Höppe, P. (1999). The physiological equivalent temperature - a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology*, *43*(2), 71–75. https://doi.org/10.1007/s004840050118

Horn, S. (2017). *Bauwerksintegrierte Photovoltaik (BIPV): Entwicklung und Bewertung von Fassadensystemen* (Dissertation). Technische Universität Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen. Dresden. Verfügbar 17. Dezember 2020 unter https://www.baufachinformation.de/bauwerkintegrierte-photovoltaik-(bipv)/mobil/dissertation/2018029002481

Hunter, A. M., Williams, N. S., Rayner, J. P., Aye, L., Hes, D. & Livesley, S. J. (2014). Quantifying the thermal performance of green façades: A critical review. *Ecological Engineering*, *63*, 102–113. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.12.021

Hutzschenreuter, T. (2015). *Allgemeine Betriebswirtschaftslehre: Grundlagen mit zahlreichen Praxisbeispielen* (6., überarbeitete Auflage). Springer Fachmedien Wiesbaden. Verfügbar 26. Februar 2021 unter http://link.springer.com/10.1007/978-3-658-08564-3

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Core Writing Team, R. K. Pachauri & L. A. Meyer, Hrsg.). IPCC. Verfügbar 1. November 2021 unter https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2018). Summary for Policymakers. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor & T. Waterfield (Hrsg.), *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. Im Erscheinen. Verfügbar 3. Februar 2021 unter https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/spm/

Jaafar, B., Said, I. & Rasidi, M. H. (2011). Evaluating the Impact of Vertical Greenery System on Cooling Effect on High Rise Buildings and Surroundings: A Review. *Review of Urbanism and Architectural Studies*, *9*(2), 1–9. https://doi.org/10.21776/ub.ruas.2011.009.02.1

Köhler, M. (2008). Green facades - a view back and some visions. *Urban Ecosystems*, *11*(4), 423–436. https://doi.org/10.1007/s11252-008-0063-x

Köhler, M. & Rares Nistor, C. (2018). *Wandgebundene Begrünungen: Quantifizierungen einer neuen Bauweise in der Klima-Architektur* (Bd. FV 2015/01). Fraunhofer IRB Verlag. Verfügbar 4. März 2021 unter https://www.baufachinformation.de/wandgebundene-begruenungen/bu/15039013815

Kontoleon, K. & Eumorfopoulou, E. (2010). The effect of the orientation and proportion of a plant-covered wall layer on the thermal performance of a building zone. *Building and Environment*, *45*(5), 1287–1303. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.11.013

Korjenic, A., Tudiwer, D., Moren, M. S. P., Hollands, J., Salonen, T., Mitterböck, M., Pitha, U., Zluwa, I., Stangl, R., Kräftner, J., Gump, K. & Becker, G. (2018). *Hocheffiziente Fassaden- und Dachbegrünung mit Photovoltaik-Kombination* (Nr. 27/2019). Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie. Wien. Verfügbar 17. Dezember 2020 unter https://nachhaltigwirtschaften.at/de/sdz/publikationen/schriftenreihe-2019-27-gruenplusschule.php

Kramer, G. (2010). Energieverbrauch der privaten Haushalte: Regionalisierte Ergebnisse. *Statistische Monatshefte Rheinland-Pfalz*, *2010*(5), 362–374. Verfügbar 23. Februar 2021 unter https://www.statistik.rlp.de/de/publikationen/statistische-monatshefte/

Kraus, F., Fritthum, R., Robausch, E., Scharf, B., Preiss, J., Enzi, V., Steinbauer, G., Oberbichler, C., Lichtblau, A., Haas, S., Dyk, G., Korjenic, A., Tudiwer, D. & Jesner, L. (2019). *Leitfaden Fassadenbegrünung*. Wiener Umweltschutzabteilung und ÖkoKaufWien. Verfügbar 13. März 2020 unter https://www.wien.gv.at/umweltschutz/raum/fassadenbegruenung.html

Lai, C.-M. & Hokoi, S. (2015). Solar façades: A review. *Building and Environment*, *91*, 152–165. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.01.007

Li, D., Liao, W., Rigden, A. J., Liu, X., Wang, D., Malyshev, S. & Shevliakova, E. (2019). Urban heat island: Aerodynamics or imperviousness? *Science Advances*, *5*(4), eaau4299. https://doi.org/10.1126/sciadv.aau4299

Link, G., Krüger, C., Rösler, C., Bunzel, A., Nagel, A. & Sommer, B. (2018). *Klimaschutz in Kommunen: Praxisleitfaden* (Deutsches Institut für Urbanistik gGmbH (Difu), Hrsg.; 3., aktualisierte und erweiterte Auflage). Deutsches Institut für Urbanistik gGmbH. Verfügbar 2. März 2021 unter https://repository.difu.de/jspui/handle/difu/248422

Mann, G. & Mollenhauer, F. (2020). Kombination von Photovoltaik und Dachbegrünung [magazine]. *GebäudeGrün*, *2020*(1), 7–10. Verfügbar 6. Januar 2021 unter https://www.regenwasseragentur.berlin/wp-content/uploads/2020/05/GG_01_2020-SolarGr%C3%BCndach-Mann-Mollenhauer.pdf

Meinel, G., Hecht, R. & Socher, W. (2006). Städtisches Grünvolumen - neuer Basisindikator für die Stadtökologie? Bestimmungsmethodik und Ergebnisbewertung. In M. Schrenk (Hrsg.), *Nachhaltige Lösungen für die Informationsgesellschaft* (S. 685–694). Institut für EDV-gestützte Methoden in Architektur und Raumplanung. Verfügbar 15. März 2021 unter https://www2.ioer.de/recherche/pdf/2006_meinel_corp.pdf

Mertens, K. (2020). *Photovoltaik: Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis* (5., aktualisierte Auflage). Carl Hanser Verlag München.

