

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SOLARE ENERGIESYSTEME, ISE
BUNDESVERBAND GEBÄUDEGRÜN

GUTACHTEN ZUR SOLARGRÜNDACH-PFLICHT IN HAMBURG

gemäß §16 HmbKliSchG



GUTACHTEN ZUR SOLARGRÜNDACH-PFLICHT IN HAMBURG gemäß §16 HmbKliSchG

Bericht erstellt im Auftrag der
Freie und Hansestadt Hamburg
Behörde für Umwelt, Klima, Energie und Agrarwirtschaft
Neuenfelder Str. 19
21109 Hamburg

Fachliche Begleitung:
Stephan Schmale, Dr. Hanna Bornholdt, Sylwia Röseler

Autor:innen:
Gerhard Stryi-Hipp¹
Dr. Annette Steingrube¹
Dr. Gunter Mann²
Felix Mollenhauer²
Evelyn Trachsel²

¹ Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Heidenhofstr. 2
79110 Freiburg

² Bundesverband GebäudeGrün e.V.
Albrechtstr. 13
10117 Berlin

Mai 2024

Titelbild: Solargründach in Hamburg, Quelle: Gunter Mann/BuGG

Zusammenfassung / Executive Summary

Die Freie und Hansestadt Hamburg hat sich zum Ziel gesetzt, bis zum Jahr 2045 Netto-CO₂-neutral zu werden. Eine wichtige Klimaschutz-Maßnahme zur Erreichung dieses Ziels ist die umfangreiche Erschließung der lokalen Solarenergiepotenziale. Deshalb wurde zum Januar 2023 eine Photovoltaik-Pflicht auf Neubauten eingeführt, die im Januar 2024 auf Bestandsgebäude bei Dachsanierung ausgeweitet wurde. Gleichzeitig treibt Hamburg die Klimaanpassung voran, um die Wirkungen des unvermeidbaren Klimawandels zu begrenzen. Hierzu gehört die Begrünung von Flachdächern zur Vermeidung von Überschwemmungen, zum Erhalt der Biodiversität und zur Verbesserung des Mikroklimas. Die Begrünung von Dächern wird aktuell durch Zuschüsse gefördert.

Sowohl Klimaschutz als auch Klimaanpassung sind notwendig, um die Lebensqualität in den Städten zu erhalten, deshalb müssen Lösungen gesucht werden, die beide Ziele zu vereinen. Solar Gründächer, bei denen PV-Anlagen auf extensiv begrünten Dachflächen installiert werden, dienen dem Klimaschutz- und der Klimaanpassung. Deshalb wurde Ende 2023 das Hamburger Klimaschutzgesetz novelliert und die PV-Pflicht auf Flachdächern ab Januar 2027 zu einer Solar Gründach-Pflicht ausgeweitet.

Solar Gründächer wurden schon vielfach demonstriert und sind problemlos umsetzbar, wenn in Bezug auf die PV-Anlage auf einen ausreichenden Reihenabstand zur Pflege des Gründachs und eine ausreichende Belichtung der Pflanzen sowie in Bezug auf das Gründach auf eine extensive Bepflanzung zur Vermeidung der Verschattung der PV-Module durch hochwachsende Pflanzen geachtet wird.

Die Solar Gründach-Pflicht steht wie die PV-Pflicht unter dem Vorbehalt der wirtschaftlichen Vertretbarkeit. Eine PV-Anlage ist dann wirtschaftlich, wenn die Einnahmen aus der Einspeisevergütung für den Solarstrom und die eingesparten Strombezugskosten bei Eigenverbrauch des Solarstroms die Investitions- und Betriebskosten übersteigen. Gründächer dagegen generieren keine Einnahmen. Allerdings führen sie zu Kosteneinsparungen, z.B. durch Reduktion der Niederschlagswassergebühren. Zwar wurden Kostenvorteile von Gründächern verschiedentlich untersucht, eine umfassende Bewertung, unter welchen Bedingungen Gründächer und Solar Gründächer in der Praxis wirtschaftlich vertretbar sind, stand bislang jedoch nicht zur Verfügung.

Vor diesem Hintergrund wurden in diesem Gutachten umfassende Wirtschaftlichkeitsberechnungen für Solar Gründächer, PV-Dächer (ohne Gründach) und Gründächer im Vergleich zu Schwarzdächern (frei bewittertes Foliendach) erarbeitet und geprüft, ob diese im Sinne des Hamburger Klimaschutzgesetzes wirtschaftlich vertretbar sind, d.h. eine Amortisationszeit von maximal 20 Jahren aufweisen. Als Grundlage der Berechnungen werden in Kapitel 2 die technischen Ausführungen der verschiedenen Dachnutzungen vorgestellt und erläutert und abschließend Empfehlungen für die Umsetzung von Solar Gründächern gegeben.

Die Wirtschaftlichkeitsberechnungen werden in Kapitel 3 vorgestellt. Nach Definition der im Klimaschutzgesetz geforderten wirtschaftlichen Vertretbarkeit und Vorstellung der Berechnungsmethodik (Kapitel 3.1 bis 3.3), werden in Kapitel 3.4 Fallgruppen mit

unterschiedlichen Flachdachgrößen eingeführt (50, 100, 200, 500, 2.000 und 5.000 m² Bruttodachfläche), um die Dachnutzungen vergleichbar zu machen. Auf diesen Dachflächen werden dann jeweils die installierbaren Solargründächer mit PV-Modulen in Südausrichtung, PV-Dächer (ohne Begrünung) sowie die Gründächer mit den Schwarzdächern verglichen. Bei den PV-Anlagen werden dabei zwei Geschäftsmodelle unterschieden. Bei der Volleinspeisung wird der Solarstrom vollständig ins Netz der allgemeinen Versorgung eingespeist und nach EEG vergütet. Im zweiten Fall wird davon ausgegangen, dass 25 % des Solarstroms direkt bei der Erzeugung im Gebäude verbraucht wird und damit höhere Strombezugspreise einspart. Die restlichen 75 % des Solarstroms werden ins Stromnetz eingespeist und vergütet.

In Kapitel 3.5 werden die typischen Investitions- und Betriebskosten für PV-Anlagen, für Gründächer, für Solargründächer und für Schwarzdächer für die Fallgruppen vorgestellt, die durch Literaturrecherchen, Anbieterbefragungen und Mittelwertbildung ermittelt wurden. Dabei ist festzustellen, dass sich sowohl die Preise für PV-Anlagen wie auch für Gründächer für eine bestimmte Dachgröße stark unterscheiden können, auch weil sie von den konkreten Randbedingungen abhängen, wie z.B. der Zugänglichkeit zum Dach. Die Preise können sich auch im Zeitverlauf deutlich ändern, da die Märkte volatil sind, beispielsweise sind die PV-Modulpreise von 2023 auf 2024 deutlich gesunken. Dementsprechend können im konkreten Fall die Preise und Kosten vom ermittelten Referenzwert deutlich abweichen. Es wird allerdings davon ausgegangen, dass die generellen Ergebnisse bezüglich der Wirtschaftlichkeit belastbar sind und Bestand haben, solange sich die Rahmenbedingungen nicht grundsätzlich ändern. Durch Änderungen bei Preisen und Kosten verschieben sich jedoch die Grenzwerte zwischen Wirtschaftlichkeit und Nicht-Wirtschaftlichkeit, was berücksichtigt werden sollte.

In Kapitel 3.6 werden zwölf Nutzenarten von Gründächern vorgestellt und soweit möglich deren Kostenvorteile quantifiziert. Diese wurden aus wissenschaftlichen Veröffentlichungen entnommen und teilweise durch eigene Berechnungen für den Standort Hamburg ergänzt. Im Rahmen des Gutachtens konnten allerdings nicht alle Nutzen belastbar ökonomisch bewertet werden, beispielsweise war dies bezüglich der Biodiversität von Gründächern und der Minderung von lokalen Hitzeinseln durch Verbesserung des Mikroklimas nicht möglich. Unterschieden wurden die betriebswirtschaftlichen Kostenvorteile für die Gebäudeeigentümer:innen von den volkswirtschaftlichen Kostenvorteilen für die Gesellschaft. Von acht quantifizierten Nutzen wurde nur die Luftreinigung als gesellschaftlicher Nutzen eingestuft, die allerdings nur 3 % der Betriebskostenvorteile ausmacht. Da sie somit nur einen marginalen Einfluss auf die Berechnungsergebnisse hat, wurden bei den Wirtschaftlichkeitsrechnungen alle quantifizierbaren Vorteile berücksichtigt, unabhängig davon, ob ihre Nutzen betriebs- oder volkswirtschaftlicher Art sind.

Die größten Kosteneinsparungen bei den Investitionskosten resultieren aus der Verlängerung der Lebensdauer der Dachabdichtung von 25 auf 40 Jahre sowie den Einsparungen aufgrund des vermiedenen Baus von Mulden-Rigolen zur Entwässerung auf dem Gelände, die mehr als die 50 % der Kosten für den Gründachaufbau ausmachen können. Bei den jährlichen Kostenvorteilen hat die Immobilienwertsteigerung den größten Anteil. Hinzu kommen vermiedene Abwassergebühren und ein erhöhter Solarstromertrag.

Die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsrechnungen werden in Kapitel 3.7 für alle Fallarten, Geschäftsmodelle und Dacharten im Vergleich vorgestellt. Demnach sind die PV-Anlagen für alle Dachgrößen wirtschaftlich im Sinne der Definition der Umsetzungsverordnung

des Klimaschutzgesetz, die eine Amortisationszeit von maximal 20 Jahren festlegt. Kleine Gründächer haben hohe flächenspezifische Kosten, die mit der Größe deutlich abnehmen. Solargründächer auf 150 m² großen Dächern haben Amortisationszeiten von 17 Jahren bei Volleinspeisung und 13 Jahren bei 25 % Eigenverbrauch und sind somit wirtschaftlich vertretbar. Größere Dächer haben deutlich niedrigere Amortisationszeiten und sind sogar wirtschaftlich attraktiver als PV-Dächer (ohne Begrünung). Solargründächer auf 100 m² großen Dächern sind dagegen nur wirtschaftlich bei 25 % Eigenverbrauch und bei 50 m² Dächern ist die Wirtschaftlichkeit gar nicht gegeben. Die Empfehlung lautet deshalb, bei Solargründächern auf Dachflächen bis zu 150 m² die Installation durch Fördermittel zu stimulieren, da diese Dächer mangels wirtschaftlicher Vertretbarkeit von der Pflicht ausgenommen sind. In Abbildung 1 sind die Amortisationszeiten für Solargründächer und PV-Dächer für alle Dachgrößen aufgetragen.

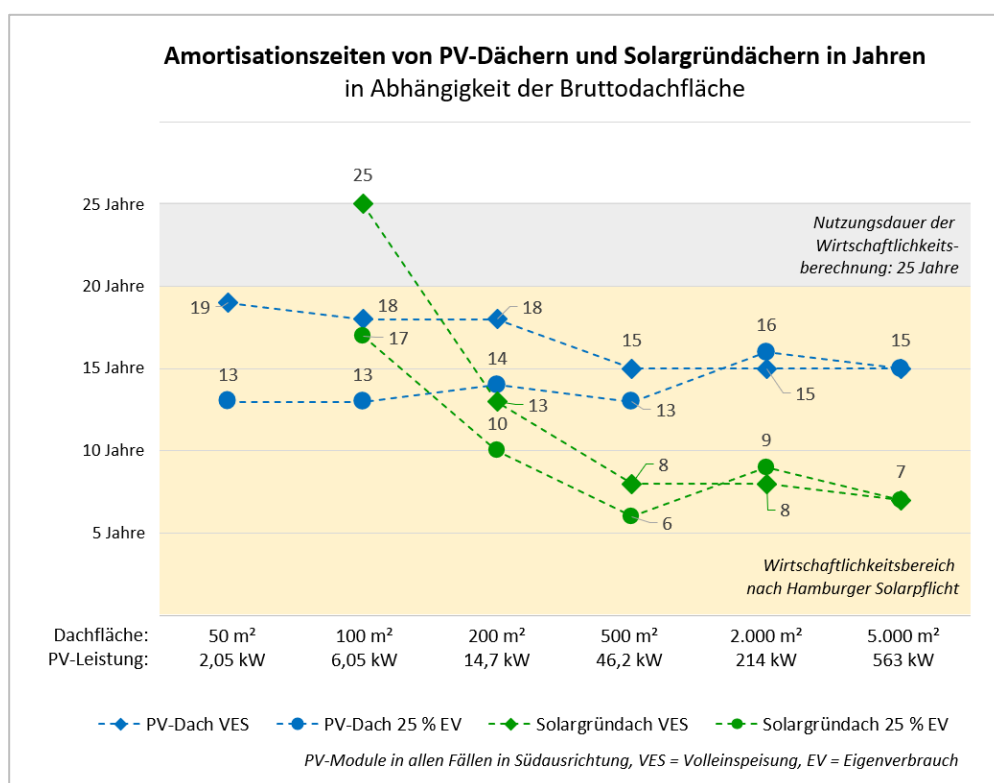


Abbildung 1: Amortisationszeiten von PV-Dächern und Solargründächern in Abhängigkeit der Dachgröße für Volleinspeisung (VES) und 25 % Eigenverbrauch (EV)

Abschließend werden in Kapitel 4 die Fälle vorgestellt, in denen die wirtschaftliche Vertretbarkeit nicht gegeben ist, sowie mögliche Maßnahmen, um diese zu vermeiden. Hierzu gehört die Fortsetzung der aktuellen Investitionsförderung für Gründächer für die Dachgrößen, bei denen Solargründächer wirtschaftlich nicht vertretbar sind, d.h. für Dachgrößen kleiner 150 m².

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass Solargründächer ab 150 m² Dachfläche wirtschaftlich sind und bei größeren Dächern sogar wirtschaftlich attraktiver sind als PV-Dächer (ohne Begrünung), da die Kosteneinsparungen die Mehrkosten überkompensieren. Damit ist auch zu erwarten, dass die Solargründach-Pflicht ab dem Jahr 2027 greift und vornehmlich die kleineren Dächer eine Befreiung von der Pflicht beantragen werden.

Executive summary

The Free and Hanseatic City of Hamburg has set itself the goal of becoming net CO₂-neutral by 2045. An important climate protection measure to achieve this goal is the extensive development of its local solar energy potential. For this reason, a photovoltaic obligation was introduced on new buildings in January 2023, which was extended to existing buildings for roof renovations in January 2024. At the same time, Hamburg is pushing ahead with climate adaptation in order to limit the effects of unavoidable climate change. This includes the greening of flat roofs to prevent flooding, preserve biodiversity and improve the microclimate. The greening of roofs is currently subsidised by the city.

Both climate protection and climate adaptation are necessary to maintain the quality of life in cities, which is why solutions must be sought that combine both objectives. Solar green roofs, in which PV systems are installed on extensively greened roof areas, serve climate protection and climate adaptation. For this reason, the Hamburg Climate Protection Act was amended at the end of 2023 and the PV obligation on flat roofs was extended to a solar green roof obligation from January 2027.

Solar green roofs have already been demonstrated many times and are easy to implement if, with regard to the PV system, sufficient row spacing for maintaining the green roof and sufficient exposure of the plants is ensured and, with regard to the green roof, extensive planting to avoid shading of the PV modules by tall-growing plants is ensured.

Like the PV obligation, the solar green roof obligation is subject to economic viability. A PV system is economically viable if the income from the feed-in tariff for the solar power and the electricity purchase costs saved when the solar power is consumed by the customer exceed the investment and operating costs. Green roofs, on the other hand, do not generate any income. However, they do lead to cost savings, e.g. through a reduction in rainwater charges. Although the cost benefits of green roofs have been analysed on various occasions, a comprehensive assessment of the conditions under which green roofs and solar green roofs are economically viable in practice has not yet been available.

Against this background, comprehensive economic feasibility calculations for solar green roofs, PV roofs (without green roof) and green roofs in comparison to black roofs (freely weathered foil roof) were developed in this report and it was examined whether these are economically justifiable in terms of the Hamburg Climate Protection Act, i.e. whether they have a maximum amortisation period of 20 years. As a basis for the calculations, Chapter 3 presents and explains the technical designs of the various roof uses and concludes with recommendations for the realisation of solar green roofs.

The profitability calculations are presented in Chapter 4. After defining the economic justifiability required by the Climate Protection Act and presenting the calculation methodology (Chapters 4.1 to 4.3), Chapter 4.4 introduces case groups with different flat roof sizes (50, 100, 200, 500, 2,000 and 5,000 m² gross roof area) in order to make the roof uses comparable. On these roof areas, the installable solar green roofs with south-facing PV modules, PV roofs (without greenery) and the green roofs are then compared with the black roofs. A distinction is made between two business models for PV systems. In the case of full feed-in, the solar power is fed completely into the general supply grid

and remunerated in accordance with the EEG. In the second case, it is assumed that 25 % of the solar power is consumed directly during generation in the building, thus saving higher electricity purchase prices. The remaining 75 % of the solar power is fed into the electricity grid and remunerated.

Chapter 3.5 presents the typical investment and operating costs for PV systems, green roofs, solar green roofs and black roofs for the case groups, which were determined through literature research, provider surveys and averaging. It should be noted that the prices for both PV systems and green roofs can vary greatly for a given roof size, partly because they depend on the specific boundary conditions, such as accessibility to the roof. Prices can also change significantly over time, as the markets are volatile; for example, PV module prices fell significantly from 2023 to 2024. Accordingly, prices and costs can deviate significantly from the calculated reference value in specific cases. However, it is assumed that the general results with regard to economic viability are reliable and will remain valid as long as the framework conditions do not fundamentally change. However, changes in prices and costs shift the threshold values between economic efficiency and non-economic efficiency, which should be taken into account.

Chapter 3.6 presents twelve types of benefits of green roofs and quantifies their cost advantages as far as possible. These were taken from scientific publications and in some cases supplemented by our own calculations for the Hamburg site. However, not all benefits could be reliably evaluated economically within the scope of the report; for example, this was not possible with regard to the biodiversity of green roofs and the reduction of the local heat island effect by improving the microclimate. A distinction was made between the economic cost benefits for building owners and the economic cost benefits for society. Of the eight quantified benefits, only air purification was categorised as a social benefit, although this only accounts for 3% of the operating cost benefits. As it therefore only has a marginal influence on the calculation results, all quantifiable benefits were taken into account in the economic efficiency calculations, regardless of whether their benefits are of a business or economic nature.

The greatest cost savings in terms of investment costs result from the extension of the service life of the roof waterproofing from 25 to 40 years and the savings due to the avoidance of the construction of trough trenches for drainage on the site, which can account for more than 50 % of the costs for the green roof structure. The increase in property value accounts for the largest share of the annual cost benefits. Added to this are avoided water charges and an increased solar power yield.

The results of the profitability calculations are presented in Chapter 3.7 for all case types, business models and roof types in comparison. According to this, the PV systems are economical for all roof sizes in terms of the definition of the implementation ordinance of the Climate Protection Act, which stipulates a maximum amortisation period of 20 years. Small green roofs have high area-specific costs, which decrease significantly with size. Solar green roofs on 150 m² roofs have amortisation periods of 17 years with full feed-in and 13 years with 25 % self-consumption of the solar electricity and are therefore economically justifiable. Larger roofs have significantly lower amortisation times and are even more economically attractive than PV roofs (without greening). Solar green roofs on 100 m² roofs, on the other hand, are only economically viable at 25 % self-consumption and are not economically viable at all on 50 m² roofs. The recommendation is therefore to stimulate the installation of solar green roofs on roof areas of up to 150 m² with

subsidies, as these roofs are exempt from the obligation due to a lack of economic viability. Figure 1 shows the amortisation times for solar green roofs and PV roofs for all roof sizes.

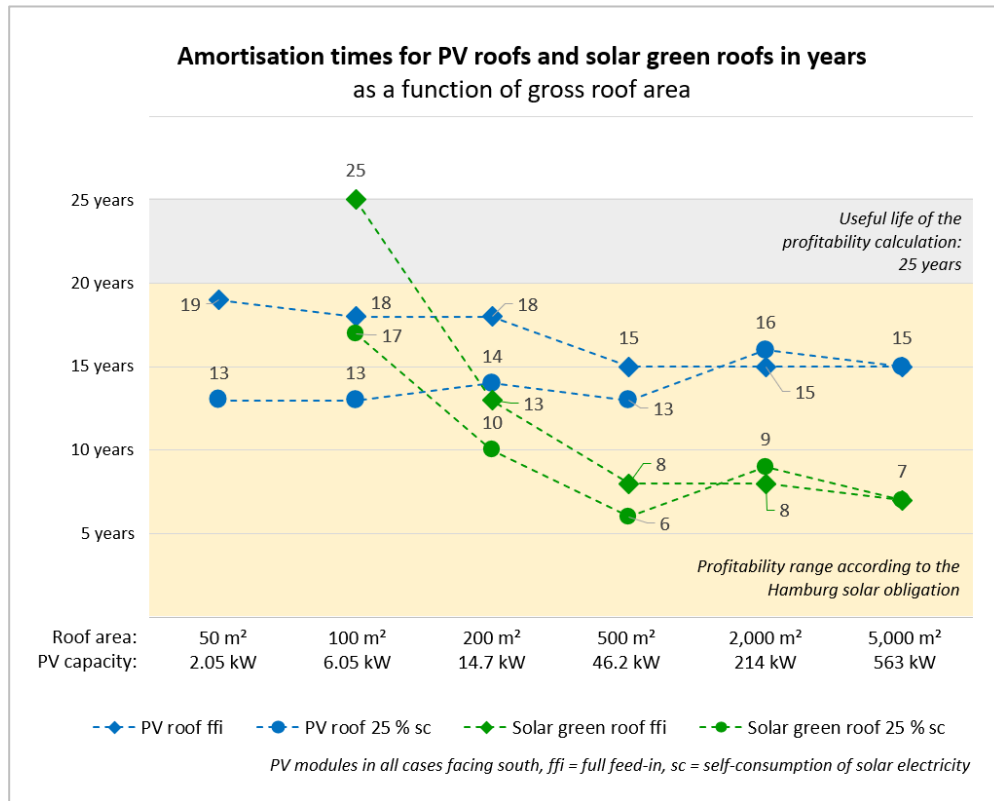


Figure 1: Amortisation times of PV roofs and solar green roofs as a function of roof size for full feed-in (ffi) and 25 % self-consumption (sc)

Finally, Chapter 4 presents the cases in which economic viability is not given and possible measures to avoid this. This includes the continuation of the current investment subsidy for green roofs for roof sizes where solar green roofs are not economically viable, i.e. for roof sizes smaller than 150 m².

