

**Photovoltaik und Dachbegrünung: eine sinnvolle Kombination?  
Literaturstudie zum Diskussions- und Forschungsstand  
der Wissenschaft und Praxis**

**Bachelorarbeit**

zur Erlangung des akademischen Grades „Bachelor of Science“ (B. Sc.)

Universität Kassel  
Fachbereich Wirtschaftswissenschaften  
Studiengang Wirtschaftsingenieurwesen  
Fachrichtung Regenerative  
Energien und Energieeffizienz

vorgelegt von

Martin Meyer

aus Nürnberg  
Matrikel-Nr. 33225153

Gutachter Universität Kassel  
Prof. Dr. Klaus Vajen  
Dr. Daniel Fleig

Betreuer Fraunhofer ISE  
Dipl.-Ing. Georg Bopp

Kassel, März 2018

## **Abstract**

Der verstärkte Ausbau regenerativer Energien, unter anderem aufgrund des anthropogenen Klimawandels, führt zu einer steigenden Installation von Photovoltaikanlagen auf Flachdächern. Diese eignen sich allerdings auch ideal für Dachbegrünungen, mit denen sich die Auswirkungen des Klimawandels in den Städten abmildern lassen. Die Verwirklichung von Photovoltaik und Dachbegrünung auf derselben Dachfläche könnte deswegen eine Möglichkeit darstellen einen Flächennutzungskonflikt beider Dachnutzungsarten zu vermeiden. In der vorliegenden Arbeit wurde untersucht ob es sich unter ökologischen und wirtschaftlichen Aspekten um eine sinnvolle Kombination handelt. Bei fachgerechter Umsetzung erwies sich das PV-Gründach dabei als praxistauglich. Durch Berücksichtigung spezifischer Anforderungen und sorgfältiger Pflege ergeben sich im Vergleich zur separaten Nutzung keine zwingenden Zielkonflikte zwischen PV-Erträgen oder der ökologischen Qualität der Dachbegrünung. Im Idealfall kann eine doppelte Ausnutzung der Dachfläche erreicht werden. Der häufig genannte Synergieeffekt, bei dem die Dachbegrünung durch Verdunstungskühlung den Wirkungsgrad einer PV-Anlage steigert, lässt sich anhand der vorhandenen wissenschaftlichen Studien allerdings nur als marginal bewerten. Die betriebswirtschaftliche Betrachtung ergab, dass es sich bei der Kombination um eine wenig rentable Nutzung der Dachfläche handelt, welches sich hauptsächlich auf den hohen Aufwand und den eher geringen ökonomischen Nutzen der Dachbegrünung zurückführen ließ. Einzig durch Förderung der Anschaffungskosten für die Begrünung, minimierten Pflegeaufwand und idealer sonstiger Rahmenbedingungen konnte in der Investitionsrechnung ein positives Betriebsergebnis erzielt werden. Bei separater Betrachtung und verursachergerechten Kostenumlegung ist die PV-Anlage des PV-Gründaches jedoch rentabel und kann einen positiven Deckungsbeitrag zu den Anschaffungs- und Pflegekosten der Begrünung liefern. Die Wirtschaftlichkeit stellt zudem nur eines der für die Bewertung herangezogenen Kriterien dar. Mit nachhaltig produziertem Strom trägt das PV-Gründach zum Klimaschutz und mit Verdunstungskühlung, WasserRetention und Dämmwirkung zur Klimaanpassung bei. Durch zusätzlichen Nutzen, wie der Förderung der Biodiversität, Verbesserung des Kleinklimas, Ästhetik und Bindung von Schadstoffen wird die Lebensqualität in den Städten und der unmittelbaren Umgebung erhöht.

**Schlüsselwörter:** PV-Gründach, GRIPV, Green Roof Integrated Photovoltaics, Energie-Gründach, Photovoltaik, Dachbegrünung, Flachdach

## **Erklärung**

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig durchgeführt und verfasst, keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet und sämtliche Stellen, die anderen Werken im Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen sind, mit Quellenangaben kenntlich gemacht habe. Desgleichen gilt für Zeichnungen, Skizzen, bildliche Darstellungen oder Gleichungen.

Kassel, den 06. März 2018

Martin Meyer

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	1
2	Photovoltaik und Dachbegrünung auf Flachdächern .....	5
2.1	Flachdächer und deren Nutzungsmöglichkeiten.....	5
2.2	PV–Anlage .....	6
2.3	Dachbegrünung .....	8
3	Umsetzung eines PV–Gründaches – Planung, Ausführung und Nutzung .....	12
3.1	Umsetzungsmöglichkeiten .....	12
3.1.1	Gründach–Unterkonstruktion .....	12
3.1.2	Aerodynamisch.....	13
3.1.3	Bifazial .....	14
3.1.4	PV–Dachgarten .....	15
3.2	Spezifische Anforderungen an ein PV–Gründach .....	16
3.2.1	Statik.....	16
3.2.2	Vermeidung von Verschattungen .....	17
3.2.3	Pflege.....	23
3.3	Evaluation .....	23
4	Ökologische Qualität der Begrünung eines PV–Gründaches .....	25
4.1	Ökologische Vorteile von extensiver und intensiver Dachbegrünung .....	25
4.2	Biodiversität eines PV–Gründaches .....	26

4.3 Evaluation – Übertragbarkeit der ökologischen Qualität einer extensiven Begrünung auf das PV–Gründach .....	30
5 Doppelte Flächenausnutzung.....	31
5.1 Süd–Ausrichtung.....	32
5.2 Ost–West–Ausrichtung .....	34
6 PV–Ertragssteigerung durch Dachbegrünung .....	36
6.1 Ertragssteigerung durch Kühlung .....	37
6.2 Ein neuer Ansatz – Ertragssteigerung durch Albedo.....	39
6.3 Evaluation .....	40
7 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....	41
7.1 Ökonomischer Nutzen einer Dachbegrünung.....	42
7.2 Grundlegende Annahmen der Beispielrechnung.....	43
7.3 Kostengegenüberstellung.....	44
7.4 Investitionsrechnung für das PV–Gründach und PV–Kiesdach ...	46
7.4.1 Methode des Internen Zinsfußes .....	46
7.4.2 Rahmenbedingungen der Investitionsrechnung .....	47
7.4.3 Ergebnisse der Investitionsrechnung .....	49
7.4.4 Sensitivitätsanalyse für das PV–Gründach .....	50
7.4.5 Optimistisches Szenario.....	51
7.4.6 Finanzierung der Dachbegrünung durch die Erträge der PV–Anlage .....	53
7.5 Evaluation.....	54
8 Nutzwertanalyse – PV–Gründach im Vergleich mit anderen Formen der Dachnutzung.....	54
9 Zusammenfassung und Ausblick.....	57

10 Abbildungsverzeichnis.....	61
11 Tabellenverzeichnis .....	63
12 Literaturverzeichnis .....	I
13 Anhang .....	XI

## 1 Einleitung

Die globale Energieversorgung, die hauptsächlich über fossile Brennstoffe erfolgt, ist mit einer Vielzahl an ökologischen und gesellschaftlichen Nachteilen verbunden. [1] Die verwendeten Energieträger sind nur begrenzt vorhanden, stoßen bei Verbrennung Schadstoffe aus und sind hauptsächlich für den anthropogenen Klimawandel verantwortlich. Durch die verstärkte Verwendung von Erneuerbaren Energien wird das konventionelle Energieversorgungssystem zu einem nachhaltigeren System mit weniger schädlichen Auswirkungen auf Mensch und Umwelt umgestaltet.

Insbesondere in Deutschland werden Erneuerbare Energien im Zuge der Energiewende immer weiter ausgebaut und stellen mittlerweile die Hauptstromquelle dar. Nach EU-Richtlinie soll deren Anteil am Endenergieverbrauch bis zum Jahr 2020 18 % betragen. [2] Prognosen des Bundesverband Erneuerbare Energie e. V. (BEE) zufolge wird Deutschland dieses Ziel jedoch ohne zusätzliches Handeln um gut zwei Prozent verfehlten. [3] Auch die im Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) festgelegte jährliche Zubau-Rate von 2,5 GW für Photovoltaikanlagen wurde im Jahr 2017 nicht erreicht. [4] Innerhalb der Erneuerbaren Energien nimmt Photovoltaik (PV) jedoch aufgrund der guten Ergänzung zur Windenergie, den stark gesunkenen Systempreisen und der dezentralen Einbindungs möglichkeit in das Energiesystem eine zentrale Rolle ein. In einem Szenario des Fraunhofer ISE wurde für eine potentielle deutsche Stromversorgung im Jahr 2050 ein PV-Anteil von 30 % empfohlen. Im Jahr 2017 wurden allerdings nur ca. 7,2 % des Netto-Stromverbrauchs durch PV-Strom gedeckt. Für eine erfolgreiche Energiewende ist daher noch ein starker Ausbau der PV-Leistung notwendig.

Gleichzeitig machen sich erste Folgen des Klimawandels schon heute bemerkbar. [5] Meeresspiegel und durchschnittliche Lufttemperatur haben sich seit den Anfängen des 20 Jahrhunderts erhöht, Gletscher schrumpfen oder verschwinden gänzlich und extreme Wetterereignisse nehmen zu. Von der deutschen Bundesregierung wurden deswegen mit einer Anpassungsstrategie (2008) und einem Aktionsplan (2011) [6] politische Rahmenbedingungen und konkrete Maßnahmen beschlossen um die Folgen der Klimaerwärmung abzumildern.

Eine Möglichkeit, die sich vor allem im städtischen Bereich anbietet, ist die Begrünung von Dächern. Gerade in Städten werden zunehmend höhere Tem-

peraturen erreicht als im Umland. [7] Es bilden sich Wärmeinseln (urban heat islands), die sich negativ auf die Gesundheit der Bewohner und auf städtische Flora und Fauna auswirken. Durch Verdunstungskühlung kann eine Begrünung von Dächern der Erwärmung entgegenwirken und positiv zum Stadtklima beitragen. Gleichzeitig verfügt eine Dachbegrünung auch über eine Dämmwirkung, die im Sommer für eine kühtere und im Winter für eine wärmere Innen temperatur in Gebäuden sorgt. Bei Starkregenereignissen werden die Abwasserwerke entlastet, indem Regenwasser durch Wasserrückhalt erst mit erheblicher Verzögerung in die Kanalisation abgeleitet wird. Bewohner profitieren zudem von einer längeren Haltbarkeit der Dachabdichtung und durch unmittelbare ökologische Vorteile wie Schallschutz und Schadstoffbindung. Tieren und Pflanzen ergibt sich durch die naturnahen Strukturen einer Dachbegrünung ein neuer Lebensraum, wodurch die städtische Biodiversität gefördert wird. Mit Bindung von CO<sub>2</sub> und dessen indirekte Einsparung über die Dämmwirkung verbessert eine Dachbegrünung zudem die Energiebilanz des Gebäudes.

Aufgrund der zahlreichen positiven Aspekte fordern immer mehr Städte und Gemeinden in Bebauungsplänen begrünte Dächer und bieten den Bauherren Anreize, wie beispielsweise eine direkte Förderung. [8-10] Da Naturflächen immer mehr versiegelt werden und die Folgen des Klimawandels immer weiter zunehmen ist davon auszugehen, dass auch Dachbegrünungen in der Stadtplanung eine immer wichtigere Rolle einnehmen werden.

Sowohl für den Ausbau der PV-Leistung als auch für Dachbegrünungen werden Dachflächen benötigt. Kommunen und Bauherren stehen deshalb vor der Frage, für welche der beiden Nutzungsmöglichkeiten sie sich entscheiden sollten. [9,10] Dies gilt besonders für Flachdächer<sup>1</sup>, die sich aufgrund ihrer geringen Neigung besonders für eine umfangreiche Begrünung eignen. [7] Eine Entscheidung für die Photovoltaik kann dabei eher als Klimaschutz, eine Entscheidung für Dachbegrünung hingegen mehr als Klimaanpassung angesehen werden.

Die Verwirklichung von Photovoltaik und Dachbegrünung auf derselben Dachfläche könnte deswegen eine Möglichkeit darstellen die Vorteile einer Dachbegrünung zu nutzen, ohne dabei auf eine nachhaltige Stromproduktion ver-

---

<sup>1</sup> Unter Flachdächer versteht man Dachflächen mit Neigung unter 5°. Statt mit einer Dachdeckung werden diese mit einer Dachabdichtung ausgeführt. [11]

zichten zu müssen.<sup>2</sup> Damit würde sich ein Flächennutzungskonflikt zwischen PV und Dachbegrünung auf den begrenzten Flachdächern vermeiden lassen.

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wird deswegen untersucht ob es sich dabei unter ökologischen und wirtschaftlichen Aspekten um eine sinnvolle Kombination handelt.

Dafür wird zunächst beschrieben wie Flachdächer aktuell, insbesondere mit Photovoltaik und Dachbegrünung, genutzt werden können.

Es werden die verschiedenen Umsetzungsmöglichkeiten eines PV-Gründaches aufgezeigt und die Praxistauglichkeit der herkömmlichen Kombination überprüft. Als praxistauglich gilt die Kombination dann, wenn diese ohne gravierende Zielkonflikte zwischen PV-Anlage und Begrünung technisch realisierbar ist. Für die Beurteilung werden die spezifischen Anforderungen, die sich bei der praktischen Umsetzung ergeben, untersucht und bewertet. Bei einer Begrünung ist vor allem die ökologische Qualität wichtig mit der diese umgesetzt werden kann, bei der Installation einer PV-Flachdachanlage stehen vor allem realisierbare Anlagenleistung und die damit verbundenen Stromerträge im Mittelpunkt. Die Praxistauglichkeit des PV-Gründaches stellt dabei die Grundvoraussetzung für die Beantwortung der Leitfrage dar.

Um fest zu stellen ob sich durch die Kombination eine doppelte Flächenausnutzung erreichen lässt, erfolgt ein Vergleich der bei dem PV-Gründach genutzten Fläche mit der Flächenausnutzung einer konventionellen PV-Anlage und Dachbegrünung.

Anhand von wissenschaftlichen Publikationen wird die Kombination auf einen häufig aufgeführten Synergieeffekt untersucht, bei dem die Verdunstungskühlung der Dachbegrünung den Wirkungsgrad der PV-Anlage steigern soll.

Eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung soll anhand einer dynamischen Investitionsrechnung aufzeigen, wie sich die Rentabilität eines PV-Gründaches von einer separaten Nutzung mit Dachbegrünung oder PV-Anlage unterscheidet.

Die abschließende Beantwortung der Leitfrage erfolgt durch eine Nutzwertanalyse. Dabei wird das PV-Gründach, anhand der in der Arbeit präsentierten Ergebnisse mit der separaten Nutzung durch Dachbegrünung und PV-Anlage

---

<sup>2</sup> International hat sich für die Kombination der Begriff „Green Roof Integrated Photovoltaics“ (GRIPV) etabliert. In der vorliegenden Arbeit wird der Begriff PV-Gründach verwendet.

verglichen. Es werden vier Vergleichskriterien bestimmt: Wirtschaftlichkeit, Klimaschutz, Klimaanpassung und zusätzlicher Nutzen. Als sinnvoll wird die Umsetzung des PV-Gründaches dann bewertet, wenn es sich anhand der Kriterien und gewählten Gewichtung gegenüber den betrachteten Investitionsalternativen als vorteilhafter erweist.

## 2 Photovoltaik und Dachbegrünung auf Flachdächern

Die Entscheidung für ein PV-Gründach kann auf dem Teil des Daches auf dem es realisiert wird, eine Entscheidung gegen eine der diversen anderen Nutzungsmöglichkeiten darstellen. Bauherren oder andere Entscheidungsträger müssen sich deshalb auch mit den alternativen Gestaltungsmöglichkeiten von Flachdächern auseinandersetzen, weshalb diese zu Beginn anhand von drei Kategorien aufgezeigt werden.

Schwerpunkt des Kapitels liegt dabei auf der Beschreibung der direkten Konkurrenten, PV und Dachbegrünung, und auf der Art und Weise, wie diese auf einem Flachdach umgesetzt werden. Dadurch sollen dem Leser die Grundlagen für die Thematisierung des PV-Gründaches vermittelt werden.

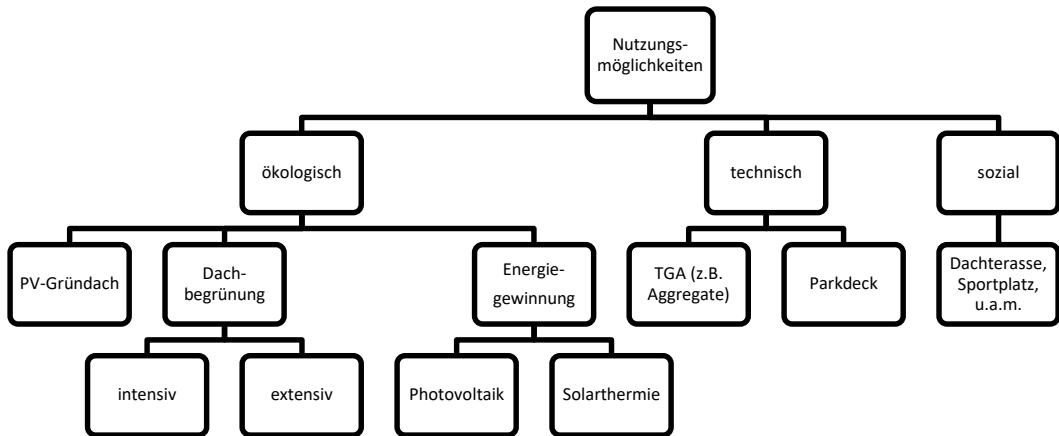
### 2.1 Flachdächer und deren Nutzungsmöglichkeiten

Da die in den 1960er Jahren gebauten Flachdächer im Laufe der Zeit häufig gravierende Mängel aufwiesen, ist das Flachdach in Deutschland bis heute umstritten. [12,13] Gerade ob Flachdächer auch längerfristig dicht bleiben wird häufig angezweifelt. [14] Praktische Erfahrung, neue Baustoffe und ausgereifte Verfahren haben allerdings bessere Rahmenbedingungen zur mangelfreien und preiswerten Umsetzung geschaffen. Undichtigkeiten sind meist auf mangelnde Qualität in der Planung und Ausführung oder versäumte Wartung zurückzuführen. Flachdächer bieten eine günstige Bedachung weiter Gebäudegrundrisse, eine gute Ausnutzung des Innenvolumens und ein modernes optisches Erscheinungsbild. Auch wegen der vielseitigen Nutzungsmöglichkeiten liegt das Flachdach in Zeiten steigender Grundstückspreise und Flächenversiegung wieder stärker im Trend.<sup>3</sup> [7] Es lassen sich dabei ökologische, technische und soziale Nutzungsmöglichkeiten unterscheiden. (vgl. Abbildung 1)

---

<sup>3</sup> Im Jahr 2015 handelte es sich bei mehr als jedem zehnten Neubau um ein Gebäude mit Flachdach. [13]

**Abbildung 1** Verschiedene Nutzungsmöglichkeiten eines Flachdaches. Eigene Darstellung in Anlehnung an Stahr et. al [12] und Czycholl [13].



Bei Neubauten wird der Dachaufbau speziell für die jeweilige spätere Nutzungsmöglichkeit konzipiert, Bestandsgebäuden können unter Umständen nachträglich für eine in der Planung nicht vorgesehene Nutzung umgerüstet werden.

## 2.2 PV-Anlage

Flachdächer bieten oftmals gute Rahmenbedingungen für die Installation einer PV-Anlage, vorausgesetzt es erfolgt keine entscheidende Verschattung der Dachfläche durch umliegende Landschaft oder Gebäude. [15–17] Mit der Aufständerung können Neigungswinkel sowie Ausrichtung flexibel gewählt werden. Eine Süd-Ausrichtung mit einer Neigung um die 30° führt dabei für den Standort Deutschland zu den optimalen Energieerträgen. Durch eine Ost-West-Ausrichtung hingegen kann gegebenenfalls ein höherer Eigenverbrauchsanteil erzielt werden. [18] Zudem wird eine gute Hinterlüftung ermöglicht, welche die Module kühlt und damit deren Wirkungsgrad erhöht. Durch die Aufständerung müssen bei Süd-Ausrichtung allerdings auch die Modulreihen in einem relativ großen Abstand zueinander montiert werden, um eine gegenseitige Verschattung zu vermeiden. [19] (vgl. 5.1) Im Vergleich zu anderen Dächern, wie beispielsweise den weit verbreiteten Satteldächern, ergibt sich dadurch eine weniger effiziente Flächenausnutzung.