Nugroho, A. M. (2020). The Impact of Living Wall on Building Passive Cooling: A Systematic Review and Initial Test. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *448*, 012120. https://doi.org/10.1088/1755-1315/448/1/012120

Optigrün. (o. D.). *Solargründach*. Extensivbegrünung: Optigrün Dachbegrünungen. Verfügbar 6. Januar 2021 unter https://www.optigruen.de/systemloesungen/solargruendach/uebersicht-solargruendach/

Peñaranda Moren, M. S. (2018). *Multifunktionale Systemlösung: Gebäudebegrünung und Photovoltaik* (Dissertation). Technische Universität Wien. Verfügbar 17. Dezember 2020 unter https://resolver.obvsg.at/urn:nbn:at:at-ubtuw:1-113858

Peñaranda Moren, M. S. & Korjenic, A. (2017a). Green buffer space influences on the temperature of photovoltaic modules. *Energy and Buildings*, *146*, 364–382. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.051

Peñaranda Moren, M. S. & Korjenic, A. (2017b). Hotter and colder – How Do Photovoltaics and Greening Impact Exterior Facade Temperatures: The synergies of a Multifunctional System. *Energy and Buildings*, *147*, 123–141. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.082

Peñaranda Moren, M. S. & Korjenic, A. (2018). Untersuchungen zum ganzjährigen Wärmeschutz an Varianten eines kombinierten Dachaufbaus mit Photovoltaik und Begrünung. *Bauphysik*, *40*(3), 131–142. https://doi.org/10.1002/bapi.201810016

Pérez, G., Coma, J., Martorell, I. & Cabeza, L. F. (2014). Vertical Greenery Systems (VGS) for energy saving in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *39*, 139–165. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.055

Perini, K. & Rosasco, P. (2013). Cost–benefit analysis for green façades and living wall systems. *Building and Environment*, *70*, 110–121. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.08.012

Petter Jelle, B., Breivik, C. & Drolsum Røkenes, H. (2012). Building integrated photovoltaic products: A state-of-the-art review and future research opportunities. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *100*, 69–96. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.12.016

Pfoser, N. (2016). *Fassade und Pflanze. Potenziale einer neuen Fassadengestaltung*. Technische Universität Darmstadt. Darmstadt. Verfügbar 17. Dezember 2020 unter https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/5587

Pfoser, N. (2018). *Vertikale Begrünung: Bauweisen und Planungsgrundlagen zur Begrünung von Wänden und Fassaden mit und ohne natürlichen Boden-/Bodenwasseranschluss*. Verlag Eugen Ulmer.

Pfoser, N. (2019). Photovoltaik und Gebäudebegrünung [magazine]. *Neue Landschaft*, *2019*(11). Verfügbar 6. Januar 2021 unter https://neuelandschaft.de/artikel/photovoltaik-und-gebaeudebegruenung-12610.html

Pfoser, N., Jenner, N., Hnerich, J., Heusinger, J. & Weber, S. (2013). *Gebäude, Begrünung Energie: Potenziale und Wechselwirkungen* (Abschlussbericht). Technische Universität Darmstadt, Fachbereich Architektur, FG ee / FG e+f. Darmstadt. Verfügbar 16. März 2021 unter https://www.baufachinformation.de/mobil/literatur.jsp?bu=2013109006683

Poglitsch, H., Hartmann, A., Schwarz, S., Hecht, R., Eisenlohr, J., Ferrara, C. & Behnisch, M. (2018). Eine Frage des Flächensparens: Wo können 1 Milliarde Photovoltaik-Module in Deutschland installiert werden? In G. Meinel, U. Schumacher, M. Behnisch & T. Krüger (Hrsg.), *Flächennutzungsmonitoring X: Flächenpolitik - Flächenmanagement - Indikatoren* (S. 133–142). Rhombos. Verfügbar 3. März 2021 unter https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa2-358271

Quaschning, V. (2019). *Regenerative Energiesysteme: Technologie - Berechnung - Klimaschutz* (10., aktualisierte und erweiterte Auflage). Carl Hanser Verlag München.

Redweik, P., Catita, C. & Brito, M. (2013). Solar energy potential on roofs and facades in an urban landscape. *Solar Energy*, *97*, 332–341. https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.08.036

Rosenzweig, C., Solecki, W. D., Parshall, L., Lynn, B., Cox, J., Goldberg, R., Hodges, S., Gaffin, S., Slosberg, R. B., Savio, P., Dunstan, F. & Watson, M. (2009). Mitigating New York City's Heat Island: Integrating Stakeholder Perspectives and Scientific Evaluation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *90*(9), 1297–1312. https://doi.org/10.1175/2009BAMS2308.1

Senatsverwaltung für Stadtentwicklung. (2011). *Stadtentwicklungsplan Klima: urbane Lebensqualität im Klimawandel sichern*. Berlin. Verfügbar 4. März 2021 unter https://www.stadtentwicklung.berlin.de/planen/stadtentwicklungsplanung/de/klima/download.shtml

Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt. (2016). *Stadtentwicklungsplan Klima: KONKRET - Klimaanpassung in der Wachsenden Stadt*. Berlin. Verfügbar 4. März 2021 unter https://www.stadtentwicklung.berlin.de/planen/stadtentwicklungsplanung/de/klima/download.shtml

Seto, K. C., Dhakal, S., Bigio, A., Blanco, H., Delgado, G. C., Dewar, D., Huang, L., Inaba, A., Kansal, A., Lwasa, S., McMahon, J. E., Müller, D. B., Murakami, J., Nagendra, H. & Ramaswami, A. (2014). Human Settlements, Infrastructure and Spatial Planning. In O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel & J. C. Minx (Hrsg.), *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (S. 923–1000). Cambridge University Press. Verfügbar 22. Februar 2021 unter https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/human-settlements-infrastructure-and-spatial-planning/

Shukla, A. K., Sudhakar, K. & Baredar, P. (2017). Recent advancement in BIPV product technologies: A review. *Energy and Buildings*, *140*, 188–195. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.02.015

Sieker, H., Steyer, R., Büter, B., Leßmann, D., von Tils, R., Becker, C. & Hübner, S. (2019). *Untersuchung der Potentiale für die Nutzung von Regenwasser zur Verdunstungskühlung in Städten* (Abschlussbericht Nr. 111/2019). Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Verfügbar 28. Februar 2021 unter https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/untersuchung-der-potentiale-fuer-die-nutzung-von