To summarise, it can be stated that solar green roofs are economically viable from a roof area of 150 m² and are even more economically attractive than PV roofs (without greenery) for larger roofs, as the cost savings more than compensate for the additional costs. It is therefore also to be expected that the solar green roof obligation will take effect from 2027 and that primarily smaller roofs will apply for exemption from the obligation.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung / Executive
Summary

Zusammenfassung / Executive Summary.....	3
1 Auftrag und Zielsetzung.....	17
2 Dachbelegungsarten: Gründach und PV-Anlagen.....	19
2.1 Aufbauvarianten Gründächer.....	20
2.1.1 Gründachtaufbauten.....	20
2.1.2 Extensivbegrünung.....	23
2.1.3 Biodiversitätsgründach.....	23
2.1.4 Retentionsgründach.....	25
2.1.5 Solargründächer.....	26
2.1.6 Solargründächer in Kombination mit speziellen Gründächern.....	29
2.2 Installation von PV-Anlagen auf Flachdächern.....	31
2.2.1 Generelle Aufstellarten von PV-Anlagen auf Flachdächern.....	31
2.2.2 Installation von PV-Anlagen auf Gründächern.....	33
2.2.3 Basisdaten der im Gutachten berücksichtigten Solargründächer.....	36
2.3 Empfehlungen für die Umsetzung von Solargründächern.....	39
2.3.1 Instandhaltung und Wartung von Gründächern.....	39
2.3.2 Wartung von PV-Anlagen auf Gründächern.....	41
2.3.3 Grundsätze bei der Umsetzung von Solargründächern.....	41
3 Wirtschaftlichkeitsberechnungen.....	43
3.1 Grundsätzliche Bemerkungen zur Wirtschaftlichkeit.....	43
3.2 Definition der wirtschaftlichen Vertretbarkeit.....	44
3.2.1 Definition wirtschaftliche Vertretbarkeit für PV-Anlagen.....	44
3.2.2 Definition der wirtschaftlichen Vertretbarkeit von Gründächern und Solargründächern.....	45
3.2.3 Alternative Definition für die wirtschaftliche Vertretbarkeit von Solargründächern.....	46
3.3 Methodik der Wirtschaftlichkeitsberechnung.....	47
3.3.1 Berechnungsmethode und Zielsetzung der Wirtschaftlichkeitsrechnung.....	47
3.3.2 Angewandtes Verfahren und Software zur Wirtschaftlichkeitsrechnung.....	48
3.4 Fallgruppen der Wirtschaftlichkeitsberechnungen.....	48
3.4.1 PV-Anlagen mit Volleinspeisung des Solarstroms.....	49
3.4.2 PV-Anlagen mit Eigenverbrauchsanteil.....	49
3.4.3 Betrachtete Fallgruppen.....	50
3.5 Parameter der Wirtschaftlichkeitsberechnungen.....	52
3.5.1 Nutzungsdauer, Betrachtungszeitraum und Amortisationszeit.....	52
3.5.2 Kosten und sonstige Parameter Photovoltaik-Anlagen.....	53
3.5.3 Kostenrichtwerte Schwarzdach und begrüntes Dach.....	59
3.6 Nutzen und Kostenvorteile von Dachbegrünungen.....	64
3.6.1 Übersicht der ökonomischen Vorteile von Dachbegrünungen.....	64
3.6.2 Schutz der Dachabdichtung.....	65
3.6.3 Retention – Senkung der Kosten für Mulden-Rigolen-Versickerungen.....	66
3.6.4 Retention – Senkung der Niederschlagswassergebühr.....	68
3.6.5 Wärmedämmung des Gebäudes – Senkung der Heizkosten.....	69
3.6.6 Kühlwirkung im Gebäude: Senkung der Kühlkosten.....	70
3.6.7 Ertragssteigerung Photovoltaik.....	72

3.6.8	Steigerung Immobilienwert	73
3.6.9	Luftreinigungswirkung	75
3.6.10	Kühleffekte durch Verdunstung: Vermeidung von Hitzeinseln.....	76
3.6.11	Biodiversitätsfördernde Wirkung von Gründächern.....	79
3.6.12	Lärminderung durch Gründächer	82
3.6.13	Brandschutz durch Gründächer	83
3.7	Wirtschaftlichkeitsberechnungen	84
3.7.1	Steuerliche Aspekte der Wirtschaftlichkeitsberechnungen.....	84
3.7.2	Kostenübersicht der Wirtschaftlichkeitsberechnungen.....	86
3.7.3	Wirtschaftlichkeit Solargründach.....	92
3.7.4	Wirtschaftlichkeit Gründach	94
3.7.5	Wirtschaftlichkeit PV-Dach	96
3.7.6	Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Solargründach, Gründach und PV-Dach	97
4	Fälle, in denen die Pflichten aus wirtschaftlichen Gründen nicht greifen.	100
4.1	Grundlagen und Annahmen.....	100
4.2	Vorschläge zur Regelung der wirtschaftlichen Zumutbarkeit von Solargründächern	103
4.3	Verbesserung der Wirtschaftlichkeit von Gründächern	103
5	Anhang.....	105
5.1	Antworten auf die Fragen der Expertenanhörung.....	105
5.2	Dachflächen und PV-Nennleistungen	107
5.3	Förderung der Dachbegrünung in Hamburg	109
5.4	Detaillierergebnisse PV-Dach in Süd- und Ost-West-Ausrichtung	110
5.5	Gebäudekenndaten	112
6	Literaturverzeichnis.....	114

Abkürzungsverzeichnis

Zusammenfassung / Executive
Summary

BuGG	Bundesverband GebäudeGrün
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
ES	Einspeisung (von Solarstrom ins Stromnetz)
EW	Einwohner:in
FLL	Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V.
GD	Gründach
GEG	Gebäudeenergiegesetz
HmbKliSchG	Hamburgisches Klimaschutzgesetz
IRR	Internal rate of return
K	Kelvin
Kd	Kelvintage
k.A.	Keine Amortisation
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
kWh/a	Kilowattstunde pro Jahr
m ²	Quadratmeter
MaStR	Marktstammdatenregister
MJ	Megajoule (1 MJ = 0,2778 kWh)
MPP	Maximum power point (Regelung zum Betrieb der PV-Anlage im optimalen Betriebspunkt)
MsbG	Messstellenbetriebsgesetz
MW	Megawatt (1 MW = 1.000 KW)
PPA	Power purchase agreement (Stromlieferverträge zwischen Erzeu- ger:innen, die nicht Energieversorger sind, und Verbraucher:innen)
PV	Photovoltaik (Solarstromerzeugung)
PVUmsVO	Photovoltaikpflicht-Umsetzungsverordnung
SD	Schwarzdach
UStG	Umsatzsteuergesetz
VES	Volleinspeisung (von Solarstrom ins Stromnetz)
W/EW	Watt pro Einwohner:in
WR	Wechselrichter
FHH	Freie und Hansestadt Hamburg
ZVDH	Zentralverband des Deutschen Dachdeckerhandwerks

Begriffserklärungen

Zusammenfassung / Executive
Summary

- Flachdach: Gebäudedach mit einer Dachneigung zwischen 0° und 10° (auch wenn Dächer teilweise auch nur bis 3° Neigung als Flachdächer und Dächer zwischen 3° und 5° als flachgeneigte Dächer bezeichnet werden (z.B. DIN 68800-2)).
- Geneigtes Dach: Gebäudedach mit einer Dachneigung größer 10° (teilweise werden auch Dächer mit Neigungen größer 5° als geneigt bezeichnet (DIN 68800-2)). Andere Bezeichnungen: Schrägdach oder Steildach (mit unterschiedlichen Grenzwerten für die Neigungen).
- Schwarzdach: Mit Bitumen oder Folie abgedecktes Flachdach ohne Begrünung, mit oder ohne Kiesschüttung, auch „frei bewittertes Dach“.
- Gründach: Dach, das mit Substrat abgedeckt und bepflanzt ist.
- Solargründach: Gründach, auf dem eine PV-Anlage installiert ist. Statt einer PV-Anlage kann ersatzweise auch eine Solarthermieanlage zur Wärmeerzeugung installiert werden, aus Gründen der Vereinfachung wird in diesem Gutachten aber bei einem Solargründach standardmäßig von einer PV-Anlage ausgegangen.
- PV-Dach: nicht begrüntes Dach, auf dem eine PV-Anlage installiert ist.
- Retentionsdach: Flachdach, das ein besonders hohes Retentionsvermögen (Regenwasserhaltungsvermögen) durch einen speziellen Gründachaufbau aufweist.
- Biodiversitätsdach: Dach, das mit einer erhöhten Diversität von Pflanzen bepflanzt ist bzw. eine höhere Diversität ermöglicht, u.a. durch Einbau von Biodiversitätsbausteine (u.a. Nisthilfen).
- Substrathöhe bzw. -dicke: Höhe des Substrates ohne Drainageschicht (Siehe auch Hamburger-Gründachförderung)
- Durchwurzelbarer Raum: Sind im Gründachaufbau die Funktionsschichten, die intensiv durchwurzelt sind und betrifft die Vegetationstragschicht (Substrat) und die Drainageschicht (Siehe FLL-Dachbegrünungsrichtlinien und Hamburger-Gründachförderung)
- Höhe Gründachaufbau: Gesamthöhe des Gründachaufbaus ab Oberkante Dachabdichtung/Schuttlage bis Oberkante Substrat. Die Höhe des Gründachaufbaus umfasst bei der mehrschichtigen Bauweise Substrat und Drainageschicht.

Dieses Gutachten handelt von Flachdächern bis 10° Neigung, somit sind mit den Begriffen Schwarz-, Grün-, Solargrün- und PV-Dach immer Flachdächer gemeint, auch wenn diese Dacharten auch mit steileren Neigungen möglich sind.

Abbildung 1: Amortisationszeiten von PV-Dächern und Solargründächern in Abhängigkeit der Dachgröße für Volleinspeisung (VES) und 25 % Eigenverbrauch (EV)	5
Abbildung 2: Ausführungs- und Nutzungsarten von Flachdächern sowie Darstellung der beiden im Gutachten betrachteten Solagründach-Ausführungen	19
Abbildung 3: Mehrschichtiger Gründachaufbau mit einer Dränage aus Kunststoffelement (links) bzw. Schüttgut (rechts) (Quelle: BuGG)	21
Abbildung 4: Einschichtiger Gründachaufbau (Quelle: BuGG)	22
Abbildung 5: Schichtaufbau Flachdachbegrünung bei 5-10° Dachneigung (Quelle: BuGG)	22
Abbildung 6: Schichtaufbau Schrägdachbegrünung bei 10 – 45° Dachneigung (Quelle: BuGG)	23
Abbildung 7: Aufbau mehrschichtiges Biodiversitätsgründach (Quelle: BuGG)	24
Abbildung 8: Aufbau einschichtiges Biodiversitätsgründach (Quelle: BuGG)	24
Abbildung 9: Schichtaufbau Retentionsgründach (Quelle: BuGG)	25
Abbildung 10: Aufbau eines mehrschichtigen auflastgehaltenen Solagründaches (Quelle: BuGG)	27
Abbildung 11: Aufbau eines einschichtigen auflastgehaltenen Solagründaches (Quelle: BuGG)	28
Abbildung 12: Getrennte Verlegung von PV und Begrünung auf einem Dach (Quelle: BuGG)	28
Abbildung 13: PV-Pergola bei einer intensiven (Teil-) Dachbegrünung (Quelle: BuGG)	29
Abbildung 14: "Solar-Biodiversitätsgründach": Arten- und struktureiches Solagründach (Quelle: BuGG)	29
Abbildung 15: "Solar-Retentionsgründach": unter dem Solagründachaufbau ist ein zusätzlicher Retentionsraum eingebaut (Quelle: BuGG)	30
Abbildung 16: Aufstellarten von PV-Anlagen auf Flachdächern, Sicht von Süden (obere Reihe) und von Osten (untere Reihe) auf Gebäude mit Flachdach mit unterschiedlich ausgerichteten PV-Modulreihen (blau) (Quelle: Fraunhofer ISE) ...	32
Abbildung 17: Solagründach mit horizontaler Ausrichtung der PV-Module (Quelle: BuGG)	34
Abbildung 18: Solagründach mit geneigten PV-Modulen in Süd-Ausrichtung (Quelle: BuGG)	34
Abbildung 19: Solagründach mit moduliertem, wellenförmig angelegtem Substrataufbau. Analog zum Biodiversitätsgründach (Quelle: BuGG)	34
Abbildung 20: Solagründach mit geneigten PV-Modulen Ost-West-Ausrichtung (Quelle: BuGG)	35

Abbildung 21 Solargründach mit senkrechter Aufstellung der PV-Module (Quelle: BuGG)	36
Abbildung 22: Sicht von oben auf ein Flachdach mit Solargründach mit Attika (graue Fläche), Gründach (grün umrandete Fläche) und PV-Modulreihen (blaue Flächen). A umschreibt die Bruttodachfläche, B die Gründachfläche inklusive Randstreifen und C die Außenkante der Solarinstallationsfläche	37
Abbildung 23: Jährliche solare Einstrahlungsmenge auf ebene Flächen in Hamburg für Ausrichtungen von West über Süd bis Ost (Azimut 90° bis -90°) und Neigung der bestrahlten Fläche von 0° bis 90° (Inklination) für nicht verschattete Flächen (Quelle: Eigene Berechnungen, Einstrahlungsdaten aus [23])	56
Abbildung 24: Lebensdauer einer Dachabdichtung bis zur ersten größeren Reparatur, mit und ohne Dachbegrünung, ohne PV-Anlage (Quelle: Umfrage BuGG 2021) ..	66
Abbildung 25: Lebensdauer einer Dachabdichtung bis zur ersten größeren Reparatur, mit und ohne Dachbegrünung, mit PV-Anlage (Quelle: Umfrage BuGG 2021)	66
Abbildung 26: Prinzip-Schnitt Mulden-Rigolen-Versickerung (Quelle: [43])	67
Abbildung 27: Simulation der möglichen Temperaturreduktion um 13 Uhr, welche durch eine Erhöhung der Dachbegrünungen um 25 %, 50%, 75% und 100% in der Stadt Essen erreicht werden kann. [81]	78
Abbildung 28: Artenzahlen an Wildbienen und Laufkäfern auf Gründächern in Abhängigkeit von der Vegetationsform [85]	79
Abbildung 29: Vegetationsanalysen Gründächer Hamburg: Tabellarische Übersicht der untersuchten Gründachtypen sowie der dazugehörigen Ergebnisse der Vegetationsaufnahmen [88]	80
Abbildung 30: Begrünte Dachfläche der Fahrgastunterstände in Hamburg (Quelle: BuGG)	81
Abbildung 31: Durch Fluglärm in Hamburg belastete Flächen, die im Jahr 2022 eine Größe von 11,52 km ² aufwiesen [92]	82
Abbildung 32: Investitionskosten und -kosteneinsparungen/Gutschriften für ein Solargründach auf einem 200 m ² großen Dach, Kostenangaben pro m ² Brutto-Dachfläche (blaue Balken: Kosten, orange Balken: Kosteneinsparungen bzw. Gutschriften)	89
Abbildung 33: Jährliche Betriebskosten und -kosteneinsparungen/Gutschriften für ein Solargründach auf einem 200 m ² großen Dach, Kostenangaben pro m ² Dachfläche und Jahr (blaue Balken: Kosten, orange Balken: Kosteneinsparungen bzw. Gutschriften), die jährliche Einspeisevergütung ist nicht grafisch dargestellt.	90
Abbildung 34: Amortisationszeiten von PV-Dächern und Solargründächern in Abhängigkeit der Dachfläche für Volleinspeisung (VES) und 25 % Eigenverbrauch (EV)	98

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Modulflächen für ein 500 m ² großes Flachdach für drei PV-Anlagenvarianten	38
Tabelle 2: Installierte PV-Leistung und Solarstromertrag für drei PV-Anlagenvarianten für 500 m ² Flachdach-Fläche	39
Tabelle 3: Fallgruppen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung nach Dachgröße, PV-Anlagenvariante und Geschäftsmodell (Volleinspeisung oder 25 % Eigenverbrauch mit Resteinspeisung) für Anlagen auf Gründächern (GD) und Schwarzdächern (SD)	51
Tabelle 4: Wichtigste Eingangsparameter für die Wirtschaftlichkeitsrechnung einer PV-Anlage	53
Tabelle 5: Ermittelte PV-Systempreise Stand 1. Quartal 2023 in Abhängigkeit von der Anlagengröße auf Gründächern (GD) und Schwarzdächern (SD)	57
Tabelle 6: Verwendete Eingangsdaten für die Wirtschaftlichkeitsrechnungen (entsprechend der Eingangsparameter des verwendeten Wirtschaftlichkeitsrechners)	58
Tabelle 7: Kostenrichtwerte für Herstellung, Wartung und Rückbau eines Schwarzdaches	60
Tabelle 8: Kostenrichtwerte extensiver Gründächer auf Flachdächern (0-5° Dachneigung) für unterschiedliche Aufbauhöhen	61
Tabelle 9: Kostenrichtwerte Biodiversitäts- und Retentionsgründach in mehrschichtiger Bauweise auf Flachdach (0-5° Dachneigung)	62
Tabelle 10: Kostenrichtwerte Begrünungen auf Flachdächern 5-10° und Schrägdächern 10-30° Dachneigung (DN)	62
Tabelle 11: Kostenrichtwerte Solargründach auf Flachdach mit 0-5° Dachneigung inklusive PV-Montagegestell und ohne sonstige PV-Anlagenkosten	63
Tabelle 12: Übersicht der Nutzen von Dachbegrünungen und ermittelte ökonomische Vorteile für Gebäude in Hamburg	64
Tabelle 13: Typische Lebensdauern von Flachdach-Abdichtungen verschiedener Dacharten (Literaturangaben)	65
Tabelle 14: Kostenvergleich einer Mulden-Rigole ohne und mit Kombination mit Dachbegrünung (Quelle: [44, 45])	68
Tabelle 15: Zusammenfassung der Forschungen zur Ertragssteigerung der PV-Module durch eine Dachbegrünung	72
Tabelle 16: Nutzen von Dachbegrünungen zu vermiedene Sterbefälle (pro Jahr) [79] ..	77
Tabelle 17: Übersicht, welche Kosten in der Wirtschaftlichkeitsrechnung brutto (mit USt.) und welche netto (ohne USt.) angesetzt wurden	85
Tabelle 18: Spezifische einmalige Kosten der verschiedenen Komponenten in Abhängigkeit der Dachgröße, bei welcher Dachart diese anzusetzen sind, ist mit einem „X“ vermerkt	86

Tabelle 19: Spezifische jährliche Betriebskosten der verschiedenen Komponenten in Abhängigkeit der Dachgröße, bei welcher Dachart diese anzusetzen sind, ist mit einem „X“ vermerkt.....	87
Tabelle 20: Spezifische Kostenvorteile der Dachbegrünung bei Gründach und Solargründach.....	88
Tabelle 21: Spezifische Invest- und Betriebs-Mehrkosten Solargründach sowie Kostenvorteile in Abhängigkeit von der Dachgröße	91
Tabelle 22: Spezifische Invest- und Betriebs-Mehrkosten Solargründach sowie Kostenvorteile in Abhängigkeit der Dachgröße.....	91
Tabelle 23: Spezifische Invest- und Betriebs-Mehrkosten des PV-Dachs in Abhängigkeit der Dachgröße	92
Tabelle 24: Amortisationszeiten für Solargründächer mit Modulen in Südausrichtung nach Dachgröße und Betriebsweise (Volleinspeisung bzw. 25 % Eigenverbrauch)	93
Tabelle 25: Amortisationszeiten Solargründach für unterschiedliche Lebensdauern der Dachbegrünung für ein 500 m² Dach.....	94
Tabelle 26: Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsanalyse für Gründächer	95
Tabelle 27: Amortisationszeiten für PV-Dächer (ohne Gründach) mit Modulen in Südausrichtung nach Dachgröße und Betriebsweise (Volleinspeisung bzw. 25 % Eigenverbrauch)	97
Tabelle 28: Amortisationszeiten der verschiedenen Dacharten im Vergleich nach Dachgröße	97
Tabelle 29: Fälle, in denen die wirtschaftliche Vertretbarkeit möglicherweise nicht gegeben ist	100
Tabelle 30: Abmessungen der unterschiedlichen Flachdach- und Gründachgrößen, die im Gutachten verglichen werden.....	107
Tabelle 31: Solarinstallationsfläche, PV-Modulfläche und PV-Leistung für Ost-West-Ausrichtung ohne Dachbegrünung sowie Süd- und Ost-West-Ausrichtung mit Dachbegrünung	108
Tabelle 32: Größen von Referenzschrägdächern, die den Flachdachgrößen des Gutachtens entsprechen	109
Tabelle 33: Detailergebnisse der Wirtschaftlichkeitsrechnung für Solargründächer in Süd- und in Ost-West-Ausrichtung	110
wTabelle 34: Detailergebnisse der Wirtschaftlichkeitsrechnung für PV-Dächer (ohne Begrünung) in Süd- und in Ost-West-Ausrichtung.....	111
Tabelle 35: Zuordnung von Dachflächengrößen zu Gebäudetypen des deutschen Gebäudebestands (Quelle: Wohngebäudetypologie TABULA [97])	112

Auftrag und Zielsetzung

Die Freie und Hansestadt Hamburg (FHH) hat im Jahr 2020 in § 16 des Hamburgischen Klimaschutzgesetzes (HmbKliSchG) vom 20. Februar 2020 eine Pflicht zur Installation einer Photovoltaik (PV) – Anlage auf Neubauten und bei vollständiger Erneuerung der Dachhaut erlassen [1]. Die Pflicht entfällt u.a., wenn ihre Erfüllung wirtschaftlich nicht vertretbar ist. Die konkreten Anforderungen wurden in der Hamburgischen Klimaschutz-Umsetzungspflichtverordnung (HmbKliSchUmsVO) vom 22. Dezember 2022 geregelt [2].