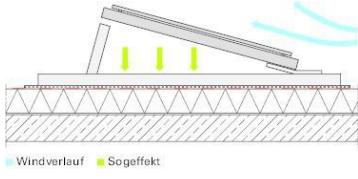
Wichtig ist es eine Beschädigung des Flachdaches bei der Montage und während des Betriebs zu vermeiden. Dies gilt vor allem für Bestandsgebäude, bei deren Errichtung ursprünglich keine spätere Nutzung durch Photovoltaik vor-

gesehen war. Eine Beschädigung der Dachhaut oder Dachkonstruktion kann zu teuren Folgeschäden im Inneren des Gebäudes führen. Seit der Einführung des EEG konnte diesbezüglich ausreichend Erfahrung gesammelt werden. [16] Entstandene Schäden bei Flachdachmontage sind dabei entweder auf Unwissenheit der Solarteuer bezüglich Dachabdichtung und Dachaufbauten zurückzuführen oder auf die Installation von Anlagen auf Flachdächern, die schlichtweg für diesen Zweck ungeeignet waren. Das ist einer der Gründe, weshalb das energetische Potential von Flachdächern oftmals ungenutzt bleibt. [9,20] Dies gilt vor allem für die Industrie, in der Flachdächer besonders häufig vorzufinden sind und eine photovoltaische Dachnutzung stark zur Senkung der Energiekosten beitragen kann. [21]

Für die Installation einer PV-Anlage auf einem Flachdach gibt es diverse Möglichkeiten. Prinzipiell lassen sich diese grob in drei unterschiedliche Montagevarianten unterscheiden:

**Tabelle 1** Verschiedene PV-Montagesysteme für Flachdächer Flachdach. Eigene Darstellung in Anlehnung an Zebe [15] und Spaiker et. al [16]

Montagesystem	Skizze	Beschreibung
Montage mit Auflast		Systeme, die nicht direkt an der Dachkonstruktion befestigt werden, sondern mit Ballast gegen auftretende Windlasten gesichert werden.
Montage mit Durchdringung		Systeme, bei denen zur Befestigung eine oder mehrere Dachschichten, durch einen Teil der Anlagenkonstruktion, durchdrungen werden.

aerodynamische Systeme		Durchdringungsfreie Systeme, die aufgrund ihrer Konstruktion, nur geringfügig gegen auftretende Windlasten ballastiert werden müssen.
------------------------	---	---

Welches Montagesystem am besten geeignet ist muss objektspezifisch anhand des jeweiligen Flachdaches bestimmt werden. Systeme mit Durchdringung der Dachabdichtung bieten sich vor allem bei Dächern an, die aus statischen Gründen nur geringfügig beschwert werden können. [22] In der Praxis wird diese Variante mittlerweile aber eher vermieden. [16,23] Zwar sind diese bei fachgerechter Eindichtung der Aufständerung prinzipiell langfristig dicht, führen aber auch zu höheren Kosten und bergen trotz allem das Risiko ein Ein dringen von Feuchtigkeit in die Dachkonstruktion zu ermöglichen. Bietet das Flachdach ausreichend Tragekapazität, erfolgt die Lagesicherung der Anlage deswegen i.d.R. durch zusätzlich aufs Dach gebrachte Lasten. Diese müssen ausreichen um eine horizontale und vertikale Verschiebung der Anlage durch Wind zu vermeiden. Der Dachaufbau muss dabei zusätzlich zu den Eigenlasten der PV-Komponenten auch die Lasten der Ballastierung aufnehmen. Das ist einer der Gründe, weshalb aktuell die gewichtreduzierten und aerodynamischen Montagesysteme im Trend liegen [1,23–25]. Durch flache Aufständerung und für den Wind optimierte Bauweise müssen diese nur mit geringer Ballastierung versehen werden. In den letzten Jahren sind zudem die Preise für Module stark gesunken, weshalb sich auch die wirtschaftliche Auslegung von PV-Flachdachanlagen geändert hat. [26,27] Während die Kosten für Module immer weniger ins Gewicht fallen, machen sich die Kosten einer Aufständerung immer stärker bemerkbar. Aufgrund der Materialeinsparung ergibt sich durch die Installation flacher aerodynamische Systeme (Neigung: 10 – 15°) ein Kostenvorteil. Mit der geringeren Neigung verzichtet man zwar auf die optimalen Energieerträge pro Modul, allerdings kann auch der Abstand zwischen den Modulreihen geringer gewählt werden. Bei geringerem Abstand lassen sich wiederum mehr Module auf die Dachfläche anbringen. Nach Aussagen von Solarteuren ergibt sich dadurch i.d.R. insgesamt die wirtschaftlichste Lösung. [26,27]

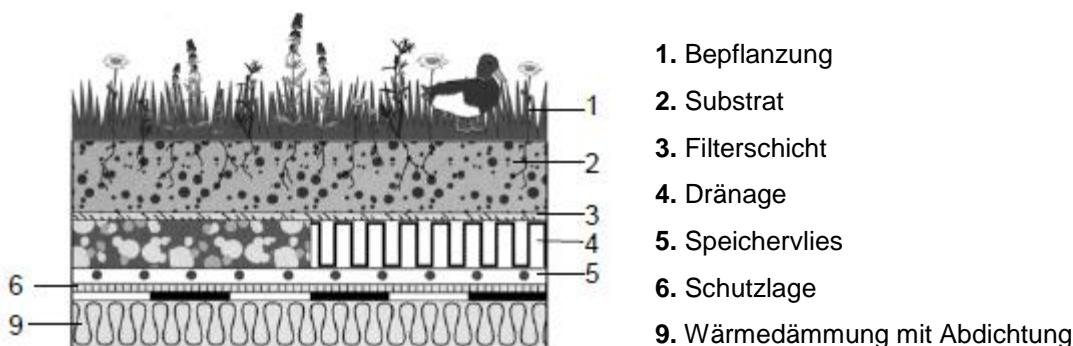
### 2.3 Dachbegrünung

Grundsätzlich lässt sich eine Dachbegrünung in extensive und intensive Be grünung unterscheiden. [7] Differenziert wird hauptsächlich nach Höhe der

Substratdicke. Diese bestimmt grundsätzlich darüber welche Pflanzenarten sich in welcher Wachstumshöhe auf einem Gründach entwickeln können. Bei einer extensiven Begrünung werden niedrig wachsende und pflegeleichte Pflanzen auf einer dünnen Substratschicht von 5–15 cm aufgebracht. Typischerweise werden hier Kräuter, Moose, Sukkulanten und vor allem Sedum-Arten<sup>4</sup> verwendet. Eine intensive Dachbegrünung wird hingegen mit höheren Substratdicken von 15–200 cm ausgeführt. Dies ermöglicht eine deutlich höhere wachsende Vegetation, die von Rasen und anspruchsvollen Stauden bis hin zu Gehölzpflanzen und Bäumen reicht. Je nach Ausführung können sich dabei die Unterschiede zu ebenerdig angelegten Gärten oder Wiesen immer weiter verringern. [12]

Der Schichtaufbau (vgl. Abbildung 2) von intensiver und extensiver Begrünung unterscheidet sich nur unwesentlich voneinander. [12]

**Abbildung 2** Aufbau einer extensiven Begrünung [12]



Zunächst wird, durch eine auf der Abdichtung installierte Schutzlage<sup>5</sup> der Dachaufbau und Begrünungsaufbau voneinander getrennt, um die Dachabdichtung während der Montage und Nutzung der Begrünung vor Beschädigung zu schützen. Darüber sorgt ein Speicherflies für die Aufnahme von überschüssigem Wasser. Mit der Dränaage wird nicht benötigtes Regenwasser zwischen gespeichert und zu den Abläufen geleitet. Eine Filterschicht vermeidet, dass

<sup>4</sup> Auch Fetthennen oder Mauerpfeffer genannt. [7]

<sup>5</sup> Ggf. ist diese wurzelfest ausgeführt oder mit einer zusätzlichen Wurzelschutzbahn versehen. [12]

die Dränage mit abgetragenen Substratteilchen verstopft wird. Das Substrat bildet die Grundlage für jegliches Pflanzenwachstum, weswegen dessen Zusammensetzung<sup>6</sup> an die gewünschte Vegetation angepasst wird. Dabei muss das Substrat eine stabile Struktur aufweisen, Wasser für Pflanzen verfügbar speichern und der Vegetation auch gleichzeitig ausreichend Luftvolumen zur Verfügung stellen. [7]

Es lassen sich prinzipiell fast alle Flachdächer begrünen, unabhängig davon ob sie als Kalt- Warm- oder Umkehrdach ausgeführt wurden. [7,12] Wichtig ist dabei vorher eine genaue Prüfung der statischen Voraussetzungen durchzuführen. Selbst bei Bestandsgebäuden, die nicht für zusätzliche Dachlasten ausgelegt wurden, ist in den meisten Fällen eine extensive Begrünung oder zumindest eine Leichtbegrünung (vgl. Tabelle 2) möglich. Je nach statischer Tragfähigkeit, Budget und Präferenzen des Bauherrn bieten Dachbegrüner eine Vielzahl an vorgefertigten Systemlösungen an:

**Tabelle 2** Möglichkeiten ein Gründach auszuführen. Eigene Darstellung in Anlehnung an die Webseiten der Firmen ZinCo und Optigrün sowie Kolb [7]

Ausführungsart	Beschreibung	Begrünungsart
„Leichtbegrünung“	I.d.R. handelt es sich hierbei um mit Vegetation vorkultivierte Matten, die sich wegen ihrem geringen Gewicht besonders für Dächer mit geringen statischen Kapazitäten eignen.	Vegetationsmatten
„Standard“	Pflegeleichte und herkömmliche extensive Begrünung mit geringer Substratdicke.	extensiv

---

<sup>6</sup> Häufige Bestandteile sind Lava, Bims, Kompost, Sand, Blähton, Blähschiefer. [12]

„Funktionsdach“	• „Retentiondach“	Dachbegrünung, die speziell dafür konzipiert wurde eine bestimmte Menge an Wasser zurückzuhalten und dadurch Abfluss spitzen zu reduzieren.	extensiv oder intensiv
	• „Verdunstungsdach“	Bewässerte und auf hohe Verdunstungsleistung ausgelegte Dachbegrünung, um das Stadt- und Umgebungsklima zu verbessern.	extensiv oder intensiv
	• „Biodiversitätsdach“	Dachbegrünung die vorrangig als Lebensraum für viele verschiedene Tiere und Pflanzen ausgelegt wird.	extensiv oder intensiv
„Dachgarten“		Dachbegrünung, die sich als zusätzlicher Wohnraum oder zum Anbau von Obst und Gemüse (Urban Farming) nutzen lässt.	intensiv
„Landschaftsdach“		Begrünung, die als großflächige Landschaft mit Integration von Bäumen gestaltet wird.	intensiv

### 3 Umsetzung eines PV-Gründaches – Planung, Ausführung und Nutzung

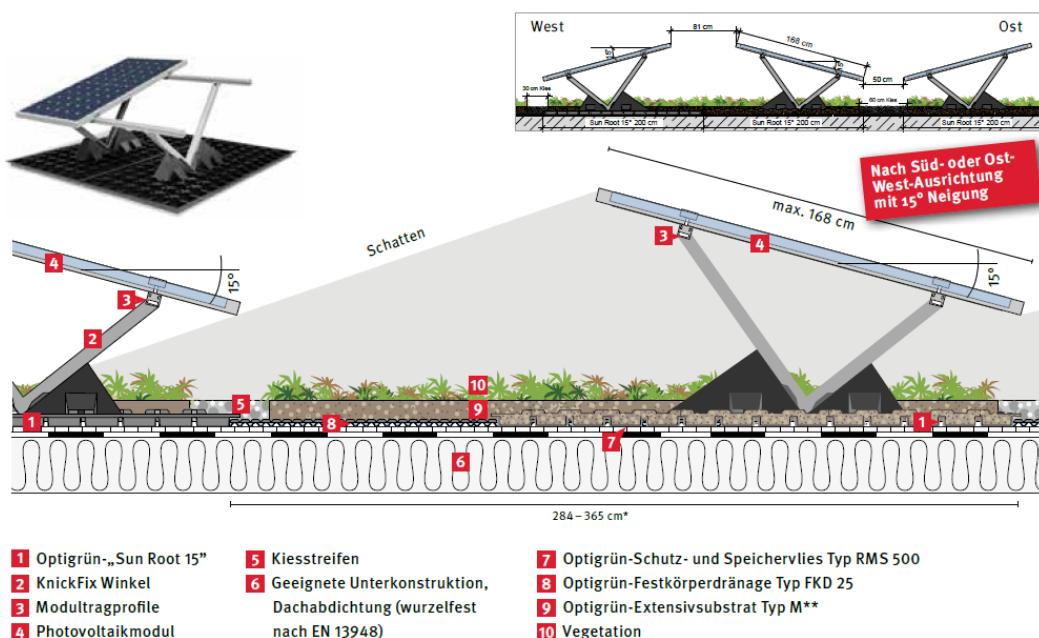
#### 3.1 Umsetzungsmöglichkeiten

Es gibt prinzipiell mehrere Möglichkeiten eine PV-Anlage mit einem Gründach zu kombinieren. In diesem Abschnitt werden Aufbau und Spezifikationen der herkömmlichen Variante und der noch weniger auf dem Markt etablierten Alternativen erläutert. Bei Letzteren handelt es sich zum einen um Projekte von Hochschulen, zum anderen um eine Variante des PV-Gründaches, welche auch bei Flachdächern mit geringen statischen Tragekapazitäten realisiert werden kann.

##### 3.1.1 Gründach–Unterkonstruktion

Bei dem herkömmlichen PV-Gründach werden oftmals speziell für die Kombination entwickelte Systemlösungen mit einer Gründach–Unterkonstruktion (GD-UK) verwendet. [28,29] (vgl. Abbildung 3). Je nach Hersteller der Komplettlösung ergibt sich dabei ein leicht unterschiedlicher Systemaufbau.

**Abbildung 3** Aufbau einer Systemlösung mit Gründach–Unterkonstruktion am Beispiel des „SunRoot 15“ der Firma Optigrün. [28]



Es wird eine extensive Begrünung verwendet, deren Schichtaufbau im wesentlich dem einer herkömmlichen extensiven Dachbegrünung entspricht. Allerdings wird durch eine spezielle Festkörperdränage aus Kunststoff die Installation einer geeigneten PV-Aufständerung ermöglicht. Die Dränageplatten werden dabei entsprechend der gewünschten Ausrichtung der PV-Anlage verlegt. Die Ausrichtung kann wie bei einer konventionellen PV-Anlage nach Süden oder nach Ost-Westen erfolgen. Auf die Dränage werden anschließend die Aluminium-Aufständerungen aufgeschraubt und die Module in einem relativ hohen Abstand zum Substrat montiert. (vgl. Abbildung 17 im Anhang) Abschließend werden Substrat und Vegetation aufgebracht. Die Gründach-Unterkonstruktion ermöglicht dabei eine Substratverlegung und Vegetation auch unterhalb der Module, wodurch die PV-Anlage vollständig in den Gründachaufbau integriert wird. [28-30] Das Substrat fungiert gleichzeitig als alleinige Auflast um die Module gegen auftretende Windlasten zu sichern. [15] (vgl. 3.2.1). Als Vegetation werden meist niedrig wachsende Sedum-Mischungen verwendet. (vgl. 3.2.2 )

### 3.1.2 Aerodynamisch

Für Flachdächer mit geringen Tragekapazitäten existiert eine Variante, die mit geringen Flächenlasten verbunden ist [26] Dabei werden aerodynamische Montagesysteme in Kombination mit einer Leichtbegrünung verwendet. Ein Beispiel für eine solche Kombination ist die Systemlösung der Firma CentroPlan. (vgl. Abbildung 4 und Abbildung 18 im Anhang)

**Abbildung 4** Beispiel eines PV-Gründaches, mit aerodynamischen Modulen und Leichtbegrünung. [26]



Durch die Verwendung von Vegetationsmatten mit ausgewählten Pflanzenarten soll der Bewuchs insgesamt in niedriger Höhe gehalten werden. [24] Bei der niedrige Aufstellhöhe der aerodynamischen Module, soll dadurch verhindert werden, dass Pflanzen über die Höhe der Modulkante hinauswachsen und zu Verschattung führen. (vgl. 3.2.2) Auf eine Begrünung unterhalb der Module wird in dem Beispiel, nach Angaben des Solarteurs, aus Kostengründen verzichtet.

### 3.1.3 Bifazial

Eine andere Variante, die gerade in der Schweiz mittels eines Pilotprojektes untersucht wird, ist die Kombination von Dachbegrünung mit speziell angefertigten bifazialen Modulen. [31] (vgl. Abbildung 5)

**Abbildung 5** Versuchsanlage mit bifazialen Modulen und silberlaubigen Pflanzen in Winterthur (Schweiz). [32]



Bifaziale Module nutzen sowohl Vorder- und Rückseite zur Stromproduktion und führen bei Ost-West-Ausrichtung zu einem Erzeugungsprofil, welches sich deutlich von nach Süden ausgerichteten Modulen unterscheidet. [33] Der Leistungspeak der Anlage ergibt sich nicht zur Mittagszeit (Süd-Ausrichtung), sondern morgens und abends. In einem Energiesystem, in dem Photovoltaik eine immer wichtigere Rolle einnimmt, könnten bifaziale Module damit einen wichtigen Beitrag zur Versorgungssicherheit und Netzentlastung leisten. Bei dieser Variante erhofft man sich noch weitere Vorteile gegenüber dem herkömmlichen PV-Gründach. [32,34,35] Zum einen sollen die vertikal aufgeständerten Kleinmodule die verfügbare Dachfläche effizienter nutzen, da sie im Vergleich zu einer konventionellen Süd-Anlage mit geringerem Abstand installiert werden können, zum andern erhofft man sich von der Konstruktion, dass die Gefahr Module, durch zu hoch gewachsene Pflanzen, zu verschatten geringer ist. Durch Verwendung von Pflanzen mit hohem Rückstrahlvermögen,

die auftreffendes Sonnenlicht auf Module zurückwerfen, erhofft man sich eine Steigerung des Stromertrags. (vgl. 6.2) [36] Die verwendeten Pflanzen sind zudem sehr trockenresistent und eignen sich deshalb besser für ein zunehmend wärmer werdendes Klima. Innerhalb des Projektes sollen auch ökologische Aspekte der Dachbegrünung überprüft werden, um eine ganzheitliche Bewertung der Variante zu ermöglichen.

### 3.1.4 PV–Dachgarten

Bei der Umsetzung mit Gründach–Unterkonstruktion, mit aerodynamischen oder mit bifazialen Systemen steht die verwendete Dachfläche für eine zusätzliche Nutzung nicht mehr zur Verfügung. Die Universität für Bodenkultur BOKU Wien hat deshalb mit dem Projekt „PV–Dachgarten“ eine Lösung konzipiert, welche neben Begrünung und photovoltaischer Nutzung, auch eine weitere Nutzung der Dachfläche als Aufenthaltsraum ermöglicht. [37] Dabei wurde für das Flachdach ein aus Holz oder Stahl bestehender Unterstand entworfen, bei dem lichtdurchlässige PV–Module als Überdachung fungieren. (vgl. Abbildung 6)

**Abbildung 6** Hauptversuchsanlage (l.) und Rendering (r.) des Forschungsprojektes PV–Dachgarten der Universität für Bodenkultur BOKU Wien. [37]



Die semitransparenten Module sorgen dafür, dass die auf dem Dach angebrachte Intensivbegrünung noch mit ausreichend Licht versorgt wird. Wie bei der herkömmlichen Kombination wird erfolgt die Ballastierung alleinig durch das Substrat. Mit Fokus auf Neubauten wurden umfangreiche Untersuchungen

durchgeführt und in einem Planungshandbuch<sup>7</sup> zusammengefasst. [38] Der PV-Dachgarten soll mit Hilfe mehrerer vorher stattfindenden Versuchsprojekten auf den Markt gebracht werden.

### 3.2 Spezifische Anforderungen an ein PV-Gründach

Im Bereich Dachbegrünung konnten über 40 Jahre lang Erfahrungen gesammelt werden [7], im Bereich PV-Flachdachanlagen fast 20 Jahre. [16] Eine fachgerechte Umsetzung der jeweiligen Dachnutzung stellt i.d.R. keine Herausforderung mehr für Solarteure oder Fachbetriebe für Dachbegrünung (Dachbegrüner) dar.

In diesem Kapitel wird die Praxistauglichkeit der Kombination untersucht und bewertet. Dafür sollen mögliche Zielkonflikte ermittelt und die spezifischen Herausforderungen aufgezeigt werden, die häufig Diskussionsschwerpunkt in Wissenschaft und Praxis darstellen.

Für die Untersuchung werden dabei sowohl praktische Erfahrungen von Solarteuren, Solargutachtern, Dachbegründern und Behörden als auch Ergebnisse wissenschaftlicher Untersuchungen verwendet.

#### 3.2.1 Statik

An die statische Tragekapazität einer Dachkonstruktion werden bei einem PV-Gründach grundsätzlich hohe Anforderungen gestellt. [24,26] Diese muss ausreichen um sowohl die Lasten der PV-Anlage als auch der Begrünung aufzunehmen. Die entstehenden Lasten einer konventionellen PV-Flachdachanlage ergeben sich dabei aus deren Eigengewicht und dem Gewicht der zur Lagesicherung notwendigen Ballastierung. Da bei dem herkömmlichen PV-Gründach das Substrat zur Lagesicherung verwendet wird, entfällt allerdings eine Ballastierung mit zusätzlichen Gewichten. [23] Die einheitliche Verlegung des Substrats sorgt zudem dafür, dass sich die auf die Dachkonstruktion wirkenden Lasten gleichmäßig auf die Dachfläche verteilen. Bei den konventionellen mit Kies oder Betonplatten beschwerten PV-Systemen treten höhere Punktlasten auf, die den Dachaufbau stärker belasten können. [39] Im Idealfall lässt sich durch das Substrat auch die Absturzsicherung befestigen, welche für die

---

<sup>7</sup> Thematisiert werden u. a. Sicherheit, Nutzerfreundlichkeit, Beschattung, geeignete Pflanzenarten, Bewässerung, Architektur, Gebäudearten und Kosten. [38]

Inspektion, Pflege und Instandsetzung auf Flachdächern vorhanden sein sollte. [11,29] Die schienengeführte Absturzsicherung wird ebenfalls durchdringungsfrei in den Begrünungsaufbau integriert. (Vgl. Abbildung 20 im Anhang)

Damit das Substrat zur Ballastierung ausreicht, muss die Schichtdicke so gewählt werden, dass bei maximal auftretenden Windlasten kein Kippen, Gleiten oder Abheben der Anlage erfolgt. [15,26] Die auftretenden Windlasten sind abhängig von Gebäudehöhe, -geometrie und -lage. Bei der Wahl der Schichtdicke muss berücksichtigt werden, dass das Gewicht des Substrats von dessen Wassergehalt abhängig ist. [23] Das Gewicht der Begrünung darf im trockenen Zustand die notwendige Auflast nicht unterschreiten und im wassergesättigten Zustand die Tragfähigkeit des Daches nicht überschreiten. Die für die Ballastierung notwendige Substratdicke beginnt dabei etwa bei 8 cm. [40]

Im Vergleich zu einer konventionellen PV-Flachdachanlage werden die Module mit einem höheren Abstand zur Dachfläche aufgeständert. (vgl. 3.2.2) [41,42] Auch zwischen den Modulreihen kann der Abstand je nach konkreter Umsetzung, höher ausfallen. Mit der speziellen Bauweise bietet die Anlage eines PV-Gründaches auch eine höhere Windangriffsfläche. Diese Tatsache darf in der Praxis nicht unterschätzt werden, weswegen bei der Projektierung genau geprüft werden muss ob die Substratdicke für die Ballastierung wirklich ausreichend gewählt ist. [24] Laut den Dachbegrünern ZinCo und Bauder wird bei höher auftretenden Windlasten die Substratdicke entsprechend angepasst. [30,43] Eine flächendeckende Erhöhung der Substratdicke ist in der Praxis aber nur bedingt zu empfehlen. (vgl. 3.2.2) Um trotzdem für eine ausreichende Ballastierung zu sorgen, könnte die Substratdicke allerdings auch direkt hinter dem Modul und unter dem Modul erhöht werden. (vgl.3.2.2). [44,45]

Je nach Rahmenbedingungen und Ausführung ist laut Herstellern mit einem Gesamtgewicht der Systemlösungen zwischen 120–200 kg/m<sup>2</sup> zu rechnen. [41,43] Für die Tragekapazität des Dachaufbaus gilt es zusätzlich noch die Schneelast zu berücksichtigen.

### 3.2.2 Vermeidung von Verschattungen

Es gibt einige Beispiele für PV-Gründächer, bei denen die PV-Anlage durch zu hoch gewachsene Pflanzen verschattet wurden. (vgl. Abbildung 7) Die Beispiele stammen nicht nur aus Handwerk [26,46–48] und Wissenschaft [44,49], sondern werden auch von Anbietern des PV-Gründaches [30,41,43] als Exempel dafür verwendet wie eine Kombination von PV und Begrünung nicht umgesetzt werden sollte.

**Abbildung 7** Beispiele für die Verschattung der Module durch die Vegetation bei unsachgemäßer Ausführung eines PV-Gründaches. [26,44,48]



PV-Module gelten als besonders verschattungsbefindlich, weshalb zu hoch gewachsene Pflanzen vor den Modulen auch eine nicht unerhebliche Auswirkung auf deren Leistung und damit auf die Gesamtleistung der PV-Anlage haben können. [1,19] Eine herkömmliche PV-Anlage besteht aus mehreren parallel geschalteten Strings, die sich jeweils aus mehreren in Reihe geschalteten Zellen zusammensetzen. Wird nun eine dieser Zellen verschattet, kann diese nicht nur keinen Strom mehr erzeugen, sondern hindert auch den Stromfluss aus den vorgeschalteten Zellen. Die Leistung des Strings und folglich der kompletten PV-Anlage verringert sich. Zusätzlich können sich die verschattenden Zellen stark aufheizen (sog. Hotspots). Die Zellen können dabei beschädigt und im Extremfall sogar zerstört werden. Zwar werden in Modulen

standardmäßig Bypassdioden<sup>8</sup> verwendet, allerdings können Leistungseinbußen und Hotspots dadurch nur eingeschränkt verringert werden.