SRU (Sachverständigenrat für Umweltfragen). (2020). *Für eine entschlossene Umweltpolitik in Deutschland und Europa: UMWELTGUTACHTEN 2020*. Berlin. Verfügbar 3. Februar 2021 unter https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/01_Umweltgutachten/2016_2020/2020_Umweltgutachten_Entschlossene_Umweltpolitik.html

Statistische Ämter des Bundes und der Länder. (2019). *Methodenbericht zur Flächenerhebung: Ausgabe 2018*. Verfügbar 15. März 2021 unter https://www.statistikportal.de/de/veroeffentlichungen/methodenbericht-zur-flaechenerhebung

Statistische Ämter des Bundes und der Länder. (2021a, 25. Februar). *Bevölkerung kompakt: Personen: Alter*. Zensus Datenbank: Ergebnis 3000G-1003. Verfügbar 25. Februar 2021 unter https://ergebnisse2011.zensus2022.de/datenbank/online Version 2.0, Stand: 25.02.2021

Statistische Ämter des Bundes und der Länder. (2021b, 25. Februar). *Gebäude: Art des Gebäudes*. Zensus Datenbank: Ergebnis 3000G-1003. Verfügbar 25. Februar 2021 unter https://ergebnisse2011.zensus2022.de/datenbank/online Version 2.0, Stand: 25.02.2021

Statistische Ämter des Bundes und der Länder. (2021c, 25. Februar). *Gebäude: Eigentumsform des Gebäudes*. Zensus Datenbank: Ergebnis 3000G-1003. Verfügbar 25. Februar 2021 unter https://ergebnisse2011.zensus2022.de/datenbank/online Version 2.0, Stand: 25.02.2021

Statistische Ämter des Bundes und der Länder. (2021d, 25. Februar). *Wohnungen: Art der Wohnungsnutzung*. Zensus Datenbank: Ergebnis 3000G-1003. Verfügbar 25. Februar 2021 unter https://ergebnisse2011.zensus2022.de/datenbank/online Version 2.0, Stand: 25.02.2021

Sterchele, P., Brandes, J., Heilig, J., Wrede, D., Kost, C., Schlegl, T., Bett, A. & Henning, H.-M. (2020). *Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem: Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen* (Studie). Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Freiburg. Verfügbar 2. März 2021 unter https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/wege-zu-einem-klimaneutralen-energiesystem.html

Tervooren, S. (2015). Potenziale von Grünvolumen und Entsiegelung zur Klimaanpassung am Beispiel der Landeshauptstadt Potsdam. *AGIT Journal für Angewandte Geoinformatik*, *2015*(1), 258–267. https://doi.org/10.14627/537557037

UBA (Umweltbundesamt). (2019). *Monitoringbericht 2019 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel: Bericht der Interministeriellen ArbeitsgruppeAnpassungsstrategie der Bundesregierung*. Verfügbar 16. Februar 2021 unter https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/umweltbundesamt-2019-monitoringbericht-2019-zur

UN (United Nations). (2019). *World urbanization prospects: The 2018 revision*. Department of Economic and Social Affairs, Population Division. New York. Verfügbar 22. Februar 2021 unter https://population.un.org/wup/Publications/

Weiß, J., Bierwirth, A., Knoefel, J., März, S., Kaselofsky, J. & Friege, J. (2018). *Entscheidungskontexte bei der energetischen Sanierung: Ergebnisse aus dem Projekt Perspektiven der Bürgerbeteiligung an der Energiewende unter Berücksichtigung von Verteilungsfragen*. Institut für ökologische Wirtschaftsforschung, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. Verfügbar 25. Februar 2021 unter https://www.ioew.de/publikation/entscheidungskontexte_bei_der_energetischen_sanierung

Weller, B., Hemmerle, C., Jakubetz, S. & Unnewehr, S. (2009). *Photovoltaik: Technik - Gestaltung - Konstruktion* (I. für Internationale Architektur-Dokumentation, Hrsg.; 1. Aufl). Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG.

Wienert, U., Kreienkamp, F., Spekat, A. & Enke, W. (2013). A simple method to estimate the urban heat island intensity in data sets used for the simulation of the thermal behaviour of buildings. *Meteorologische Zeitschrift*, *22*(2), 179–185. https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0397

Wißmann, I., Middendorf, V., Schulz, M. & Veser, S. (2019). VertiKKA: Multifunktionale Fassadenbegrünungsmodule für die Städte der Zukunft. *Korrespondenz Abwasser, Abfall*, *2019*(12), 989–994. https://doi.org/10.3242/kae2019.12.001

zillerplus Architekten und Stadtplaner GmbH. (o. D.). *Smart is GREEN: Local energy management and flexible rooms: a crossgenerational concept for all living*. zillerplus : Smart is GREEN. Verfügbar 26. März 2021 unter `https://zillerplus.de/project/smart/`

ZinCo GmbH. (2020). *Planungshilfe Solarenergie und Dachbegrünung*. Gründach und Solar. Verfügbar 17. März 2021 unter `https://www.zinco.de/solar`