Am 6. Dezember 2023 hat die Hamburger Bürgerschaft das Gesetz zur Stärkung des Klimaschutzes und des Ausbaus der erneuerbaren Energien in Hamburg (Klimaschutzstärkungsgesetz) beschlossen [3]. Dieses enthält eine Erweiterung der PV-Pflicht in § 16 des HmbKliSchG zu einer Verpflichtung zur Errichtung und Nutzung von Solargründächern [4]. Auch für die Solargründach-Pflicht gilt entsprechend § 16 Absatz 5 HmbKliSchG der Vorbehalt, dass ihre Erfüllung im Einzelfall technisch möglich und wirtschaftlich vertretbar ist. Die zugehörige Verordnung wurde im Frühjahr 2024 angepasst. Seit 16.04.2024 ersetzt die Photovoltaikpflicht-Umsetzungsverordnung (PVUmsVO) die Verordnung aus dem Jahr 2020 [5].

Vor diesem Hintergrund hat die Behörde für Umwelt, Klima, Energie und Agrarwirtschaft (BUKEA) der FHH das vorliegende Gutachten in Auftrag gegeben zur Erarbeitung der „Grundlagen für die fachinhaltliche Ausgestaltung einer Verpflichtung zur Errichtung und zum Betrieb einer Anlage zur Stromerzeugung durch Nutzung solarer Strahlungsenergie in Kombination mit Dachbegrünung (Solargründach-Pflicht) im Hamburgischen Klimaschutzgesetz“. Das Gutachten wurde gemeinsam vom Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE und dem Bundesverband GebäudeGrün e.V. (BuGG) erstellt.

In diesem Gutachten wird die Wirtschaftlichkeit von Solargründächern im Vergleich zu PV-Dächern ohne Gründach sowie von Gründächern ohne PV-Anlage untersucht. Grundlage der Bewertung ist die in Kapitel 3.2 beschriebene Definition der Wirtschaftlichkeit. Die Forderung nach der Wirtschaftlichkeit bezieht sich auf die zusätzlich zur Standard-Dachbedeckung notwendigen Investitionen der verschiedenen Dacharten, sprich den Mehrkosten des Solargründachs, PV-Dachs und Gründachs gegenüber einem Schwarzdach ohne Kiesschüttung.

Das Gutachten zeigt auf, inwieweit die Wirtschaftlichkeit in Abhängigkeit von der Dachgröße für typische Annahmen gegeben ist und unter welchen Umständen die Solargründach-Pflicht wegen wirtschaftlicher Nicht-Vertretbarkeit oder sonstigen Gründen entfallen würde. Weiter wird dargestellt, inwieweit bei einer wirtschaftlichen Unvertretbarkeit der Solargründach-Pflicht entweder nur Photovoltaik (PV) oder nur Gründächer gesetzlich vorgeschrieben werden können.

Der Aufwand der Erstellung von Gründächern, PV-Anlagen oder Solargründächern kann sich zwischen dem Neubau von Gebäuden und der Installation auf Bestandsgebäuden (z.B. im Rahmen einer umfassenden Dachsanierung) deutlich unterscheiden. Dabei sind die Kosten für ein Gründach, eine PV-Anlage oder ein Solargründach selbst für Neu- und Bestandsbauten grundsätzlich gleich, da die Ausführung dieselbe ist. Mögliche Mehrkosten können bei Bestandsbauten jedoch entstehen, wenn eine Verstärkung der Statik

erforderlich ist, die Kabel aufwändiger zu verlegen sind oder die Erneuerung der vorhandenen elektrischen Installation notwendig wird, um die PV-Anlage anschließen zu können.

Auftrag und Zielsetzung

In diesem Gutachten wird nicht zwischen Neubauten und Bestandsbauten unterschieden, da sich der Aufwand für die Installation von Gründächern, PV-Anlagen oder Solargründächen auf den beiden Gebäudetypen nicht prinzipiell unterscheiden. Allerdings ist es wichtig, bei Bestandsgebäuden Regelungen zu definieren, die Zusatzkosten auf Bestandsgebäuden im Einzelfall berücksichtigen. Wie damit umzugehen ist, ist in Kapitel 4.1 und Nr. 3 der Tabelle 29 dargestellt.

Das Gutachten untersucht die Anwendung der Solargründach-Pflicht auf Gebäuden in Hamburg mit Flachdächern bis 10° Dachneigung, für die die Einführung der Pflicht geplant ist. Da die Gründächer auf Flachdächern von 0° bis 5° Dachneigung dominieren, werden diese im Folgenden als Standardfall genommen.

Flachdächer können mit Photovoltaik-Anlagen (PV) auf einem Schwarzdach, als Gründächer oder als Solargründächer, also einer Kombination von PV- und Gründach ausgeführt werden. Dabei gibt es für alle drei Dacharten verschiedene Ausführungs- und Montagearten. Diese können sich bei PV-Anlagen bezüglich der Ausrichtung (nach Himmelsrichtung) und Neigung (Winkel gegenüber der Horizontalen) der PV-Module unterscheiden, was Einfluss auf die Belegungsichte und den Solarstromertrag hat. Darüber hinaus gibt es Sonderformen der PV-Anlagenarten wie z.B. bifaziale PV-Module, die auf der Vorder- und der Rückseite Licht aufnehmen und in Strom umwandeln können und senkrecht montiert werden. Zeitweise wurden auch PV-Module in Röhrenform angeboten, die z.B. horizontal über einem Gründach installiert werden können. Beim Gründach werden Aufbauarten wie das extensive und das intensive Gründach sowie spezielle Nutzungsformen wie das Biodiversitäts- oder das Retentionsgründach unterschieden.

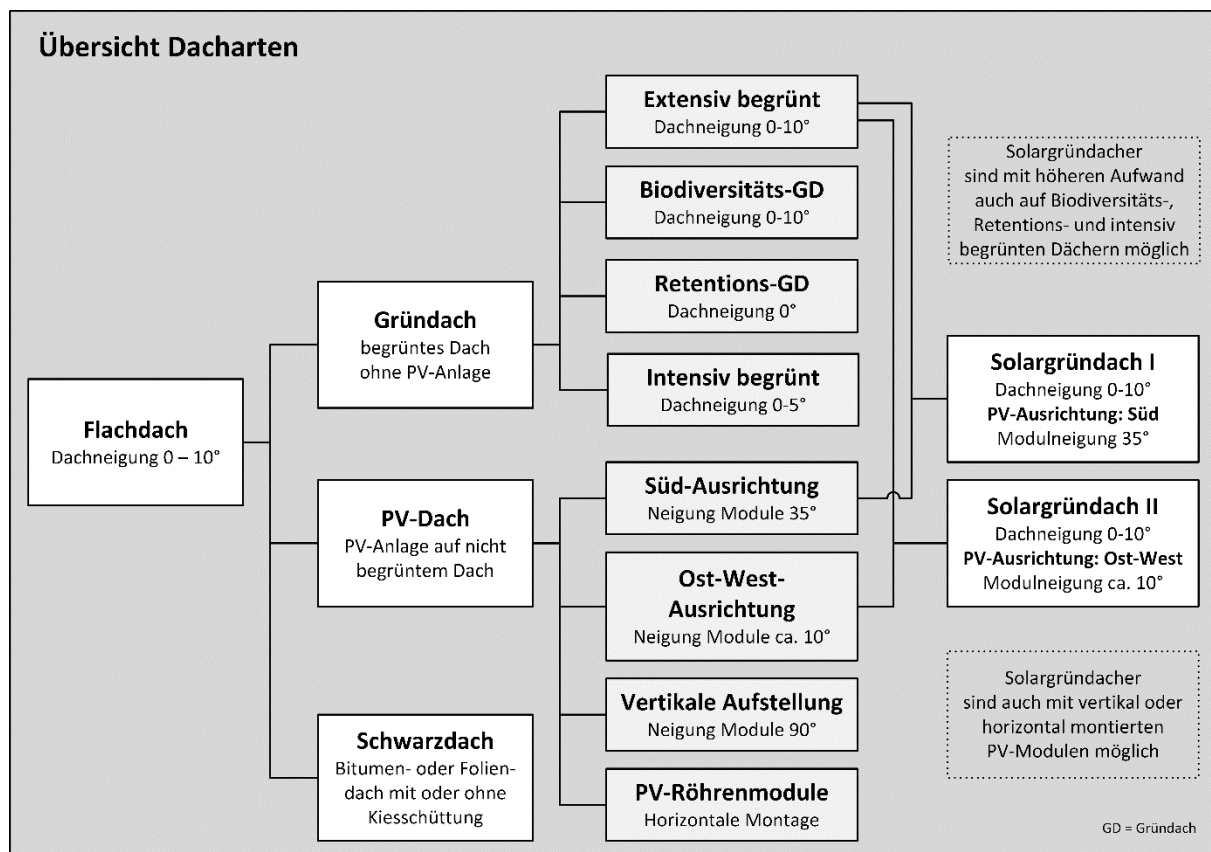


Abbildung 2: Ausführungs- und Nutzungsarten von Flachdächern sowie Darstellung der beiden im Gutachten betrachteten Solargründach-Ausführungen

Die Gründach-Aufbauarten können unterschiedlich mit PV-Anlagen zum Solargründach kombiniert werden. Beim Solargründach sollten PV-Anlagen mit extensiven, niedrigwüchsiger Begrünung kombiniert werden, um einerseits die Verschattung der PV-Module durch zu hohen Pflanzenwuchs zu vermeiden und andererseits Pflanzen zu nutzen, die mit dem reduzierten Sonnenlichtangebot unter den PV-Modulen zurechtkommen. Deshalb werden Solargründächer meist mit extensiver Begrünung kombiniert. Abbildung

2 gibt einen Überblick über die im Gutachten betrachteten Solargründächer I und II. Solargründächer sind auch mit vertikal oder horizontal montierten PV-Modulen möglich, allerdings werden diese bislang relativ selten umgesetzt, so dass sie in dieser Studie nicht näher betrachtet werden.

Dachbelegungsarten: Gründach
und PV-Anlagen

In diesem Gutachten wird für die Durchführung der Berechnungen die Ausführung des Solargründachs mit extensivem Gründach kombiniert mit nach Süden oder nach Osten und Westen ausgerichtete PV-Module betrachtet. Da jedoch die Bedeutung von Biodiversitäts- und Retentionsgründächer deutlich zunimmt, werden diese im Folgenden ebenfalls beschrieben und die Möglichkeiten und Grenzen der Kombination mit Solaranlagen aufgezeigt. Auf die Beschreibung von Intensivbegrünungen wird dagegen nicht eingegangen, da sie nur selten mit PV-Anlagen kombiniert werden. In den folgenden Teilkapiteln werden mögliche Formen an PV-Dächern, Gründächern und Solargründächern vorgestellt und ihre Vor- und Nachteile erläutert.

2.1 Aufbauvarianten Gründächer

2.1.1 Gründachaufbauten

In diesem Kapitel werden grundlegende Gründachaufbauten, Einsatzbereiche und Begrünungsformen beschrieben.

Extensive und intensive Dachbegrünungen können in **einschichtiger oder mehrschichtiger Bauweise** umgesetzt werden. Während beim einschichtigen Aufbau alle Funktionen in einer Schicht zusammengefasst sind, bilden sich bei der mehrschichtigen Bauweise die Funktionen „Dränage“ und „Vegetationstragschicht“ als zwei durch ein Filtervlies getrennte Schichten aus (vgl. Abbildung 3). Somit sind effektivere Möglichkeiten bei der Wasserspeicherung und Ableitung gegeben. Auch bei gefällelosen Dächern mit Pfützenbildung bzw. stehendem Wasser ist die mehrschichtige Bauweise besser geeignet, um Vernässungen und Vegetationsumbildungen zu vermeiden. Mehrschichtsubstrate speichern in der Regel mehr Wasser und Nährstoffe als Einschichtsubstrate. Die Dränageschicht kann als Schüttgut (Lava, Blähschiefer, Blähton) oder Festkörperdränage (Kunststoffelemente) ausgebildet sein.

In Deutschland werden jährlich etwa 9 Mio. Quadratmeter Dachbegrünung umgesetzt, davon sind etwa 75 % aller extensiven Dachbegrünungen in mehrschichtiger Bauweise errichtet. Bei Intensivbegrünungen beträgt der Anteil der Mehrschichtbegrünungen 92 % [6].

Dachbegrünungen lassen sich in folgende Dachneigungskategorien einteilen:

- **Begrünung Flachdach 0-5° Dachneigung**
- **Begrünung Flachdach 5-10° Dachneigung**
- **Begrünung Schrägdach 10-45° Dachneigung**

Teilweise werden bereits Dächer ab 5° Neigung als Schrägdächer bezeichnet, in diesem Gutachten werden jedoch die genannten Bezeichnungen genutzt.

Die folgend dargestellten Grafiken zeigen den grundsätzlichen Gründachaufbau in verschiedenen Varianten, die in Abhängigkeit der Dachkonstruktion ggf. hinsichtlich Aufbauhöhen, verwendeten Produkte angepasst werden müssen. Unter „Geeigneter Dachkonstruktion“ ist die ausreichend vorhandene Statik, notwendige bauphysikalischen Maßnahmen und eine wurzelfeste Dachabdichtung zu verstehen. Die FLL-Dachbegrünungsrichtlinien geben Hinweise zu „Dachbauweisen und Begrünbarkeit“ [7].

Schichtaufbau Flachdachbegrünung 0-5° Dachneigung

Bei Flachdächern bis 5° Neigung sind sowohl ein- als auch mehrschichtige Gründachaufbauten möglich. Aufbauend auf einer geeigneten Dachunterkonstruktion mit ausreichender Tragfähigkeit und einer wurzelfesten Dachabdichtung sieht der typische **mehrschichtige Begrünungsaufbau** von unten nach oben wie folgt aus (siehe Abbildung 3):

- Schutzlage zum Schutz der Dachabdichtung vor mechanischer Beschädigung (3)
- Dränageschicht (Schüttgut oder Kunststoffelement) zur Speicherung und Ableitung des Niederschlagswassers (4)
- Filterschicht zur Verhinderung des Einschlämmens von Feinanteilen (5)
- Mehrschichtsubstrat als Vegetationstragschicht zur Verwurzelung der Pflanzen (6)
- Vegetation (7)

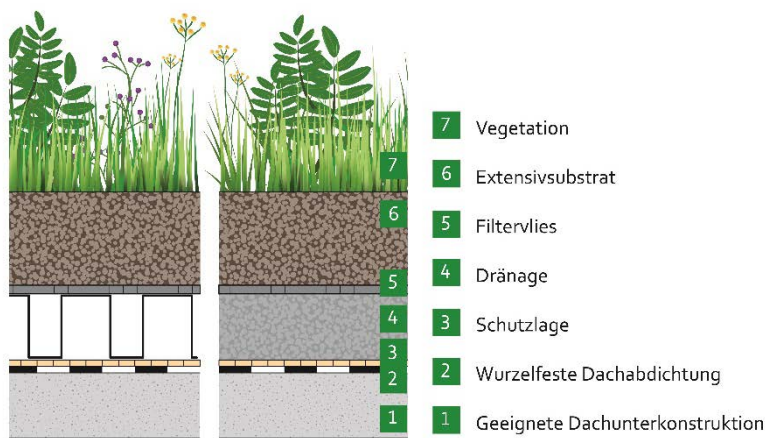


Abbildung 3: Mehrschichtiger Gründachaufbau mit einer Drainage aus Kunststoffelement (links) bzw. Schüttgut (rechts) (Quelle: BuGG)

Der typische **einschichtige Begrünungsaufbau** sieht von unten nach oben wie folgt aus (siehe Abbildung 4):

- Schutzlage zum Schutz der Dachabdichtung vor mechanischer Beschädigung (3)
- Einschichtsubstrat als Vegetationstragschicht zur Verwurzelung der Pflanzen und Drainage zur Speicherung und Ableitung des Niederschlagswassers (4)
- Vegetation (5)

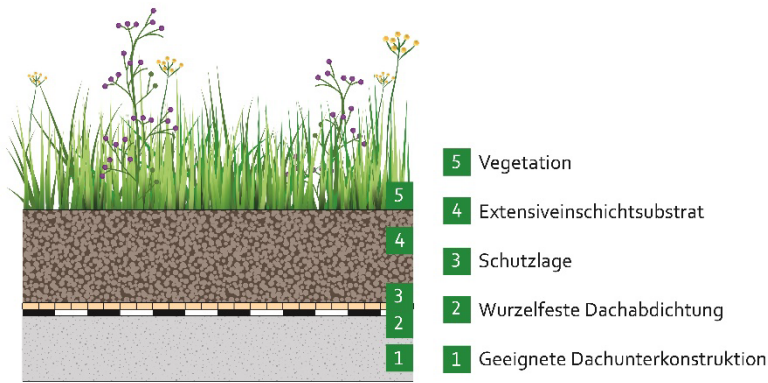


Abbildung 4: Einschichtiger Gründachaufbau (Quelle: BuGG)

Gründachaufbau Begrünung Flachdach 5-10° Dachneigung

Bei Flachdächern mit 5-10° Dachneigung kann ein einschichtiger Gründachaufbau gewählt und ggf. auf die Dränageschicht verzichtet werden, da der Wasserabfluss aufgrund der Neigung oft schon sichergestellt ist. Im Traufbereich müssen dabei Vorkehrungen getroffen werden, um das abgeführte Wasser schnell und sicher abzuleiten. Der Aufbau ist in Abbildung 5 dargestellt.

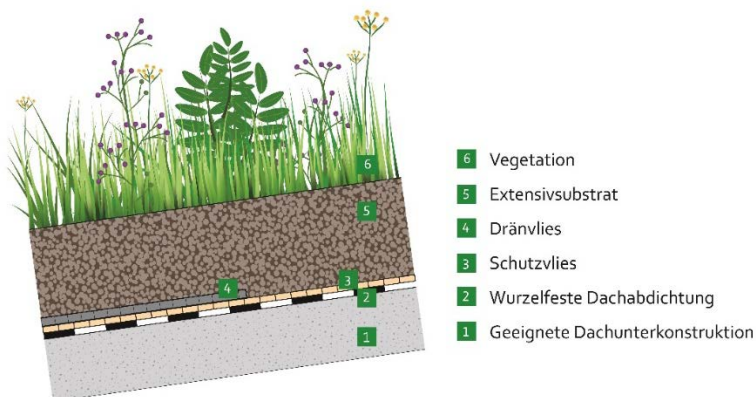


Abbildung 5: Schichtaufbau Flachdachbegrünung bei 5-10° Dachneigung (Quelle: BuGG)

Gründachaufbau Schrägdachbegrünung 10 - 45° Dachneigung

Um das Abrutschen des Gründachaufbaus beispielsweise bei extremen Wetterereignissen zu verhindern, geben die Dachbegrünungsrichtlinien der Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL) ab einer Dachneigung von 10° vor, ggf. Maßnahmen zu konstruktiven Schubsicherung vorzusehen [7]. Diese Maßnahmen können Schubswellen sein, die vom Dachdeckerhandwerk in oder auf die Dachabdichtung eingebaut werden bzw. Schubelemente oder spezielle Drainageplatten, die vom Fachbetrieb für Dachbegrünung verlegt werden. Der Aufbau ist in Abbildung 6 dargestellt.



Abbildung 6: Schichtaufbau Schrägdachbegrünung bei 10 – 45° Dachneigung (Quelle: BuGG)

2.1.2 Extensivbegrünung

Die einfachste und bekannteste Form der Dachbegrünung ist die Extensivbegrünung. Sie zielt darauf ab, leicht zu pflegende, struktur- und artenreiche Grünflächen auf dem Dach zu schaffen. Eine Extensivbegrünung kann einschichtig oder mehrschichtig ausgeführt werden und lässt sich sowohl auf flachen als auch auf geneigten Dächern bis etwa 45° Neigung umsetzen.