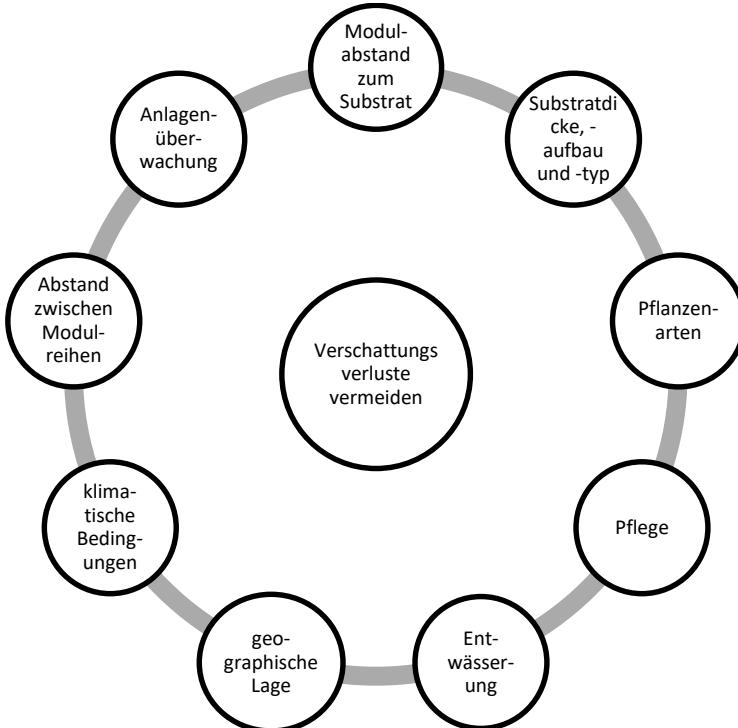
Wird eine Anlage durch die Vegetation verschattet, ergeben sich negative Auswirkungen auf das Betriebsergebnis des PV-Gründaches. Entweder man nimmt die Leistungseinbußen und die damit entgangenen Erlöse in Kauf oder man entfernt den unerwünschten Bewuchs, wodurch Pflegekosten entstehen. Der Schweizer Solarteur ADEV Solarstrom AG rät deswegen von der Kombination aus Gründach und PV-Anlage ab. [47] Andere Solarteuere oder Anlagenbetreiber sind dazu übergegangen in einem solchen Fall Gummischrotmatten oder Gitternetze über die Begrünung zu legen oder diese vollständig zu entfernen. (vgl. Abbildung 21 im Anhang) [27,44,50]

Handwerk [26,48], wissenschaftliche Mitarbeiter [32,44,49] und Anbieter der Systemlösungen [41,43,51] führen die negativen Beispiele allerdings auf mangelnde Erfahrung in Planung und Ausführung oder auf eine Vernachlässigung der Pflege während der Nutzung zurück. Für die Vermeidung von Verschattungsverluste gilt es diverse Aspekte bei Umsetzung und Nutzung zu beachten. (vgl. Abbildung 8)

---

<sup>8</sup> Bypassdioden sind elektrische Bauteile in den Modulen, mit denen verschattete Zellen überbrückt werden können. [1]

**Abbildung 8** Aspekte zur Vermeidung von Verschattungsverlusten bei einem PV-Gründach [7,41,44,45,48,50]



Da die Höhe des Pflanzenwachstums zu einem großen Teil von der *Substratdicke* abhängig ist, muss diese so gewählt werden, dass höher wachsenden Pflanzen das Wachstum erschwert wird. Entscheidend ist dabei vor allem die Substratdicke direkt vor dem Modul, da an der vorderen Kante des Moduls, der Abstand zwischen Modul und Substrat am geringsten ist. Gleichzeitig ergeben sich dort auch gute Wachstumsbedingungen. Ein großer Teil des Niederschlags wird über die Modulfläche direkt vor das Modul geleitet und schafft feuchte Bedingungen. [50] Zudem wird der sich auf dem Modul sammelnde Blütenstaub mit dem Regen vor das Modul gespült. Um die Wachstumshöhe der Vegetation zu beschränken, kann die gesamte Substratdicke auf dem Dach niedriger ausgeführt werden, als es beispielsweise bei einer konventionellen extensiven Begrünung üblich ist. [45] Da die Substratdicke allerdings auch für die Ballastierung der PV-Anlage ausreichend hoch gewählt werden muss, ist das bei der herkömmlichen Variante nur begrenzt möglich. Eine weitere Möglichkeit ist die Verlegung eines Kiesstreifen vor der Modulunterkante, um dort das Wachstum von Pflanzen zu unterbinden (vgl. Abbildung 3). In der Praxis ist das allerdings relativ aufwendig [41] und verringert zudem die begrünte Dachfläche. Als bessere Alternative erscheint eine gezielte Variation der Schichtdicken. Vor dem Modul wird dabei eine geringere Schichtdicke gewählt. Als Ausgleich kann das Substrat dafür unter und hinter dem Modul höher ge-

staltet werden, ohne das Verschattungsrisiko wesentlich zu erhöhen. [44] (vgl. Abbildung 22 im Anhang). Das Pflanzenwachstum unter dem Modul, wird dabei durch die Modulrückseite selbst beschränkt und bei ausreichendem *Abstand zwischen den Modulreihen* führen auch höher wachsende Pflanzen hinter den Modulreihen nicht zu Verschattungen. [45]

Für die Vegetation sollten möglichst niedrig wachsende *Pflanzenarten* ausgewählt werden. Es eignen sich vor allem Sedum-Arten, die eine bestimmte Wuchshöhe nicht überschreiten. [41,45] Saatgutfirmen bieten hierfür speziell zusammengestellte Mischungen an. [52,53] Der Dachbegrüner Optigrün empfiehlt beispielsweise eine Sedum-Begrünung mit Sprossen<sup>9</sup> und dabei auf die Beimischung von Saatgut<sup>10</sup>, welches zumeist bei einer extensiven Begrünung verwendet wird, zu verzichten.

Die *Entwässerung* des Flachdaches muss auch während der Nutzung weiterhin gewährleistet werden um Pflanzen, insbesondere Fremdbewuchs, keine idealen Wachstumsbedingungen zu bieten. [48] Fremdbewuchs gelangt u.a. über Vogelkot und Wind auf das Dach. Problematisch ist dies vor allem dann, wenn es sich um höher wachsende Pflanzen handelt.

Das Ausmaß von Fremdbewuchs ist auch von der *geografischen Lage* und den spezifischen *klimatischen Bedingungen* abhängig. [45,48] Bei einem nahegelegenen Waldgebiet beispielsweise kann von einem stärkeren und ungünstigeren Fremdbewuchs ausgegangen werden. Liegt das Flachdach in niederschlagsintensiveren Gebieten, welches gute Bedingungen für ein ausgeprägtes Pflanzenwachstum bietet, muss auch dies berücksichtigt werden.

Trotz der Verwendung von niedrig wachsenden Pflanzenarten ist es deswegen essentiell einen hohen *Modulabstand zum Substrat* zu wählen. [45]. Die Firma ZinCo empfiehlt beispielsweise einen Mindestabstand von 30 cm. [43]

Während der Nutzungsdauer muss eine regelmäßige und gewissenhaft durchgeführte *Pflege* erfolgen. Zwei bis dreimal jährlich muss die Vegetation zurückgeschnitten und der Fremdbewuchs entfernt werden. [41,48] (vgl.3.2.3)

Referenzanlagen zeigen wie sich die gegenseitige Abstimmung von PV-Anlage und Dachbegrünung auf die Praxistauglichkeit des PV-Gründaches auswirken kann. (vgl. Abbildung 9)

---

<sup>9</sup> Von Mutterpflanzen geerntete Triebe. [7]

<sup>10</sup> Trockene und sortenrein vermehrbare Fortpflanzungsorgane von Pflanzen [7]

**Abbildung 9** Beispiele für die sachgemäße Umsetzung eines PV-Gründaches. [27,29,41,51]



Selbst bei Berücksichtigung aller Kriterien, erscheinen Verschattungen allerdings nicht vollständig ausgeschlossen werden zu können. Gerade bei einer extensiven Begrünung herrscht eine spezielle Artendynamik, die dazu führen kann, dass sich die Vegetation anders entwickelt, als in der Planung vorgesehen. [7,48] Unkalkulierbare Faktoren wie kleinklimatischen Bedingungen und die Interaktion zwischen den Pflanzen sorgen im Laufe der Bestandsentwicklung für eine Änderung der Artenzusammensetzung.

Wichtig ist deshalb eine sorgsam durchgeführte *Anlagenüberwachung*. [54] Dabei wird entweder der Tagesertrag der PV-Anlage mit Referenzanlagen oder die aktuelle Anlagenleistung mit der Solleistung, berechnet aus Einstrahlung und Modultemperatur, verglichen. [1] Bei vergleichsweise geringerem PV-Ertrag erfolgt eine Benachrichtigung, wodurch sofort überprüft werden kann, ob dieser auf zu hoch gewachsene Vegetation zurückzuführen ist. Idealerweise findet – vorbeugend – eine regelmäßige Kontrolle der Wuchshöhe durch den Betreiber der Anlage statt.

### 3.2.3 Pflege

Eine extensive Begrünung benötigt deutlich weniger Pflege als eine intensive Begrünung. [7] Jedoch sollte, selbst bei einer wartungsarmen extensiven Dachbegrünung, die Pflege nicht vollständig vernachlässigt werden. [55,56] Um Dachfunktionen wie Abdichtung und Wasserablauf auf Dauer zu gewährleisten, muss einmal jährlich eine Mindestpflege durchgeführt werden. Will man Ästhetik und ökologische Wertigkeit der Begrünung erhalten, so empfiehlt es sich noch ein bis zwei Pflegeeinheiten pro Jahr zusätzlich durchzuführen. Dabei werden gezielt unerwünschte Pflanzen entfernt, Moos ausgedünnt, abgetragenes Substrat aufgefüllt und ggf. Langzeitdünger aufgebracht. Optimal wäre bei einer extensiven Begrünung also eine zwei bis dreimal jährlich stattfindende Pflege. Dieselbe Anzahl, welche von Begrünungsfirmen auch bei für die Pflege der Begrünung eines PV-Gründaches empfohlen wird. [41,43] Damit unterscheiden sich die Pflegeintervalle eines PV-Gründaches idealerweise nicht von denen einer konventionellen extensiven Dachbegrünung.

Da der Bewuchs in Art, Wuchshöhe und Wachstumsdichte trotz sorgsamer Planung unterschiedlich ausfallen kann, ist es dennoch möglich, dass die Anzahl der notwendigen Pflegegänge bei einem PV-Gründach höher ausfällt. [48] Zudem ist bei einem PV-Gründach der Pflegegang meist mit höherem Aufwand verbunden. [42,48] Die Module schränken die Bewegungsfreiheit ein und es muss sorgsamer gearbeitet werden um Kabel oder andere Systemkomponenten nicht zu schädigen und ein damit verbundenes Verletzungsrisiko auszuschließen. Auch auf die Verwendung motorisierte Schnittwerkzeuge sollte deswegen verzichtet werden. [48]

Um den Pflegeaufwand eines PV-Gründaches zu reduzieren, experimentiert die Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften (ZHAW) aktuell mit einem Mähroboter, der zu hoch wachsende Pflanzen automatisch stutzen soll. [27]

## 3.3 Evaluation

Dachbegrünung und Anlage müssen schon in der Planung aufeinander abgestimmt werden. Für beide Komponenten ergeben sich Einschränkungen bezüglich der freien Gestaltung. Die PV-Anlage muss höher aufgeständert werden, für die Begrünung sind nur Pflanzenarten mit niedriger Wachstumshöhe zu verwenden.

Die spezielle Bauweise der Kombination, durch die hohe Aufständierung und den ggf. höher gewählten Reihenabstand, sorgt für erhöhte Stabilitätsanforderungen an die PV-Anlage und damit zu einem höheren Ballastierungsbedarf. Bei Verwendung des Substrats als Ballastierung muss dessen Dicke entsprechend hoch gewählt werden, wodurch sich allerdings auch das Verschattungsrisiko erhöht. Zudem muss das witterungsabhängige Gewicht des Substrats berücksichtigt werden. Für ein PV-Gründach ist deswegen insgesamt eine sorgsame statische Planung notwendig.

Die Flächenlast ist dabei mehr als doppelt so hoch, als bei aerodynamischen Systemen ( $45-70 \text{ kg/m}^2$ <sup>11</sup> [25]), die hinsichtlich der Gewichtslast immer weiter optimiert werden. [58]. Dafür entfällt aber bei einem PV-Gründach eine konventionelle Ballastierung oder eine Dachdurchdringung für die Absturzsicherung gänzlich.

Werden die spezifischen Anforderungen für die Gestaltung ausreichend berücksichtigt, wirkt das PV-Gründach praxistauglich. Es ließen sich keine wissenschaftlichen Quellen oder praktische Erfahrungen finden, die bei einer sorgsam ausgeführten Systemlösung und verlässlich durchgeföhrter Pflege, Verschattungsverluste erwarten lassen würden. Ein Restrisiko, durch die unvorhersehbare Entwicklung extensiver Begrünungen scheint aber trotzdem bestehen zu bleiben. Pflege und sorgsame Anlagenüberwachung sind deswegen die Hauptanforderungen an die Nutzungsphase. Negative Erfahrungen lassen sich entweder darauf oder auf eine unsachgemäß ausgeführte Kombination zurückführen, wie beispielsweise die Installation von Module mit niedriger Aufständierung über einer üppig wachsenden Begrünung.

Die gegenseitige Abstimmung von Begrünung und PV-Anlage erfolgt hauptsächlich aus der Motivation heraus, die PV-Erträge nicht durch von Pflanzen geworfenen Schatten zu mindern. Ein wichtiger Beweggrund für die Begrünung eines Daches sind allerdings die damit nachweislich verbundenen ökologischen Vorteile. [7] Bei einem PV-Gründach will man diese nutzen ohne dabei jedoch auf eine nachhaltige Stromproduktion verzichten zu müssen. Mit den PV-Erträgen stellt die ökologische Qualität der Dachbegrünung damit einen der wichtigsten Beweggründe für eine Kombination dar. Deshalb wird im folgenden Kapitel untersucht wie sich die Anpassung der Begrünung und die In-

---

<sup>11</sup> Für verschiedene Windlastzonen aber gleichbleibenden sonstigen Rahmenbedingungen für das Gebäude: 1° Neigung, Attika 0,2m, Innenstadt, PV-System IBC Solar [57]

stallation der PV-Anlage auf die ökologische Qualität der Begrünung auswirken.

## 4 Ökologische Qualität der Begrünung eines PV-Gründaches

Um die ökologische Qualität der Begrünung eines PV-Gründaches bewerten zu können, werden zunächst herkömmliche extensive und intensive Begrünung auf deren ökologische Vorteile untersucht. Die Vorteile werden quantifiziert, gegenübergestellt und dabei Abhängigkeiten herausgearbeitet. Anschließend erfolgt eine Abschätzung in wie weit sich die ökologische Qualität der Begrünung eines PV-Gründaches von den zwei herkömmlichen Begrünungsarten unterscheidet.

Die Biodiversität wird dabei gesondert betrachtet, da diese innerhalb der ökologischen Wertigkeit einer Dachbegrünung einen besonders hohen Stellenwert einzunehmen scheint. Diese steht stark im Fokus wissenschaftlicher Untersuchungen (vgl. 4.2) und ist ein wichtiges Diskussionsthema in der Kommunalpolitik. [9, 45] Für die Beurteilung der Biodiversität eines PV-Gründaches existiert eine ausreichende Menge an Studien, die auch extensive und intensive Begrünung als Vergleich mit einbeziehen. Deshalb wird auf eine separate Betrachtung der Biodiversität von extensiver und intensiver Begrünung verzichtet.

### 4.1 Ökologische Vorteile von extensiver und intensiver Dachbegrünung

Die *Dämmwirkung* einer Dachbegrünung kann sowohl Wärme- als auch Kälteverluste verringern. Abhängig ist diese von der Üppigkeit des Bewuchses, Substratart- und dicke und der Durchfeuchtung. [59] Über Messungen konnte nachgewiesen werden, dass ein 10 cm hohes Substrat mit einer 6 bis 16 mm dicken Wärmedämmung der Wärmeleitfähigkeitsgruppe (WLG) 040 vergleichbar ist. [60] Die Dämmwirkung führt über Heiz- und Kühlenergieeinsparung auch zu einer *CO<sub>2</sub>-Reduktion*. Unmittelbar wird diese auch durch die von Pflanzen durchgeführte Photosynthese erreicht, bei der CO<sub>2</sub> in Form von Kohlenstoff (C) an das Pflanzengewebe gebunden und Sauerstoff (O<sub>2</sub>) freigesetzt wird. Eine extensive Begrünung kann dabei innerhalb von drei Jahren 0,8 – 0,9 Kg/m<sup>2</sup> CO<sub>2</sub> aufnehmen. [61] Bei Moosen ist diese mit 2,2 kg/m<sup>2</sup> pro Jahr um einiges höher und erreicht dabei annähernd die Aufnahmefähigkeit einer intensiven Begrünung (2,4 kg/m<sup>2</sup>). [62] *Feinstaub* und andere *Schadstoffe* lassen

sich ebenso durch eine Dachbegrünung binden, wodurch die Luftqualität innerhalb der Stadt und in Gebäudenähe verbessert wird. [63] Besonders gut geeignet sind hier wieder Moose, aber auch verschiedene Sedum-Arten.

Eine Verbesserung der Luftqualität ergibt sich ebenfalls durch *Luftbefeuhtung*. [59] Die Begrünung trägt durch die Verdunstungskühlung zu einer höheren Luftfeuchtigkeit bei, die vor allem im Winter, in den Übergangszeiten und milden Sommertagen als angenehm empfunden wird. An schwülen Sommertagen kann die Luftbefeuhtung allerdings auch als unangenehm wahrgenommen werden.

Durch die Fähigkeit Schall zu absorbieren wird eine Lärmminderung, die in Städten vorherrschenden akustischen Dauerbelastung, bewirkt. [64] Auch hier ergibt sich bei einer intensiven Begrünung ein etwas höheres Potential. Die *Schallabsorption* macht sich dabei sowohl innerhalb als auch außerhalb des Gebäudes bemerkbar. Abhängig von Substratdicke, Pflanzenarten und Feuchtigkeitsgehalt kann der Lärmpegel, der von außen in das Gebäude gelangt, zwischen 5–46 dB abgemindert werden.

Für den Regenwasserrückhalt bzw. die *Retentionsleistung* einer Dachbegrünung ist deren Abflussbeiwert entscheidend. [65] Dieser beschreibt das Verhältnis aus dem direkt in das Abwasser geleitetem Niederschlag und dem Gesamtniederschlag. Bei einer intensiven Begrünung ist dieser i.d.R. niedriger (0,4 – 0,05) als bei einer extensiven (0,6 – 0,4).

Über die Verdunstung des zurückgehaltenen Regenwassers kühlt Dachbegrünung sowohl die Stadt als auch die unmittelbare Umgebung und erhöht die regionalen Niederschläge. [7] Die *Verdunstungsleistung* einer intensiven Begrünung ist auch hier höher, als bei einer extensiven Begrünung. Eine Intensivbegrünung wird aktiv bewässert und besitzt eine Vegetation mit höherer Wasserspeicherkapazität, während eine extensive Begrünung meist mit trockenresistenten Sedum-Arten umgesetzt wird. [66,67]

## 4.2 Biodiversität eines PV-Gründaches

Eine negative Folge der zunehmenden Versiegelung von Flächen ist der Verlust von immer mehr Lebensraum für heimische Tiere und Pflanzen und eine damit verbundene Minderung der Biodiversität<sup>12</sup>. [7] Eine Dachbegrünung kann als

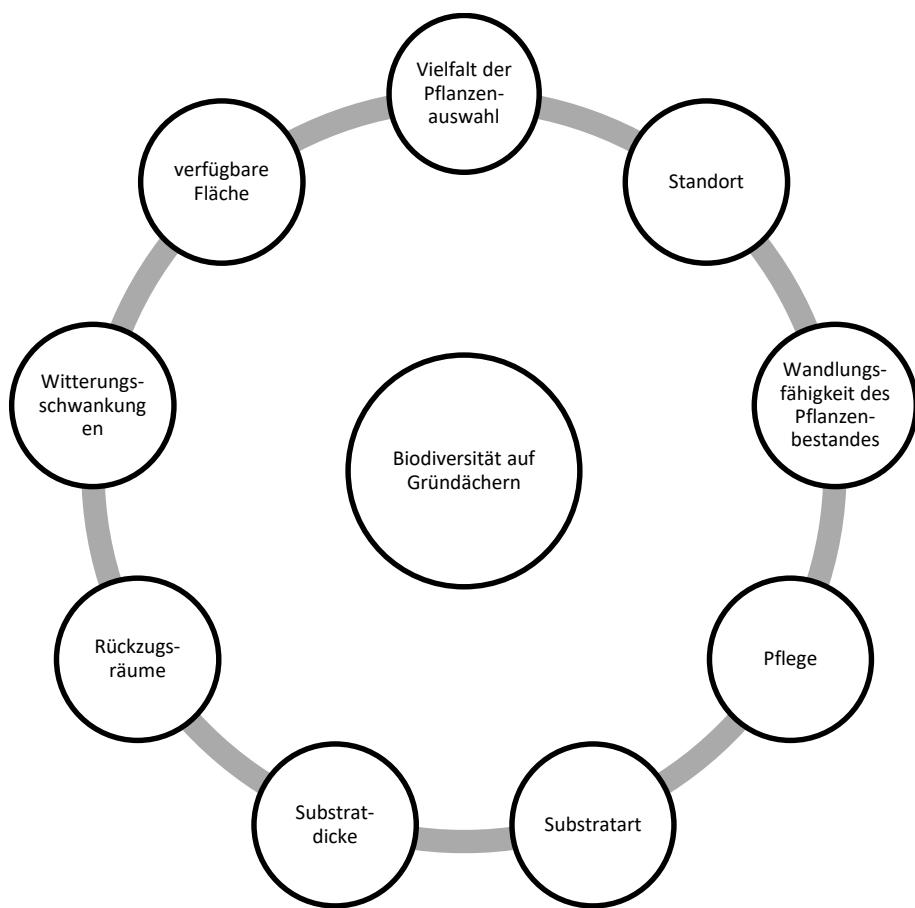
---

<sup>12</sup> Unter Biodiversität versteht man allgemein die Vielfalt der Ökosysteme, die Vielfalt der Arten und die genetische Vielfalt innerhalb der Arten. [68]

ökologische Ausgleichsfläche dienen um naturnahe Strukturen wieder zu gewinnen.