A. Ergänzendes Material

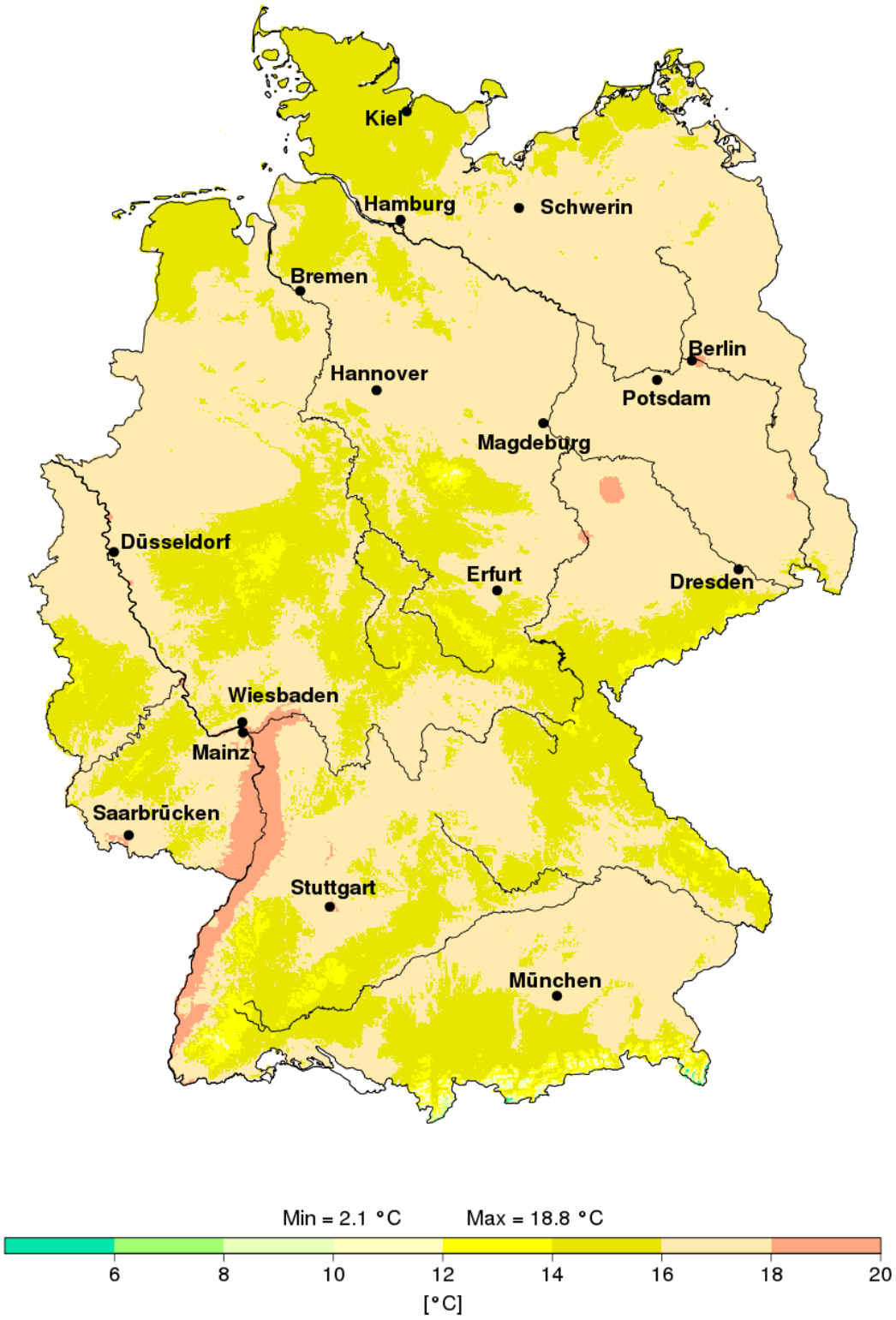


Abbildung A.1.: *Durchschnittliche Lufttemperatur im Sommer in Deutschland im Referenzzeitraum von 1961 bis 1990 (Quelle: DWD, o. D. a).*

B. Material zur Bestimmung der Indikatoren

Abbildung B.1.: *Anzahl heißer Tage in Deutschland im Referenzzeitraum von 1961 bis 1990 (Quelle: DWD, o. D. a).*