Die Gesamtaufbauhöhen sind bei einer Extensivbegrünung vergleichsweise niedrig gehalten und liegen je nach Begrünungsziel und vorhandenen statischen Bedingungen zwischen 5 und 18 cm, was einem Gewicht von ca. 60–230 kg/m² entspricht. Je höher die Vegetationstragschicht ausgebildet wird, desto größer ist zwar das Gewicht des Gründachaufbaus, allerdings wird damit auch ein höheres Retentionsvolumen (Regenwasser-rückhaltevermögen) sowie eine größere Pflanzenvielfalt geboten. Generell gilt, je höher der Gründachaufbau, desto höher die Wasserspeicherfähigkeit und damit die Artenvielfalt und Wuchshöhe der Pflanzen.

Zumeist werden bei Extensivbegrünungen trockenresistente Pflanzen verwendet, die sich auch ohne intensivere Pflege selbst erhalten können. Abhängig von der Höhe des Gründachaufbaus etablieren sich unterschiedliche Vegetationsformen. Für Aufbauten mit 10 cm Dicke lassen sich niedrigwüchsige Sedum-Kräuter-Gräser-Vegetationen etablieren, Aufbauten mit 15 cm ermöglichen dagegen artenreichere höherwüchsige Gräser-Kräuter-Vegetationen. Es sind auch sogenannte Leichtbauweisen mit Minimalgewichten von ca. 40–60 kg/m² möglich. Die Artenvielfalt ist hier jedoch sehr eingeschränkt.

2.1.3 Biodiversitätsgründach

Als "Biodiversitätsgründächer" werden struktur- und artenreiche Gründächer mit Biodiversitätsbausteinen bezeichnet, die meist auf extensiver Dachbegrünung realisiert werden. Ziel ist die Steigerung der Biodiversität auf dem einzelnen Dach, bei großflächigen

Grünanlagen und vernetzen Grünstrukturen innerhalb der ganzen Stadt. Das geschieht vor allem durch eine gezielt erhöhte Struktur- und Pflanzenartenvielfalt, wodurch mehr Lebensräume für Insekten und Bodentiere geschaffen werden.

Dachbelegungsarten: Gründach und PV-Anlagen

Biodiversitätsbausteine sind beispielsweise verschiedene Substratzusammensetzungen, partielle Anhögelungen mit kleineren Gehölzen als Rückzugsbereiche für Bodentiere, Totholz als Nisthilfen für Insekten, Steine als Verstecke, Sandlinsen als Mikrohabitate oder Wasserflächen als Vogel- und Insektentränke sowie eine hohe Diversität an Pflanzenarten. Um die dauerhafte Funktion der Begrünung zu gewährleisten, ist eine fachgerechte Pflege unbedingt erforderlich. In erster Linie soll die biologische Vielfalt erhalten und gefördert werden. Insbesondere invasive Arten müssen daher entfernt werden. Biodiversitätsgründächer sind in ein- und mehrschichtiger Bauweise bei Extensiv- und Intensivbegrünungen von 0° bis etwa 10° Dachneigung möglich (siehe Abbildung 7 und Abbildung 8).

Die Kombination von Biodiversitätsgründach mit Photovoltaik ist unter bestimmten Voraussetzungen möglich, beispielsweise bei ausreichend großer Dachfläche und getrennter Verlegung. Auf diese Variante wird in Kapitel 2.1.6 eingegangen.

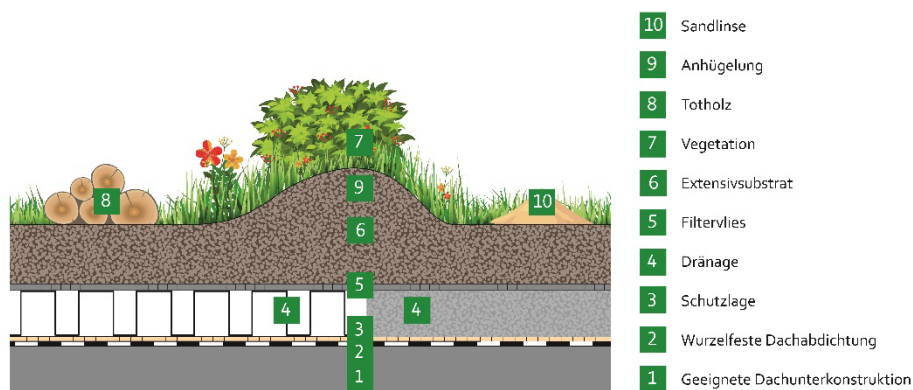


Abbildung 7: Aufbau mehrschichtiges Biodiversitätsgründach (Quelle: BuGG)

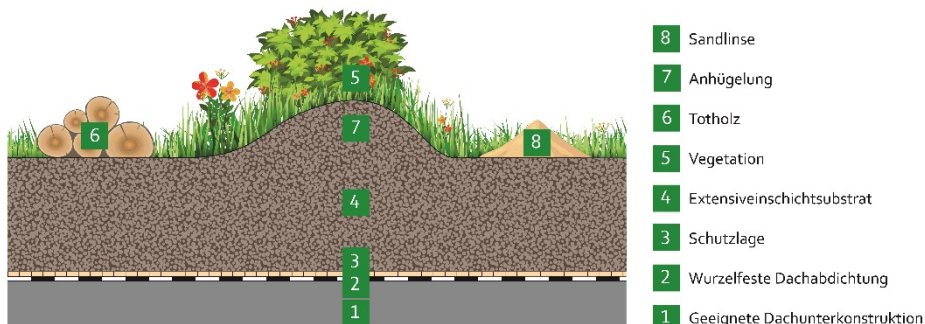


Abbildung 8: Aufbau einschichtiges Biodiversitätsgründach (Quelle: BuGG)

2.1.4

Retentionsgründach

Dachbelegungsarten: Gründach
und PV-Anlagen

Bei sogenannten Retentionsgründächern wird die bei allen Gründächern vorhandene Retentionsfähigkeit (Regenwasserrückhaltevermögen) gezielt erhöht. Hierzu wird innerhalb der Dränageschicht (Retentionselement) ein temporärer bzw. teilweise auch dauerhafter Wasseranstau mittels einer Anstaudrossel geschaffen, so dass das Rückhaltevolumen einer Dachbegrünung zusätzlich um bis zu 160 l/m^2 gesteigert wird. Somit kann bis zu 100 % des Wasservolumens eines Starkregenereignisses (nach deutschem Wetterdienst 40 l/m^2 in einer Stunde oder 60 l/m^2 in 6 Stunden) zurückgehalten werden. Das Wasser wird dabei in der Vegetationstragschicht und zusätzlich in der Retentionsschicht gespeichert und kann damit auch, je nach System, den Pflanzen zur Verdunstung zur Verfügung stehen.

Über ein Anstaulement, die sogenannte Anstaudrossel, wird der Regenwasserabfluss verzögert (siehe Abbildung 9). An dieser lässt sich die maximale Abflussspende einstellen, um das angestaute Regenwasser gedrosselt über mehrere Stunden und Tage abzuleiten. Eine der Herausforderungen stellt dabei die Berechnung des Abflussverhaltens des Begrünungsaufbaus und dessen Abflussbeiwerts unter Berücksichtigung der örtlichen Niederschläge dar. Weitere Planungskriterien, die an diesen Gründachtyp gestellt werden, sind ein gefälleloses Dach und die höheren statischen Erfordernisse.

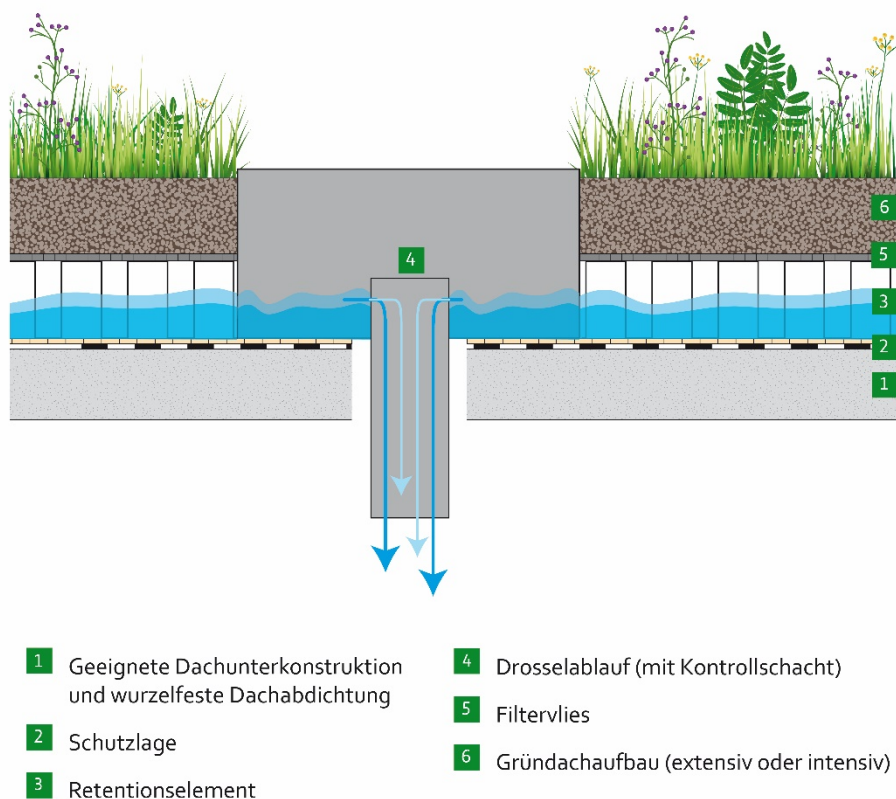


Abbildung 9: Schichtaufbau Retentionsgründach (Quelle: BuGG)

Da bei Retentionsgründächern ein temporärer Wasseranstau vorgesehen ist, muss die Dachkonstruktion besonders hinsichtlich Statik und Bauphysik geeignet sein. Obwohl Umkehrdächer keinen dauerhaften Wasseranstau zulassen, sind Retentionsgründächer aufgrund des temporären Wasseranstaus und des Abfließens des Wassers innerhalb von zwei Tagen möglich [8].

Retentionsgründächer können in mehrschichtiger Bauweise bei Extensiv- und Intensivbegrünungen bei gefällelosen Dächern (Dachneigung 0°) umgesetzt werden. Ein Retentionsgründach lässt sich auch mit einer PV-Anlage kombinieren. Aufbau und Beachtenswertes ist unter Kapitel 2.1.6 genauer beschrieben.

2.1.5

Solargründächer

Unter einem "Solargründach" wird die Kombination von Dachbegrünung und Solaranlage (Photovoltaik- oder Solarthermieanlage) verstanden. Solargründächer sind in folgenden "Einsatzbereichen" möglich:

- **Klassisches Solargründach**
Die Solarmodule sind oberhalb der begrünten Dachfläche montiert (üblicherweise auf einer Unterkonstruktion befestigt, die das Gründachsubstrat als Beschwerung verwendet, bei statisch problematischen Dächern sind aber auch Strahlträger möglich, die nur auf den Außenwänden aufgesetzt werden).
- **Getrennt verlegtes Solargründach**
Ein Teil der Dachfläche ist begrünt und die Solarmodule sind auf einem anderen Teil des Daches auf nicht begrünter Dachfläche montiert.
- **Gründach mit PV-Pergola**
Begehbare extensiv oder intensiv begrünte Dachflächen sind mit PV-Pergola als Sonnenschutz über den Gründachflächen versehen.

In diesem Gutachten wird in den folgenden Kapiteln nur das klassische Solargründach in der Kombination Dachbegrünung und Photovoltaik behandelt, das zum größten Teil in der Praxis umgesetzt wird. Die anderen Varianten werden in diesem Kapitel lediglich vorgestellt, um alternative Dachnutzungsmöglichkeiten durch Kombinationen von Gründach und PV aufzuzeigen. Statt der PV-Module können jedoch immer auch solarthermische Kollektoren installiert sein, was auf die Gestaltung des Solargründachs fast keinen Einfluss hat. Die Entscheidung für eine Photovoltaik- oder eine solarthermische Anlage hängt meist nur vom Wärmebedarf im Gebäude und/oder wirtschaftlichen Erwägungen ab.

"Klassisches Solargründach": PV-Anlage auf begrünter Dachfläche

PV-Anlagen auf Gründächern haben den Vorteil, dass der Gründachaufbau, insbesondere das Substrat, als Auflast für das Montagegestell genutzt und somit die PV-Anlage ohne Dachdurchdringung und zusätzliche Lasten stand- und sturmsicher befestigt werden kann. Der grundsätzliche Aufbau von solchen auflastgehaltenen Solargründächern ist von unten nach oben wie folgt (siehe Abbildung 10):

- Schutzlage, um die wurzelfeste Dachabdichtung vor mechanischen Beschädigungen zu schützen (3).
- Basisplatte: Dient als Grundelement für das PV-Montagesystem bei Solargründächern, an dem das PV-Montagegestell verschraubt wird und hat meist sowohl eine Drän- als auch Wasserspeicherfunktion (4, 5).
- Drainageelement (optional und systemabhängig): Stellt die durchgehende und störungsfreie Entwässerung sicher (5)
- Filtervlies zur Trennung der Substrat und Dränschicht (6).
- Substrat, das auch dem PV-Aufständersystem seine Standfestigkeit verleiht. Die zu erbringende Mindestauflast und damit die Substrathöhe wird objektspezifisch vorgegeben (7).
- Vegetation mit niedrigwüchsigen Arten (8).
- Modulaufständigung (Montagegestell) (9) und PV-Module (11).
- Verkabelung und weitere technische Komponenten (Kabelkanäle, Schaltkästen, Modulanschlussdosen, Wechselrichter) müssen so ausgeführt werden, dass sie eine Instandhaltung nicht erschweren und bei der Gründachpflege mit Heckenschere oder Motorsensen nicht beschädigt werden (10).

Eine durchgehende, störungsfreie Entwässerung muss sichergestellt sein, entweder durch die Basisplatte selbst, die integrierte Dränageschicht oder dem geeigneten Substrat. Je nach Systemanbieter kann sich der Schichtaufbau leicht unterscheiden.

Die Empfehlungen für die fachgerechte Umsetzung von Solargründächern sollten beachtet werden (Kapitel 2.3).

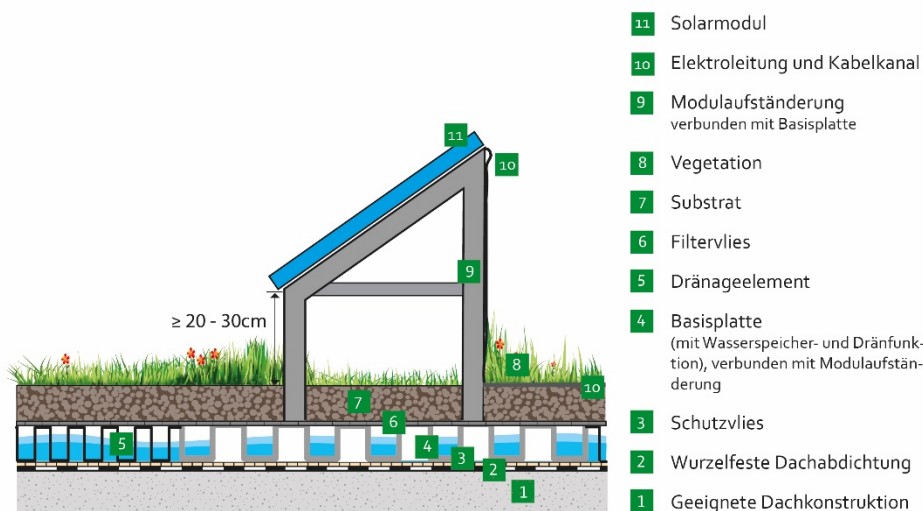


Abbildung 10: Aufbau eines mehrschichtigen auflastgehaltenen Solargründaches (Quelle: BuGG)

Abbildung 11 zeigt den einschichtigen auflastgehaltenen Solargründachaufbau.

Dachbelegungsarten: Gründach
und PV-Anlagen

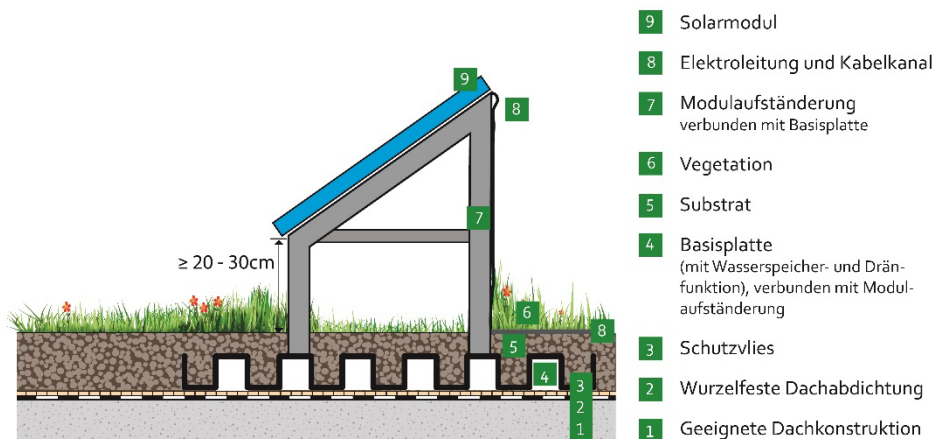


Abbildung 11: Aufbau eines einschichtigen auflastgehaltenen Solargründaches (Quelle: BuGG)

PV- und Gründach auf unterschiedlichen Teildachflächen

Die PV-Anlage kann auch auf einer nicht begrünten Teildachfläche neben einer Gründachfläche installiert werden (siehe Abbildung 12). Allerdings reduzieren sich dadurch sowohl die begrünte Fläche als auch die installierbare PV-Leistung. Außerdem entfallen auch die Synergieeffekte der Kombination, wie z.B. die Erhöhung der PV-Leistung und der Schutz des Daches unter der PV-Anlage. Allerdings kann die Grünfläche besser gepflegt und ggf. auch höher extensiv und auch intensiv begrünt werden.



Abbildung 12: Getrennte Verlegung von PV und Begrünung auf einem Dach (Quelle: BuGG)

Gründach mit PV-Pergolen

Wird eine Dachnutzung durch die Bewohner z.B. für „Urban Gardening“ oder die Anpflanzung einer höheren Vegetation als Intensivbegrünung gewünscht, ist eine klassische Solargründachlösung nicht möglich. In diesem Fall bieten sich sogenannte „PV-Pergolen“ an, bei denen semitransparente PV-Module teilweise über Sitzplätzen oder anders genutzten Flächen wie z. B. Pflanzbeeten installiert werden und so gleichzeitig noch eine Verschattungsfunktion und Regenschutz übernehmen (siehe Abbildung 13).



Abbildung 13: PV-Pergola bei einer intensiven (Teil-) Dachbegrünung (Quelle: BuGG)

2.1.6

Solargründächer in Kombination mit speziellen Gründächern

Üblicherweise werden Solargründächer wie oben dargestellt mit einfacher extensiver Dachbegrünung umgesetzt. Sie können jedoch auch mit dem Biodiversitäts- oder Retentionsgründach kombiniert werden.

Kombination Biodiversitätsgründach und Solargründach

In der Regel sind Solargründächer bei niedrigem Substrataufbau weniger artenreich als zielgerichtet ausgebildete Biodiversitätsgründächer. Es lassen sich die Strukturelemente von Biodiversitätsgründächer jedoch auch mit Solargründächern kombinieren, so dass sich ein erhöhter Artenreichtum einstellt. Dabei sollten allerdings die Empfehlungen für Solargründächer trotzdem beachtet werden (Kapitel 2.3). Zu beachten ist, dass Substratanhügelungen und der Einsatz von Biodiversitätsbausteinen nur dort möglich ist, wo sie nicht zur Verschattung der PV-Module führen bzw. so auszuführen sind, dass keine Verschattung auftritt. Hierfür können beispielsweise die Abstände der Modulreihen vergrößert, die PV-Module höher installiert oder die Biodiversitäts-Flächen getrennt neben den Standard-Solargründachflächen umgesetzt werden (Abbildung 14).



Abbildung 14: "Solar-Biodiversitätsgründach": Arten- und struktureiches Solargründach (Quelle: BuGG)

Denkbar ist auch die Substratverlegung in unterschiedlichen Einbauhöhen, d.h. vor den PV-Modulen niedriger und dahinter höher [9]. Auch der Einsatz von senkrecht aufgestellten bifazialen PV-Modulen erleichtert die Kombination mit dem Biodiversitätsgründach. Ein abwechslungs- und artenreich gestaltetes Solargründach kann als „Solar-Biodiversitätsgründach“ bezeichnet werden

Dachbelegungsarten: Gründach
und PV-Anlagen

Kombination Retentionsgründach und Solargründach

Ein Retentionsgründach mit erhöhter Wasserrückhaltungsfunktion kann grundsätzlich auch mit einem Solargründach kombiniert werden. Hierzu sind nur zusätzlich zum Standardaufbau des Solargründachs die charakteristischen Elemente eines Retentionsgründachs umzusetzen, wie die Schaffung des zusätzlichen Retentionsraums und die Installation einer Anstaudrassel bei einer Dachneigung von 0° (Abbildung 15).