Bei einem PV-Gründach muss. auf eine intensive Begrünung verzichtet werden. Die begrenzte Pflanzenauswahl wirkt sich prinzipiell negativ auf die Biodiversität einer Dachbegrünung aus. (vgl. Abbildung 10)

**Abbildung 10** Einflussfaktoren auf die Biodiversität von Gründächern. [7,69,70]



Auch das Einrichten von Naturförderungs-Elementen mit Ästen, Gehölzkonstruktionen oder Hügel ist, aufgrund möglicher Verschattungen und des Pflegebedarfs zwischen den Modulreihen, zu begrenzen. [45] Auf temporäre Wasseroberflächen wie sie bei Dachbegrünungen normalerweise realisiert werden können muss, aufgrund der Notwendigkeit Strom und Wasserkreisläufe voneinander zu trennen, verzichtet werden. [59]

Zudem beeinflusst auch die Installation der PV-Anlage die Begrünung und damit dessen Biodiversität. Die aufgeständerten Module sorgen für andere Wasser-, Licht-, Temperatur- und Windverhältnisse auf dem Gründach. [71] In wissenschaftlichen Publikationen (vgl. Tabelle 3) wurden die Auswirkungen der unterschiedlichen Verhältnisse auf die Biodiversität der Begrünung untersucht, allerdings mit dem Ergebnis, dass sich die damit geschaffenen unterschiedlichen kleinklimatischen Bedingungen positiv auswirken.

**Tabelle 3** Studien zu den Auswirkungen einer PV-Anlage auf die Biodiversität der Dachbegrünung.

Referenz	Standort	Untersuchung	Auswirkung
S. Brenneisen [44] [49]	Basel, Schweiz	Vergleich der Biodiversität auf PV-Gründächern mit anderen Gründächern ohne PV-Anlage.	positiv
C. Nash et. al [72]	London, England	Biodiversität auf einem PV-Gründach in London.	positiv
J. M. Bousselot et. al [73,74]	Denver (Colorado), USA	Einfluss eines Solar-Gründaches auf das Pflanzenwachstum.	positiv
M. Köhler et. al [75]	Berlin	Vegetationsentwicklung unter einem PV-Gründach.	positiv
S. Brenneisen et. al [76]	Winterthur und Basel, Schweiz	Biodiversität unter einem Muster-PV-Gründach. Anschließender Vergleich mit Kies- und Gründächern.	positiv
T. Obergeföll [71]	Freiburg	Vegetationsentwicklung und Mikroklima unter einem PV-Gründach.	positiv

M. Köhler et. al [75] kommen in deren Studie zu dem Schluss, dass die Anzahl und Wachstum der Pflanzenarten im Bereich der PV-Anlage signifikant höher ist als auf der restlichen Grünfläche. Zu ähnlichen Ergebnissen gelangen die Studien von Nash et. al [72], Bousselot et. al [73,74] und Obergeföll [71], welche ebenfalls die Vegetationsentwicklung unter den Modulen untersucht haben. Die Vegetation variiert dabei in Abhängigkeit, der durch die PV-Anlage geschaffenen, unterschiedlichen klimatischen Verhältnisse. In der Untersuchung von Obergeföll beispielsweise wurde hinter, unter und vor den Modulreihen ein besonders üppiger, aber jeweils unterschiedlicher Bewuchs festgestellt (vgl. Abbildung 11). Im begrünten Bereich ohne PV-Anlage war die Vegetation hingegen vergleichsweise heterogen und ausgetrocknet.

**Abbildung 11** Vegetation auf dem PV-Gründach der Strahlenklinik Freiburg, die sich anhand ihrer unterschiedlichen Entwicklung in verschiedene Zonen einteilen lässt. (l.) Ausgetrocknete Begrünung auf dem Bereich des Daches ohne PV-Anlage (r.). [71]



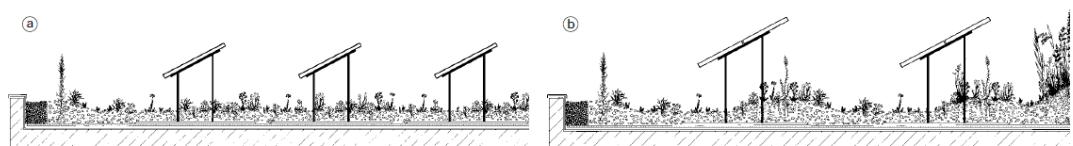
In einer Studie von S. Brenneisen et. al [44,49] wurden 15 begrünte Flachdächer auf deren Anzahl von Käferarten untersucht und bei den PV-Gründächern eine hohe Artenvielfalt festgestellt. Dabei wurde auch eine Dachfläche untersucht, die mit einem PV-Gründach, einem begrünten Bereich ohne PV-Anlage und einem mit Gehölzen naturnah eingerichteten Bereich, drei unterschiedlichen Lebensraumtypen aufweist. (vgl. Abbildung 23 im Anhang ) Der direkte Vergleich ergab unter der PV-Anlage eine geringere Artenvielfalt als auf dem mit Gehölzen versehenen Bereich. Allerdings wies die Käferfauna unter der PV-Anlage eine deutlich größere Diversität auf als bei dem ungeschützten sonnenexponierten Bereich der der Dachbegrünung.

Vergleichbare Ergebnisse ergaben sich auch bei der Untersuchung der Käferfauna einer Muster-PV-Anlage in Winterthur. [76] Auch hier wurden bei dem PV-Gründach mehr Arten ermittelt als auf bekiesten und begrünten Referenzflächen, jedoch weniger als auf den begrünten Flächen, die speziell zur Steigerung der Biodiversität angelegt wurden.

Die positiven Auswirkungen einer PV-Anlage auf die Diversität werden in den Studien auf das entstehende Mikroklima zurückgeführt. Schatten und feuchtere Umgebung unter den Modulen bieten gute Bedingungen für Flora und Fauna. Dadurch können sich auf dem PV-Gründach auch weniger trockenresistente Pflanzen- und Tierarten etablieren. [44] Der beweglichen Fauna dienen die Module bei Bedarf, insbesondere in trockenen Sommerphasen, als Rückzugsraum. Auch direkt hinter den Modulen können sich aufgrund des unterschiedlichen Wasser- und Lichtangebots andere Arten entfalten als auf dem sonnenexponierteren Bereich des Daches.

Zudem existieren auch bei einem PV-Gründach Möglichkeiten die Biodiversität weiter zu steigern. Das Baudepartement Basel-Stadt empfiehlt beispielsweise, direkt hinter dem Modul eine dickere Substratschicht anzubringen. [45] (vgl. Abbildung 12)

**Abbildung 12** Mögliche Variation des Substrataufbaus zur Erhöhung der Biodiversität in Abhängigkeit der gewählten Höhe für die Aufständeration [45]



Die damit aufgeschütteten Hügel bleiben länger feucht und kühl und bieten sich spezielle für Futterpflanzen oder heimische Pflanzen an, die höhere Substratdicken zum Wachsen benötigen. Wird ein ausreichend großer Modulreihenabstand gewählt ergibt sich dadurch keine höhere Verschattungsgefahr.

#### 4.3 Evaluation – Übertragbarkeit der ökologischen Qualität einer extensiven Begrünung auf das PV-Gründach

Die Untersuchungen der ökologischen Vorteile einer Dachbegrünung in Kapitel 4.1 zeigen, dass diese auch in positiver Korrelation zur Pflanzenauswahl und Substratdicke stehen. Wird bei einem PV-Gründach eine geringere Substratdicke gewählt und nur Pflanzen mit niedriger Wuchshöhe verwendet, könnten sich deswegen auch die ökologischen Vorteile verringern.

Wird das Substrat zur Ballastierung verwendet muss die Substratschicht aufgrund der statischen Erfordernisse allerdings i.d.R. sogar höher gewählt werden, als es bei einer herkömmlichen extensiven Begrünung üblich ist<sup>13</sup>. [26]

---

<sup>13</sup> Beispielsweise verwendet Die Firma Optigrün bei deren Systemlösung Substratdicken ab 8 cm. Deren konventionell angebotene Extensivbegrünung wird hingegen standardmäßig mit 8 cm ausgeführt. [40]

Betrachtet man die Biodiversität, wird die Verwendung niedrig wachsender Pflanzenarten kompensiert. Durch das geschaffene Mikroklima fällt die Artenvielfalt im Bereich der PV-Anlage in den wissenschaftlichen Publikationen höher aus als im begrünten Bereich ohne PV-Anlage.

Überträgt man dies auf die ökologischen Vorteile, wie beispielsweise Schadstoffbindung, verbessertes Umgebungsklima und Dämmwirkung, sind im Vergleich zu einer herkömmlichen Begrünung diesbezüglich Einbußen nicht zwingend zu erwarten. Das würde sich mit Aussagen von Dachbegründern decken, die in der Praxis keine Unterschiede in der Qualität der Begrünung beobachten konnten. [41,42].

Die hohe ökologische Qualität einer Intensivbegrünung wird allerdings nicht erreicht. In der Praxis werden jedoch zumeist Extensivbegrünungen umgesetzt. [77]

Im Vergleich zur ökologischen Qualität einer separaten extensiven Dachbegrünung oder einer der spezifischen Modularträge einer konventionellen PV-Anlage ergeben sich bei einem PV-Gründach also keine Einschränkungen. Im Folgenden wird deshalb untersucht ob dies auch für die Nutzung der gesamten Dachfläche gilt.

## 5 Doppelte Flächenausnutzung

Wichtiger Beweggrund für die Kombinationslösung ist eine effizientere Flächenausnutzung, um eine Konkurrenz zwischen Begrünung und PV-Anlage zu vermeiden. Im Idealfall würde eine Kombinationslösung die vorhandene Fläche dabei doppelt ausnutzen.

Da bei dem PV-Gründach das Substrat auch unter dem Modul verlegt wird kann bis auf einen kleinen Bereich, der von der Aufständerung in Anspruch genommen wird die komplette Dachfläche extensiv begrünt werden.

Um Aussagen über die Effizienz der Flächenausnutzung der PV-Anlage des Gründaches treffen zu können, muss ein Vergleich zur Nutzung mit einer konventionellen PV-Anlagen erfolgen. Ein Maß für die effiziente Dachnutzung von PV-Flachdachanlagen ist dabei der Flächennutzungsgrad, der Modulfläche in

das Verhältnis zur Dachfläche setzt. [1] Dieser lässt sich mit Modulbreite (b) und Modulabstand<sup>14</sup> (d) errechnen:

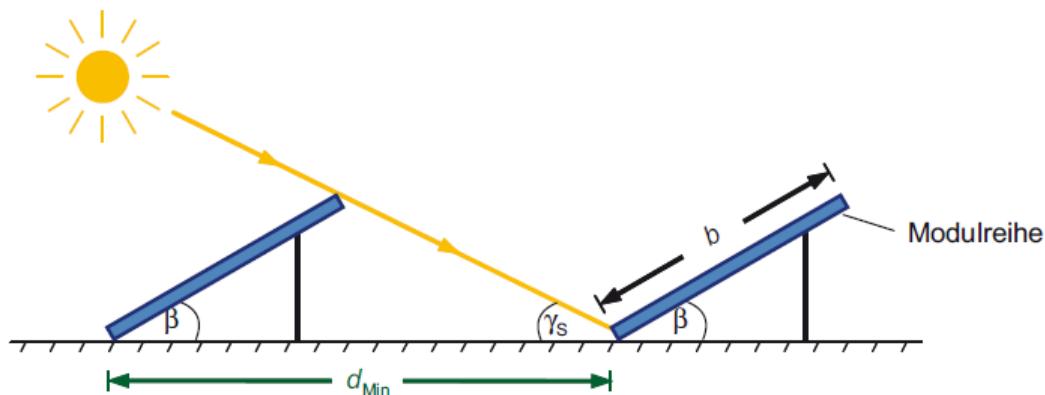
$$fNutz = \frac{b}{d}$$

Durch eine Gegenüberstellung der Flächennutzungsgrade wird untersucht, ob sich auf einem PV-Gründach prinzipiell dieselbe Anlagenleistung installieren lässt wie bei einer konventionellen PV-Anlage.

## 5.1 Süd-Ausrichtung

Bei einer Süd-Ausrichtung ist der Modulabstand (d) abhängig von dem gewählten Sonnenwinkel<sup>15</sup> (ys), dem Aufstellwinkel ( $\beta$ ) und der Modulbreite. (vgl. Abbildung 13)

**Abbildung 13** Grafische Darstellung des Modulabstands (d), des Sonnenwinkels (ys) und der Modulbreite (b) [1]



Berechnet wird der Modulabstand durch: [1]

---

<sup>14</sup> Der Modulabstand bezeichnet die Länge zwischen der Unterkante des vorderen Moduls zur Unterkante des darauffolgenden Moduls. [1]

<sup>15</sup> Der Sonnenwinkel (bzw. Verschattungswinkel) ist der Winkel zwischen der Geraden durch die obere Kante des vorderen Moduls zur unteren Kante des darauffolgenden Moduls. [1] (vgl. im Anhang)

$$d = b * \frac{\sin(ys + \beta)}{\sin ys}$$

Der gewählte Sonnenwinkel bestimmt welche Eigenverschattungsverluste zu Gunsten einer höheren Flächenausnutzung akzeptiert werden. Wird dieser höher gewählt ergibt sich ein geringerer Modulabstand und damit höhere Ertragsverluste. Dabei wird sich am Sonnenstand im Winter orientiert. Als Richtlinie dient hier ein Sonnenwinkel, bei dem am kürzesten Tag zur Mittagszeit gerade keine Eigenverschattung auftritt. Beispielsweise empfiehlt der Solarteur Solarwerk Karlsruhe für PV-Anlagen im Süden Deutschlands einen Sonnenwinkel von 16°–18,5° und für den nördlichen Teil einen Sonnenwinkel von 15,5°–16,5°. [78]

Bei einem PV-Gründach muss in der Praxis der Modulabstand zusätzlich noch so gewählt werden, dass zwischen den Modulreihen noch ausreichend Platz zur Pflege der Begrünung vorhanden ist. [41,42]

Für den Vergleich wurde eine PV-Gründach-Lösung der Firma Optigrün [40] und ein aerodynamische Flachdachsystem der Firma S:Flex [79] herangezogen, welche als relativ repräsentativ eingeschätzt werden.

Für die Variante von Optigrün wird ein Modulabstand von 2,85 m bis 3,60 m bei längs aufgeständerten Modulen empfohlen. Bei den quer aufgeständerten Modulen von S-Flex wird bei einem Sonnenwinkel von 18° ein Reihenabstand<sup>16</sup> von 0,79 m vorgegeben. Sonnenwinkel und Reihenabstand des S-Flex-Systems wurden auf die Auslegung des Systems von Optigrün übertragen und für beide Systeme der Flächennutzungsgrad errechnet. (vgl. Tabelle 4)

**Tabelle 4** Flächennutzungsgrade der Systeme von S:Flex und Optigrün bei Süd-Ausrichtung und deren Installationsparameter.

Anbieter	S-Flex [79]	Optigrün [80]
System	"LEICHTmount 2.1 S 15°"	"SunRoot 15°"

<sup>16</sup> Länge zwischen unterer Modulkante und oberer Modulkante des darauffolgenden Moduls. [1]

Sonnenwinkel (ys)	18°	18°
Modulneigung	15°	15°
Modullänge	1 m	1,65 m
Modulbreite (b)	1,65 m	1 m
Modulabstand (d)	1,76 m	2,91 m
Reihenabstand	0,79 m	1,31 m
<b>Flächennutzungsgrad</b>	<b>0,57</b>	<b>0,57</b>

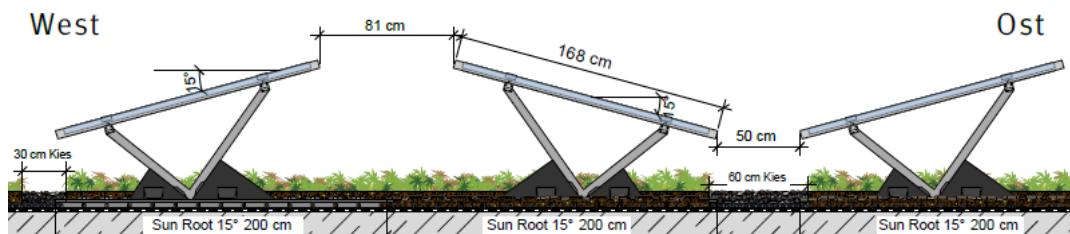
Der Modulabstand der sich dabei für das System von Optigrün ergibt, liegt mit 1,76 m noch innerhalb des von Optigrün empfohlenen Bereichs. Für beide Systeme ergibt sich damit ein Flächennutzungsgrad von 0,57, wodurch über die Hälfte der Dachfläche mit Modulen belegt werden kann.

## 5.2 Ost-West-Ausrichtung

Bei der Auslegung einer der PV-Anlage mit Ost-West-Ausrichtung muss eine mögliche Eigenverschattung nicht berücksichtigt werden. [81] Nach einer nach Osten orientierten Modulreihe folgt zunächst eine nach Westen orientierte Reihe, weswegen zwischen Reihen mit gleicher Ausrichtung genügend Abstand besteht.

Bei der Ost-West-Ausrichtung des PV-Gründaches wird allerdings wiederum ein Abstand zwischen den Reihen empfohlen. (vgl. Abbildung 14)

**Abbildung 14** Ost-West-Ausrichtung der Systemlösung von Optigrün und empfohlener Umsetzung. [28]



Für die Ost-West-Ausrichtung beider Systeme wurden in Abhängigkeit der jeweiligen Installationsempfehlungen folgende Flächennutzungsgrade berechnet:

**Tabelle 5** Flächennutzungsgrade der Systeme von S:Flex und Optigrün bei Ost-West-Ausrichtung und deren Installationsparameter.

Anbieter	S:Flex [79]	Optigrün [80]
System	"LEICHTmount 2.1 EW"	"SunRoot 15°"
Modulneigung	10°	15°
Modullänge	1 m	1,6 m
Modulbreite	1,68 m	0,95 m
Dachfläche pro Modul	2,5 m	1,82 m
Modulfläche	1,68 m	1,48 m
Flächennutzungsgrad	0,67	0,81

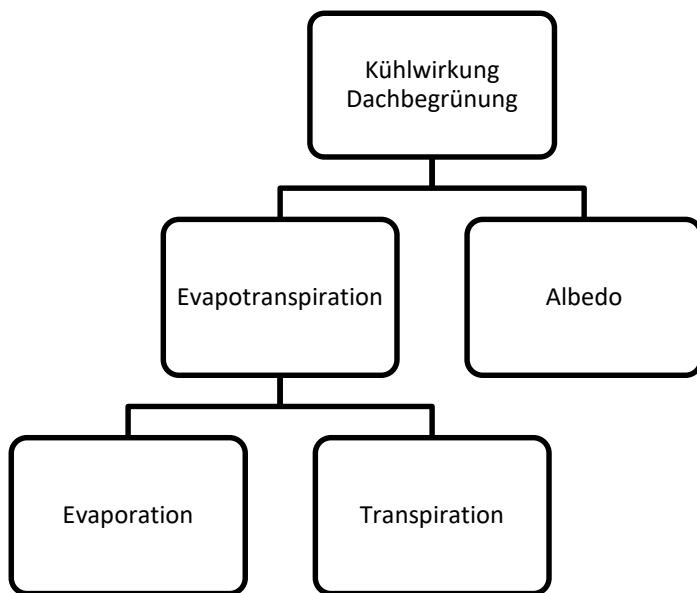
Durch den geringer gewählten Abstand lässt sich bei dem aerodynamischen System eine signifikant höhere Flächenausnutzung erreichen. Das ermöglicht eine größere Anlagenleistung mit mehr Energieerträgen. Die Modulreihen des PV-Gründaches bei Ost-West-Ausrichtung dichter zusammen zu stellen erscheint hinsichtlich notwendiger Pflege zwischen den Modulen als weniger geeignet (vgl. Abbildung 19 im Anhang). Zudem müsste untersucht werden welche Auswirkung dies auf die ökologische Qualität der Begrünung hätte. Eine kompaktere Bauweise der Anlage würde auch zu anderen mikroklimatischen Bedingungen, wie beispielsweise einer geringeren Lichtversorgung der Pflanzen, führen.

## 6 PV–Ertragssteigerung durch Dachbegrünung

Anbieter der Systemlösungen, wie beispielsweise ZinCo [29], Optigrün [28] und Bauder [30], werben mit der Kühlleistung der Dachbegrünung, welche den Wirkungsgrad einer PV–Anlage erhöhen soll. Auch in Fachliteratur [12,15,59] oder wissenschaftlichen Abhandlungen (vgl. 6.1) wird dies oftmals als ausschlaggebende Synergie der Kombination aufgeführt.

Begrünte Flachdächer sind nachweislich kühler als Bitumen– oder Kiesdächer. [7] An heißen Sommertagen können die Temperaturunterschiede dabei sogar bis zu 40° betragen. [82,83] Die kühleren Temperaturen einer Dachbegrünung ergeben sich dabei aus zwei spezifischen Effekten. (vgl. Abbildung 15)

**Abbildung 15** Ursachen für die Kühlwirkung einer Dachbegrünung [84]



Die Albedo beschreibt das Verhältnis von reflektierter zu eingehender kurzwelliger Sonneneinstrahlung. [59] Je mehr Strahlung durch die Begrünung reflektiert wird, umso weniger trägt zur Erwärmung des Flachdaches bei. Die Evapotranspiration entsteht aus der Verdunstung von Wasser auf dem Substrat (Evaporation) und der Verdunstung von Wasser über die Blätter von Pflanzen (Transpiration). [85] Die aktive Kühlung durch Evapotranspiration ist dabei zum größeren Teil ausschlaggebend für die geringeren Temperaturen einer Dachbegrünung. [84]

Da die Leistung einer Solarzelle und somit auch die des Solarmoduls stark von dessen Temperatur abhängig ist, könnte eine PV–Anlage von der Kühlleistung

einer Dachbegrünung profitieren. [1] Je nach spezifischem Temperaturkoeffizient des Moduls können, ab einer Modultemperatur von 25°C, die Leistungsverluste durch die Aufheizung des Moduls um 0,4–0,5 %/K verringert werden.

## 6.1 Ertragssteigerung durch Kühlung

Für die Beurteilung wurden die veröffentlichten Studien samt Rahmenbedingungen und Ergebnisse zusammengetragen. (vgl. Tabelle 6) Im Fokus des Kapitels stehen die Publikation, deren Ergebnisse deutlich vom Durchschnitt abweichen sowie eine Studie der ZHAW, die aufgrund ihres Umfangs als besonders aussagekräftig eingeschätzt wird.

**Tabelle 6** Studien zum Thema Ertragssteigerung von PV-Anlagen durch Kühlleistung der Dachbegrünung. In Anlehnung an Lamnatou und Chemisana. [86] Aufsteigend nach Mehrertrag sortiert.