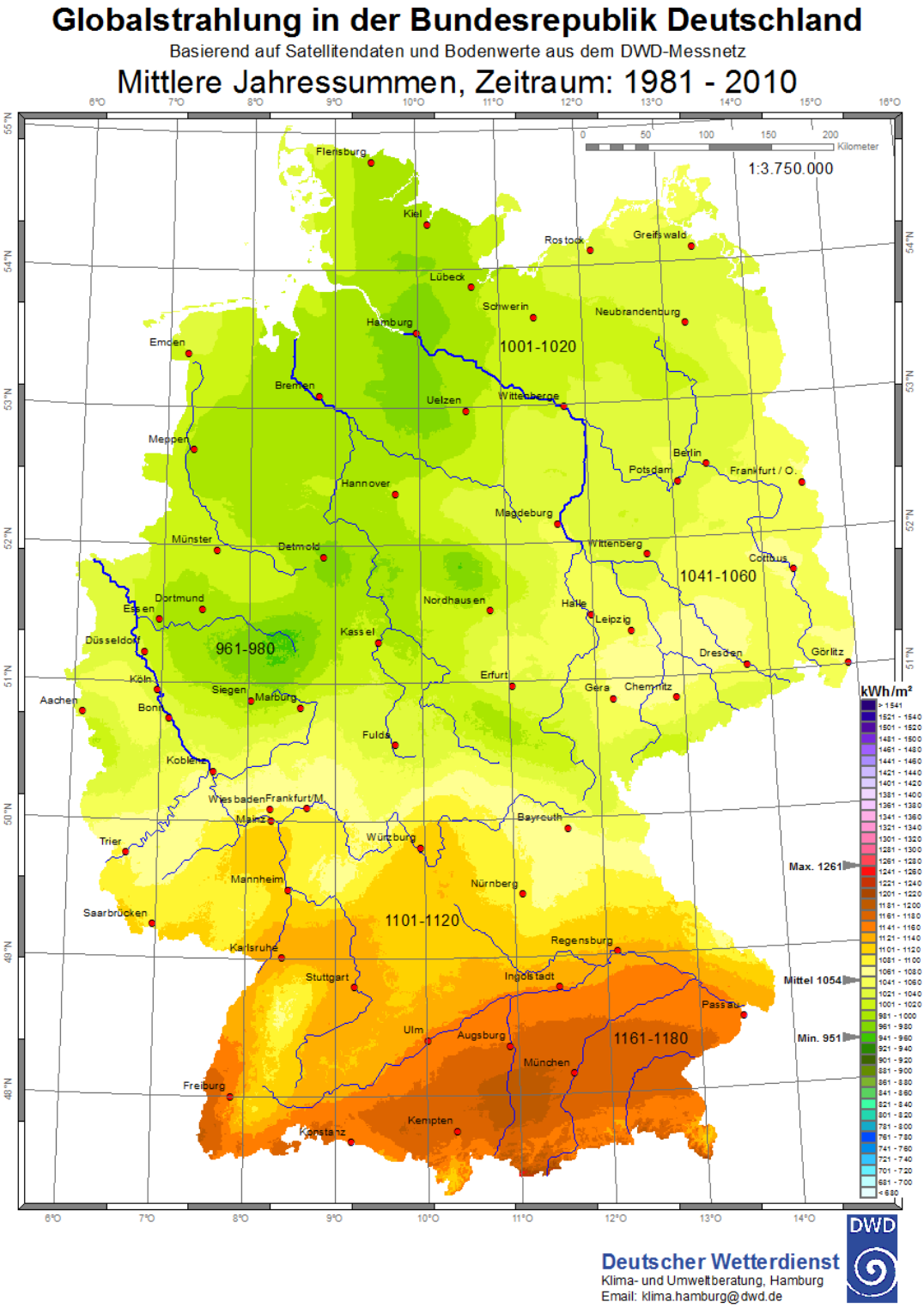


Abbildung B.2.: *Mittlere Jahressummen der Globalstrahlung für den Zeitraum von 1981 bis 2010 in Deutschland (Quelle: DWD, o. D. b).*

C. Vollständige Berechnungsergebnisse der Proxyindikatoren

Die vollständigen Berechnungsergebnisse der aufgestellten Proxyindikatoren für die betrachteten Szenarien sind in den folgenden Tabellen C.1 bis C.10 aufgeführt. Diese wurden mittels eines Tabellenkalkulationsprogramms berechnet. Die entsprechende Datei im Format XLSX ist der eingereichten elektronischen Version der Arbeit beigelegt.

Tabelle C.1.: *Vollständige Berechnungsergebnisse der Proxyindikatoren im Szenario$_{1,1}$ (Quelle: Eigene Darstellung).*

Proxyindikator	**$I_{j\,min}$**	**$I_{j\,max}$**	**Einheit**	**g_j**	**PVF**		**FBS**		**MFS**	
					Ein[1]	**Aus[2]**	**Ein**	**Aus**	**Ein**	**Aus**
Produkton erneuerbarer Strom						20%		0%		14%
Bedarf						100%		100%		100%
P_1 Bedarf Solarstrom					1	100%	1	100%	1	100%
Wirkungspotential						20%		0%		14%
P_2 Solare Bestrahlung Fassade						20%		20%		20%
$I_{2.1}$ Globalstrahlung	0	1200	kWh/m²	-	960	80%	960	80%	960	80%
$I_{2.2}$ Bestrahlungsverhältnis	0	80	%	-	50	63%	50	63%	50	63%
$I_{2.3}$ Verschattungsgrad	100	0		-	60	40%	60	40%	60	40%
P_3 Temperatureinfluss PV						98%		99%		99%
P_4 Stromerzeugungspotential Maßnahme						100%		0%		70%
$I_{4.1}$ Modulwirkungsgrad	0	21,5	%	-	21,5	100%	0	0%	15	70%
Reduzierung Hitzebelastung						0%		8%		8%
Bedarf						8%		8%		8%
P_5 Mikroklimatische Hitzebelastung						40%		40%		40%
$I_{5.1}$ Hitze Regionalklima	0	10	Tage	8	1	10%	1	10%	1	10%
$I_{5.2}$ UHI-Index	0	9,1	K	9,1	6	66%	6	66%	6	66%
$I_{5.3}$ Grünvolumenanteil	100	0	%	5,6	60	40%	60	40%	60	40%
P_2 Solare Bestrahlung Fassade						20%		20%		20%
P_6 Vulnerabilität Bevölkerung					1	100%	1	100%	1	100%
Wirkungspotential						0%		100%		100%
P_7 Kühlpotential Maßnahme					0	0%	1	100%	1	100%

[1] Eingabewerte für das entsprechende Szenario; [2] Ausgabewerte für die berechneten Proxyindikatoren

Tabelle C.2.: *Vollständige Berechnungsergebnisse der Proxyindikatoren im Szenario$_{1,2}$ (Quelle: Eigene Darstellung).*

Proxyindikator	**$I_{j\,min}$**	**$I_{j\,max}$**	**Einheit**	**g_j**	**PVF**		**FBS**		**MFS**	
					Ein[1]	**Aus[2]**	**Ein**	**Aus**	**Ein**	**Aus**
Produkton erneuerbarer Strom						19%		0%		14%
Bedarf						100%		100%		100%
P_1 Bedarf Solarstrom					1	100%	1	100%	1	100%
Wirkungspotential						19%		0%		14%
P_2 Solare Bestrahlung Fassade						20%		20%		20%
$I_{2.1}$ Globalstrahlung	0	1200	kWh/m²	-	960	80%	960	80%	960	80%
$I_{2.2}$ Bestrahlungsverhältnis	0	80	%	-	50	63%	50	63%	50	63%
$I_{2.3}$ Verschattungsgrad	100	0		-	60	40%	60	40%	60	40%
P_3 Temperatureinfluss PV						97%		98%		98%
P_4 Stromerzeugungspotential Maßnahme						100%		0%		70%
$I_{4.1}$ Modulwirkungsgrad	0	21,5	%	-	21,5	100%	0	0%	15	70%
Reduzierung Hitzebelastung						0%		14%		14%
Bedarf						14%		14%		14%
P_5 Mikroklimatische Hitzebelastung						70%		70%		70%
$I_{5.1}$ Hitze Regionalklima	0	10	Tage	8	5	50%	5	50%	5	50%
$I_{5.2}$ UHI-Index	0	9,1	K	9,1	8	88%	8	88%	8	88%
$I_{5.3}$ Grünvolumenanteil	100	0	%	5,6	30	70%	30	70%	30	70%
P_2 Solare Bestrahlung Fassade						20%		20%		20%
P_6 Vulnerabilität Bevölkerung					1	100%	1	100%	1	100%
Wirkungspotential						0%		100%		100%
P_7 Kühlpotential Maßnahme					0	0%	1	100%	1	100%