Abbildung 15: „Solar-Retentionsgründach“: unter dem Solargründachaufbau ist ein zusätzlicher Retentionsraum eingebaut (Quelle: BuGG)

Bei Ausführung als „Solar-Retentionsgründach“ wird eine stärkere Entlastung der Kanalisation erreicht. Zusätzlich ergibt sich durch die erhöhte Verdunstungsleistung eine höhere Kühlleistung, was den Solarstromertrag der PV-Anlage etwas steigert und das Mikroklima verbessert und somit zur Verminderung von Hitzeinseln in der Stadt beitragen kann. Es ist darauf zu achten, dass durch den erhöhten Wasserrückhalt keine ungeplante, übermäßig hochwachsende Vegetationsausbildung erzielt wird, die zu Verschattungen der PV-Module führt und einen höheren Pflegeaufwand nach sich zieht.

2.2

Installation von PV-Anlagen auf Flachdächern

PV-Module können unterschiedlich installiert werden. Die Installationsarten auf Flachdächern werden im Folgenden vorgestellt, insbesondere die Installationsvarianten auf Gründächern.

2.2.1

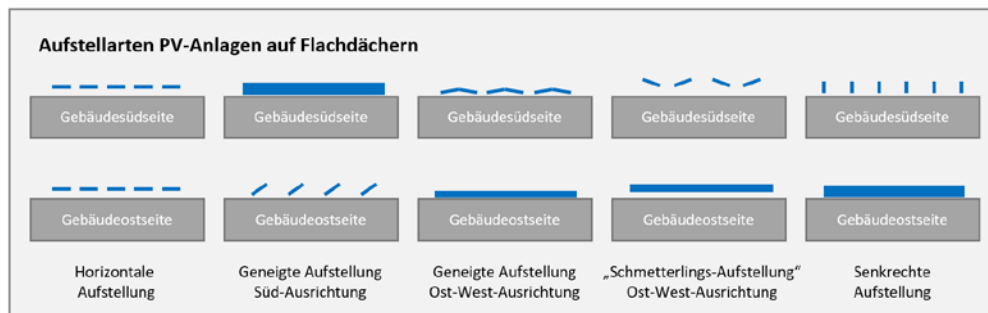
Generelle Aufstellarten von PV-Anlagen auf Flachdächern

Die Installation von PV-Anlagen auf Flachdächern bringt gegenüber der Installation auf Schrägdächern den Vorteil mit sich, dass die PV-Module mithilfe einer Unterkonstruktion beliebig ausgerichtet werden können in Bezug auf ihre Neigung gegenüber der horizontalen Dachfläche und ihrer Ausrichtung in Bezug auf die Himmelsrichtung.

Die Sonne strahlt ihr Sonnenlicht kontinuierlich mit annähernd der gleichen Stärke auf die Erde. Vor Eintritt in die Erdatmosphäre beträgt die Bestrahlungsstärke im Mittel 1.361 W/m^2 (sogenannte Solarkonstante). Durch Reflektion und Absorption in den Luftschichten und an den Wolken wird die Sonnenstrahlung beim Durchtritt durch die Erdatmosphäre abgeschwächt. Bei klarem Himmel beträgt die Strahlungsstärke, die noch auf der Erdoberfläche ankommt, etwa 1.000 W/m^2 . Dieser Wert bezieht sich auf eine senkrecht zur Solarstrahlung ausgerichtete Fläche. Je mehr die Solarempfangsfläche zur optimalen, d.h. senkrecht zur Strahlungsrichtung ausgerichteten Fläche geneigt ist, desto mehr reduziert sich die auf der Solarempfangsfläche auftreffende Strahlungsstärke. Somit hängt die auf ein PV-Modul auftreffende Solarstrahlungsmenge sowohl von den Wetterbedingungen (Bewölkung) als auch von der Ausrichtung des PV-Moduls zur Strahlungsrichtung ab.

Von der Erde aus betrachtet wandert die Sonne im Tagesverlauf von Osten nach Westen und ihr Winkel gegenüber der Horizontalen verändert sich im Tagesverlauf kontinuierlich. Zusätzlich ändert sich die Sonnenhöhe über dem Horizont auch im Jahresverlauf. Somit fallen die Sonnenstrahlen auf ein fest installiertes PV-Modul auch bei optimaler Ausrichtung nur wenige Stunden im Jahr im senkrechten Winkel auf das PV-Modul. Doch auch bei schrägem Sonneneinfall wird Solarstrom erzeugt, nur etwas weniger. Da entscheidend ist, wie viel Solarstrom pro Jahr erzeugt wird, muss der Solarstromertrag von jeder Stunde im Jahr in Abhängigkeit der Ausrichtung des PV-Moduls gegenüber der Sonnenstrahlungsrichtung in dieser Stunde ermittelt werden. Hierzu gibt es entsprechende Computer-Simulationsprogramme, die auch die üblichen Wetterbedingungen mit berücksichtigen.

Zusätzlich zur Solarstrahlungsmenge, die auf ein PV-Modul auftritt, beeinflussen noch andere Faktoren die Aufstellart der PV-Module. Die möglichen Aufstellarten sind in Abbildung 16 dargestellt und ihre Vor- und Nachteile im Folgenden beschrieben.



Dachbelegungsarten: Gründach
und PV-Anlagen

Abbildung 16: Aufstellarten von PV-Anlagen auf Flachdächern, Sicht von Süden (obere Reihe) und von Osten (untere Reihe) auf Gebäude mit Flachdach mit unterschiedlich ausgerichteten PV-Modulreihen (blau) (Quelle: Fraunhofer ISE)

Horizontale Aufstellung (0° Neigung)

Eine horizontale Aufstellung parallel zur Dachoberfläche erfolgt mit flachen Standardmodulen sehr selten. Allerdings werden auch PV-Röhrenmodule angeboten, bei denen die Solarzellen in Glasröhren integriert sind, die horizontal installiert werden.

Vorteile:

- Geringe Aufbauhöhe über dem Dach und somit geringe Windlast
- PV-Röhrenmodule lassen Sonnenlicht und Regen zwischen den Röhren durch, so dass die darunter liegende Fläche relativ gleichmäßig beschienen und befeuchtet wird

Nachteile:

- Geringerer Solarstromertrag als bei optimaler Ausrichtung (trifft bei PV-Röhren weniger zu)
- keine oder reduzierte Reinigungswirkung durch Regen bei flachen PV-Modulen

Eine Bewertung der PV-Röhrenmodule in Bezug auf Wirtschaftlichkeit, Solarstromertrag und Praktikabilität ist bislang noch nicht möglich, da es bislang nur wenige Produkte gibt.

Geneigte Aufstellung in Süd-Ausrichtung

Werden die PV-Module in einem Winkel von etwa 35° gegenüber der Horizontalen geneigt und nach Süden ausgerichtet, ist die Jahressumme der auf das PV-Modul fallenden Strahlung und damit auch der Solarstromertrag am höchsten. Deshalb wurde diese Aufstellart früher üblicherweise gewählt.

Vorteile:

- Höchster Solarstromertrag im Jahr

Nachteile:

- Es muss ein ausreichender Abstand zwischen den Modulreihen gewählt werden, um die gegenseitige Verschattung der Modulreihen zu minimieren

Geneigte Aufstellung in Ost-West-Ausrichtung

Werden die PV-Modulreihen im flachen Neigungswinkel von etwa 10° abwechselnd nach Osten und Westen geneigt, können mehr Module auf einer Dachfläche installiert werden, da die gegenseitige Verschattung entfällt.

- Vorteile:
 - Geringe Neigung der Module reduziert die Windlast
 - Geringe Neigung der Module macht die architektonische Integration leichter
 - Es können mehr PV-Module auf einem Dach installiert werden, da die Abstände zwischen den Modulreihen deutlich geringer sind, eine gegenseitige Verschattung tritt nicht auf
 - Die Solarstromerzeugung ist stärker über den Tag verteilt, was die Integration des Solarstroms in das Stromsystem erleichtert und die Möglichkeit des Eigenverbrauchs erhöht
- Nachteile:
 - Der Solarstrom-Jahresertrag ist etwa 15% geringer als bei Südausrichtung und 35° Modulneigung

Senkrechte Aufstellung

Die senkrechte Aufstellung von PV-Modulen (90° Neigung gegenüber der Dachfläche), reduziert den Solarstromertrag bei Standardmodulen deutlich gegenüber einer geneigten Aufstellung in südliche Richtungen. Neuerdings werden allerdings sogenannte „bifaziale“ PV-Module angeboten, die sowohl auf der Vorder- als auch auf der Rückseite die Solarstrahlung aufnehmen und in Strom umwandeln können. Werden die beiden Modulflächen der bifazialen PV-Module nach Osten und Westen ausgerichtet, trifft auf beide Seiten in der Summe 22% mehr Solarstrahlung als auf die Oberseite eines nach Süden mit 35° geneigten PV-Moduls. Wieviel Solarstrommehrertrag sich mit bifazialen Modulen in der Praxis erzielen lässt, ist noch unbekannt.

Vorteile:

- Die Fläche zwischen den senkrechten Modulreihen lässt sich leichter pflegen, sie wird gleichmäßig beschienen und beregnet
- Möglicherweise ist der Solarstromertrag pro installierter Modulfläche bzw. -leistung höher

Nachteile:

- Die PV-Modulreihen müssen in ausreichendem Abstand aufgestellt werden, damit sie sich nicht übermäßig gegenseitig verschatten; möglicherweise lässt sich aufgrund des Mindestabstands auf einer bestimmten Dachfläche in senkrechter Aufstellung nur eine geringere PV-Leistung installieren als bei geneigter Ausrichtung der PV-Module nach Süden

Eine Bewertung senkrecht aufgestellter bifazialer PV-Module in Bezug auf Wirtschaftlichkeit, Solarstromertrag und Praktikabilität ist bislang noch nicht möglich, da diese erst seit kurzem auf dem Markt angeboten werden.

2.2.2

Installation von PV-Anlagen auf Gründächern

Die im vorigen Kapitel vorgestellten Installationsarten sind grundsätzlich auch auf Gründächern möglich und werden im Folgenden vorgestellt. Generell gilt, dass alle marktüblichen Solargründachlösungen auflastgehalten sind, d.h. das Substrat des Gründachs ist die Auflast für das Montagegestell, das so ohne Dachdurchdringung installiert werden kann (siehe Kapitel 2.1.5). Diese werden in der Regel nur bei Flachdächern bis zu einer Dachneigung von 5° eingesetzt, um der DIN EN 795 zu entsprechen. PV-

Montagesysteme in Kombination mit Gründächern, die direkt mit der Dachkonstruktion verbunden sind, sind nicht bekannt und werden aufgrund der höheren Schadanfälligkeit und der erschwerten Kontrolle der Dachdurchdringungen nicht empfohlen.

Dachbelegungsarten: Gründach und PV-Anlagen

Horizontale Aufstellung

Die horizontale Aufstellung (Modulneigung 0°) von PV-Modulen auf Gründächern wurde zweitweise für Solargründächer in Form von PV-Röhrenmodulen angeboten, konnte sich aber nicht durchsetzen (siehe Kapitel 2.2.1 und Abbildung 17).

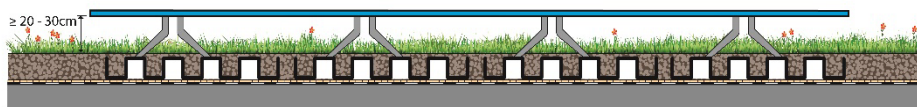


Abbildung 17: Solargründach mit horizontaler Ausrichtung der PV-Module (Quelle: BuGG)

Geneigte Aufstellung in Süd-Ausrichtung

Die aufgeständerte, von der Substratauflast gehaltene Bauweise mit Neigungen der PV-Module von 10–45° ist die am häufigsten verwendete Art der Solargründachsysteme. Die Ausrichtung und Neigung der PV-Module wird dabei abhängig von den Standortbedingungen und den Nutzungszielen gewählt. Der Schichtaufbau des Gründaches ist in Kapitel 2.1.5 erläutert.

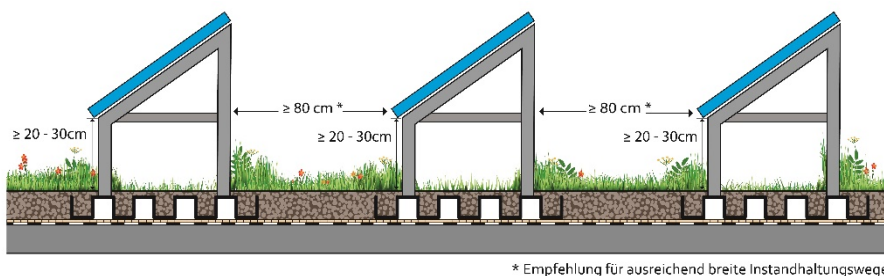


Abbildung 18: Solargründach mit geneigten PV-Modulen in Süd-Ausrichtung (Quelle: BuGG)

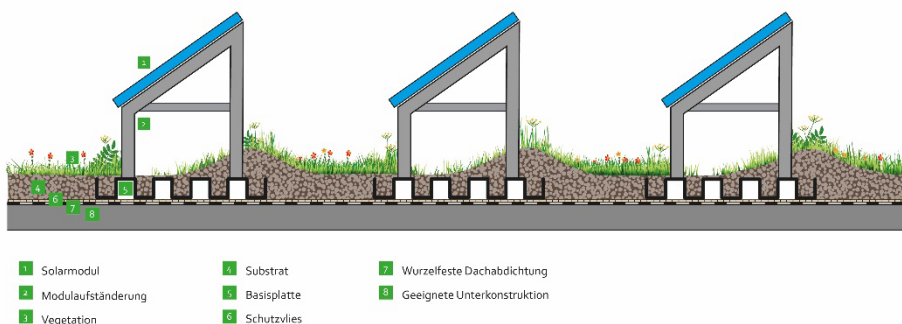


Abbildung 19: Solargründach mit moduliertem, wellenförmig angelegtem Substrataufbau. Analog zum Biodiversitätsgründach (Quelle: BuGG)

Die höchste jährliche Solareinstrahlung empfängt in Hamburg ein PV-Modul, das nach Süden ausgerichtet und mit einer Neigung von 35° montiert ist. Der Solarstromertrag ist proportional zur Solareinstrahlung und somit für diese Ausrichtung am höchsten. Wie in Kapitel 2.2.1 erläutert, ist bei der Aufstellung von Modulreihen, die alle nach Süden geneigt sind, ein Abstand zwischen den Reihen erforderlich, um die gegenseitige Verschattung zu minimieren, was die maximal installierbare PV-Leistung auf einer bestimmten Dachfläche bis zu 30 Prozent reduzieren kann (siehe Tabelle 1). Bei Solargründächern allerdings ist ein ausreichender Reihenabstand zur Belichtung und zur Pflege des Gründachs erforderlich, so dass dies keinen Nachteil mehr darstellt. In der Regel ist ein Reihenabstand von 80 cm bei einer Süd-Ausrichtung für die Vermeidung der gegenseitigen Verschattung und einer fachgerechten Pflege ausreichend groß (vgl. Abbildung 18).

Geneigte Aufstellung in Ost-West-Ausrichtung

Die geneigte Aufstellung von PV-Modulen in Ost-West-Ausrichtung hat auf nicht begrüntem Dach unter anderem das Ziel, die Abstände zwischen den Modulreihen deutlich zu reduzieren, um so auf dem vorhandenen Dach eine höhere PV-Leistung installieren zu können (siehe Kapitel 2.2.1). Bei Solargründächern kann dagegen auf den Reihenabstand nicht verzichtet werden, da dieser zur Belichtung und zur Pflege des Gründachs erforderlich ist. Allerdings kann durch die in Abbildung 20 dargestellte Aufstellung die Zahl der Wege zur Wartung reduziert und so die Installationsdichte etwas erhöht werden. Zwischen den Unterkanten der PV-Modulreihen ist ein reduzierter Abstand von 50 cm ausreichend für das Pflanzenwachstum [9] unter der Voraussetzung, dass der Abstand zwischen den Oberkanten der PV-Modulreihen mindestens 80 cm beträgt, was von dort eine fachgerechte Pflege und Wartung in beide Richtungen ermöglicht. Der Jahresstromertrag der Anlage ist bei dieser Aufstellart etwa 15 % geringer als bei reiner Südausrichtung, allerdings weist die Aufstellung eine gleichmäßigere Solarstromerzeugung im Tagesverlauf auf, was ökonomisch dann attraktiv ist, wenn so der Eigenverbrauch des Solarstroms gesteigert wird.

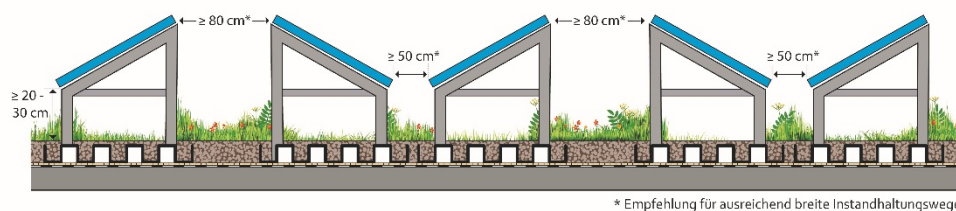


Abbildung 20: Solargründach mit geneigten PV-Modulen Ost-West-Ausrichtung (Quelle: BuGG)

Senkrechte Aufstellung

In der Schweiz werden zunehmend auflastgehaltene Solargründachsysteme mit senkrechter Aufstellung von bifazialen PV-Modulen installiert, die mittlerweile auch in Deutschland angeboten werden. Die bifazialen PV-Module können das einfallende Licht von beiden Seiten nutzen und in Strom umwandeln. Die Modulreihen sind üblicherweise von Süden nach Norden orientiert, so dass die Modulflächen nach Osten und Westen ausgerichtet sind (siehe Abbildung 21).

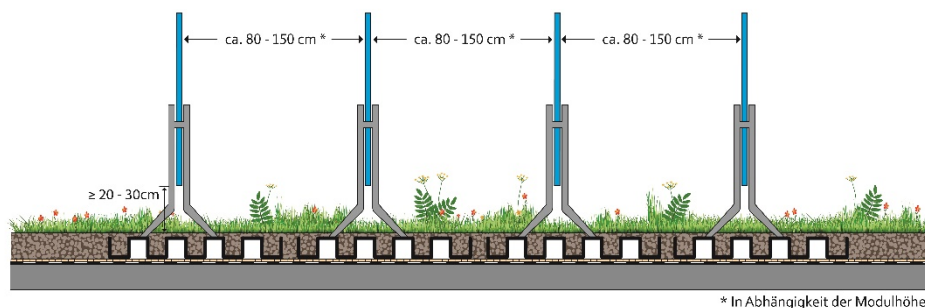


Abbildung 21 Solargründach mit senkrechter Aufstellung der PV-Module (Quelle: BuGG)

Vorteilhaft bei senkrechter Aufstellung ist, dass die Begrünung auf der ganzen Fläche fast gleichmäßig der Sonneneinstrahlung und Niederschlägen ausgesetzt ist und genügend Platz für die Vegetation als auch die Instandhaltung der Anlage zur Verfügung steht. Sollten Pflanzen höher wachsen ist das Problem der Verschattung hier geringer als bei den anderen Aufstellarten. Je nach System können auch bestehende Gründächer nachträglich mit teilweise geringer Balastierung auf der Vegetationstragschicht mit bifazialen Modulen ausgestattet werden (ohne das Substrat aufnehmen zu müssen).

2.2.3

Basisdaten der im Gutachten berücksichtigten Solargründächer

Im Folgenden werden **Solargründächer mit geneigter Aufstellung der PV-Modulreihen in Süd- oder in Ost-West-Ausrichtung auf einem Gründach mit extensiver Begrünung und 10 cm Substratdicke betrachtet**. Da die horizontale und die senkrechte Aufstellung von PV-Modulen auf Solargründächern bislang selten vorkommen und auch keine belastbaren Daten zu Vor- und Nachteilen vorliegen, werden diese nicht weiter berücksichtigt.

Bei geneigter Aufstellung in Süd-Ausrichtung ergibt sich kein Unterschied für die PV-Anlage, ob sie auf einem begrünten oder einem nicht begrünten Dach installiert wird. Dies ist bei Ost-West-Ausrichtung der PV-Anlage anders. Bei Montage auf einem nicht begrünten Dach können die PV-Modulreihen mit deutlich geringeren Reihenabständen installiert werden als bei einer Installation auf einem Gründach.

Im Gutachten wird für verschiedene Dachgrößen die Wirtschaftlichkeit von PV-Anlagen, Gründächer und Solargründächer berechnet. Für ein Beispieldach von 500 m² Bruttodachfläche und einer Abmessung von 20 m mal 25 m ergeben sich die folgenden Daten. Die Bruttodachfläche ist die Außenmaße der gesamten Dachfläche eines Gebäudes. In Abbildung 22 entspricht diese dem Rechteck „A“. „B“ ist die Gründachfläche inklusive dem Gründach-Randstreifen, der üblicherweise aus einem Kiesstreifen besteht. Zwischen „A“ und „B“ liegt die Attika, die auf allen Seiten mit 0,5 m Breite angenommen wird. „B“ weist somit eine Fläche von 456 m² auf. Diese Gründachfläche entspricht 91,2 % der Bruttodachfläche, was deutlich größer ist als die nach § 16 Absatz 4 HmbKliSchG geforderte Mindestgröße von 70 %.