Referenz	Studienart	PV-System <sup>17</sup>	Standort	Zeitrahmen	Pflanzenarten	PV-Mehrertrag	Vergleichsobjekte
D. E. Helow et. al [87]	Experiment	Standard	Toronto, Kanada	2 Wochen (Juli/August)	Gräser, Wildblumen	0 %	PV-Gründach und weißes PV-Dach
L. Witmer [88]	Simulation	-	diverse, USA	-	k.A.	0,08 % – 0,55 %, je nach Klimaregion	PV-Gründach und weißes PV-Dach
A. Nagingast et. al [89]	Experiment	Standard	Pittsburgh, USA	1 Jahr	Moos, Sedum	0,5 %	PV-Gründach und PV-Bitumendach
M. Alshayeb et. al [90]	Experiment	Standard	Kansas, USA	1 Monat (September)	k. A.	0,62 %	PV-Gründach und PV-Bitumendach
T. Baumann et al. [32]	Experiment	Standard	Winterthur, Schweiz	ca. 1,5 Jahre	Sedum	<±0,74 %	PV-Gründach und PV-Kiesdach
Ogaili et. al [91]	Experiment	Standard	Portland, USA	2 Monate (Juli–September)	Nelken	0,7 – 0,75 % (weiß); 1,0 – 1,2 % (Bitumen)	PV-Gründach, PV-Bitumendach und weißes PV-Dach

<sup>17</sup> Die experimentellen Studien wurden entweder anhand von konventionellen Modulen (Standard) oder kleineren Mini-Solarmodulen durchgeführt.

G. Osma et. al [92]	Experiment	Standard	Bucaramanga, Kolumbien	3 Wochen	Sedum	1 %	PV-Gründach und PV-Bitumendach
M. J. R. Perez et. al [93]	Experiment	Mini	New York, USA	1 Monat (Juni)	Sedum	2,56 %	PV-Gründach, PV-Kiesdach, Gründach und Kiesdach
D. Schenk (Fa. Zin-Co) [94]	Experiment	Standard	Deutschland	3 Jahre	k. A.	4 %	PV-Gründach und PV-Bitumendach
S. C. M. Hui et. al [95]	Experiment	Standard	Hong Kong, China	sonniger Tag (11 – 14 Uhr)	intensive Begrünung	4,3 %	PV-Gründach und PV-Betondach
Köhler et al. [75]	Experiment	Standard	Berlin, Deutschland	ca. 5 Jahre		ca. 6 %	PV-Gründach und PV-Bitumendach
S. C. M. Hui et. al [95]	Simulation	-	Hong Kong, China	1 Jahr	Sedum	8,3 %	PV-Gründach und PV-Betondach

In fast allen Studien erreicht das PV-Gründach gegenüber der jeweiligen Referenzfläche, zumeist ein PV-Bitumen oder PV-Kiesdach, einen PV-Mehrertrag. Die Studie von D. E. Helow et. al ist die einzige Studie in der keine Leistungssteigerung quantifiziert wird. Diese umfasst allerdings nur einen Zeitrahmen von zwei Wochen, in denen heiße und trockene Wetterbedingungen herrschten. [87] Deshalb konnte, laut den Verfassern, im Beobachtungszeitraum nicht die potentielle Evapotranspirationsrate der Begrünung erreicht werden.

In den Studien von Köhler et. al [75] und Hui et. al [95] hingegen werden vergleichsweise hohe Ertragssteigerung quantifiziert. Bei dem Versuch von Köhler et al. [75] wurde ein Teil der PV-Anlage über Bitumen und ein Teil über einer Dachbegrünung installiert. Beim Vergleich der Stromerträge wurden über der Dachbegrünung durchschnittlich 6 % höherer Erträge gemessen. Innerhalb des Versuchs wurden allerdings noch weitere Parameter variiert, weswegen die Ertragsunterschiede bei kritischer Betrachtung nicht zwingend auf die Kühlleistung der Begrünung zurückgeführt werden muss. Beispielsweise wurden Systemkomponenten von verschiedenen Herstellern verwendet und die PV-Anlage über dem, als Referenzfläche dienenden, Bitumen, wurde mit zwei unterschiedlichen Neigungen installiert ( $15^\circ$  und  $30^\circ$ ). Zudem wurden die Module über der Begrünung, im Vergleich zur Bitumen-Variante, höher und offener aufgeständert, wodurch vermutlich auch eine bessere Hinterlüftung gegeben war.

Die Studie von Hui et. al [95] besteht aus einem theoretischen Modell und einer praktischen Feldstudie in Hong Kong. Mit einem theoretischen Modell wurde ein Jahresmehrertrag von 8,3 % errechnet. Durch die anschließende Messung in der praktischen Studie konnte dieser Wert allerdings nicht validiert werden. Der dabei gemessene Mehrertrag ist mit 4,3 % dennoch relativ hoch. Der Versuch erfolgte dabei allerdings über einer Intensivbegrünung, die bei einem herkömmlichen PV-Gründach nicht verwendet wird. Zudem umfassen die Messergebnisse nur einen sehr kurzen Zeitraum von drei Stunden.

Innerhalb der Veröffentlichungen ist vor allem die Studie der ZHAW besonders hervorzuheben, in der versucht wurde den Kühlungseffekt mit relativ hohem Aufwand über einen Zeitraum von eineinhalb Jahren nachzuweisen. [32] Für diesen Zweck wurde eine 78 kWp großen Anlage auf einer Fläche von ca. 1300 m<sup>2</sup> installiert. Dabei wurden 13 verschiedene Testfelder mit unterschiedlichen Aufständerungshöhen, Neigungen, Substrattypen- und dicken angelegt. Bei einigen Testfeldern fand zusätzlich eine Bewässerung statt. Dadurch sollten nicht nur die günstigsten Bedingungen für die Kühlung der Module ermittelt werden, sondern auch zu neuen Erkenntnissen über die optimale Umsetzung eines PV-Gründaches gelangt werden. Die Referenzanlagen wurden über einer Bekiesung installiert und dessen Modultemperaturen mit denen der auf Begrünung angebrachten Module verglichen. Durch die Ergebnisse ließ sich jedoch kein entscheidender Kühlungseffekt nachweisen. Die Temperaturunterschiede waren gering und befanden sich noch im Bereich der Messunsicherheit des verwendeten Messverfahrens. Eine Erklärung für den ausbleibenden Kühlungseffekt könnte nach Aussagen von beteiligten Projektpartnern [27,35,50] eine zu üppig gewachsene Begrünung unter den Modulen und ein damit verbundener Hitzestau gewesen sein. Durch zu dicht und hoch gewachsene Bepflanzung wurde die Luftzirkulation unter den Modulen erschwert und dabei der Abtransport von Wärme verhindert.

## 6.2 Ein neuer Ansatz – Ertragssteigerung durch Albedo

In einer Studie der ZHAW wird mit der direkten Nutzung der Albedo eine weitere Möglichkeit untersucht die PV-Erträge durch eine Dachbegrünung zu steigern. [27,96] Silberlaubige Pflanzen mit einer hohen Albedo sollen dabei reflektierte Strahlung als diffusen Anteil auf die Module zurückwerfen. In einem ersten Vorversuch wurde gegenüber einer herkömmlichen Begrünung eine Ertragssteigerung von bis zu 10 % festgestellt. Eine Validierung der Ergebnisse durch den Hauptversuch lag zum Zeitpunkt der Erstellung der Arbeit noch nicht vor.

Auch in der Studie von D. Chemisana et. al [97] wurde eine Leistungssteigerung durch die Albedo einer Dachbegrünung untersucht. (vgl. Tabelle 7) In einem mediterranen Klima wurden drei verschiedene Versuchsfelder aufgebaut um eine positive Interaktion zwischen Dachbegrünung und PV-Anlage nachzuweisen. Die Erträge der PV–Sedum–Kombination waren um 3,33 %, die der PV–Gazania–Kombination um 1,29 % höher als die Erträge, die sich über der Bekiesung erreichen ließen. Da es sich im Beobachtungszeitraum um Sommermonate mit heißen und windarmen Tagen handelte, führen die Autoren die Ertragssteigerung nicht auf die Evapotranspiration, sondern auf die Albedo zurück.

**Tabelle 7** Studien zum Thema Ertragssteigerung von PV–Anlagen durch die Albedo einer Dachbegrünung. In Anlehnung an Lamnatou und Chemisana. [86]

Referenz	Studienart	PV–System	Standort	Zeitrahm	Pflanzenart	PV–Mehrertrag	Vergleichsobjekte
D. Chemisana et. al [98]	Experiment	Mini	Lleida, Spanien	2 Monate (Juni–Juli)	Sedum, Gazanien	1,29 % (Gazania) bzw. 3,33 % (Sedum)	PV–Gründach und PV–Kiesdach
T. Baumann et. al [35]	Experiment	Standard	Wintertthur, Schweiz	–	Silberlaubige Pflanzen (u. a. Sonnenröschen und Thymian)	–	PV–Gründach und PV–Kiesdach

### 6.3 Evaluation

Insgesamt ergeben sich bei den Studien, in der relative hohe Mehrerträge ermittelt wurden, zu viele Unsicherheiten um allgemein auf höhere PV–Erträge durch die Verdunstungskühlung einer Dachbegrünung zu schließen.

Anhand der Vielzahl an wissenschaftlichen Studien mit einem positiven Ergebnis lässt sich dennoch ein leichter Synergieeffekt ableiten. Der Wirkungsgrad einer PV–Anlage profitiert tendenziell von den kühleren Gründächern. Allerdings sind dabei nur marginal höhere Erträge zu erwarten, die sich auch wirtschaftlich kaum bemerkbar machen dürften. (vgl. 7.4.4)

Die Ursache für das Ausbleiben eines höheren Synergieeffektes, trotz der im Sommer merklichen Temperaturunterschiede, kann, neben dem Hitzestau durch üppigen Pflanzenwuchs unter den Modulen, auch eine zu geringe Verdunstungsleistung der Vegetation sein. Eine extensive Begrünung wird meist

nicht bewässert, weshalb vorrangig trockenresistente Sedum-Arten verwendet werden, die allerdings über eine geringe Evapotranspirationsrate verfügen. [67] Mittlerweile existieren extensive Dachbegrünungen, die mit einer aktiven Bewässerung speziell für eine hohe Kühlwirkung konzipiert wurden. [99] Allerdings können sich dort auch verstärkt höher wachsenden Pflanzen entwickeln. [42]

## 7 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

In der Literatur<sup>18</sup> lässt sich nur wenig zu Kosten und wirtschaftlichen Aspekten eines PV-Gründaches finden. Die Wirtschaftlichkeit<sup>19</sup> stellt allerdings ein wichtiges Kriterium für eine Investitionsentscheidung dar. [9,10] In diesem Kapitel wird deswegen überprüft, ob es sich bei einem PV-Gründach um eine aus betriebswirtschaftlicher Sicht lukrative Flächennutzung handelt.

Dabei werden die beiden separaten Nutzungen, Photovoltaik und Dachbegrünung, als Investitionsalternativen mit einbezogen. Die Dachbegrünung muss hierfür zunächst deren ökonomischer Auswirkungen untersucht werden.

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung erfolgte anhand eines fiktiven Gebäudes, da Kosten und Erlöse der Dachnutzungsarten, je nach Größe und anderer Rahmenbedingungen des Objektes, unterschiedlich hoch ausfallen können. Die Ergebnisse sind eher als Orientierung und Abschätzung zu verstehen undersetzen keine detaillierte und ausführliche objektunspezifische Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.

Für das Gebäude wurden Rahmenbedingungen definiert und die Kosten der jeweiligen Dachnutzungsart quantifiziert und gegenübergestellt. Die Rentabili-

---

<sup>18</sup> Bei einer der wenigen betriebswirtschaftlichen Betrachtungen die sich in der Literatur zum Thema PV-Gründach finden ließ handelt es sich um eine Lebenszykluskostenanalyse der TU Darmstadt. [59] In dieser Arbeit wurden allerdings deutlich unterschiedliche Rahmenbedingungen, Methoden und Untersuchungsbereiche gewählt, sodass die vorliegende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung eine Ergänzung der wissenschaftlichen Literatur darstellt.

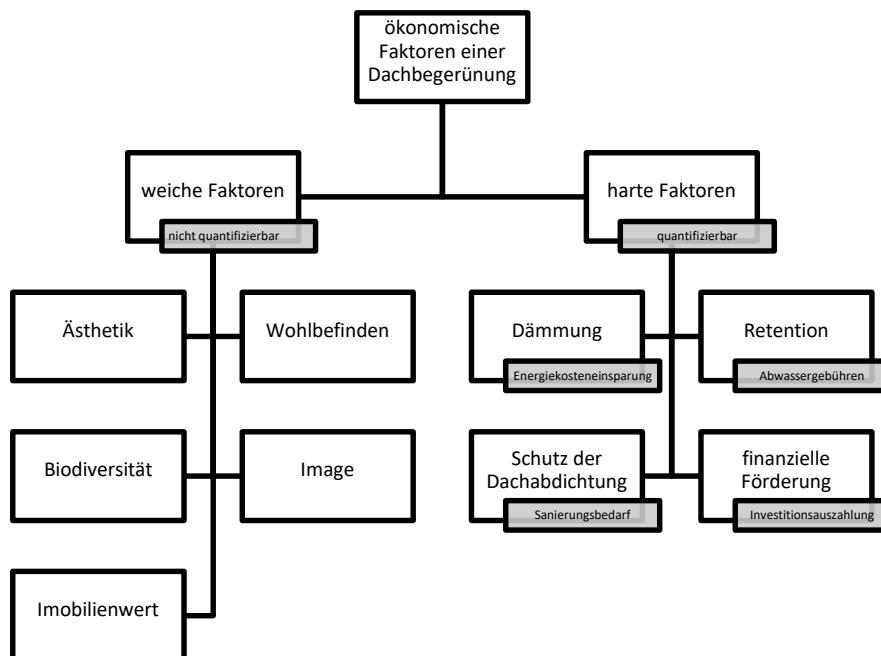
<sup>19</sup> Betriebswirtschaftliche Kennzahl, die das Verhältnis von Ertrag und Aufwand beschreibt. [100]

tät<sup>20</sup> der Dachnutzungsarten wird anhand einer dynamischen Investitionsrechnung überprüft.

## 7.1 Ökonomischer Nutzen einer Dachbegrünung

Eine Dachbegrünung verursacht nicht nur Kosten, sondern führt auch zu einem Nutzen, der aus ökonomischer Sicht positiv zu bewerten ist. Ein Teil des Nutzens lässt sich dabei konkret in Form von harten Faktoren monetär quantifizieren. [59] (vgl. Abbildung 16)

**Abbildung 16** Harte und weiche Faktoren bei ökonomischer Betrachtung einer Dachbegrünung. Eigene Darstellung in Anlehnung an Pfosser et. al. [59]



Im Hinblick auf umweltverträgliches und energieeffizientes Bauen werden Dachbegrünungen von manchen Städten und Kommunen über direkte Zuschüsse gefördert. [101,102] Für den Bauherren kann das eine Minderung der *Investitionsauszahlung* von 10 – 20 €/m<sup>2</sup> bedeuten.

In vielen Kommunen werden mittlerweile zudem die *Abwassergebühren* gesplittet berechnet. Wird die Niederschlagswassergebühr bei einer Dachbegrü-

---

<sup>20</sup> Als Rentabilität bezeichnet man grundsätzlich das Verhältnis von Gewinn und eingesetztem Kapital. [100]

nung verringter, lässt sich bis zu einem Euro pro Quadratmeter einsparen. [103]

Durch die *Dämmwirkung* der Dachbegrünung ergibt sich im Vergleich zu einem konventionellen Kiesdach sowohl eine Kühl- als auch eine Heizkosteneinsparung. Für die Heizkosten hat die TU Darmstadt das vereinfachte Verfahren nach der Energieeinsparverordnung (EnEV) angesetzt und ein Kostenersparnis von  $0,04 \text{ €}/\text{m}^2\text{*a}$  (Heizenergiokosten:  $0,08 \text{ €}/\text{kWh}$ ) ermittelt. [59] Für die Kühlung im Sommer fallen  $0,06 \text{ €}/\text{a*m}^2$  weniger an.

Die Dachbegrünung sorgt für eine geringere witterungsbedingte Beanspruchung der Dachabdichtung. [7] Dadurch erhöht sich deren *Haltbarkeit* von 30 Jahren, gegenüber einem Kies- oder Bitumendaches, auf 40 Jahre. [104] Für ein Gründach ergibt sich ein späterer Sanierungsbedarf und damit auch später anfallende Kosten. Aus ökonomischer Sicht sind diese als konkreter Nutzen zu bewerten, da die finanziellen Mittel bis zum späteren Sanierungszeitpunkt verzinst werden können.

Die weichen Faktoren lassen sich nicht unmittelbar monetär quantifizieren, wirken sich aber dennoch wirtschaftlich aus. Werden für die Investitionsentscheidung wirtschaftliche Kriterien herangezogen, müssen diese auch mitberücksichtigt werden.

## 7.2 Grundlegende Annahmen der Beispielrechnung

Als Gebäude wurde ein Einfamilienhaus gewählt, welches sich im Eigentum der Bewohner befindet. (vgl. Tabelle 8) Die Bewohner finanzieren und nutzen das jeweilige Investitionsobjekt. Für die Umsetzung von Photovoltaik und Dachbegrünung wurden ideale Rahmenbedingungen angenommen.<sup>21</sup> Die Begrünung wird über die gesamte Dachfläche realisiert. Die PV-Anlage wird wirtschaftlich ausgelegt, d.h. mit einer hohen Anlagenleistung, aber unter 10 kWp, da sonst eine EEG-Umlage auf den Eigenverbrauch gezahlt werden müsste. [105]

---

<sup>21</sup>Unter anderem hinsichtlich statischer Kapazität, keine Verschattungen durch umliegende Gebäude und gute Erreichbarkeit der Dachfläche.

**Tabelle 8** Grundlegende Daten des Gebäudes und der PV-Anlage.

Gebäudedaten		Auslegung der PV-Anlage	
Gebäudetyp	Einfamilienhaus	Ausrichtung/Neigung	Süd/15°
Dachfläche (m <sup>2</sup> )	130	Anlagenleistung	9 kWp
Höhe (m)	< 10 m	Finanzierungsart	Eigenfinanzierung
Standort	Region Freiburg i. Br.	Batteriespeicher	Nein
Windlastzone	1 <sup>22</sup>	Inbetriebnahme	08/2017
Personenanzahl	5		
Stromverbrauch	5000 kWh/a <sup>23</sup>		

### 7.3 Kostengegenüberstellung

Investitionsausgaben und Betriebskosten für die Begrünungen und das PV-Gründach wurden auf Anfrage von der Firma Optigrün für die konkreten Rahmenbedingungen des Gebäudes bereitgestellt. [56] (vgl. Tabelle 9) Die Kosten für die PV-Flachdachanlage wurden anhand einer aktuellen Marktanalyse abgeschätzt. [108]

**Tabelle 9** Kostengegenüberstellung der Investitionsobjekte in Anlehnung an [59].

Dachnutzung	extensiv	intensiv	PV-Kiesdach	PV-Gründach
Investitionsausgaben (netto)				

<sup>22</sup> [106]

<sup>23</sup> Durchschnittlicher Stromverbrauch eines deutschen 5-Personenhaushaltes. [107]

extensiv (10 cm)/intensiv (30cm)/Kiesdeckung (5cm) (inkl. Montage)	45 €/m <sup>2</sup> ) <sup>24</sup>	115 €/m <sup>2</sup> ) <sup>24</sup>	6 €/m <sup>2</sup> ) <sup>25</sup>	45 €/m <sup>2</sup> ) <sup>24</sup>
zusätzliche Unterkonstruktion für die PV-Anlage mit Kiesdach/Gründach (inkl. Montage)	-	-	13,8 €/m <sup>2</sup> ) <sup>26</sup>	16,62 €/m <sup>2</sup> ) <sup>24</sup>
PV-Anlage (exkl. Aufständerung), 9 kWp (inkl. Montage)	-	-	83 €/m <sup>2</sup> ) <sup>27</sup>	83 €/m <sup>2</sup> ) <sup>27</sup>
<b>Summe spez. Investitionsausgaben</b>	<b>45 €/m<sup>2</sup></b>	<b>115 €/m<sup>2</sup></b>	<b>102,8 €/m<sup>2</sup></b>	<b>144,62 €/m<sup>2</sup></b>
<b>Gesamte Investitionsausgaben</b>	<b>5.850,00 €</b>	<b>14.950,00 €</b>	<b>13.364,00 €</b>	<b>18.800,60 €</b>
<hr/>				
<b>Betriebskosten</b>				
Pflege Dachbegrünung /Kiesdach	5,5 €/m <sup>2*a</sup> ) <sup>24</sup>	10 €/m <sup>2*a</sup> ) <sup>24</sup>	0,21 €/m <sup>2*a</sup> ) <sup>24</sup>	5,5 €/m <sup>2*a</sup> ) <sup>24</sup>
Pflegeintervalle	2xjährlich ) <sup>24</sup>	2xmonatlich ) <sup>24</sup>	1xjährlich ) <sup>24</sup>	2xjährlich ) <sup>24</sup>
Betriebskosten PV-Anlage (1,5 % von der Investitionsauszahlung)	-	-	1,542 €/m <sup>2*a</sup> ) <sup>28</sup>	1,542 €/m <sup>2*a</sup> ) <sup>28</sup>

<sup>24</sup> Angaben der Firma Optigrün [56] für deren Systemlösung „SunRoot 15°“ [80].

<sup>25</sup> [109]

<sup>26</sup> Abschätzung nach [110,111].

<sup>27</sup> Abschätzung nach [108,110,111].

<sup>28</sup> [1]

<b>Summe spez. Betriebskosten</b>	5,5 €/m <sup>2</sup> *a	10 €/m <sup>2</sup> *a	1,752 €/m <sup>2</sup> *a	7,042 €/m <sup>2</sup> *a
<b>Gesamte Betriebskosten</b>	<b>715 €/a</b>	<b>1300 €/a</b>	<b>227,76 €/a</b>	<b>915,46 €/a</b>

## 7.4 Investitionsrechnung für das PV-Gründach und PV-Kiesdach

Auf die Durchführung der Investitionsrechnung für die intensive und extensive Begrünung wurde verzichtet. Eine Gegenüberstellung von Kosten und Erlösen (vgl. Tabelle 11) zeigte, dass die Begrünung unter den gegebenen Rahmenbedingungen und getroffenen Annahmen nicht mit den Erträgen einer PV-Anlage konkurrieren kann.

Zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit der beiden PV-Anlagen wurde das vom Umweltinstitut München e. V. erstellte Excel-Tool „Wirtschaftlichkeit von Solarstrom“ verwendet, mit dem sich die Renditen privater Solarstromanlagen berechnen lassen. [112] Das Tool wurde auf Plausibilität geprüft und so angepasst, dass auch der wirtschaftlichen Nutzen der Dachbegrünung des PV-Gründaches in die Berechnungen mit einfließt.

### 7.4.1 Methode des Internen Zinsfußes

Die Investitionsrechnung erfolgt anhand der Methode des internen Zinsfußes, einem Verfahren der dynamischen Investitionsrechnung. [113] Im Gegensatz zu den statischen werden bei dynamischen Verfahren auch die finanziellen Konsequenzen einer Investition berücksichtigt, weswegen diese Methode prinzipiell als realitätsnäher zu bewerten ist. [114] Zahlungsströme, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten anfallen werden auch unterschiedlich bewertet. Konkret bedeutet dies, dass zukünftige Ein- und Auszahlungen mit einem Kalkulationszinsfuß diskontiert (abgezinst) werden müssen. Dadurch werden für das eingesetzte Kapital entstehende Opportunitätskosten, also entgangene Erträge, die durch das nicht wahrnehmen einer alternativen Investitionsmöglichkeit entstehen, berücksichtigt. Der Kalkulationszinsfuß entspricht den Kapitalkosten und spiegelt im Grunde die präferierte Mindestverzinsung des Investors wieder. Durch das Aufsummieren aller abgezinsten Ein- und Auszahlungen (Barwerte bzw. Gegenwartswerte) ergibt sich der Kapitalwert. Dieser gibt letztlich Aufschluss darüber ob durch die geplante Investition ein Gewinn oder Verlust erzielt wird. Ein negativer (positiver) Kapitalwert ergibt einen Verlust (Gewinn) und somit eine geringerer (höhere) Verzinsung als der angesetzte

Kalkulationszinsfuß. Der interne Zinsfuß vermittelt dabei eine verständlichere Vorstellung davon, wie hoch die Rendite der Investition letztlich ausfällt. Er gibt an zu welchem Prozentsatz sich das investierte Kapital verzinst.