[1] Eingabewerte für das entsprechende Szenario; [2] Ausgabewerte für die berechneten Proxyindikatoren

Tabelle C.3.: *Vollständige Berechnungsergebnisse der Proxyindikatoren im Szenario$_{1,3}$ (Quelle: Eigene Darstellung).*

Proxyindikator	**$I_{j\,min}$**	**$I_{j\,max}$**	**Einheit**	**g_j**	**PVF**		**FBS**		**MFS**	
					Ein[1]	**Aus[2]**	**Ein**	**Aus**	**Ein**	**Aus**
Produkton erneuerbarer Strom						19%		0%		14%
Bedarf						100%		100%		100%
P_1 Bedarf Solarstrom					1	100%	1	100%	1	100%
Wirkungspotential						19%		0%		14%
P_2 Solare Bestrahlung Fassade						20%		20%		20%
$I_{2.1}$ Globalstrahlung	0	1200	kWh/m²	-	960	80%	960	80%	960	80%
$I_{2.2}$ Bestrahlungsverhältnis	0	80	%	-	50	63%	50	63%	50	63%
$I_{2.3}$ Verschattungsgrad	100	0		-	60	40%	60	40%	60	40%
P_3 Temperatureinfluss PV						96%		98%		98%
P_4 Stromerzeugungspotential Maßnahme						100%		0%		70%
$I_{4.1}$ Modulwirkungsgrad	0	21,5	%	-	21,5	100%	0	0%	15	70%
Reduzierung Hitzebelastung						0%		20%		20%
Bedarf						20%		20%		20%
P_5 Mikroklimatische Hitzebelastung						100%		100%		100%
$I_{5.1}$ Hitze Regionalklima	0	10	Tage	8	10	100%	10	100%	10	100%
$I_{5.2}$ UHI-Index	0	9,1	K	9,1	9,1	100%	9,1	100%	9,1	100%
$I_{5.3}$ Grünvolumenanteil	100	0	%	5,6	0	100%	0	100%	0	100%
P_2 Solare Bestrahlung Fassade						20%		20%		20%
P_6 Vulnerabilität Bevölkerung					1	100%	1	100%	1	100%
Wirkungspotential						0%		100%		100%
P_7 Kühlpotential Maßnahme					0	0%	1	100%	1	100%

[1] Eingabewerte für das entsprechende Szenario; [2] Ausgabewerte für die berechneten Proxyindikatoren

Tabelle C.4.: *Vollständige Berechnungsergebnisse der Proxyindikatoren im Szenario$_{2,1}$ (Quelle: Eigene Darstellung).*

Proxyindikator	**$I_{j\,min}$**	**$I_{j\,max}$**	**Einheit**	**g_j**	**PVF**		**FBS**		**MFS**	
					Ein[1]	**Aus[2]**	**Ein**	**Aus**	**Ein**	**Aus**
Produkton erneuerbarer Strom						51%		0%		37%
Bedarf						100%		100%		100%
P_1 Bedarf Solarstrom					1	100%	1	100%	1	100%
Wirkungspotential						51%		0%		37%
P_2 Solare Bestrahlung Fassade						54%		54%		54%
$I_{2.1}$ Globalstrahlung	0	1200	kWh/m²	-	1054	88%	1054	88%	1054	88%
$I_{2.2}$ Bestrahlungsverhältnis	0	80	%	-	70	88%	70	88%	70	88%
$I_{2.3}$ Verschattungsgrad	100	0		-	30	70%	30	70%	30	70%
P_3 Temperatureinfluss PV						95%		97%		97%
P_4 Stromerzeugungspotential Maßnahme						100%		0%		70%
$I_{4.1}$ Modulwirkungsgrad	0	21,5	%	-	21,5	100%	0	0%	15	70%
Reduzierung Hitzebelastung						0%		21%		21%
Bedarf						21%		21%		21%
P_5 Mikroklimatische Hitzebelastung						40%		40%		40%
$I_{5.1}$ Hitze Regionalklima	0	10	Tage	8	1	10%	1	10%	1	10%
$I_{5.2}$ UHI-Index	0	9,1	K	9,1	6	66%	6	66%	6	66%
$I_{5.3}$ Grünvolumenanteil	100	0	%	5,6	60	40%	60	40%	60	40%
P_2 Solare Bestrahlung Fassade						54%		54%		54%
P_6 Vulnerabilität Bevölkerung					1	100%	1	100%	1	100%
Wirkungspotential						0%		100%		100%
P_7 Kühlpotential Maßnahme					0	0%	1	100%	1	100%

[1] Eingabewerte für das entsprechende Szenario; [2] Ausgabewerte für die berechneten Proxyindikatoren

Tabelle C.5.: *Vollständige Berechnungsergebnisse der Proxyindikatoren im Szenario$_{2,2}$ (Quelle: Eigene Darstellung).*

Proxyindikator	**$I_{j\,min}$**	**$I_{j\,max}$**	**Einheit**	**g_j**	**PVF**		**FBS**		**MFS**	
					Ein[1]	**Aus[2]**	**Ein**	**Aus**	**Ein**	**Aus**
Produkton erneuerbarer Strom						51%		0%		36%
Bedarf						100%		100%		100%
P_1 Bedarf Solarstrom					1	100%	1	100%	1	100%
Wirkungspotential						51%		0%		36%
P_2 Solare Bestrahlung Fassade						54%		54%		54%
$I_{2.1}$ Globalstrahlung	0	1200	kWh/m²	-	1054	88%	1054	88%	1054	88%
$I_{2.2}$ Bestrahlungsverhältnis	0	80	%	-	70	88%	70	88%	70	88%
$I_{2.3}$ Verschattungsgrad	100	0		-	30	70%	30	70%	30	70%
P_3 Temperatureinfluss PV						94%		97%		97%
P_4 Stromerzeugungspotential Maßnahme						100%		0%		70%
$I_{4.1}$ Modulwirkungsgrad	0	21,5	%	-	21,5	100%	0	0%	15	70%
Reduzierung Hitzebelastung						0%		38%		38%
Bedarf						38%		38%		38%
P_5 Mikroklimatische Hitzebelastung						70%		70%		70%
$I_{5.1}$ Hitze Regionalklima	0	10	Tage	8	5	50%	5	50%	5	50%
$I_{5.2}$ UHI-Index	0	9,1	K	9,1	8	88%	8	88%	8	88%
$I_{5.3}$ Grünvolumenanteil	100	0	%	5,6	30	70%	30	70%	30	70%
P_2 Solare Bestrahlung Fassade						54%		54%		54%
P_6 Vulnerabilität Bevölkerung					1	100%	1	100%	1	100%
Wirkungspotential						0%		100%		100%
P_7 Kühlpotential Maßnahme					0	0%	1	100%	1	100%