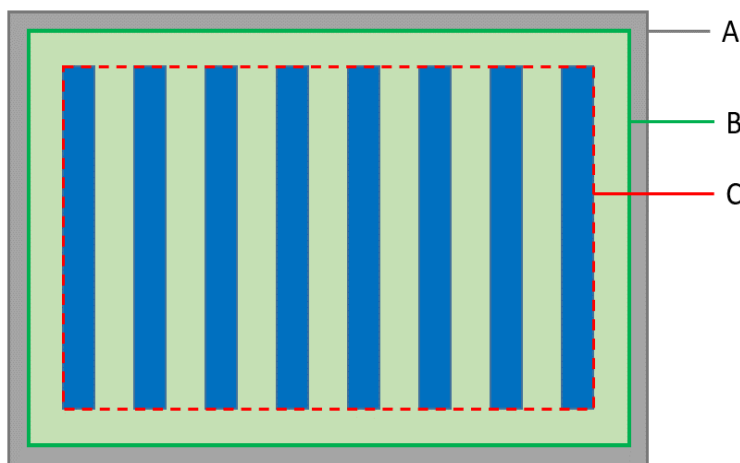


Abbildung 22: Sicht von oben auf ein Flachdach mit Solargründach mit Attika (graue Fläche), Gründach (grün umrandete Fläche) und PV-Modulreihen (blaue Flächen). A umschreibt die Bruttodachfläche, B die Gründachfläche inklusive Randstreifen und C die Außenkante der Solarinstallationsfläche

Zwischen der Solarinstallationsfläche „C“ und der Attika („B“) befindet sich ein auf allen Seiten 1 m breiter Randstreifen, der zur Wartung der PV-Anlage, aber auch zur Wartung und Reinigung der Fassade oder auch zur Aufstellung von technischen Geräten genutzt werden kann. Hier wird davon ausgegangen, dass dies der bekieste Randstreifen der Gründachfläche ist, der noch zu dieser hinzugezählt wird. In diesem Beispiel weist „C“ eine Fläche von 374 m² auf.

Somit werden im Folgenden drei PV-Anlagenvarianten verglichen:

1. Geneigte PV-Anlage in Süd-Ausrichtung (sowohl mit als auch ohne Gründach)
2. Geneigte PV-Anlage in Ost-West-Ausrichtung auf einem nicht begrünten Dach
3. Geneigte PV-Anlage in Ost-West-Ausrichtung auf einem Gründach

Für diese drei Fälle sind die Geometrien der Aufständering und die Erträge in Tabelle 1 gegenübergestellt. Für sie werden Annahmen getroffen für die Berechnungen der installierbaren Leistungen, des Solarstromertrags, der Kosten und der Wirtschaftlichkeit. Weiter werden die Gründächer und die PV-Anlagen in ihrer Größe zueinander in Bezug gesetzt.

Nach § 16 Absatz 3 HmbKliSchG muss auf Neubauten 30 % der Bruttodachfläche mit einer Photovoltaikanlage bedeckt sein. Im genannten Beispiel bezieht sich dies auf die Fläche „A“, d.h. 150 m² der Dachfläche muss mit PV-Modulen bedeckt sein. Bei einer Modulneigung von 10° ist hierfür eine Modulfläche von mindestens 152,3 m² erforderlich, bei stärkerer Modulneigung von 35° eine Modulfläche von mindestens 183,1 m². Bei Dachsanierung bezieht sich die Forderung von 30 % auf die Nettodachfläche, d.h. die solargeeignete Dachfläche. In dem genannten Beispiel weist das Dach keinerlei Störungen auf, so dass die Nettodachfläche mit der Fläche „B“ gleichzusetzen ist. Damit muss bei der Bestandssanierung eine Dachfläche von 136,8 m² mit den PV-Modulen

bedeckt sein. Die Modulfläche beträgt somit bei 10° Neigung mindestens 138,9 m² und bei 35° Neigung mindestens 167,0 m².

Dachbelegungsarten: Gründach
und PV-Anlagen

Auf Basis dieser Geometrien ergeben sich für die verschiedenen Belegungsarten die in Tabelle 1 gezeigten Modulflächen und Erträge für das Beispiel eines Flachdaches mit 500 m² Bruttodachfläche (20 x 25 m Außenmaße).

Tabelle 1: Modulflächen für ein 500 m² großes Flachdach für drei PV-Anlagenvarianten

PV-Anlagenvarianten	Reihen- abstand (Mittel- wert)	Modul- länge	Modul- neigung	Länge Module + Ab- stände Dach- ebene	Modul- fläche MDF	Verhält- nis Modul-/ Brutto- dach- fläche
	m	m	-	m	m²	-
Süd-Ausrichtung mit / ohne Gründach	0,80	1,0	35°	1,62	231	46 %
Ost-West Ausrichtung ohne Gründach	0,18	2,0	10°	2,32	328	66 %
Ost-West-Ausrichtung mit Gründach	0,65	2,0	10°	3,27	231	46 %

Wie Tabelle 1 zeigt, kann auf einem Flachdach mit 500 m² Bruttodachfläche ohne Gründach eine PV-Anlage in Ost-West-Ausrichtung installiert werden, die mit 328 m² eine deutlich größere PV-Modulfläche aufweist als bei einer Süd-Ausrichtung mit 231 m² Modulfläche. Werden bei Ost-West-Ausrichtung der PV-Modulreihen auf einem Gründach wie oben beschrieben die empfohlenen Mindestabstände zwischen PV-Modulreihen eingehalten, ergibt sich eine Modulfläche von ebenfalls 231 m² wie bei Süd-Ausrichtung. Berücksichtigt sind dabei bei Ost-West-Ausrichtung ohne Gründach ein Reihenabstand von 0,35 m alle 2 Modulreihen und im mit Gründach ein Abstand abwechselnd von 0,8 m und von 0,5 m, d.h. im Schnitt 0,65 m. Da allerdings die PV-Module nur 10° geneigt sind, ergibt sich dieselbe Modulfläche wie bei der Südaufstellung. Auf Gründächern kann also bei Ost-West-Ausrichtung keine größere PV-Leistung installiert werden als bei Süd-Ausrichtung.

Wie Tabelle 2 zeigt, kann bei dem dargelegtem Beispiel bei Südausrichtung eine Modulfläche von 231 m² und eine PV-Anlagenleistung von 46,2 kWp bei einem Wirkungsgrad von 20 % installiert werden. Bei Ost-West-Ausrichtung ohne Gründach sind es 328 m² und 65,5 kWp und mit Gründach ergeben sich fast identische Werte wie bei Süd-Ausrichtung. Aufgrund des niedrigeren spezifischen Solarstromertrags bei Ost-West-Ausrichtung ergibt sich auf dem Gründach ein Stromertrag von 83 % gegenüber der Südausrichtung und gleicher PV-Leistung. Bei der Ost-West-Ausrichtung ohne Gründach ist die PV-Leistung 42 % größer als bei Südausrichtung, allerdings ist der Stromertrag nur 17 % größer.

Tabelle 2: Installierte PV-Leistung und Solarstromertrag für drei PV-Anlagenvarianten für 500 m² Flachdach-Fläche

Dachbelegungsarten: Gründach und PV-Anlagen

PV-Anlagenvarianten	Modul- fläche MDF	Installierte PV- Anlagen- leistung	Spezi- fischer Solar- strom- ertrag pro Jahr	Solar- strom- ertrag pro Jahr gesamt	Solar- strom- ertrag relativ zur Südaus- richtung
	m ²	[kWp]	[kWh/ kWp/a]	[kWh/a]	
Südausrichtung mit / ohne Gründach	231	46,2	987	45.600	100 %
Ost-West Ausrichtung ohne Gründach	328	65,5	817	53.514	117 %
Ost-West-Ausrichtung mit Gründach	231	46,2	817	37.745	83 %

Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass auf Gründächern die Aufstellung der PV-Anlagen in Ost-West-Ausrichtung keine Vorteile bringt in Bezug auf die installierbare PV-Leistung und der erzielbare Solarstromertrag nicht nur spezifisch, sondern auch absolut niedriger ist als bei Süd-Ausrichtung. **In Süd-Ausrichtung um 35° geneigte PV-Anlagen auf Gründächern werden in diesem Gutachten als Referenz zum Nachweis der Wirtschaftlichkeit verwendet**, da sie unter Standardannahmen die wirtschaftlichste Installationsart darstellen und auf allen Flachdächern installiert werden können. Dabei können durchaus PV-Anlagen auf Gründächern in Ost-West-Ausrichtung auch wirtschaftlich attraktiv sein, wenn durch das veränderte Solarstromerzeugungsprofil der ökonomisch vorteilhafte Eigenverbrauch dadurch erhöht werden kann. Dieser Vorteil hängt allerdings von den konkreten Bedingungen ab und kann nicht verallgemeinert werden. Um die heute übliche Ost-West-Ausrichtung von PV-Anlagen ohne Gründach mit abzubilden, werden im Folgenden auch die Berechnungen für geneigte PV-Anlagen in Ost-West-Ausrichtung mit und ohne Gründach durchgeführt.

2.3

Empfehlungen für die Umsetzung von Solargründächern

2.3.1

Instandhaltung und Wartung von Gründächern

Sowohl Dachbegrünung als auch PV-Anlage bedürfen einer regelmäßigen und fachgerechten Instandhaltung und Wartung. Entsprechende Wartungswege und Absturzsicherungen sind hierfür einzuplanen. Die Instandhaltung von Dachbegrünung und Montagesystem übernimmt der Gründach-Fachbetrieb, die Instandhaltung der PV-Anlage inklusive der Elektronik obliegt dem Solar-Fachbetrieb.

Der früher bei Dachbegrünungen verwendete Begriff "Pflege" lautet nun "Instandhaltung" [1]. Beide Begriffe werden in diesem Gutachten gleichbedeutend verwendet. Die Instandhaltung betrifft die verschiedenen Pflegearten bei der Dachbegrünung und die

Wartung betrifft alle "technischen" Bereiche bei Dachbegrünung, Dachabdichtung und PV-Anlagen.

Dachbelegungsarten: Gründach
und PV-Anlagen

Es wird zwischen Fertigstellungs-, Entwicklungs- und Unterhaltungspflege unterschieden [7]. Die Fertigstellungspflege gehört zur Herstellung einer Dachbegrünung. Sie erfolgt nach der Aufbringung der Pflanzen und soll das Anwachsen und Etablieren der Vegetation sicherstellen. In der Regel dauert die Fertigstellungspflege 12 Monate, wobei in den Wintermonaten keine Pflege notwendig ist. Da das Erreichen des geplanten Vegetationsziels (Mindestdeckungsgrad von 60 %) ohne die Vergabe und Ausführung der Fertigstellungspflege gefährdet ist, wird auf deren Wichtigkeit besonders hingewiesen.

Bei der **Fertigstellungspflege** sind unter anderem je nach Bedarf folgende Tätigkeiten auszuführen:

- Anfangsbewässerung, Bewässerung bei Auflaufen der Saat, ggf. Intervallbewässerung bis zu Abnahme.
- Entfernen von unerwünschtem Fremdbewuchs.
- Flächenschnitt.
- Entfernen des Schnittgutes, Laub und Unrat.
- Ggf. Start- und Folgedüngungen.
- Nachsaaten bzw. Nachpflanzungen bei Fehlstellen.
- Nachfüllen von Substrat.
- Pflanzenschutz.

Weitere besondere Leistungen sind:

- Freihalten von Rand- und Sicherheitsstreifen sowie von Platten- und anderen Belägen.
- Freihalten von unerwünschtem Aufwuchs.
- Säubern von Sicherheitsrinnen, Kontrollschächten, Dachabläufen und anderen Entwässerungseinrichtungen.

In der Regel können bei extensiven Gründächern ein bis drei Pflegegänge im Rahmen der Fertigstellungspflege pro Jahr erforderlich werden. Das Ziel der Fertigstellungspflege ist die Erreichung eines Pflanzen-Deckungsgrades von mindestens 60 %.

Die **Entwicklungspflege** beginnt nach der Abnahme im Anschluss an die Fertigstellungspflege, um das angestrebte Vegetationsziel und einen Deckungsgrad von etwa 90 % zu erreichen. Sie geht in die **Unterhaltungspflege** über, die das erreichte Vegetationsziel erhalten soll.

Der Pflegeaufwand eines Solargründaches ist auch bei fachgerechter Planung und Ausführung etwas höher als bei vergleichbaren Gründächern ohne PV-Anlage. Solargründächer sollten jährlich zwei bis viermal, insbesondere in den Wuchsphasen zwischen März bis Juni, kontrolliert und ggf. zurückgeschnitten werden. Grundsätzlich sollte jeweils im Frühjahr und Herbst eine Pflege stattfinden.

Bei Solargründächern kommen zusätzlich zu den vorgenannten Tätigkeiten noch dazu:

- Überprüfung der Vegetationsdeckung und Substratschichtstärken auf Fehlstellen durch Winderosion. Vor allem bei auflastgehaltenen Systemen. Fehlendes Substrat ist zu ersetzen und Vegetation ist nachzupflanzen.
- Sichtprüfung der Standfestigkeit der Modulaufständigung.

Dachbelegungsarten: Gründach
und PV-Anlagen

2.3.2

Wartung von PV-Anlagen auf Gründächern

PV-Anlagen sind weitgehend wartungsfrei. Die jährliche Inspektion der Anlagen beschränkt sich auf eine Sichtkontrolle bezüglich möglicher Schäden der Anlage und bei hohem Schmutzaufkommen ggf. auf die Reinigung der Module. Bei PV-Modulen mit Neigungen ab 10° ist eine Reinigung in der Regel jedoch nicht erforderlich, da der Regen die Module säubert, außer in Regionen mit hohem Blütenstaubanteil und bei längeren Trockenzeiten.

Solarfirmen bieten teilweise die elektronische Fernüberwachungen von PV-Anlagen an, was die automatische Überprüfung des ordnungsgemäßen Betriebs anhand der erzeugten Solarstrommenge ermöglicht.

Folgende Wartungsmaßnahmen sind bei Bedarf durchzuführen:

- Sichtkontrollen bei der jährlichen Wartung (z. B. auf Isolationsschäden bei Kabeln, Beschädigungen der Verteilerkästen, Beschädigungen an Wechselrichtern oder sonstigen Bauteilen).
- Sichtkontrollen im Bedarfsfall nach Stürmen bzw. Gewittern.
- Sichtprüfung der Standfestigkeit des Montagesystems.
- Kontrolle aller Anlagenteile auf Beschädigungen (Witterungseinflüsse, Ablagerungen an den Modulen, Bewuchs, hängende Kabel, die den Dachbegrünungspflegenden bei der Arbeit behindern können).
- Alle 4–5 Jahre sollte eine wiederkehrende Prüfung nach DIN EN 6 2446-1 durchgeführt werden.

2.3.3

Grundsätze bei der Umsetzung von Solargründächern

Für die nachhaltige Umsetzung von Solargründächern sind folgende Grundsätze zu beachten [7, 9]:

- **Vermeidung der Verschattung der aufgeständerten PV-Module.**
Empfohlen wird eine Mindesthöhe von 20–30 cm zwischen Oberkante Substrat und Unterkante PV-Modul sowie die Verwendung von niedrigwüchsiger Vegetation. Um diese zu etablieren und das Aufkommen hoher Pflanzenbestände zu vermeiden, wird eine eher geringe Substrathöhe von ca. 9–11 cm empfohlen. Der Aufbau kann partiell höher sein, um bei auflastgehaltenen Montagegestellen die Mindestauflast erbringen zu können.
Aufgrund des niedrigen Gründachaufbaus (Substrathöhe) kann die

Pflanzenvielfalt eingeschränkt und ein "klassisches" Biodiversitätsgründach mit höherwüchsigen Pflanzen und Biodiversitätsbausteinen nur bedingt umsetzbar sein.

Andererseits entstehen durch die PV-Module neue Habitate, die eine artenreiche Fauna nach sich ziehen können. Zudem gibt es Vorschläge zur artenreichen Pflanzenauswahl mit niedrigwüchsigen Arten. Eine Auswahl an Pflanzen ist u.a. in der Broschüre "Hamburger Naturdach" zu finden [10].

- **Ausreichend Reihenabstände zwischen den PV-Modulreihen.**

Die PV-Module und Modulreihen sind so aufzustellen, dass der Lichteinfall ein natürliches Pflanzenwachstum auch unter den Modulen ermöglicht und dass die Instandhaltung (Pflege) der Grünfläche gut machbar ist. Der Reihenabstand sollte bei einer Süd-Ausrichtung 80 cm und bei einer Ost-West-Ausrichtung zwischen den Unterkanten 50 cm und zwischen den Oberkanten der PV-Module 80 cm betragen.

- **Einsatz auflastgehaltener Solargründach-Systeme.**

Durch den Zusatznutzen des Substrats als Auflast für das PV-Montagegestell wird eine lage- und sturmsichere Befestigung ohne Dachdurchdringung und ohne Reduzierung der begrüneten Flächen erreicht. Auflastgehaltene Montagegestelle können bei Flachdächern bis 5° Dachneigung eingesetzt werden. Soweit bekannt, werden auf dem Markt keine auflastgehaltene PV-Montagegestelle für eine Verwendung über 5° Dachneigung angeboten. Die PV-Anlagen werden in diesem Fall i.d.R. mit der Dachkonstruktion mechanisch verbunden.

- **Regelmäßige fachgerechte Instandhaltung (Pflege) und Wartung.**

Bei extensiver Begrünung ist der Pflegeaufwand des Gründaches begrenzt, auch die PV-Anlage ist wartungsarm. Trotzdem sollte mindestens einmal jährlich eine Begehung stattfinden, das Gründach gepflegt und die PV-Anlagen überprüft werden. Zur Pflege und Wartung von Gründächern hat die Stadt Hamburg eine Handreichung bereitgestellt [11].

- **Kooperative Planung und Umsetzung von Solargründächern.**

Die rechtzeitige Einbeziehung und Koordination aller beteiligten Gewerke bei der Planung und Ausführung des Solargründachs sind die Voraussetzung für eine reibungslose und effiziente Realisierung eines qualitativ hochwertigen Solargründachs. Planende und Ausführende des Dachdeckerhandwerks, des Garten- und Landschaftsbaus und des Elektrohandwerks müssen unter der Leitung des Planenden informiert, integriert und koordiniert werden.

Wirtschaftlichkeitsberechnungen

Das HmbKliSchG in der Fassung vom 13. Dezember 2023 verpflichtet in §16 Absatz 4 **zur Errichtung von Solargründächern**. Konkret haben Eigentümerinnen und Eigentümer von Gebäuden, deren Baubeginn nach dem 1. Januar 2027 liegt, zu errichtende Dächer mit bis zu 10° Dachneigung mit mindestens 70 % der Bruttodachfläche dauerhaft, struktur- und artenreich und mindestens extensiv zu begrünen. Dies gilt auch bei wesentlichen Umbauten des Daches eines Gebäudes, die nach dem 1. Januar 2027 begonnen wurden und unter der Maßgabe, dass die Nettodachfläche zu begrünen ist. Die **Solargründach-Pflicht soll u.a. entfallen, wenn ihre Erfüllung wirtschaftlich nicht vertretbar** ist. In diesem Kapitel wird erläutert, was in diesem Gutachten unter dem Begriff „wirtschaftlich vertretbar“ verstanden wird und inwieweit PV-Dächer, Gründächer und Solargründächer in der Regel diese Bedingung erfüllen.

3.1

Grundsätzliche Bemerkungen zur Wirtschaftlichkeit

Das **Geschäftsmodell von PV-Anlagen** besteht darin, durch den Verkauf des erzeugten Solarstroms und/oder die Einsparung des vermiedenen Strombezugs die Kosten für die Investition und den Betrieb zu decken und darüber hinaus über den Nutzungszeitraum einen Gewinn zu erzielen. Die Wirtschaftlichkeit einer PV-Anlage hängt von einer Vielzahl von Parametern ab, die diese Kosten beeinflussen. Dies sind u.a. der Standort (Globalstrahlungsstärke), die Umgebung (Verschattung), die baulichen Gegebenheiten (Ausrichtung, Montagemöglichkeit, elektrischer Anschluss, etc.), die Marktentwicklung (Investitionskosten sowie Betriebs- und Wartungskosten), die Gebäudenutzung (möglicher Anteil des Eigenverbrauchs des Solarstroms) und die gesetzlichen Regelungen (Höhe der Einspeisevergütung).

Gründächer haben dagegen **kein klassisches Geschäftsmodell**, da den Investitions- und Betriebskosten keine Einnahmen gegenüberstehen. Allerdings können vermiedene Kosten gegengerechnet werden. Diese lassen sich oftmals schwer verallgemeinern, da sie stark von der konkreten Situation abhängig sind und es ist zu beachten, dass die Einsparungen teilweise den Eigentümerinnen und Eigentümern der Gründächer selbst und teilweise der Gesellschaft allgemein zugutekommen. Im zweiten Fall ergibt sich kein ökonomischer Vorteil für die Eigentümerinnen und Eigentümer. Die verschiedenen ökonomischen Vorteile von Gründächern wurden bislang nur in einzelnen Studien abgeschätzt und noch nicht systematisch erfasst. In diesem Kapitel werden diese eingesparten Kosten einzeln dargestellt und erläutert und typische Werte abgeleitet. Für die Kosten der Gründächer werden in Abhängigkeit von Aufbauhöhe, Montagesystem, Pflanzintensität, Flächengröße, Zugänglichkeit sowie für Instandhaltung (Pflege) und Wartung typische Daten erhoben.