#### 7.4.2 Rahmenbedingungen der Investitionsrechnung

Bei einer Investitionsrechnung handelt es sich immer um eine vereinfachte Darstellung der komplexen Realität, bei der eine Vielzahl an Annahmen getroffen werden müssen. [115] Für ein möglichst aussagekräftiges Ergebnis stellen realitätsnah getroffene Rahmenbedingungen deshalb eine Grundvoraussetzung dar.

Als Kalkulationszinssatz (bzw. Diskontierungszinssatz) wurden 3 % gewählt. Dieser setzt sich zusammen aus der aktuell erzielbaren Rendite einer risikolosen Festgeldanlage (1,3 %<sup>29</sup>) und einem zusätzlichen Zuschlag (1,7 %), durch den das mit der Investition in eine PV-Anlage verbundene Risiko berücksichtigt werden soll. Der Risikozuschlag orientiert sich dabei an den Betriebskosten der PV-Anlage, die unter anderem Rücklagen für notwendige Wartungen beinhalten. Das Risiko für defekte Anlagenkomponenten wird in der Kalkulation damit mehr als doppelt berücksichtigt.

Im Zeitraum von 20 Jahren besteht für eine PV-Anlage durch die gesetzlich zugesicherte EEG-Einspeisevergütung Planungssicherheit. [117] Der Zeitraum entspricht auch der in der Afa-Tabelle des Bundesfinanzministeriums aufgeführten Nutzungsdauer einer PV-Anlage. [118] Allerdings ist davon auszugehen, dass beide PV-Anlagen noch 5–10 Jahre darüber hinaus große Mengen an Strom zu geringen anlagenbezogenen laufenden Kosten produzieren. [4] Deswegen wurden für den Betrachtungszeitraum 25 Jahre gewählt. Der in den letzten 5 Jahren erzielbare Umsatz ist dabei von gesetzlichen Rahmenbedingungen sowie dem zukünftigen Vergütungskonzept der Energieversorgungsunternehmen abhängig. Im folgenden Szenario wird dafür eine Vergütung der Einspeisung von 0,05 €/kWh angenommen. [71] Die übrigen Rahmenbedingungen lassen sich aus Tabelle 10 entnehmen, in der diese vollständig aufgelistet sind.

---

<sup>29</sup> Angebot der IKB Deutsche Industriebank. [116]

**Tabelle 10** Rahmenbedingungen für die PV-Anlagen der Investitionsrechnung.

Spezifischer Stromertrag	1031 (Kies) bzw. 1038 (Grün) kWh/kWp*a ) <sup>30</sup>
Ertragsminderung pro Jahr	0,50 % ) <sup>31</sup>
Eigenverbrauchsanteil	30 % ) <sup>32</sup>
Kleinunternehmer (ja / nein)	nein ) <sup>33</sup>
Einspeisung (ja / nein)	ja
Kosteneinsparung durch Dachbegrünung	61,1 € p. a. ) <sup>34</sup>
EEG-Einspeisevergütung	0,1218 €/kWh ) <sup>35</sup>
Einspeisevergütung nach 20 Jahren	0,05 €/kWh
Inflationsrate	1,5 % p. a. ) <sup>36</sup>
Zinssatz für Barwertermittlung (Diskontsatz)	3 % p. a.
Strompreis im ersten Jahr (brutto)	0,2923 €/kWh ) <sup>37</sup>

---

<sup>30</sup> Durchschnittswert von 10 Anlagen (15°/Süd) für Südbaden über die letzten 10 Jahre. [119]

<sup>31</sup> [1]

<sup>32</sup> Orientiert an dem Unabhängigkeitsrechner der HTW-Berlin. [120]

<sup>33</sup> Auf eine Befreiung von der Umsatzsteuer, durch die Inanspruchnahme der Kleinunternehmerregelung, [121] wurde zu Gunsten eines besseren Betriebsergebnisses verzichtet.

<sup>34</sup> Vgl. Kapitel 7.1 und Tabelle 11.

<sup>35</sup> [122]

<sup>36</sup> Ermittelte und aufgerundete durchschnittliche Inflationsrate der letzten 20 Jahre. [123]

<sup>37</sup> Durchschnittlicher Brutto-Endkundenpreis 2017. [124]

Strompreisseigerung	2 % p. a. ) <sup>38</sup>
Preisseigerung Energie- und Abwasserkosten	2 % p. a. ) <sup>38</sup>
Betrachtungszeitraum	25 a

Für das PV-Gründach wurde auch der wirtschaftliche Nutzen der Dachbegrünung berücksichtigt (vgl. Tabelle 11) sowie ein leichter PV-Mehrertrag von 0,74 % (Studie der ZHAW [34]), der sich aus dem höheren Wirkungsgrad durch die Kühlleistung der Dachbegrünung ergibt.

**Tabelle 11** Wirtschaftlicher Nutzen der Dachbegrünung für das Berechnungsbeispiel (vgl. Kapitel 7.1)

	PV-Gründach
Minderung Niederschlagswassergebühr	0,37 €/m <sup>2</sup> *a
Heizkosteneinsparung gegenüber Kiesdach	0,04 €/m <sup>2</sup> *a
Kühlkosteneinsparung	0,06 €/m <sup>2</sup> *a
<b>Summe spez. Kosteneinsparung</b>	<b>0,47 €/m<sup>2</sup>*a</b>
<b>Gesamte Kosteneinsparung</b>	<b>61,1 €/a</b>
PV-Ertragssteigerung durch Dachbegrünung	0,74 %

#### 7.4.3 Ergebnisse der Investitionsrechnung

Wie erwartet befindet sich das PV-Kiesdach mit einem positiven Kapitalwert in der Gewinnzone und kann mit einem internen Zinsfuß von fast 8,8 % eine lukrative Rendite erzielen. (vgl. Tabelle 12)

---

<sup>38</sup> [59]

**Tabelle 12** Ergebnisse der Investitionsrechnung für das PV-Gründach und PV-Kiesdach.

	PV-Kiesdach	PV-Gründach
Interner Zinsfuß	8,5 %	-9,6 %
Kapitalwert	8.882 €	-13.005 €
Anfangs-Eigenkapital (inkl. MwSt.)	15.903 €	21.087,16 €

Das PV-Gründach erreicht hingegen nicht die geforderte Mindestverzinsung und erzielt einen deutlichen Verlust. Der Aufwand für die höhere Aufständerung, extensive Begrünung und die Pflege wirkt sich stärker auf das Betriebsergebnis aus als der wirtschaftliche Nutzen der Begrünung und der einkalkulierte leichte PV-Mehrertrag.

#### 7.4.4 Sensitivitätsanalyse für das PV-Gründach

Um zu bestimmen wie stark die Parameter eines PV-Gründaches jeweils zur Unwirtschaftlichkeit beitragen, wird für das PV-Gründach eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Hierbei wird das Verfahren der Kritischen-Werte-Rechnung angewendet, bei dem jeweils ein Parameter variiert wird und dessen Auswirkungen auf die Zielwerte untersucht werden. [115]

Es werden dabei nur die für das PV-Gründach spezifischen Parameter verändert. Erlöse werden um 50 % erhöht, Kosten um 50 % gesenkt und die prozentuale Abweichung zum ursprünglichen Kapitalwert bestimmt. (vgl. Tabelle 13) Anschließend wurden die Parameter nach deren wirtschaftlichen Bedeutung aufsteigend sortiert.

**Tabelle 13** Kritische-Werte-Rechnung für das PV-Gründach.

Parameter	Inter- ner Zinsfuß	Kapital- wert	Abweichung zum ur- sprünglichen KW	Rangfolge nach Höhe der Aus- wirkung
Pflegekosten	0,8 %	-3.990 €	69,32 %	I
Investitionsausga-	-7,6 %	-9.524 €	26,77 %	II

ben extensive Begrünung				
Investitionsausgaben GD-UK	-9 %	-11.925 €	8,30 %	III
ökonomischer Nutzen Dachbegrünung	-7,6 %	-12.300 €	5,42 %	IV
PV-Mehrertrag durch Kühlung	-9 %	-12.809 €	1,51 %	V

Die Ursachen für das negative Betriebsergebnis des PV-Gründaches sind hauptsächlich auf der Kosten Seite zu finden. Am stärksten wirken sich die anfallenden Pflegekosten für die Dachbegrünung aus. Werden diese in der Kalkulation um die Hälfte reduziert, ergibt sich zwar noch ein Verlust (KW: -3.990 €), allerdings mit einem positiven internen Zinsfuß (0,8 %). Damit können zumindest die Investitionsausgaben und Betriebskosten über die Nutzungsdauer gedeckt werden. Geringere Investitionsausgaben für die extensive Begrünung können das Betriebsergebnis ebenfalls merklich verändern, ohne dabei jedoch eine positive Verzinsung (- 7,6 %) zu erreichen. Der Materialaufwand für die höhere Aufständerung durch die GD-UK ist zwar der geringste spezifische Kostentreiber, trägt aber ebenfalls nicht unerheblich zum negativen Betriebsergebnis bei. Dem wirtschaftlichen Nutzen der Dachbegrünung und vor allem dem PV-Mehrertrag kommt eine geringe betriebswirtschaftliche Bedeutung zu.

#### 7.4.5 Optimistisches Szenario

Um zu bestimmen ob ein PV-Gründach unter bestimmten Rahmenbedingungen des Projektes wirtschaftlich sein kann, wird ein optimistisches Szenario nach dem Verfahren der Dreifachrechnung erstellt. Bei der Dreifachrechnung handelt es sich ebenfalls um eine Methode der Sensitivitätsanalyse, bei dem die Investitionsrechnung mit einem wahrscheinlichen, einem pessimistischen und einem optimistischen Datensatz durchgeführt wird. [114] Die für das optimistische Szenario getroffenen Annahmen erscheinen durchaus noch möglich.

**Tabelle 14** Parametervariation für das optimistische Szenario des PV-Gründaches.

Parameter	Pflegekosten (brutto)	Minderung Investitionsausgaben durch Förderung (brutto)	Höherer wirtschaftlicher Nutzen Dachbegrünung	Höherer PV-Mehrertrag durch Kühlung
<b>Angesetzte Werte</b>	355,81 €/a ) <sup>39</sup>	2.600 € ) <sup>40</sup>	91,65 €/a ) <sup>41</sup>	1072 kWh/kWp*a ) <sup>42</sup>

Für die angesetzten Werte wird die geforderte Mindestverzinsung von 3 % leicht übertrffen. (vgl. Tabelle 15)

**Tabelle 15** Ergebnisse des positiven Szenarios für das PV-Gründach.

Interner Zinsfuß (IRR)	4,3 %
Kapitalwert	2.142 €

Unter zuversichtlich gewählten Rahmenbedingungen lässt sich beim PV-Gründach damit eine rentable Nutzung der Dachfläche erreichen.

---

<sup>39</sup> Niedrigere Pflegekosten, entnommen aus der Beispielrechnung der TU-Darmstadt, die allerdings für eine weit größere Dachfläche angesetzt wurden. [45]

<sup>40</sup> Förderung (bspw. durch Kommune) der Dachbegrünung mit 20 €/m<sup>2</sup>.

<sup>41</sup> Der wirtschaftliche Nutzen der Dachbegrünung wurde um 50 % erhöht. Dies könnte z.B. durch vollständig entfallende Niederschlagswassergebühren erreicht werden.

<sup>42</sup> 4 % Jahresmehrertrag durch Kühlleistung. Ergebnis der Studie von der Firma ZinCo. [94]

#### 7.4.6 Finanzierung der Dachbegrünung durch die Erträge der PV-Anlage

Da sich bei der Nutzung der Dachfläche mit dem PV-Gründach nur unter sehr zuversichtlichen Rahmenbedingungen ein wirtschaftliches Ergebnis erzielen lässt, sollen im Folgenden die Kosten und Erlöse der Dachbegrünung und PV-Anlage separat betrachtet werden. Die getrennte Betrachtung stützt sich auf das Verursachungsprinzip aus der Betriebswirtschaftslehre, nachdem im Allgemeinen nur jene Kosten einem Kalkulationsobjekt zugerechnet werden dürfen, welches diese auch tatsächlich verursacht hat. [100] Da vor allem der hohe Pflegeaufwand und die Investitionsauszahlung für die Begrünung zu dem negativen Betriebsergebnis des PV-Gründaches führt, soll mit einer getrennten Betrachtung evaluiert werden, dass die PV-Anlage einen positiven Beitrag zur Finanzierung der Dachbegrünung beitragen kann. Dabei werden der PV-Anlage nur die Investitionsauszahlungen für die höhere Aufständerung zugerechnet. (vgl. Tabelle 18) Die Kosten für die Pflegekosten der Dachbegrünung werden vollständig auf die Begrünung umgelegt. (vgl. 3.2.3) Die Synergieeffekte durch die Verwendung der Begrünung als Ballastierung und die leicht höheren PV-Mehrerträge führen zu einem marginal besseren Betriebsergebnis als bei dem PV-Kiesdach. (vgl. Tabelle 16)

**Tabelle 16** Betriebsergebnis der PV-Anlage des PV-Gründaches bei separater Betrachtung.

Interner Zinsfuß (IRR)	9,5 %
Stromgestehungskosten (LCOE)	0,084 €/ kWh
Kapitalwert	10.322 €
Anfangs-Eigenkapital (incl. MwSt.)	15.411 €

Bei dieser Betrachtungsweise liefert die PV-Anlage einen positiven Deckungsbeitrag zur Finanzierung der Dachbegrünung. Der erzielte Kapitalwert (10.322 €) reicht dabei aus um die Investitionsauszahlung der Begrünung im Laufe der Nutzungsdauer vollständig zu decken (6.961,5 €) und darüber hinaus zur Finanzierung des Pflegeaufwands der Begrünung beizutragen.

## 7.5 Evaluation

Die Investitionsrechnung zeigt wie die Wirtschaftlichkeit des PV-Gründaches im Vergleich zu den anderen Dachnutzungsarten einzuordnen ist. Es lässt sich zwar ein besseres Betriebsergebnis erzielen als bei der Extensiv- und Intensivbegrünung, eine rentable Nutzung der Dachfläche wird dennoch nicht erreicht. Gegenüber einer konventionellen PV-Anlage (KW: 8.882 €), befindet sich das PV-Gründach (KW: -13.005 €) deutlich in der Verlustzone.

Mit der Kritischen-Werte-Rechnung wurden als entscheidende Werte hauptsächlich die Pflegekosten und Investitionsausgaben der Begrünung identifiziert. Das untersuchte PV-Gründach ist nicht wirtschaftlich, weil sich unter den zugrunde gelegten Rahmenbedingungen die Kosten der Dachbegrünung weit stärker auf die Rentabilität der Dachnutzung auswirken, als deren Erlöse. Kommunale Förderung und die Entwicklung eines Mähroboters der ZHAW stellen dabei gute Ansatzpunkte dar, dass Betriebsergebnis entscheidend zu verbessern. Dies bestätigt sich durch das optimistische Szenario in dem sich mit zuversichtlich angenommenen Investitions- und Pflegeaufwand ein leichter Gewinn (KW: 2.142 €) erzielen ließ.

Die getrennte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von PV-Anlage und Begrünung des PV-Gründaches ergab, dass die erzielten Erlöse der PV-Anlage die Investitionsausgaben der Begrünung decken und dabei sogar noch einem positiven Beitrag zu den Pflegekosten liefern können.

## 8 Nutzwertanalyse – PV-Gründach im Vergleich mit anderen Formen der Dachnutzung

Abschließend soll die Evaluation des PV-Gründaches anhand eines Vergleiches mit den thematisierten Dachnutzungsarten erfolgen. Dabei wurde eine Nutzwertanalyse angewendet, eine Methode zur „Investitionsalternativenauswahl“.<sup>[114]</sup> Mit diesem pragmatischen Verfahren können die Handlungsalternativen anhand mehrerer Zielkriterien bewertet und nach der jeweiligen Präferenzen des Entscheidungsträgers geordnet werden. Vorteil der Methode ist, dass auch nicht monetär quantifizierbare bzw. weiche Kriterien berücksichtigt werden können. Kritisch ist hingegen die stark subjektive Bewertung der Zielkriterien und deren jeweilige Gewichtung anzusehen. Dies gilt auch für die folgende Nutzwertanalyse, die daher eher als subjektive Bewertung des Autors auf Basis der in der Arbeit präsentierten Erkenntnisse zu verstehen ist. Das Ergebnis

könnte bei den diversen Entscheidungsträgern mit unterschiedlichen Präferenzen und Gewichtungen möglicherweise anders ausfallen.

Als Zielkriterien wurden Wirtschaftlichkeit, Klimaanpassung, Klimaschutz und der zusätzliche Nutzen festgelegt. Diese sollen dabei möglichst sämtliche Hauptbeweggründe, weswegen Dachbegrünung und Photovoltaik in der Praxis umgesetzt werden, abdecken. Alle Kriterien werden dabei, für eine höhere Objektivität gleich stark gewichtet. Für jedes Kriterium werden Plus- oder Negativpunkte vergeben, je nachdem ob eine positive oder negative Relation zwischen Investitionsobjekt und betrachteten Kriterium besteht. Um eine klare Abstufung zu ermöglichen gibt es pro Kategorie vier erreichbare Punkte, die je nachdem wie stark sich die jeweilige Investitionsentscheidung auf das Kriterium auswirkt, in unterschiedlicher Höhe vergeben werden. Abschließend wird die Summe gebildet, wobei bei einer vergleichsweise höheren Zahl das jeweilige Investitionsobjekt als vorteilhafter zu bewerten ist.

In der Investitionsrechnung ergab sich für das PV-Gründach keine rentable Nutzung der Dachfläche. Nur unter sehr optimistischen Rahmenbedingungen konnte im Szenario ein Gewinn erzielt werden. Dies lässt sich vor allem auf das negative Betriebsergebnis der extensiven Begrünung zurückführen. Die intensive Begrünung wird anhand des hohen Investitions- und Pflegeaufwands am unwirtschaftlichsten eingeschätzt.

Durch WasserRetention, Verdunstungsleistung und Dämmwirkung eignen sich Dachbegrünungen als Maßnahme zur *Klimaanpassung*, die intensive Begrünung dabei etwas besser als die extensive.

Auch zum *Klimaschutz* trägt eine Dachbegrünung indirekt über die Dämmwirkung eingespartes CO<sub>2</sub> und der CO<sub>2</sub>-Bindung durch Photosynthese bei. Im Vergleich zu einer PV-Anlage sind die Auswirkungen aber gering. [4]

Mit dem *zusätzlichen Nutzen* wurden weitere Vorteile wie die Erhöhung der Biodiversität, die unmittelbare Steigerung der Umgebungsqualität<sup>43</sup> und Urban Farming in die Bewertung mit einbezogen.

In der Nutzwertanalyse (vgl. Tabelle 17) erweist sich das PV-Gründach, durch die doppelte Flächenausnutzung als die vorteilhafteste Dachnutzung, weswegen die Investitionsentscheidung zugunsten der Kombination ausfällt.

---

<sup>43</sup> U. a. Kleinklima-Verbesserung, Feinstaub-Bindung, Ästhetik

**Tabelle 17** Nutzwertanalyse für die verschiedenen Dachnutzungsarten.

	PV– Gründach	PV– Anlage	Intensive Begrünung	Extensive Begrünung	Gewichtung
Wirtschaftlichkeit	-1	4	-4	-2	1
Klimaanpassung	3	0	4	3	1
Klimaschutz	4	4	1	1	1
zusätzlicher Nutzen	3	0	4	3	1
<b>Summe</b>	<b>9</b>	<b>8</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	
<b>Rang</b>	I	II	III	III	-

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Flachdächer liegen wieder stärker im Trend und können auf vielfältige Weise genutzt werden. Mit guten Rahmenbedingungen für die Realisierung von PV oder Dachbegrünung bieten diese dabei auch ein hohes ökologisches Potential.

Bei der herkömmlichen Umsetzung der Kombination aus Photovoltaik und Dachbegrünung werden Systemlösungen mit einer speziellen Gründach-Unterkonstruktion verwendet. Die PV-Anlage wird mit einer an der Dränage befestigten Aufständerung und der Substratverlegung unter den Modulen vollständig in den Begrünungsaufbau integriert.

Für Dächer mit einer geringen statischen Tragekapazität bietet sich eine Kombination aus Leichtbegrünung und aerodynamischen Modulen an. Alternativen Ansätze werden aktuell in Forschungsprojekten untersucht und könnten eine gute Ergänzung zu der herkömmlichen Umsetzung darstellen. Die ZHAW erprobt die Verwendung bifazialer Module und silberlaubiger Pflanzen auf Vorteile und die BOKU Wien versucht mit dem PV-Dachgarten eine begehbarer Variante des PV-Gründaches auf den Markt zu bringen.

Die spezielle Bauweise und die Verwendung des Substrats als Ballastierung erfordern bei der herkömmlichen Variante eine sorgsame statische Planung und eine hohe Tragekapazität des Flachdaches. Für eine praxistaugliche Umsetzung müssen die spezifische Anforderung aus den beiden beteiligten Gewerken, Photovoltaik und Dachbegrünung, berücksichtigt werden. Begrünung und PV-Anlage müssen aufeinander abgestimmt werden, insbesondere um PV-Ertragsverluste durch von Pflanzen geworfenen Schatten zu vermeiden. Während der Nutzung muss dafür zudem eine regelmäßige Pflege der Begrünung und ein sorgsames Monitoring der PV-Anlage erfolgen. Durch die nur eingeschränkt beeinflussbare Bestandsentwicklung der Vegetation scheinen Verschattungsverluste bzw. ein zusätzlicher Pflegeaufwand trotz sachgemäßer Umsetzung nicht vollständig ausgeschlossen werden zu können. Wie stark sich Verschattungen bei üppigem und hohem Bewuchs, aber auch bei einzelnen in die Höhe gewachsenen Halmen auf die PV-Erträge auswirkt, sollte deswegen noch Gegenstand praktischer Untersuchungen sein.