[1] Eingabewerte für das entsprechende Szenario; [2] Ausgabewerte für die berechneten Proxyindikatoren

Tabelle C.6.: *Vollständige Berechnungsergebnisse der Proxyindikatoren im Szenario$_{2,3}$ (Quelle: Eigene Darstellung).*

Proxyindikator	**$I_{j\,min}$**	**$I_{j\,max}$**	**Einheit**	**g_j**	**PVF**		**FBS**		**MFS**	
					Ein[1]	**Aus[2]**	**Ein**	**Aus**	**Ein**	**Aus**
Produkton erneuerbarer Strom						50%		0%		36%
Bedarf						100%		100%		100%
P_1 Bedarf Solarstrom					1	100%	1	100%	1	100%
Wirkungspotential						50%		0%		36%
P_2 Solare Bestrahlung Fassade						54%		54%		54%
$I_{2.1}$ Globalstrahlung	0	1200	kWh/m²	-	1054	88%	1054	88%	1054	88%
$I_{2.2}$ Bestrahlungsverhältnis	0	80	%	-	70	88%	70	88%	70	88%
$I_{2.3}$ Verschattungsgrad	100	0		-	30	70%	30	70%	30	70%
P_3 Temperatureinfluss PV						94%		97%		97%
P_4 Stromerzeugungspotential Maßnahme						100%		0%		70%
$I_{4.1}$ Modulwirkungsgrad	0	21,5	%	-	21,5	100%	0	0%	15	70%
Reduzierung Hitzebelastung						0%		54%		54%
Bedarf						54%		54%		54%
P_5 Mikroklimatische Hitzebelastung						100%		100%		100%
$I_{5.1}$ Hitze Regionalklima	0	10	Tage	8	10	100%	10	100%	10	100%
$I_{5.2}$ UHI-Index	0	9,1	K	9,1	9,1	100%	9,1	100%	9,1	100%
$I_{5.3}$ Grünvolumenanteil	100	0	%	5,6	0	100%	0	100%	0	100%
P_2 Solare Bestrahlung Fassade						54%		54%		54%
P_6 Vulnerabilität Bevölkerung					1	100%	1	100%	1	100%
Wirkungspotential						0%		100%		100%
P_7 Kühlpotential Maßnahme					0	0%	1	100%	1	100%

[1] Eingabewerte für das entsprechende Szenario; [2] Ausgabewerte für die berechneten Proxyindikatoren

Tabelle C.7.: *Vollständige Berechnungsergebnisse der Proxyindikatoren im Szenario$_{3,1}$ (Quelle: Eigene Darstellung).*

Proxyindikator	**$I_{j\,min}$**	**$I_{j\,max}$**	**Einheit**	**g_j**	**PVF**		**FBS**		**MFS**	
					Ein[1]	**Aus[2]**	**Ein**	**Aus**	**Ein**	**Aus**
Produkton erneuerbarer Strom						91%		0%		67%
Bedarf						100%		100%		100%
P_1 Bedarf Solarstrom					1	100%	1	100%	1	100%
Wirkungspotential						91%		0%		67%
P_2 Solare Bestrahlung Fassade						100%		100%		100%
$I_{2.1}$ Globalstrahlung	0	1200	kWh/m²	-	1200	100%	1200	100%	1200	100%
$I_{2.2}$ Bestrahlungsverhältnis	0	80	%	-	80	100%	80	100%	80	100%
$I_{2.3}$ Verschattungsgrad	100	0		-	0	100%	0	100%	0	100%
P_3 Temperatureinfluss PV						91%		96%		96%
P_4 Stromerzeugungspotential Maßnahme						100%		0%		70%
$I_{4.1}$ Modulwirkungsgrad	0	21,5	%	-	21,5	100%	0	0%	15	70%
Reduzierung Hitzebelastung						0%		40%		40%
Bedarf						40%		40%		40%
P_5 Mikroklimatische Hitzebelastung						40%		40%		40%
$I_{5.1}$ Hitze Regionalklima	0	10	Tage	8	1	10%	1	10%	1	10%
$I_{5.2}$ UHI-Index	0	9,1	K	9,1	6	66%	6	66%	6	66%
$I_{5.3}$ Grünvolumenanteil	100	0	%	5,6	60	40%	60	40%	60	40%
P_2 Solare Bestrahlung Fassade						100%		100%		100%
P_6 Vulnerabilität Bevölkerung					1	100%	1	100%	1	100%
Wirkungspotential						0%		100%		100%
P_7 Kühlpotential Maßnahme					0	0%	1	100%	1	100%

[1] Eingabewerte für das entsprechende Szenario; [2] Ausgabewerte für die berechneten Proxyindikatoren

Tabelle C.8.: *Vollständige Berechnungsergebnisse der Proxyindikatoren im Szenario$_{3,2}$ (Quelle: Eigene Darstellung).*