Das **Geschäftsmodell von Solargründächern** ergibt sich aus der Addition aller Kosten, Einnahmen und Einsparung der Teilsysteme PV-Anlage und Gründach. Zu berücksichtigen sind die Solargründach-spezifischen Aspekte wie z.B. das PV-Montagesystem und die Aufbauhöhe des Gründachs.

Die Wirtschaftlichkeit wird für die ermittelten typischen Rahmenbedingungen berechnet. Da die verschiedenen Kosten, Einnahmen und Einsparungen im Einzelfall deutlich abweichen können, **sind die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsrechnungen nicht für alle Gebäude in Hamburg gültig, sondern für die typischen Fälle**. Es wird davon ausgegangen, dass die Ergebnisse somit auf die Mehrzahl der Gebäude in Hamburg zutreffen, dass es aber auch Gebäude gibt, wo dies nicht der Fall ist.

Die Wirtschaftlichkeit von Solar Gründachanlagen kann sich mit der Zeit verändern, da sich sowohl die Preise der Anlagen als auch die Einnahmen und Einsparungen kontinuierlich ändern. Da die Solargründach-Pflicht ab dem Jahr 2027 wirksam werden soll, wäre es naheliegend, Prognosen für die zeitliche Entwicklung der Wirtschaftlichkeit zu erarbeiten. Allerdings sind Prognosen von Preis- und Kostenentwicklungen mit großen Unsicherheiten verbunden, wie gerade die letzten zwei Jahre gezeigt haben. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass die PV-Anlagen aufgrund weiterer technischer Fortschritte und auch die Gründächer aufgrund eines deutlichen Marktausbaus tendenziell günstiger werden. Weiter kann von einer Steigerung der Kosteneinsparungen aufgrund erhöhter Kosten für den Strombezug sowie Gebührensteigerungen z.B. für die Entwässerung ausgegangen werden. Diese Effekte dürften mögliche Kostensteigerungen im Personalbereich für Montage und Pflege überkompensieren.

Vor diesem Hintergrund **wird in diesem Gutachten die Wirtschaftlichkeit für die heutige Situation berechnet und davon ausgegangen, dass diese künftig gleichbleibt oder sich verbessert. Sollten sich die wesentlichen Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit von Solargründächer signifikant verschlechtern**, indem sich die Kosten der PV-Anlagen und des Gründachs in den kommenden Jahren deutlich stärker erhöhen als die Einsparungen bzw. Vergütungen, **empfiehlt sich eine Aktualisierung der Wirtschaftlichkeitsrechnung z.B. im Jahr vor Inkrafttreten der Solargründach-Pflicht**. Sollten sich die Rahmenbedingungen für die Nutzung von Solargründächer tendenziell weiter verbessern, wovon im Allgemeinen ausgegangen wird, ist dies nicht erforderlich.

3.2 Definition der wirtschaftlichen Vertretbarkeit

Nach § 16 Absatz 5 Nummer 3 HmbKliSchG entfällt die Pflicht zur Installation einer Photovoltaik-Anlage bzw. eines Solargründachs, „soweit ihre Erfüllung wirtschaftlich nicht vertretbar ist“. In diesem Kapitel wird erläutert, wie dies im Rahmen dieser Studie definiert wird.

3.2.1

Definition wirtschaftliche Vertretbarkeit für PV-Anlagen

Die Definition der wirtschaftlichen Vertretbarkeit für PV-Anlagen wird aus Gründen der Konsistenz aus dem Gutachten zur PV-Pflicht aus dem Jahr 2020 übernommen [12]:

- Die Installation einer Photovoltaik-Anlage ist dann **wirtschaftlich vertretbar**, wenn generell die erforderlichen Aufwendungen für deren Errichtung und Betrieb innerhalb der üblichen Nutzungsdauer durch die eintretenden Einnahmen und Einsparungen erwirtschaftet werden können.

- Die vertretbare Wirtschaftlichkeit ist für **Fallgruppen** und typische PV-Anlagendaten innerhalb dieser Fallgruppen nachzuweisen. Damit muss nicht für jede einzelne PV-Anlage die wirtschaftliche Vertretbarkeit nachgewiesen werden und gegeben sein.
- Als **übliche Nutzungsdauer** von PV-Anlagen wird ein Zeitraum von 25 Jahren angenommen.

Die Definition ist an § 5 des Gebäudeenergiegesetzes (GEG) angelehnt [13].

Zwar beträgt die Nutzungsdauer von PV-Anlagen in der Regel 25 oder mehr Jahre, doch wurde in § 4 Absatz 2 Nummer 1 HmbKliSchUmsVO vom Dezember 2020 und auch in deren Aktualisierung in § 5 Absatz 1 Nummer 2 PVUmsVO vom April 2024 festgelegt, dass die Wirtschaftlichkeit nicht vertretbar ist, wenn die Amortisationszeit der Kosten der Photovoltaikanlage mehr als 20 Jahre beträgt. Dies ist bislang ein üblicher Zeitraum für die Wirtschaftlichkeitsberechnung, da die Einspeisevergütung für Solarstrom nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) über 20 Jahre festgeschrieben ist. Wie der Strom nach Ablauf dieser 20 Jahre vergütet wird, ist mit Unsicherheiten behaftet. Früher, als die Vergütungssätze für den Solarstrom höher lagen als die Preise für den bezogenen Strom, war dieses Vorgehen folgerichtig. Da heute die Gestehungskosten von Solarstrom in der Größenordnung von 10 ct pro kWh und damit deutlich niedriger liegen als die Preise für den bezogenen Strom von über 30 ct pro kWh, ist ein wirtschaftlicher Betrieb der PV-Anlage auch über die Nutzungsdauer von 20 Jahren hinaus sehr wahrscheinlich, da der Eigenverbrauch weiter möglich ist und der Netzbetreiber den Solarstrom weiter abnehmen und vergüten muss. Die Vergütungshöhe hängt allerdings vom Börsenstrompreis ab, der volatil ist und im ersten Quartal 2024 bei etwa 6-7 ct pro kWh lag.

Da immer mehr PV-Anlagen mehr als 20 Jahre in Betrieb sind und somit zunehmend Erfahrungen bezüglich der wirtschaftlichen Aspekte des Weiterbetriebs der Anlagen gesammelt werden, kann es sinnvoll sein, im Rahmen einer zukünftigen Novelle der PVUmsVO zu prüfen, ob es sinnvoll ist, die Amortisationszeit im Zusammenhang der Berechnung der Wirtschaftlichkeit auf 25 Jahre zu erhöhen, was die Anforderung an die Wirtschaftlichkeit etwas reduziert.

3.2.2

Definition der wirtschaftlichen Vertretbarkeit von Gründächern und Solargründächern

Das HmbKliSchG macht keinen Unterschied bei der Forderung der wirtschaftlichen Vertretbarkeit zwischen PV-Anlagen und Solargründächern. Deshalb wurde in diesem Gutachten für die Definition der wirtschaftlichen Vertretbarkeit für Solargründächer die oben genannte Definition für PV-Anlagen übernommen und wo notwendig wie folgt angepasst:

- Die Installation eines Solargründaches ist dann **wirtschaftlich vertretbar**, wenn generell die erforderlichen Aufwendungen für deren Errichtung und Betrieb abzüglich aller üblicherweise resultierenden einmaligen und regelmäßigen Einsparungen und Mehrwerte für die Gebäudeeigentümer:innen sowie für die Gesellschaft aus der Umsetzung des Gründaches innerhalb der üblichen Nutzungsdauer durch die eintretenden Einnahmen und Einsparungen aus dem Betrieb der PV-Anlage erwirtschaftet werden können.

- Die vertretbare Wirtschaftlichkeit ist für **Fallgruppen** und typische Solargründachdaten innerhalb dieser Fallgruppen nachzuweisen. Damit muss nicht für jedes einzelne Solargründach die wirtschaftliche Vertretbarkeit nachgewiesen werden und gegeben sein.
- Als **übliche Nutzungsdauer** von Solargründächern wird ein Zeitraum von 25 Jahren angenommen, wobei gleichzeitig eine Verlängerung der Nutzungsdauer der Dachabdichtung auf 40 Jahre berücksichtigt ist. In § 5 Absatz 1 Nummer 2 PVUmsVO wurde jedoch die mindestens zu erreichende **Amortisationszeit** als Grenze zur wirtschaftlichen Vertretbarkeit auf 20 Jahre festgesetzt, da dies traditionell als Mindesthaltbarkeit für PV-Anlagen angesehen wird und auch die Einspeisevergütung auf 20 Jahre begrenzt ist. Diese spielt zwar heute meist eine untergeordnete Rolle, da der Eigenverbrauch und teilweise auch die Direktvermarktung attraktiver sind, doch gibt sie den Investoren eine Kalkulationssicherheit und wird vielfach weiter als Referenz verwendet.

Die Wirtschaftlichkeit von Gründächern berechnet sich in gleicher Art und Weise wie für das Solargründach mit dem Unterschied, dass darin die Einnahmen und Ausgaben der PV-Anlage nicht berücksichtigt werden.

3.2.3

Alternative Definition für die wirtschaftliche Vertretbarkeit von Solargründächern

Alternativ zur gewählten Definition für die wirtschaftliche Vertretbarkeit von Solargründächern könnten auch nur die Zusatzkosten und Zusatzeinnahmen und -einsparungen, die ein Solargründach gegenüber einem Gründach ohne PV-Anlage aufweist, berücksichtigt werden. Diese Definition wäre begründet, wenn es eine Gründachpflicht, wie sie in Bebauungsplänen festgesetzt wird, generell im Geltungsbereich des Gesetzes gäbe. In diesem Fall wäre es naheliegend, für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit des Solargründaches die grundsätzlichen Kosten des Gründachs, auf dem die PV-Anlage installiert wird, nicht einzubeziehen, sondern nur die Kosten der PV-Anlage inklusive der Mehrkosten, die die Montage auf dem Gründach verursacht sowie die Mehrkosten für den Bau und die Pflege des Gründachs, auf dem die PV-Anlage installiert wird im Vergleich zu einem Gründach ohne PV-Anlage. Konkret wären die Differenzkosten und Differenzeinnahmen und -einsparungen zwischen einem Solargründach und einem Gründach ohne PV-Anlage zu ermitteln und zu berücksichtigen.

Es gibt gute Gründe, die Gründachpflicht wirtschaftlich anders zu bewerten als eine PV-Pflicht. So sind gebäudetechnische Anlagen wie eine PV-Anlage nicht fester Bestandteil des Gebäudes und können zu jeder Zeit auf- und auch wieder abgebaut werden. Wird keine PV-Anlage auf dem Gebäude installiert und damit kein Solarstrom erzeugt, kann dieser ersatzweise aus dem Stromnetz z.B. aus PV-Freilandanlagen außerhalb der Stadt bezogen werden. Ein Gründach dagegen ist untrennbar mit dem Gebäude verbunden und verfolgt das Ziel, die Umweltbelastungen zu mindern, die durch das Gebäude entstehen. Dabei kann ein Teil seiner Funktionen, wie z.B. der Beitrag zur Vermeidung von Hitzeinseln oder von lokalen Überschwemmungen bei Starkregenereignissen nicht durch Ersatzmaßnahmen außerhalb der Stadt ersetzt werden. Ein weiterer Unterschied ist, dass ein größerer Anteil der Vorteile von Gründächern im Vergleich zu PV-Dächern vor allem vorteilhaft für die Gesellschaft insgesamt ist und keinen ökonomischen Vorteil für die

Eigentümer:innen dar stellt. Dies trifft z.B. auf die Unterstützung der Biodiversität und Reduzierung von Hitzeinseln zu. Dies spricht dafür, eine Gründachpflicht ohne Wirtschaftlichkeitsgebot zu erlassen.

Die **Wirtschaftlichkeit von Solargründächern könnte alternativ auch so berechnet werden, dass nur die Mehrkosten sowie die Mehreinnahmen und -einsparungen gegenüber einem Gründach ohne PV-Anlage berücksichtigt werden, wenn eine Gründachpflicht ohne Wirtschaftlichkeitsgebot gegeben wäre.** Da das HmbKliSchG jedoch keinen Unterschied zwischen der Wirtschaftlichkeit von PV-Anlagen und Solargründächern macht und eine generelle Gründachpflicht unabhängig von der PV-Pflicht nicht gegeben ist, wird in diesem Gutachten die in Kapitel 3.2.2 vorgestellte Definition verwendet.

3.3

Methodik der Wirtschaftlichkeitsberechnung

3.3.1

Berechnungsmethode und Zielsetzung der Wirtschaftlichkeitsrechnung

Bei Wirtschaftlichkeitsrechnungen von technischen Anlagen werden unterschiedliche Methoden angewandt. Die **Kostenvergleichsrechnung** hat das Ziel herauszufinden, mit welcher Investition eine konkrete Zielsetzung, z.B. die Wärmeversorgung eines Gebäudes, am kostengünstigsten erreicht werden kann. Für einen fundierten Vergleich der Investitionsvarianten sind alle relevanten Kostenarten zu berücksichtigen, vergleichbare Eingangsparameter zu verwenden und dieselben Betrachtungszeiträume anzuwenden. Hierbei wird üblicherweise die VDI Richtlinie 2067 „Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen“ angewandt. Das Ziel der Berechnung ist der ökonomische Vergleich von Anlagenvarianten, nicht die Berechnung einer Rendite, die z.B. bei Wärmeerzeugungsanlagen auch nicht vorhanden ist.

Mit der **Rentabilitätsrechnung** wird ermittelt, ob sich das Investment „lohnt“, was bedeutet, dass die erwartete Rendite des Investments gleich oder höher ist als bei anderen Investitionen oder Geldanlagen mit vergleichbarem Risiko. Die Renditerechnung dient der Entscheidung, ob ein Investment durchgeführt werden soll oder nicht. Berechnet wird z.B. der interne Zinssatz (auch interner Zinsfuß, engl. internal rate of return, IRR), d.h. der Diskontierungssatz, bei dem sich für eine Investition ein Kapitalwert von Null errechnet [14]. Ist der Zinsfuß größer als die Kapitalzinsen plus Risikoaufschlag, ist die Investition über die Gesamtlaufzeit profitabel. Die Rechnung geht davon aus, dass sich der Investor frei entscheiden kann, ob er ein Investment durchführt oder nicht. Bei der **Amortisationsrechnung** wird dieselbe Methodik wie bei der Rentabilitätsrechnung genutzt, allerdings nicht berechnet, wie hoch die Rendite ist, sondern wie lange es dauert, bis das eingesetzte Kapital wieder zurück an den Investor fließt. Es soll also ermittelt werden, ob das Investment vor Erreichen der Nutzungsdauer refinanziert ist.

Für die Berechnung der vertretbaren Wirtschaftlichkeit, wie sie in Kapitel 3.2.1 und 3.2.2 definiert ist, ist die Amortisationsrechnung die entsprechende Methode. **Im Folgenden wird damit die Amortisationszeit der PV-Anlagen, Gründächer und Solargründächer berechnet.**

3.3.2

Angewandtes Verfahren und Software zur Wirtschaftlichkeitsrechnung

Wirtschaftlichkeitsberechnungen von PV-Anlagen müssen verschiedene Zahlungsströme und Eingangsparameter berücksichtigen, die von den Geschäftsmodellen für den Betrieb der Anlagen abhängen können. Berechnungen von unterschiedlichen Akteur:innen kommen oftmals zu unterschiedlichen Ergebnissen, weil unterschiedliche Eingangsparameter gewählt und Berechnungsschritte verwendet wurden. Das macht es Außenstehenden schwer, die Ergebnisse aus unterschiedlichen Quellen zu vergleichen.

Um eine möglichst große Transparenz bezüglich der Wirtschaftlichkeitsrechnungen zu erreichen und allen Interessierten die Durchführung eigener Berechnungen auf derselben Basis zu ermöglichen, wurden die Wirtschaftlichkeitsrechnungen in diesem Gutachten mit der Software „Wirtschaftlichkeit von Solarstrom“ des Münchner Umweltinstituts e.V. durchgeführt. Das Institut bietet die Excel-basierte Berechnungssoftware kostenfrei auf seiner Internetseite zum Download an [15]. Die verwendeten Berechnungsmethoden wurden nachvollzogen und werden als fundiert angesehen. Für die Korrektheit der Berechnungen wird jedoch vom Herausgeber der Software und somit auch von den Autor:innen dieser Studie keine Gewähr übernommen.

Aus Gründen der Vergleichbarkeit wurde für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit von Solargründächern dieselbe Software genutzt wie für PV-Anlagen ohne Gründach. Hierzu wurden sowohl für die Investitionskosten als auch die jährlichen Betriebskosten jeweils die Gesamtkosten für das Solargründach abzüglich der einmaligen bzw. jährlichen Einsparungen, die durch das Gründach erzielt werden, angesetzt. Somit stammen die Einnahmen weiterhin nur aus der Einspeisevergütung und dem eingesparten Stromkosten.

3.4

Fallgruppen der Wirtschaftlichkeitsberechnungen

Die Wirtschaftlichkeitsberechnungen wurden für mehrere Fallgruppen durchgeführt, die sich an den Vergütungsstufen nach EEG und an typischen Dachgrößen für die Ermittlung der Gründachkosten orientieren. Die Gründachkosten werden in Kapitel 3.5.3 dargestellt. Weiter wird unterschieden, ob eine PV-Anlage ihren Strom ausschließlich in das öffentliche Netz einspeist oder ob ein Teil des Solarstroms im Gebäude genutzt werden kann (sogenannter Eigenverbrauch). Dabei wurden alle Berechnungen sowohl für die Ausrichtung der PV-Module nach Süden als auch nach Ost-West durchgeführt (siehe Kapitel 2.2.3).

Photovoltaik-Mieterstromanlagen werden nicht betrachtet, da deren Wirtschaftlichkeitsberechnung komplex ist. Für die Prüfung der Wirtschaftlichkeit im Rahmen der PV- bzw. Solargründach-Pflicht ist dies auch nicht notwendig, denn wenn deren Amortisationszeit kürzer ist als bei Anlagen mit Volleinspeisung, ist die Wirtschaftlichkeit durch die Berechnung von Volleinspeisungsanlagen bereits erwiesen. Ist dies nicht der Fall, können die Verpflichteten die Volleinspeisung statt der Mieterstromanlage wählen.

Im Folgenden werden die Fälle der PV-Anlagen mit vollständiger Solarstrom-Einspeisung (Kapitel 3.4.1) und mit Eigenverbrauchsanteil (Kapitel 3.4.2) erläutert und danach die im Gutachten betrachteten Fallgruppen beschrieben (Kapitel 3.4.3).

3.4.1

PV-Anlagen mit Volleinspeisung des Solarstroms

Besteht keine Möglichkeit zum Eigenverbrauch des Solarstroms, der üblicherweise ökonomisch attraktiver ist, wird der erzeugte Solarstrom vollständig ins Stromnetz eingespeist. Dabei lassen sich drei verschiedene Arten der Solarstromvergütung unterscheiden.

- (1) Eine **festе Einspeisevergütung nach EEG** wird für PV-Anlagen bis zu einer Anlagengröße von 100 kW gewährt. Die Höhe der Vergütung hängt von der Anlagengröße (bis 10 kW, über 10 bis 40 kW und über 40 bis 100 kW für Dachanlagen) und vom Zeitpunkt der Inbetriebnahme der Anlage ab. Die Vergütung wird über 20 Jahre gewährt, wobei die am Anfang festgelegte Vergütungshöhe pro eingespeiste kWh Solarstrom über den gesamten Vergütungszeitraum konstant bleibt.
- (2) Bei der **Direktvermarktung des Solarstroms** wird der Solarstrom von spezialisierten Stromhändlern vermarktet. Die Betreibenden der PV-Anlage erhalten den Marktwert sowie eine gleitende Marktprämie abzüglich der Vermarktungspauschale für die Händler. Die Marktprämie wird monatlich so festgelegt, dass die resultierenden Einnahmen der Betreibenden dem „anzulegenden Wert“ nach dem Marktprämienmodell entsprechen und etwas über der EEG-Vergütung liegen, um die Direktvermarktung attraktiver zu machen als die Volleinspeisung. Die Direktvermarktung ist ab einer Anlagengröße von 100 kW verpflichtend und kann bei Anlagen kleiner 100 kW freiwillig statt der Einspeisevergütung gewählt werden.
- (3) Ermittlung der Vergütungshöhe über **Ausschreibungen**. Anlagen größer 1 MW müssen an einer Ausschreibung teilnehmen und erhalten die in der Ausschreibung angebotene Vergütung, wenn sie ausgewählt wurden.

In allen Fällen ist für die Höhe der Solarstromvergütung unerheblich, ob sich die PV-Anlagen im Eigentum der Gebäudeeigentümer:innen befinden oder diese ihre Dächer an Dritte zur Erzeugung von Solarstrom verpachtet haben. Bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung sind im Falle der Verpachtung ggf. noch zusätzlich Pachtkosten mit zu berücksichtigen; es wird jedoch davon ausgegangen, dass die Verpachtung nur erfolgt, wenn die Pachtkosten refinanziert werden können. Somit ist eine entsprechende Unterscheidung in den Berechnungen nicht erforderlich.