Durch die Installation der PV-Anlage über einer Begrünung ergeben sich keine negativen Auswirkungen auf Flora und Fauna der Begrünung. Studien in welchen die Biodiversität eines PV-Gründaches untersucht wurde, verzeichneten im feuchten und schattigen Klima der PV-Anlage sogar eine höhere Pflanzenvielfalt, als in den sonnenexponierten Bereichen des Gründaches. Ähnliches ergab sich bei Untersuchungen der Käferfauna, die in dem Bereich der PV-

Anlage ebenfalls höher ausfiel. Für die Biodiversität ergibt sich durch die Kombination ein Synergieeffekt, auch wenn dabei nicht die Artenvielfalt einer intensiven Begrünung erreicht werden kann. Überträgt man diese Erkenntnis auf die gesamte ökologische Qualität der Begrünung, ist im Vergleich zu einer herkömmlichen extensiven Dachbegrünung zumindest keine Minderung zu erwarten. Trotz Abstimmung der Begrünung auf die PV-Anlage durch die spezielle Pflanzenwahl lassen sich damit dieselben ökologischen Vorteile wie beispielsweise Schadstoffbindung, verbessertes Umgebungsklima und Dämmwirkung erwarten. Dies sollte aber noch durch eine genauere Untersuchung validiert werden.

Bei sachgemäßer Umsetzung muss bei einem PV-Gründach demnach weder auf spezifische PV-Erträge noch auf die ökologische Qualität einer Extensivbegrünung zwingend verzichtet werden. Die Dachfläche kann dabei grundsätzlich vollständig doppelt ausgenutzt werden. Durch die Gründach-Aufständerung wird eine Begrünung auch unterhalb der Modulreihen ermöglicht und damit auf dem Dach flächendeckend realisiert. Der Abstand zwischen den Modulreihen eines PV-Gründaches wird hauptsächlich durch Vermeidung von Eigenverschattungsverlusten und einer notwendigen Gründachpflege zwischen den Modulreihen bestimmt. Bei Süd-Ausrichtung lässt sich derselbe Flächennutzungsgrad erreichen, der bei aerodynamischen Systemen realisiert wird. Für eine Ost-West-Ausrichtung ergibt sich durch den für die Pflege vorgesehenen Abstand allerdings eine geringere realisierbare Anlagenleistung. Bei einer konventionellen PV-Anlage werden die Modulreihen bei Ost-West-Ausrichtung nahezu ohne Abstand montiert. Für ein PV-Gründach müsste eine Umsetzung mit gleicher Flächenausnutzung erst anhand einer Versuchsanlage auf deren Praxistauglichkeit bzgl. des Pflegeaufwandes und den Auswirkungen auf die Begrünung geprüft werden.

Der oft aufgeführte Kühlungseffekt, bei dem die Verdunstungskühlung der Begrünung den Wirkungsgrad der PV-Anlage erhöht, kann anhand der wissenschaftlichen Publikationen nur begrenzt nachgewiesen werden. Tendenziell erscheint sich ein leichter Synergieeffekt zu ergeben, der aber nur zu geringfügig höheren PV-Erträgen führt. Wirtschaftlich wirken sich die leichten Mehrerträge dabei nur marginal aus. Mit einer Nutzung der Albedo silberlaubiger Pflanzen verfolgt die ZHAW in deren Pilotprojekt einen neuen Ansatz, die PV-Erträge durch eine Dachbegrünung zu steigern und damit auch einen betriebswirtschaftlich relevanten Synergieeffekt zu nutzen.

In der durchgeführten Investitionsrechnung erzielte das PV-Gründach einen deutlichen Verlust, weshalb keine rentable Nutzung der Dachfläche erreicht

werden konnte. Treiber des negativen Betriebsergebnisses war hauptsächlich die Dachbegrünung. Der wirtschaftliche Nutzen der Dachbegrünung konnte unter den zugrunde gelegten Rahmenbedingungen die Kosten für deren Pflege und Anschaffung nicht decken. Nur unter optimistischen, wenn auch noch möglichen, Rahmenbedingungen ließ sich bei dem PV-Gründach eine etwas höhere Rentabilität als die geforderte Mindestverzinsung (3 %) erreichen. Dies ist vor allem auf die zusätzlich einkalkulierte kommunale Förderung der Dachbegrünung und den geringer angesetzten Pflegeaufwand zurückzuführen mit denen ein PV-Gründach mittelfristig auch wirtschaftlich gestaltet werden könnte.

Bei separater Betrachtung und verursachergerechten Kostenumlegung ist die PV-Anlage eines PV-Gründaches allerdings rentabel. In dem Beispielszenario konnten die Erlöse der PV-Anlage die Investitionsausgaben der Begrünung decken und darüber hinaus einen zur Finanzierung des Pflegeaufwandes beitragen.

Insgesamt greift die rein betriebswirtschaftliche Betrachtungsweise allerdings zu kurz und müsste durch eine volkswirtschaftliche Untersuchung ergänzt werden, in der auch der gesellschaftliche Nutzen monetär quantifiziert mit einfließt.

Bei der durchgeführten Nutzwertanalyse wurden Wirtschaftlichkeit Klimaschutz, Klimaanpassung und zusätzlicher Nutzen mit gleicher Gewichtung in die Bewertung mit einbezogen. Das PV-Gründach erwies sich dabei im Vergleich zu einer herkömmlichen Intensiv- und Extensivbegrünung und einer konventionellen PV-Anlage als die vorteilhafteste Investitionsalternative. Durch die doppelte Flächenausnutzung lassen sich dem PV-Gründach sowohl die Vorteile einer PV-Anlage als auch die einer extensiven Begrünung zurechnen. Mit nachhaltig produziertem Strom trägt das PV-Gründach zum Klimaschutz und mit Verdunstungskühlung, WasserRetention und Dämmwirkung zur Klimaanpassung bei. Durch zusätzlichen Nutzen, wie der Förderung der Biodiversität, Verbesserung des Kleinklimas, Ästhetik und Bindung von Schadstoffen wird die Lebensqualität in den Städten und der unmittelbaren Umgebung erhöht.

Die Nutzwertanalyse ist nur als Einschätzung zu verstehen, zeigt jedoch, dass die Kombination anhand der betrachteten Kriterien als sinnvoll bewertet werden kann. Letztlich hat jeder Entscheidungsträger unterschiedliche Präferenzen und gewichtet die Kriterien für die Investitionsauswahl unterschiedlich hoch. Deshalb kann auch deren jeweilige Bewertung möglicherweise anders ausfallen und damit auch deren Beantwortung der Frage, ob es sich um eine

sinnvolle Kombination handelt. Es wurden zudem nicht alle möglichen Zielkriterien in die Nutzwertanalyse mit einbezogen, weswegen diese keine ganzheitliche Betrachtung darstellt.

Das PV-Gründach kann aber dennoch für alle Entscheidungsträger interessant sein. Kommunen könnten es in Bebauungspläne aufnehmen oder auf öffentlichen Gebäuden realisieren, um zur Erreichung ihrer Klimaschutzziele beizutragen und die Kommune gleichzeitig auf die Folgen des Klimawandels vorzubereiten. Private Bauherren erzielen bei der Dachnutzung zwar keine Rendite, können aber zusätzlich zur eigenen Stromversorgung die unmittelbare Umgebungsqualität verbessern. Für Firmen könnte die Kombination beispielsweise aus Imagegründen lukrativ sein mit der man zeigt, dass man sich besonders stark für das Klima engagiert.

Der Klimawandel lässt sich voraussichtlich nur noch auf ein gewisses Maß begrenzen. Um diesen einerseits auszubremsen, andererseits dessen negative Auswirkungen abzumildern müssen sowohl Maßnahmen für den Klimaschutz als auch gleichzeitig für die Klimaanpassung ergriffen werden. Das PV-Gründach bietet eine praxistaugliche Möglichkeit beides auf einer Fläche zu ermöglichen und damit einen Flächennutzungskonflikt zwischen Dachbegrünung und Photovoltaik bzw. zwischen Klimaanpassung und Klimaschutz zu vermeiden.

## 10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Verschiedene Nutzungsmöglichkeiten eines Flachdaches. Eigene Darstellung in Anlehnung an Stahr et. al [12] und Czycholl [13]. ....	6
Abbildung 2 Aufbau einer extensiven Begrünung [12].....	9
Abbildung 3 Aufbau einer Systemlösung mit Gründach–Unterkonstruktion am Beispiel des „SunRoot 15“ der Firma Optigrün. [28] .....	12
Abbildung 4 Beispiel eines PV–Gründaches, mit aero-dynamischen Modulen und Leichtbegrünung. [26].....	13
Abbildung 5 Versuchsanlage mit bifazialen Modulen und silberlaubigen Pflanzen in Winterthur (Schweiz). [32] .....	14
Abbildung 6 Hauptversuchsanlage (l.) und Rendering (r.) des Forschungsprojektes PV–Dachgarten der Universität für Bodenkultur BOKU Wien. [37] .....	15
Abbildung 7 Beispiele für die Verschattung der Module durch die Vegetation bei unsachgemäßer Ausführung eines PV–Gründaches. [26,44,48]	18
Abbildung 8 Aspekte zur Vermeidung von Verschattungs-verlusten bei einem PV–Gründach [7,41,44,45,48,50] .....	20
Abbildung 9 Beispiele für die sachgemäße Umsetzung eines PV–Gründaches. [27,29,41,51].....	22
Abbildung 10 Einflussfaktoren auf die Biodiversität von Gründächern. [7,69,70].....	27
Abbildung 11 Vegetation auf dem PV–Gründach der Strahlenklinik Freiburg, die sich anhand ihrer unterschiedlichen Entwicklung in verschiedene Zonen einteilen lässt. (l.) Ausgetrocknete Begrünung auf dem Bereich des Daches ohne PV–Anlage (r.). [71] .....	29
Abbildung 12 Mögliche Variation des Substrataufbaus zur Erhöhung der Biodiversität in Abhängigkeit der gewählten Höhe für die Aufständерung [45].....	30
Abbildung 13 Grafische Darstellung des Modulabstands (d), des Sonnenwinkels (ys) und der Modulbreite (b) [1] .....	32
Abbildung 14 Ost–West–Ausrichtung der Systemlösung von Optigrün und empfohlener Umsetzung. [28].....	34
Abbildung 15 Ursachen für die Kühlwirkung einer Dachbegrünung [84].....	36

Abbildung 16 Harte und weiche Faktoren bei ökonomischer Betrachtung einer Dachbegrünung. Eigene Darstellung in Anlehnung an Pfosser et. al. [59].....	42
Abbildung 17 Verlegung eines PV-Gründaches am Beispiel der Systemlösung „SunRoot15“ der Firma Optigrün. [28] .....	XI
Abbildung 18 Beispielhafter Aufbau eines PV-Gründaches (Ost-West-Ausrichtung) mit aerodynamischen Modulen und Vegetationsmatten. Umgesetzt durch den Solarteur CentroPlan. [26].....	XII
Abbildung 19 Nicht fachgerecht umgesetzte Ost-West-Anlage. Der nicht ausreichend gewählte Reihenabstand sorgt zudem für eine erschwerete Pflege. [51].....	XII
Abbildung 20 Systemlösung der Firma ZinCo mit Absturzsicherung und Substratgewicht im trockenen und wassergesättigten Zustand. [29]	XIII
Abbildung 21 Installierte Gitternetze vor Modulen mit geringer Aufständерungshöhe zur Vermeidung von Verschattungsverlusten. [27].....	XIII
Abbildung 22 Vermeidung von Verschattung der Module durch Pflanzenwuchs. Lösungsvorschlag von Dr. Stephan Brenneisen, der ZHAW. [44] .....	XIV
Abbildung 23 Unterschiedlich gestaltete Begrünung auf dem Dach der Messehalle in Basel. [44] .....	XIV

## 11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Verschiedene PV-Montagesysteme für Flachdächer Flachdach. Eigene Darstellung in Anlehnung an Zebe [15] und Spaiker et. al [16] .....	7
Tabelle 2 Möglichkeiten ein Gründach auszuführen. Eigene Darstellung in Anlehnung an die Webseiten der Firmen ZinCo und Optigrün sowie Kolb [7].....	10
Tabelle 3 Studien zu den Auswirkungen einer PV-Anlage auf die Biodiversität der Dachbegrünung.....	28
Tabelle 4 Flächennutzungsgrade der Systeme von S:Flex und Optigrün bei Süd–Ausrichtung und deren Installations–parameter.....	33
Tabelle 5 Flächennutzungsgrade der Systeme von S:Flex und Optigrün bei Ost–West–Ausrichtung und deren Installations–parameter.....	35
Tabelle 6 Studien zum Thema Ertragssteigerung von PV–Anlagen durch Kühlleistung der Dachbegrünung. In Anlehnung an Lamnatou und Chemisana. [86] Aufsteigend nach Mehrertrag sortiert.....	37
Tabelle 7 Studien zum Thema Ertragssteigerung von PV–Anlagen durch die Albedo einer Dachbegrünung. In Anlehnung an Lamnatou und Chemisana. [86].....	40
Tabelle 8 Grundlegende Daten des Gebäudes und der PV–Anlage. ....	44
Tabelle 9 Kostengegenüberstellung der Investitionsobjekte in Anlehnung an [59].....	44
Tabelle 10 Rahmenbedingungen für die PV–Anlagen der Investitionsrechnung.	48
Tabelle 11 Wirtschaftlicher Nutzen der Dachbegrünung für das Berechnungsbeispiel (vgl. Kapitel 7.1).....	49
Tabelle 12 Ergebnisse der Investitionsrechnung für das PV–Gründach und PV–Kiesdach.....	50
Tabelle 13 Kritische–Werte–Rechnung für das PV–Gründach. ....	50
Tabelle 14 Parametervariation für das optimistische Szenario des PV–Gründaches. ....	52
Tabelle 15 Ergebnisse des positiven Szenarios für das PV–Gründach.....	52
Tabelle 16 Betriebsergebnis der PV–Anlage des PV–Gründaches bei separater Betrachtung. ....	53

Tabelle 17 Nutzwertanalyse für die verschiedenen Dach-nutzungsarten.....	56
Tabelle 18 Kostenaufteilung für das PV-Gründach nach dem Verursacherprinzip.....	XV

## 12 Literaturverzeichnis

- [1] K. Mertens, Photovoltaik: Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis, 3rd ed., Carl Hanser, München, 2015.
- [2] Das Europäische Parlaments und Rat der europäischen Union, Richtlinie 2009/28/EG des europäischen Parlaments und Rates, 2009.
- [3] Bundesverband Erneuerbare Energie e.V., BEE-Analyse: Die verpflichtende EU-Vorgabe, 2020 den gesamten Bruttoendenergieverbrauch zu 18 Prozent mit Erneuerbaren Energien abzudecken, ist nur noch mit großer Anstrengung erreichbar., Berlin, 2017.
- [4] H. Wirth, Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland, Freiburg, 2018.
- [5] Die Bundesregierung Deutschland, Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel. vom Bundeskabinett am 17. Dezember 2008 beschlossen, 2008.
- [6] Die Bundesregierung Deutschland, Aktionsplan Anpassung der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. vom Bundeskabinett am 31. August 2011 beschlossen, 2011.
- [7] W. Kolb, Dachbegrünung: Planung, Ausführung, Pflege, Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 2016.
- [8] R. Haimann, Die Kehrseite des Zwangs zur Dachbegrünung, WeltN24 GmbH.
- [9] M. Thoma, Fächennutzungskonflikt PV und Gründach. Umweltschutzaamt Freiburg, Telefoninterview: 16.10.2017, Freiburg.
- [10] J. Wilhelm, PV–Gründach in der Stadtplanung. Stadt Kaiserslautern, persönliches Gespräch: 10.10.2017.
- [11] U. Hestermann, L. Rongen, Baukonstruktionslehre 2, 34th ed., Springer Vieweg, Wiesbaden, 2008.
- [12] M. Stahr, D. Hinz, Sanierung und Ausbau von Dächern, Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2011.
- [13] H. Czycholl, Das Flachdach hat seinen schlechten Ruf zu unrecht, WeltN24GmbH, 2015.
- [14] S. Ibold, Schäden am Flachdach. erkennen–bewerten–instand setzen, 1st ed., Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH & Co. KG, Köln, 2012.

- [15] H. Zebe, Photovoltaik auf dem Flachdach: Planungskriterien für die funktionsichere Installation, DBZ Deutsche BauZeitschrift 2016 (07).
- [16] R. Spaiker, M. Oswald, M. Zöller, G. Liebert, Solaranlagen auf Flachdächern im Gebäudebestand: Abschlussbericht, Aachen, 2016.
- [17] R. Henseleit, Solaraufbauten auf Flachdächern: Planung und Ausführung von PV-Anlagen auf Flachdächern, DBZ Deutsche BauZeitschrift 01/2013 96–98.
- [18] C. Nähr, 3 Tipps, wie sich Ost-West-Anlagen rechnen, available at <https://www.sma-sunny.com/3-tipps-wie-sich-ost-west-anlagen-rechnen/> (accessed on January 23, 2018).
- [19] V. Wesselak, S. Voswinckel, Photovoltaik: Wie Sonne zu Strom wird, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2012.
- [20] K. Sedlbauer, E. Schunck, R. Barthel, H. M. Künzel, Flachdach Atlas. Werkstoffe, Konstruktionen, Nutzungen, 1st ed., Institut für internationale Architektur-Dokumentation, München, 2010.
- [21] Ungenutztes Potential von Industriedächern, UmweltDialog (2014) 1–3.
- [22] J. Brück, Photovoltaikanlagen professionell planen und installieren, 1st ed., Franzis Verlag, Haar, 2008.
- [23] H. Zebe, Gründach und Solar – Energetisch sinnvolle Ergänzung, Bundes-BauBlatt (03) (2010).
- [24] I. Rauschen, Dachbegrünung und Photovoltaik aus Sicht eines Anlagenerichters. Telefoninterview: 15.12.2017, Freiburg.
- [25] M. Fleischmann, H. Seifert, Flachdachmontage: Markt und technische Fällen. –Firmenpräsentation IBC Solar AG.
- [26] I. Rauschen, Dachbegrünung und Photovoltaik aus Sicht eines Anlagenerichters – Firmenpräsentation CentroPlan, Berlin, 2017.
- [27] A. Dreisiebner, Photovoltaik und Dachbegrünung. Firma solarspar, persönliches Gespräch: 20.12.2017, Winterthur, 2017.
- [28] Optigrün international AG, Systemlösung Solargründach: Das Dach mehrfach nutzen und profitieren! – Firmenschrift, 2017.
- [29] ZinCo GmbH, Planungshilfe Solarenergie und Dachbegrünung: – Firmenschrift, 2013.
- [30] Paul Bauder GmbH & Co. KG, Bauder Unterkonstruktion für Gründächer: – Firmenschrift.

- [31] C. J. Muth, Schweizer Forscher testen optimale Nutzung von Gründächern in Kombination mit Photovoltaik, *pv magazine Deutschland* 2017.
- [32] T. Baumann, D. Schär, F. Carigiet, A. Dreisiebner, F. Baumgartner, Performance Analysis of PV Green Roof Systems. 5 pages / 32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition; 1618–1622 (2016).
- [33] H. Nussbaumer, T. Baumann, F. Carigiet, N. Keller, D. Schär, F. Baumgartner, New opportunities of grid integration by the use of bifacial modules.
- [34] F. Baumgartner, Performance Analysis of PV green roof Systems, 2016.
- [35] T. Baumann, Wir bringen Strom vom grünen Dach! 20. Mitgliederversammlung der SFG, Winterthur, 2015.
- [36] solarspar, «Ideale Partner» Grün und Photovoltaik auf dem Dach der Residenz Eichgut: Aktuelles Forschungsprojekt in Winterthur –Firmenschrift, available at <https://www.solarspar.ch/aktuell/pilotprojekt-eichgut/> (accessed on October 27, 2017).
- [37] I. Zluwa, Projektvorstellung PV-Dachgarten. Eine Möglichkeit zur intensiven Dachbegrünung und Dachnutzung in Kombination mit Energieerzeugung durch Photovoltaik, in: 14. Internationales FBB-Gründachsymposium 2016: – Vortragsreihe zu aktuellen Themen der Dachbegrünung –, Ditzingen, 25.02.2016.
- [38] Universität für Bodenkultur BOKU Wien, PV-Dachgarten Planungshandbuch, Wien, 2015.
- [39] M. Fleischmann, Wie viel Last ist tragbar?, *pv magazine Deutschland* (85308) (2017) 105–109.
- [40] Optigrün international AG, Planungsunterlagen. Dachbegrünung Fassadenbegrünung – Firmenschrift, 2017.
- [41] O. Böse, Pflanzenauswahl für ein Solargründach. Firma Optigrün, E-Mail: 09.11.2017, Freiburg.
- [42] Wippen, PV und Dachbegrünung. Firma Zinco, Telefoninterview: 05.01.2018, Freiburg.
- [43] L. Kalinowski, Grüner Strom vom grünen Dach! Firma ZinCo, Präsentation: 06.11.2017, Freiburg.
- [44] S. Brenneisen, Symbiose PV mit Gründach–Fluch oder Segen? VESE–Tagung 2015, 2014.
- [45] S. Brenneisen, Naturschutz auf Dachbegrünungen in Verbindung mit Solaranlagen.

- [46] T.K. B. Schmocker, Stromversorgungs-Konzept Stand Planung Wärmever-  
sorgung Photovoltaikanlagen. 6. Erlenmatt Ost–Gespräch, Basel, 2015.
- [47] A. Appenzeller, 25 jährige Betriebserfahrung mit PV Anlagen. PV Update  
Swissolar 21. Oktober 2015, Basel, 2015.
- [48] TECTON Management AG, Pflegeintensive Dächer mit PV–Anlagen. VESE  
Versammlung 18.04.2015, Winterthur, 2015.
- [49] S. Brenneisen, Pflanzenentwicklung und Biodiversität auf Solar-  
Gründächern, in: 13. Internationales FBB–Gründachsymposium 2015: –  
Vortragsreihe zu aktuellen Themen der Dachbegrünung –, Ditzingen,  
2015, pp. 18–20.
- [50] T. Probst, Begrünung unter einem PV–Gründach. Firma UFA Samen, Tele-  
foninterview: 01.11.2017, Freiburg.
- [51] S. Knapp, S. Ruttensperger, Strom vom Gründach. Weltgründachkongress  
2017, –Firmenpräsentation Paul Bauder GmbH & Co. KG, 2017.
- [52] OHS Otto Hauenstein Samen AG, Produktfinder, available at  
<http://www.hauenstein.ch/de/rasen-begruenung/produktfinder/> (ac-  
cessed on December 1, 2017).
- [53] UFA Samen, UFA–Kräuter Solardach CH – Dachkräutermischung, available  
at [https://www.ufasamen.ch/files/ufa-product-document/Kraeuter-  
Solardach-CH.pdf](https://www.ufasamen.ch/files/ufa-product-document/Kraeuter-Solardach-CH.pdf) (accessed on December 1, 2017).
- [54] I. Röpcke, Die Mischung macht, pv magazine Deutschland (2012).
- [55] J. Lichtblau, Extensive Gründächer brauchen Pflege, gplus – Die Gärtner-  
Fachzeitschrift (169) (2003).
- [56] O. Boese, Kostenabschätzung für eine Dachbegrünung und ein PV–  
Gründach für ein EFH mit 130 m<sup>2</sup> Dachfläche. Firma Optigrün, E-Mail:  
21.12.2017.
- [57] IBC Solar Ag, Montageanleitung IBC AeroFix. Version 17.01 Stand:  
27.06.2017, 2017.
- [58] C. Lichner, Photovoltaik–Dachanlagen auch ohne Ballast möglich, pv ma-  
gazine Deutschland (2017).
- [59] N. Pfoser, N. Jenner, J. Henrich, J. Heusinger, S. Weber, Gebäude Begrü-  
nung Energie. Potenziale und Wechselwirkungen. Abschlussbericht, Darm-  
stadt, 2013.