Proxyindikator	**$I_{j\,min}$**	**$I_{j\,max}$**	**Einheit**	**g_j**	**PVF**		**FBS**		**MFS**	
					Ein[1]	**Aus[2]**	**Ein**	**Aus**	**Ein**	**Aus**
Produkton erneuerbarer Strom						91%		0%		67%
Bedarf						100%		100%		100%
P_1 Bedarf Solarstrom					1	100%	1	100%	1	100%
Wirkungspotential						91%		0%		67%
P_2 Solare Bestrahlung Fassade						100%		100%		100%
$I_{2.1}$ Globalstrahlung	0	1200	kWh/m²	-	1200	100%	1200	100%	1200	100%
$I_{2.2}$ Bestrahlungsverhältnis	0	80	%	-	80	100%	80	100%	80	100%
$I_{2.3}$ Verschattungsgrad	100	0		-	0	100%	0	100%	0	100%
P_3 Temperatureinfluss PV						91%		95%		95%
P_4 Stromerzeugungspotential Maßnahme						100%		0%		70%
$I_{4.1}$ Modulwirkungsgrad	0	21,5	%	-	21,5	100%	0	0%	15	70%
Reduzierung Hitzebelastung						0%		70%		70%
Bedarf						70%		70%		70%
P_5 Mikroklimatische Hitzebelastung						70%		70%		70%
$I_{5.1}$ Hitze Regionalklima	0	10	Tage	8	5	50%	5	50%	5	50%
$I_{5.2}$ UHI-Index	0	9,1	K	9,1	8	88%	8	88%	8	88%
$I_{5.3}$ Grünvolumenanteil	100	0	%	5,6	30	70%	30	70%	30	70%
P_2 Solare Bestrahlung Fassade						100%		100%		100%
P_6 Vulnerabilität Bevölkerung					1	100%	1	100%	1	100%
Wirkungspotential						0%		100%		100%
P_7 Kühlpotential Maßnahme					0	0%	1	100%	1	100%

[1] Eingabewerte für das entsprechende Szenario; [2] Ausgabewerte für die berechneten Proxyindikatoren

Tabelle C.9.: *Vollständige Berechnungsergebnisse der Proxyindikatoren im Szenario$_{3,3}$ (Quelle: Eigene Darstellung).*

Proxyindikator	**$I_{j\,min}$**	**$I_{j\,max}$**	**Einheit**	**g_j**	**PVF**		**FBS**		**MFS**	
					Ein[1]	**Aus[2]**	**Ein**	**Aus**	**Ein**	**Aus**
Produkton erneuerbarer Strom						90%		0%		66%
Bedarf						100%		100%		100%
P_1 Bedarf Solarstrom					1	100%	1	100%	1	100%
Wirkungspotential						90%		0%		66%
P_2 Solare Bestrahlung Fassade						100%		100%		100%
$I_{2.1}$ Globalstrahlung	0	1200	kWh/m²	-	1200	100%	1200	100%	1200	100%
$I_{2.2}$ Bestrahlungsverhältnis	0	80	%	-	80	100%	80	100%	80	100%
$I_{2.3}$ Verschattungsgrad	100	0		-	0	100%	0	100%	0	100%
P_3 Temperatureinfluss PV						90%		95%		95%
P_4 Stromerzeugungspotential Maßnahme						100%		0%		70%
$I_{4.1}$ Modulwirkungsgrad	0	21,5	%	-	21,5	100%	0	0%	15	70%
Reduzierung Hitzebelastung						0%		100%		100%
Bedarf						100%		100%		100%
P_5 Mikroklimatische Hitzebelastung						100%		100%		100%
$I_{5.1}$ Hitze Regionalklima	0	10	Tage	8	10	100%	10	100%	10	100%
$I_{5.2}$ UHI-Index	0	9,1	K	9,1	9,1	100%	9,1	100%	9,1	100%
$I_{5.3}$ Grünvolumenanteil	100	0	%	5,6	0	100%	0	100%	0	100%
P_2 Solare Bestrahlung Fassade						100%		100%		100%
P_6 Vulnerabilität Bevölkerung					1	100%	1	100%	1	100%
Wirkungspotential						0%		100%		100%
P_7 Kühlpotential Maßnahme					0	0%	1	100%	1	100%

[1] Eingabewerte für das entsprechende Szenario; [2] Ausgabewerte für die berechneten Proxyindikatoren

Tabelle C.10.: *Vollständige Berechnungsergebnisse der Proxyindikatoren im Szenario$_{3,3\text{-}Synergie}$ (Quelle: Eigene Darstellung).*

Proxyindikator	**$I_{j\,min}$**	**$I_{j\,max}$**	**Einheit**	**g_j**	**PVF**		**FBS**		**MFS**	
					Ein[1]	**Aus[2]**	**Ein**	**Aus**	**Ein**	**Aus**
Produkton erneuerbarer Strom						63%		0%		66%
Bedarf						100%		100%		100%
P_1 Bedarf Solarstrom					1	100%	1	100%	1	100%
Wirkungspotential						63%		0%		66%
P_2 Solare Bestrahlung Fassade						100%		100%		100%
$I_{2.1}$ Globalstrahlung	0	1200	kWh/m²	-	1200	100%	1200	100%	1200	100%
$I_{2.2}$ Bestrahlungsverhältnis	0	80	%	-	80	100%	80	100%	80	100%
$I_{2.3}$ Verschattungsgrad	100	0		-	0	100%	0	100%	0	100%
P_3 Temperatureinfluss PV						90%		95%		95%
P_4 Stromerzeugungspotential Maßnahme						70%		0%		70%
$I_{4.1}$ Modulwirkungsgrad	0	21,5	%	-	15	70%	0	0%	15	70%
Reduzierung Hitzebelastung						0%		100%		100%
Bedarf						100%		100%		100%
P_5 Mikroklimatische Hitzebelastung						100%		100%		100%
$I_{5.1}$ Hitze Regionalklima	0	10	Tage	8	10	100%	10	100%	10	100%
$I_{5.2}$ UHI-Index	0	9,1	K	9,1	9,1	100%	9,1	100%	9,1	100%
$I_{5.3}$ Grünvolumenanteil	100	0	%	5,6	0	100%	0	100%	0	100%
P_2 Solare Bestrahlung Fassade						100%		100%		100%
P_6 Vulnerabilität Bevölkerung					1	100%	1	100%	1	100%
Wirkungspotential						0%		100%		100%
P_7 Kühlpotential Maßnahme					0	0%	1	100%	1	100%

[1] Eingabewerte für das entsprechende Szenario; [2] Ausgabewerte für die berechneten Proxyindikatoren