- [60] H. Venzmer (Ed.), Europäischer Sanierungskalender 2009: Holzschutz, Bautenschutz, Bauwerkserhaltung, Bauwerksinstandsetzung, Restaurierung und Denkmalpflege, 1st ed., Beuth, Berlin, 2008.
- [61] S. Herfort und S. Tschukowa, Die Wahrheit zur CO<sub>2</sub>-Bindung durch begrünte Dächer. Aktuelle Untersuchungsergebnisse und Diskussion, in: 11. Internationales FBB-Gründachsymposium 2013: – Vortragsreihe zu aktuellen Themen der Dachbegrünung –, Ditzingen, 2013.
- [62] J. Frahm, G. Minke, J. Gomez, Schadstoffminderung auf dem Dach mit Moosen, in: 7. Internationales FBB-Gründachsymposium 2009: – Vortragsreihe zu aktuellen Themen der Dachbegrünung –, Ditzingen, 2009.
- [63] O. Gorbachevskaya, Feinstaubbindung in Abhängigkeit der Dachbegrünungsform: IASP, Humboldt-Universität zu Berlin, in: 11. Internationales FBB-Gründachsymposium 2013: – Vortragsreihe zu aktuellen Themen der Dachbegrünung –, Ditzingen, 2013, pp. 24–30.
- [64] J. Georgi, D. Dimitriou, The contribution of urban green spaces to the improvement of environment in cities: Case study of Chania, Greece, Building and Environment 45 (2010).
- [65] G. Lösken, G. Wilhelm, Abflussbeiwerte von Dachbegrünungen – Definitionen, Messmethoden, Anwendungsbereiche, in: 14. Internationales FBB-Gründachsymposium 2016: – Vortragsreihe zu aktuellen Themen der Dachbegrünung –, Ditzingen, 25.02.2016.
- [66] J. Franzaring, M. Anemou, L.C. Hernandez Cubero, I. Katsarov, Z. Kauf, A. Mohiley, Untersuchungen zur Kühlwirkung und der Niederschlagsretention der extensiven Dachbegrünungsvegetation, Karlsruhe, 2014.
- [67] M. Jauch, Aus Grau wird Grün – Optimierung der Evapotranspirations- und Kühlleistung extensiver Dachbegrünungen durch gezielte Nutzung von Grauwasser, 2014.
- [68] B. Streit, Was ist Biodiversität? Erforschung, Schutz und Wert biologischer Vielfalt, Beck, München, 2007.
- [69] M. Köhler, K. Ksiazek, Untersuchungen zur Biodiversität begrünter Dächer, in: 12. Internationales FBB-Gründachsymposium 2014: – Vortragsreihe zu aktuellen Themen der Dachbegrünung –, Ditzingen, 2014, pp. 26–30.
- [70] D. Ramseier, J. Jansa, T. Probst, Substratstärke beeinflusst die Artenvielfalt: Extensive Dachbegrünung: Ergebnisse aus Versuchen, gplus – Die Gärtner-Fachzeitschrift 19–21.

- [71] T. Obergfell, Agrovoltaik – Landwirtschaft unter Photovoltaikanlagen. Eine Machbarkeitsstudie für den Standort Deutschland, Freiburg, 2012.
- [72] C. Nash, J. Clough, D. Gedge, R. Lindsay, D. Newport, M.A. Ciupala, S. Connop, Initial insights on the biodiversity potential of biosolar roofs. A London Olympic Park green roof case study, Israel Journal of Ecology & Evolution 62 (1–2) (2015) 74–87.
- [73] Bousselot J, Slabe T, Klett J, Koski R., Photovoltaic Array Influences the Growth of Green Roof Plants, The Journal of Living Architecture (JLIV) 4 (3) (2017) 9–18.
- [74] T. J. Slabe, J. Bousselot, A photovoltaic array on a green roof in Denver, Colorado, improves resilience of green roof plants by expanding habitat heterogeneity, 2017.
- [75] M. Köhler, W. Wiartalla, R. Feige, Interaction between PV-Systems and extensive green roofs, in: Fifth Annual Greening Rooftops for Sustainable Communities, Minneapolis, 2007.
- [76] S. Brenneisen, A. Szallies, M. Mioduszewska, Potential zur Förderung der Biodiversität durch Solar-Gründächer. Erfassung der Käferfauna, Werkhof Scheidegg in Winterthur und Vergleichsdächer in Basel Zwischenbericht 2014, 2015.
- [77] baulinks, Dachbegrünung: Anteil an Intensivbegrünung stieg auf fast 17%, available at <https://www.baulinks.de/webplugin/2011/1653.php4>.
- [78] Solarwerk Karlsruhe, Was und wie groß ist der Verschattungswinkel bei aufgeständerten Solaranlagen?, available at <http://solarwerk-karlsruhe.de/was-und-wie-gross-ist-der-verschattungswinkel-bei-aufgestaenderten-solaranlagen/> (accessed on February 6, 2018).
- [79] S:FLEX GmbH, LEICHTmount 2.1 S / EW. Aerodynamisches Flachdachsystem für Süd- und Ost/ West-Ausrichtung – Firmenschrift, 2016.
- [80] Optgrün international AG, Optgrün-Systemlösung "SolarGründach". Variante: Sun Root 15° – Firmenschrift, 2016.
- [81] Ost-West-Anlagen bringen 40 Prozent mehr Ertrag, photovoltaik (2014).
- [82] K. Liu, B. Baskaran, Thermal performance of green roofs through field evaluation, Kanada, 2003.
- [83] B. Reichmann, C. Steffan, M. Schmidt, M. Köhler, I. Hübler, Konzepte der Regenwasserbewirtschaftung – Gebäudebegrünung, Gebäudekühlung – Leitfaden für Planung, Bau, Betrieb und Wartung, Berlin, 2010.

- [84] M. Schmidt, Energy saving strategies through the greening of buildings. The example of the Institute of Physics of the Humboldt–University in Berlin–Adlershof, in: RIO 3 – World Climate & Energy Event, Rio de Janeiro, 2003, pp. 481–486.
- [85] D. Röhrlich, Ressourcen knapper als gedacht, available at [http://www.deutschlandfunk.de/suesswasser-studie-ressourcen-knapper-als-gedacht.676.de.html?dram:article\\_id=338815](http://www.deutschlandfunk.de/suesswasser-studie-ressourcen-knapper-als-gedacht.676.de.html?dram:article_id=338815) (accessed on November 9, 2017).
- [86] C. Lamnatou, D. Chemisana, A critical analysis of factors affecting photovoltaic–green roof performance, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 43 (2015) 264–280.
- [87] D. E. Helow, J. Drake, L. Margolis, Testing the Potential Synergy of Green Roof–Integrated Photovoltaics at the University of Toronto Green Roof Innovation Testing (GRIT) Laboratory, in: 32nd RCI International Convention and Trade Show, Houston, 2017.
- [88] L. Witmer, Quantification of the passive cooling of photovoltaics unsing a green roof, Pennsylvania, 2010.
- [89] A. Nagengast, C. Hendrickson, H. Scott Matthews, Variations in photovoltaic performance due to climate and low-slope roof choice, *Energy and Buildings* 64 (2013) 493–502.
- [90] M. Alshayeb, J.D. Chang, Photovoltaic Energy Variations Due to Roofing Choice, *Procedia Engineering* 145 (2016) 1104–1109.
- [91] H. Ogaili, D.J. Sailor, Measuring the Effect of Vegetated Roofs on the Performance of Photovoltaic Panels in a Combined System, *Journal of Solar Energy Engineering* 138 (2016) 061009–1–061009–8.
- [92] G. Osma, G. Ordóñez, E. Hernández, L. Quintero, M. Torres, The impact of height installation on the performance of PV panels integrated into a green roof in tropical conditions, in: *Energy quest* 2016, pp. 147–156.
- [93] M. J. R. Perez, N. T. Wight, V. M. Fthenakis, C. Ho, Green-roof integrated PV Canopies—an empirical study and teaching tool for low income students in the South Bronx.
- [94] D. Schenk, Dachbegrünung und Photovoltaikanlage – Kombination ökologischer Bauweisen mit nachweisbaren Synergien, in: 9. Internationales FBBGründachsymposium 2011: – Vortragsreihe zu aktuellen Themen der Dachbegrünung –, Ditzingen, 2011.

- [95] S. C. M. Hui, S. C. Chan, Integration of green roof and solar photovoltaic systems, in: Joint Symposium 2011: Integrated Building Design in the New Era of Sustainability, Hong Kong, 22.11.2011.
- [96] A. Lorenz-Meyer, Gründe Dächer zahlen sich aus. Energie Pflanzen auf dem Dach bringen Städtern ein besseres Klima. Und sie können auch ökonomische Vorteile für die Bauherren haben., in: Luzerner Zeitung.
- [97] C. Lamnatou, D. Chemisana, Photovoltaic–green roofs: A life cycle assessment approach with emphasis on warm months of Mediterranean climate, Journal of Cleaner Production 72 (2014) 57–75.
- [98] D. Chemisana, C. Lamnatou, Photovoltaic–green roofs: An experimental evaluation of system performance, Applied Energy 119 (2014) 246–256.
- [99] ZinCo GmbH, Dachbegrünung 4.0. Systeme für die Dachnutzung der Zukunft –Firmenschrift, Nürtingen, 2017.
- [100] J. P.Thommen, A.-K. Achleitner, D.U. Gilbert, D. Hachmeister, G. Kaiser, Allgemeine Betriebswirtschaftslehre, 8th ed., Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2017.
- [101] A. Wolfgang, Leitfaden Dachbegrünung für Kommunen: –Nutzen, Fördermöglichkeiten, Praxisbeispiele–, Nürtingen, 2011.
- [102] Fachbereich Umwelt und Stadtgrün Hannover, Dachbegrünung und Photovoltaik: Eine Handreichung der Landeshauptstadt Hannover, Hannover, 2015.
- [103] Gemeinderat der Stadt Freiburg i.Br., Stadtentwässerungssatzung, 2009.
- [104] Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB), 2011.
- [105] Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, Leitfaden zur Eigenversorgung. Juli 2016, Bonn, 2016.
- [106] Deutsches Institut für Bautechnik Berlin, Zuordnung der Windzonen nach Verwaltungsgrenzen, available at [https://www.caparol.de/uploads/pics/caparol\\_import/caparol\\_de/pdf/54744/Windzonentabelle\\_2008.pdf](https://www.caparol.de/uploads/pics/caparol_import/caparol_de/pdf/54744/Windzonentabelle_2008.pdf) (accessed on January 12, 2018).
- [107] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., Stromspiegel für Deutschland 2017, available at <https://www.die->

- stromsparinitiative.de/stromkosten/stromverbrauch-pro-haushalt/5-personen-haushalt/index.html (accessed on January 12, 2018).
- [108] EuPD Research Sustainable Management GmbH, Bundesverband Solarwirtschaft e.V., Photovoltaik-Preismonitor Deutschland. German PV ModulePriceMonitor2016. Ergebnisse 1. Quartal, Bonn, 2016.
- [109] M. Hermanus, Flachdach Kosten pro m<sup>2</sup> schon vor dem Bau abschätzen, available at <http://www.hausjournal.net/flachdach-kosten-pro-m2> (accessed on January 12, 2018).
- [110] Beko Käuferportal GmbH, Aktuelle Photovoltaik-Kosten, available at <https://www.solaranlage.de/preise-kosten/photovoltaik-kosten> (accessed on January 12, 2018).
- [111] TST Photovoltaik Shop, Delta-Stütze 15°, available at <https://www.photovoltaik-shop.com/delta-stutze-15.html> (accessed on January 12, 2018).
- [112] A. Körblein, Wirtschaftlichkeit von Solarstrom. Excel-Tool, Umweltinstitut München e. V., München, 2017.
- [113] G. Wöhe, U. Döring, G. Brösel, Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre, 22nd ed., Vahlen, München, 2005.
- [114] K. Poggensee, Investitionsrechnung. Grundlagen – Aufgaben – Lösungen, 3rd ed., Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2015.
- [115] T. Obermeier, R. Gasper, Investitionsrechnung und Unternehmensbewertung, Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, München, 2008.
- [116] IKB Deutsche Industriebank AG, IKB Festgeld Einfach, planbar, zuverlässig, available at [https://www.ikb.de/privatkunden/sparen/festgeld?cid=gaw-&wt\\_mc=SEA.Brand-Festgeld.ikb\\_festgeldanlage.%2Bikb%20%2Bfestgeldanlage.b.na&cid=gaw-](https://www.ikb.de/privatkunden/sparen/festgeld?cid=gaw-&wt_mc=SEA.Brand-Festgeld.ikb_festgeldanlage.%2Bikb%20%2Bfestgeldanlage.b.na&cid=gaw-) (accessed on January 17, 2018).
- [117] Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 21. Juli 2014 (BGBl. I S. 1066), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 17. Juli 2017 (BGBl. I S. 2532) geändert worden ist.
- [118] Bundesministerium der Finanzen, AfA-Tabelle für die allgemein verwendbaren Anlagegüter (AfA-Tabelle "AV"), 2000.
- [119] Solarenergie-Förderverein Deutschland e.V., Bundesweite Aufnahme der monatlichen Stromertragsdaten von PV-Anlagen, available at

[https://www.pv-ertraege.de/cgi-bin/pvdaten/src/region\\_uebersichten.pl/gr](https://www.pv-ertraege.de/cgi-bin/pvdaten/src/region_uebersichten.pl/gr) [https://www.pv-ertraege.de/cgi-bin/pvdaten/src/region\\_uebersichten.pl/gr](https://www.pv-ertraege.de/cgi-bin/pvdaten/src/region_uebersichten.pl/gr) (accessed on January 12, 2018).

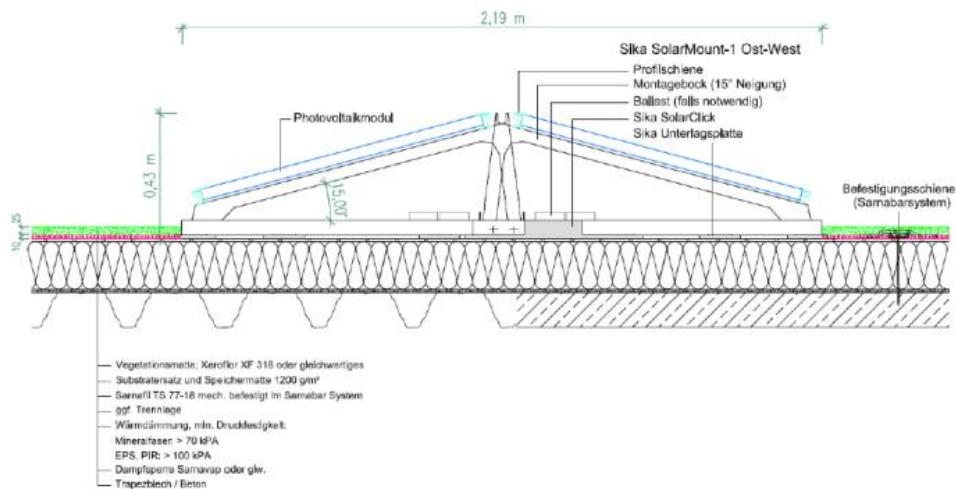
- [120] HTW-Berlin, Unabhängigkeitsrechner, available at <http://pvspeicher.hwt-berlin.de/unabhaengigkeitsrechner/> (accessed on January 12, 2018).
- [121] Baden-Württemberg, Ministerium für Finanzen und Wirtschaft, Der aktuelle Tipp. Steuerliche Regelung im Zusammenhang mit dem Erwerb und Betrieb einer Photovoltaikanlage im privaten Haushalt, 2013.
- [122] Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, EEG-Fördersätze für PV-Anlagen. Anzulegende Werte für Solaranlagen November 2017 bis Januar 2018, available at [https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen\\_Institutionen/ErneuerbareEnergien/ZahlenDatenInformationen/EEG\\_Registerdaten/EEG\\_Registerdaten\\_node.html#doc732052bodyText8](https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/ErneuerbareEnergien/ZahlenDatenInformationen/EEG_Registerdaten/EEG_Registerdaten_node.html#doc732052bodyText8) (accessed on January 12, 2018).
- [123] Triami Media BV Utrecht in Zusammenarbeit mit HomeFinance, Historische Inflation Deutschland – VPI Inflation, available at <http://de.inflation.eu/inflationsraten/deutschland/historische-inflation/vpi-inflation-deutschland.aspx> (accessed on January 12, 2018).
- [124] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., BDEW-Strompreisanalyse Mai 2017. Haushalte und Industrie, available at [http://www.lidew.de/internet.nsf/id/8CFC3276B7FF3A9CC1257DDA0049A5D0/\\$file/BDEW-Strompreisanalyse%20no\\_halbjahrlich\\_Ba\\_online\\_31052017.pdf](http://www.lidew.de/internet.nsf/id/8CFC3276B7FF3A9CC1257DDA0049A5D0/$file/BDEW-Strompreisanalyse%20no_halbjahrlich_Ba_online_31052017.pdf) (accessed on January 12, 2018).

## 13 Anhang

**Abbildung 17** Verlegung eines PV–Gründaches am Beispiel der Systemlösung „SunRoot15“ der Firma Optigrün. [28]



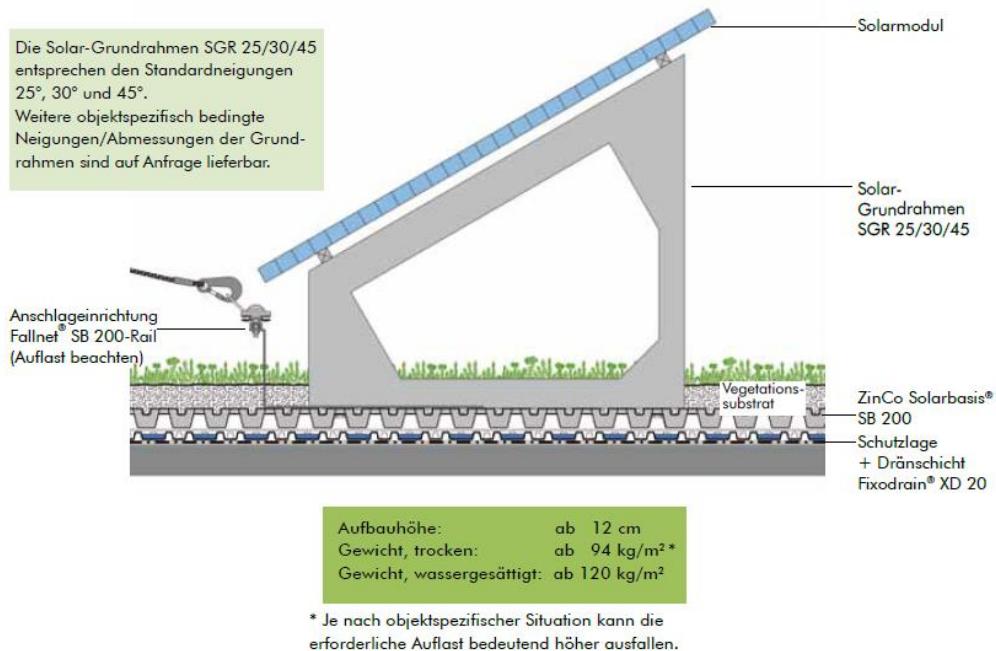
**Abbildung 18** Beispielhafter Aufbau eines PV-Gründaches (Ost-West-Ausrichtung) mit aerodynamischen Modulen und Vegetationsmatten. Umgesetzt durch den Solarteur CentroPlan. [26]



**Abbildung 19** Nicht fachgerecht umgesetzte Ost-West-Anlage. Der nicht ausreichend gewählte Reihenabstand sorgt zudem für eine erschwerte Pflege. [51]



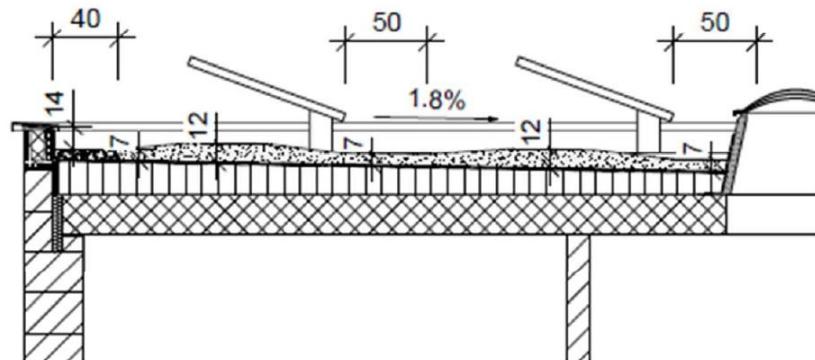
**Abbildung 20** Systemlösung der Firma ZinCo mit Absturzsicherung und Substratgewicht im trockenen und wassergesättigten Zustand. [29]



**Abbildung 21** Installierte Gitternetze vor Modulen mit geringer Aufständerungshöhe zur Vermeidung von Verschattungsverlusten. [27]



**Abbildung 22** Vermeidung von Verschattung der Module durch Pflanzenwuchs. Lösungsvorschlag von Dr. Stephan Brenneisen, der ZHAW. [44]



Schnitt C

Zürcher Hochschule  
für Angewandte Wissenschaften  
**zhaw** Life Sciences und  
Facility Management  
IUNR Institut für Umwelt und  
Natürliche Ressourcen

**Abbildung 23** Unterschiedlich gestaltete Begrünung auf dem Dach der Messehalle in Basel. [44]



**Tabelle 18** Kostenaufteilung für das PV-Gründach nach dem Verursacherprinzip.

	Extensive Begrünung	PV-Anlage
<b>Investitionsauszahlung (netto)</b>		
extensiv (10 cm)/intensiv (30cm)/Kiesdeckung (5cm)	45 €/m <sup>2</sup>	-
Kosten der Unterkonstruktion für das PV-Gründach (inkl. Montage)	-	16,62 €/m <sup>2</sup> <sup>44</sup>
PV-Anlage, 9 kWp (Aufständerung 15° ) (inkl. Montage)	-	83,00 €/m <sup>2</sup>
<b>Summe Investitionsauszahlung/m<sup>2</sup></b>	45 €/m <sup>2</sup>	99,62 €/m <sup>2</sup>
<b>gesamte Investitionsauszahlung</b>	5.850,00 €	12.950,60 €
<b>Betriebskosten (netto)</b>		
Pflege Dachbegrünung	5,5 €/m <sup>2</sup> *a	-
Pflegeintervalle	2xjährlich	1xjährlich
Betriebskosten PV-Anlage (1,5 % von den Investitionskosten)	-	1,542 €/m <sup>2</sup> *a
<b>Summe Betriebskosten/m<sup>2</sup></b>	5,5 €/m <sup>2</sup> *a	1,542 €/m <sup>2</sup> *a
<b>gesamte Betriebskosten der Investition</b>	715 €/a	200,46 €/a

---

<sup>44</sup> Für das Investitionsobjekt gilt: PV-Gründach („SunRoot 15“): ca. 75 €/m<sup>2</sup> (netto), ext. Gründach („Spardach L1“) ca. 45€/m<sup>2</sup> (netto). [56]