3.4.2

PV-Anlagen mit Eigenverbrauchsanteil

Aufgrund der starken Preisreduktion bei Solarstromanlagen liegen die Gestehungskosten für Solarstrom heute in Deutschland bei etwa 7,5 bis 11,5 ct/kWh [16] und damit deutlich niedriger als die Strombezugskosten der meisten Stromkunden. Der Strompreis für Privathaushalte betrug vor dem Krieg in der Ukraine im Bundesschnitt etwa 32 ct/kWh und stieg dann bis auf etwa 47 ct/kWh im 1. Quartal 2023 an (inkl. MWSt.) [17]. Der

Kostenvorteil beim Eigenverbrauch von Solarstrom resultiert aus der Vermeidung von Netzentgelten, netzseitigen Umlagen, Stromsteuer und Konzessionsabgaben, die bei aus dem Stromnetz der allgemeinen Versorgung bezogenem Strom zusätzlich zu den Erzeugungskosten anfallen.

Der Eigenverbrauch des Solarstroms ist das ökonomisch attraktivste Geschäftsmodell zum Betrieb von PV-Anlagen, da durch den vermiedenen Strombezug pro kWh deutlich mehr Stromkosten eingespart als durch die Solarstromeinspeisung an Einspeisevergütung pro kWh eingenommen werden können. Es kann davon ausgegangen werden, dass PV-Kleinanlagen bis 10 kW Leistung fast immer die Eigenstromversorgung nutzen, da sie meist auf selbstgenutzten Ein- und Zweifamilienhäusern installiert sind. Voraussetzung für die Eigenversorgung und die Nutzung der damit verbundenen Vorteile ist, dass der Solarstrom im unmittelbaren räumlichen Zusammenhang mit der Stromerzeugungsanlage selbst verbraucht und der Strom nicht durch ein Netz der allgemeinen Versorgung durchgeleitet wird. Weiter müssen die Verbraucher:innen die Stromerzeugungsanlagen selbst betreiben.

Der Anteil des selbst verbrauchten Stroms variiert stark in Abhängigkeit von der Strombedarfskurve (Wohngebäude weisen eine relativ geringe Übereinstimmung der Strombedarfs- und Solarstromerzeugungskurve auf, wenn die Bewohner vornehmlich abends zuhause sind, Gewerbebetriebe dagegen eine starke Übereinstimmung, wenn ihre Betriebszeiten nur tagsüber sind) sowie der Anlagengröße (je geringer der jährliche Solarstromertrag im Verhältnis zum gesamten Strombedarf ist, desto höher ist in der Regel der Anteil des Eigenverbrauchs). Privathaushalte weisen typischerweise für eine PV-Anlage, die im Jahr etwa so viel Strom erzeugt wie im Haus verbraucht wird, einen Eigenverbrauchsanteil von ca. 25 % auf [18]. Dieser Wert wird bei den folgenden Berechnungen für alle Anlagen mit Eigenverbrauch angewandt und somit als untere Grenze für den Eigenverbrauch betrachtet.

Der nicht selbst verbrauchte Solarstrom wird ins Netz der allgemeinen Versorgung eingespeist und wie bei der Volleinspeisung vergütet, entsprechend sind die Größenklassen für die Fallgruppen für die Volleinspeisung wie dem teilweisen Eigenverbrauch gleich.

Der Anteil des selbst verbrauchten Solarstroms kann, solange er unterhalb 100 % liegt, durch die Installation eines Batteriespeichers (elektrischer Speicher) erhöht werden. Durch die Kostenreduktion der Batteriespeicher in den letzten Jahren und die Förderung der Speicher ist ihr Einsatz stark angestiegen. Im Jahr 2022 wurden 52% mehr Batterien für Solaranlagen installiert als im Vorjahr und mehr als zwei Drittel der neu installierten Solarstromanlagen auf Privathäusern werden inzwischen zusammen mit einem Heimspeicher errichtet [19]. **Allerdings weisen PV-Anlagen mit Batteriespeicher eine geringere Wirtschaftlichkeit auf als ohne Batteriespeicher [18] weshalb sie in diesem Gutachten nicht weiter betrachtet werden.**

3.4.3

Betrachtete Fallgruppen

Um einen fundierten Vergleich von PV-Dächern, Gründächern und Solargründächern durchführen zu können, werden die Fallgruppen nicht primär nach PV-Anlagengröße unterschieden, sondern nach der verfügbaren Dachfläche, die von den Anlagentypen

unterschiedlich genutzt wird. Hierzu wurden Referenz-Dachgrößen ermittelt, denen die zuvor beschriebenen PV-bezogenen Fallgruppen zugeordnet wurden. Im Anhang (Kapitel 5.2) ist erläutert, wie sich aus den Referenzdachgrößen die Leistungen der PV-Anlagen berechnen.

Da in diesem Gutachten nur Flachdächer bis 10° Dachneigung betrachtet werden, wird für die „Referenz-Dachgröße“ die Grundfläche der Gebäude genutzt, da diese im Wesentlichen der Flachdachfläche entspricht. Die Referenz-Dachfläche entspricht somit der Brutto-Dachfläche des Flachdachs, d.h. der von den Außenkanten des Flachdachs eingeschlossenen Fläche. Für Gebäude mit Schrägdächern würden sich andere Werte ergeben.

Unter Berücksichtigung der genannten Punkte ergeben sich die in Tabelle 3 dargestellten Fallgruppen durch Unterscheidung nach Dach- und somit PV-Anlagengröße, nach PV-Anlagenvariante (Süd-Ausrichtung, Ost-West-Ausrichtung), mit oder ohne Gründach sowie nach dem Geschäftsmodell (Volleinspeisung des Solarstroms oder 25 % Eigenverbrauch mit Resteinspeisung). Bis 500 m² Dachgröße bzw. 100 kW PV-Leistung wird die EEG-Vergütung angesetzt, für die Dachgröße 2.000 m² und 5.000 m² bzw. über 100 kW PV-Leistung wird der anzulegende Wert des Marktprämienmodells des EEGs angesetzt.

Tabelle 3: Fallgruppen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung nach Dachgröße, PV-Anlagenvariante und Geschäftsmodell (Volleinspeisung oder 25 % Eigenverbrauch mit Resteinspeisung) für Anlagen auf Gründächern (GD) und Schwarzdächern (SD)

Fallgruppen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung					
Dachgröße	PV-Vergütungs- klasse	PV-Leistung		Vergütung bzw. anzulegender Wert	
		Ost-West- Ausrichtung auf SD	Süd- Ausrichtung auf SD + GD Ost-West- Ausrichtung auf GD	Voll- einspeisung nach EEG	25 % Eigen- verbrauch + Rest- einspeisung
m ²	kW	kW	kW	ct/kWh	ct/kWh
50	bis 10	2,90	2,05	13,0	8,2
100	bis 10	8,59	6,05	13,0	8,2
200	10-40	20,9	14,7	10,9	7,1
500	40-100	65,5	46,1	10,9	5,8
2.000	100-400	305	215	9,4	6,2
5.000	400-1000	799	563	8,1	6,2

Bis zur Dachgröße von 500 m² / 100 kW wird zur Berechnung die feste Einspeisevergütung genutzt, ab 2.000 m² das Marktprämienmodell mit dem anzulegenden Wert.

Bei 25 % Eigenverbrauch wird die restliche Solarstrommenge (75 %) eingespeist und nach EEG vergütet. Die Vergütung und der anzulegende Wert sind gültig für PV-Anlagen, die im Jahr 2023 und im Januar 2024 ans Stromnetz angeschlossen sind, danach erhalten neu installierte PV-Anlagen jedes Halbjahr einen um 1 % reduzierten Vergütungssatz (EEG 2023).

Anlagen über 1 MW Leistung werden in den Fallgruppen nicht betrachtet, da das Hmb-KliSchG in § 16 Absatz 3 die Pflicht „auf die installierte Leistung der Photovoltaikanlage begrenzt, für die die Anlagenbetreiberin bzw. der Anlagenbetreiber einen gesetzlichen Anspruch auf die Vergütung nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz [...] hat, ohne an Ausschreibungen zur wettbewerblichen Ermittlung des Zahlungsanspruchs teilnehmen zu müssen, die dem Zubauvolumen nach begrenzt sind“. Somit ist die Pflicht auf maximal 1 MW begrenzt, da über 1 MW die Teilnahme an einer Ausschreibung verpflichtend ist.

Eine Zuordnung typischer Wohngebäude zu den einzelnen Fallgruppen kann dem Anhang entnommen werden. Für gewerbliche Gebäude kann eine solche Zuordnung nicht vorgenommen werden, da die Gebäudestruktur eine zu hohe Diversität aufweist.

3.5

Parameter der Wirtschaftlichkeitsberechnungen

3.5.1

Nutzungsdauer, Betrachtungszeitraum und Amortisationszeit

Für die Amortisationsrechnung sind folgende Zeiträume voneinander zu unterscheiden:

- **Nutzungsdauer:** beschreibt den Zeitraum, den die PV-Anlage, das Schwarzdach (nicht begrüntes Dach), das Gründach und das Solargründach üblicherweise genutzt werden können, bevor sie ersetzt werden müssen. Für PV-Anlagen und das Schwarzdach werden 25 Jahre und für das Solargründach inklusive der Dachabdichtung werden 40 Jahre Nutzungsdauer angesetzt (siehe Tabelle 4 und Kapitel 3.6.2).
- **Betrachtungszeitraum:** Aufgrund der Nutzungsdauer sowohl der PV-Anlage und des Schwarzdachs erfolgt die Wirtschaftlichkeitsberechnung für einen Zeitraum von 25 Jahren, die unterschiedlichen Nutzungsdauern werden in den Investitionskosten berücksichtigt.
- **Amortisationszeit:** In § 5 Absatz 1 Nummer 2 PVUmsVO ist die wirtschaftliche Vertretbarkeit von PV-Anlagen nicht gegeben, wenn die Amortisationszeit mehr als 20 Jahre beträgt [2]. Dementsprechend werden **in diesem Gutachten PV-Anlagen und Solargründächer als nicht wirtschaftlich bezeichnet, wenn ihre Amortisationszeit mehr als 20 Jahre beträgt.**

Dabei ist zu bemerken, dass sowohl bei PV-Anlagen als auch bei Solargründächern von einer Nutzungsdauer von 25 Jahren sicher ausgegangen werden kann, wie in diesem Gutachten dargestellt (siehe z.B. Kapitel 3.2.2). Somit könnte aus fachlicher Sicht auch eine Amortisationszeit von 25 Jahren noch als wirtschaftlich vertretbar angesehen werden. Eine Prüfung dieser Grenze könnte bei der nächsten Novelle der Umsetzungsverordnung erfolgen.

3.5.2

Kosten und sonstige Parameter Photovoltaik-Anlagen

Zur Durchführung der Wirtschaftlichkeitsrechnung werden verschiedene Eingangsparameter genutzt, die sich aus dem Standort und der lokalen Umgebung, dem Marktangebot und den lokalen Installationsgegebenheiten sowie dem Geschäftsmodell und der Anlagennutzung ergeben. Alle Parameter sind für konkrete Anlagen und Gebäude spezifisch zu ermitteln. Für die folgenden Berechnungen wurden typische Werte genutzt, die in Tabelle 4 aufgelistet und erläutert sind.

Tabelle 4: Wichtigste Eingangsparameter für die Wirtschaftlichkeitsrechnung einer PV-Anlage

1. UMGEBUNGSPARAMETER

Globale Solarstrahlung, auf die PV-Module auftreffende Einstrahlung	Beschreibung: Die globale Solarstrahlung setzt sich aus direkter und diffuser Strahlung zusammen. Sie ist unabhängig von der Solaranlage und unterscheidet sich innerhalb einer begrenzten geographischen Region wie der Stadt Hamburg kaum. Die für die Solarstromerzeugung relevante Größe ist jedoch die auf die Solarmodule auftreffende solare Einstrahlungsmenge aufsummiert über ein Jahr. Diese hängt von der globalen Solarstrahlung, von der Ausrichtung der Module (Azimut und Neigung) und der Verschattung der Module ab. Werte: In Hamburg trifft auf eine optimal ausgerichtete Modulfläche (ca. 40° Neigung, nach Süden ausgerichtet) jährlich eine Solarstrahlungsmenge von 1.232 kWh [20]. Die jährliche Solarstrahlungsmenge variiert um diesen langjährigen Mittelwert um bis zu 15%, wobei in den letzten 40 Jahren eine Zunahme des Mittelwertes um 3,6 kWh/m² pro Jahr zu verzeichnen war [21].
Ausrichtung und Neigung der PV-Module	Beschreibung: Die größte Einstrahlungsmenge ergibt sich, wenn das Solarmodul senkrecht zur Sonnenstrahlung ausgerichtet ist. Da sich der Sonnenstand kontinuierlich verändert, muss die jährliche Einstrahlungsmenge für jede Ausrichtung der Module nach Himmelsrichtung (Azimut) und Neigung der Module aufsummiert werden. Werte: Die höchste jährliche Einstrahlungsmenge ergibt sich für eine Ausrichtung der PV-Module nach Süden in einem Anstellwinkel von ca. 40°. Die Einstrahlungsmenge reduziert sich um ca. 15 % bei horizontaler Montage (0° Neigung) und ca. 25 % bei senkrechter Montage (90° Neigung) bei südlicher Ausrichtung. Werden die um 40° geneigten Module nach Westen ausgerichtet, reduziert sich die Einstrahlungsmenge gegenüber der Südausrichtung um ca. 21 %, nach Osten ausgerichtet um ca. 18 %. Das Optimum der Ausrichtung ist nicht exakt Süden, sondern 10° Südost, da klimatische Bedingungen wie tageszeitlich typische Nebel- oder Wolkenbildung zu Unterschieden der Einstrahlung im Vergleich von Morgen und Abend führen. Die jährliche solare Einstrahlungsmenge in Hamburg ist in Abhängigkeit von der Ausrichtung und der Neigung in Abbildung 23 angegeben.

Verschattung	Beschreibung: Die jährliche Sonneneinstrahlung kann durch Dachaufbauten, benachbarte Gebäude oder durch Bäume etc. reduziert sein. Werte: Die meisten Dachflächen, insbesondere Flachdächer, sind nur partiell und zeitweise verschattet, wie z.B. Luftbilddaufnahmen zeigen. Außerdem wird bei einer Verschattung nur die direkte Sonneneinstrahlung verhindert und die diffuse Einstrahlung findet weiterhin statt. Entscheidend ist deshalb, wie stark die jährliche solare Einstrahlungsmenge durch die Verschattung reduziert wird. Wie umfangreich die Verschattung an einem bestimmten Standort ist, können Solarexpert:innen z.B. mit einem Sonnenbahnindikator abschätzen oder mit einem Solarsimulationsprogramm unter Berücksichtigung der lokalen Horizontlinie berechnen.	Wirtschaftlichkeitsberechnungen
2. PV-ANLAGENKOSTEN		
Kosten PV-Module und Wechselrichter	Beschreibung: Wichtige Kostenblöcke von PV-Anlagen sind die Kosten für die PV-Module und die Wechselrichter. Diese sind in den letzten Jahrzehnten deutlich gesunken, so dass sie heute nur noch zwischen 40 % und 47 % an den Gesamtkosten einer Anlage ausmachen. Weitere Kostensenkungen werden auch künftig erwartet.	
Sonstige Systemkosten	Beschreibung: Sonstige Systemkosten sind die Kosten für die Gesamtanlage ohne Module und Wechselrichter und umfassen u.a. das Montagegestell, die Verkabelung und den elektrischen Anschluss an das Stromnetz (Material und Personalkosten). Die sonstigen Systemkosten werden auch BOS-Kosten genannt (Balance of System). Sie hängen stark von der konkreten Einbausituation ab, z.B. den Befestigungsmöglichkeiten der Module auf dem Dach, der Entfernung vom Dach zum elektrischen Anschlusspunkt und den Bedingungen für den elektrischen Anschluss im Zählerschrank. Bei Solargründächern wird das Montagegestell für die PV-Module üblicherweise so konstruiert und montiert, dass der Gründachaufbau als Auflast dient und eine weitere Beschwerung des Montagegestells, das ohne Dachdurchdringung montiert wird, nicht erforderlich ist. Deshalb wird die Montage des Gestells oftmals vom Ersteller des Gründachs vorgenommen, was bei ihm die Kosten erhöht und die Kosten beim PV-Anlagenbauer reduziert. Ob die Gesamtkosten für die Montage dadurch etwas höher liegen, konnte nicht ermittelt werden. Es wird allerdings davon ausgegangen, dass die Differenz relativ gering ist. Werte: Die Werte der sonstigen Systemkosten betragen zwischen 61 % an den Gesamtkosten einer PV-Anlage bei Kleinanlagen und 53 % bei Großanlagen (Werte von 2019).	
PV-Anlagenpreis	Beschreibung: Der Preis einer PV-Anlage setzt sich aus den Preisen für die PV-Module und Wechselrichter sowie den sonstigen Systemkosten zusammen. Die letzte repräsentative deutschlandweite Studie zu PV-Anlagenpreisen wurde im März 2019 erstellt. Durch Internetrecherche wurde die Preisentwicklung von diesen Werten ausgehend bis zum März 2023 abgeschätzt.	

3. BETRIEBSDATEN

Wirtschaftlichkeitsberechnungen

Nutzungsdauer der PV-Anlage

Beschreibung und Werte:

Als Nutzungsdauer wird hier die Dauer bezeichnet, die eine PV-Anlage mit hoher Wahrscheinlichkeit in Betrieb ist. Da die Solarzellen technisch gesehen keinem Verschleiß unterliegen, kann eine PV-Anlage weit über 30 Jahre genutzt werden. Dabei wird eine geringe Abnahme der Anlageneffizienz von typischerweise 0,4 % pro Jahr eingerechnet und die Notwendigkeit, den Wechselrichter etwa alle 10 Jahre auszutauschen. Da die Hersteller für ihre PV-Module meist eine Produkt- oder Leistungsgarantie zwischen 20 und 30 Jahren gewähren, kann von einer typischen Nutzungsdauer von 25 Jahren ausgegangen werden. Diese wird im Folgenden zur Wirtschaftlichkeitsberechnung genutzt.

Die Nutzungsdauer ist von der Mindestnutzungsdauer zu unterscheiden, die üblicherweise zur betriebswirtschaftlichen Berechnung der Profitabilität einer PV-Anlage angesetzt wird. Sie ist Grundlage der Begrenzung der EEG-Vergütungssätze auf 20 Jahre und ist auch in der AfA-Steuertabelle als Grundlage für die steuerliche Abschreibung von PV-Anlagen angegeben [22]. Die Mindestnutzungsdauer beträgt 20 Jahre.

Systemwirkungsgrad (Performance Ratio)

Beschreibung:

Das Verhältnis zwischen dem tatsächlich erreichten Solarstromertrag (Wechselstromabgabe des Wechselrichters) zum theoretisch maximal erzielbaren Ertrag (Gleichstromerzeugung der Solarmodule) ist der Systemwirkungsgrad, der Performance Ratio (PR) genannt wird.

Wert:

Die PR ist in den letzten Jahrzehnten kontinuierlich gestiegen. Für die Berechnungen der Wirtschaftlichkeit wird eine PR von 86 % angesetzt.

4. SONSTIGES

Bezugszeitpunkt der Wirtschaftlichkeitsrechnung

Beschreibung und Werte:

Für die Einspeisevergütung sowie den anzusetzenden Wert im Marktprämienmodell werden die Werte genutzt für PV-Anlagen, die im Jahr 2023 ans Stromnetz angeschlossen werden. Nach EEG gelten diese für das gesamte Jahr 2023 und sinken dann ab Januar 2024 halbjährlich um 1 %.

Angesetzter Zinssatz

Beschreibung und Wert:

Zur Barwertermittlung wird der kalkulatorische Zinssatz der Finanzbehörde Hamburg angesetzt, der regelmäßig aktualisiert wird. Dieser betrug zum Zeitpunkt der Erstellung der Studie 3 %.

Einen wichtigen Einfluss auf den jährlichen Solarstromertrag hat die Ausrichtung und Neigung der PV-Module, da die Solareinstrahlung auf die Modulebene davon abhängt. Die höchste Einstrahlungsmenge wird bei einer Neigung von etwa 35° nach Süden erreicht. Abbildung 23 zeigt die Einstrahlungsmengen in kWh pro m² Modulfläche pro Jahr für alle Ausrichtungen von Ost nach West und Neigungswinkel am Standort Hamburg. Der höchste Wert wird mit 1.188 kWh/m²/a für 40° in einer um 10° nach Osten gerichteten Ausrichtung angegeben. Aufgrund von Klimabedingungen ist das Optimum nicht

exakt nach Süden ausgerichtet. Bei einer Neigung von 10° nach Westen beträgt die Einstrahlungssumme 1.008 kWh/m²/a und damit 84,8 % des Maximalwertes.

Wirtschaftlichkeitsberechnungen

Sonneneinstrahlung auf Modulfläche in Abhängigkeit von Neigung und Ausrichtung, Standort Hamburg [kWh/m²/a]																				
Azimut [°]:		West	80°	70°	60°	50°	40°	30°	20°	10°	Süd	-10°	-20°	-30°	-40°	-50°	-60°	-70°	-80°	Ost
Inklination [°] Horizontal 0°, Vertikal 90°	0°	1016	1016	1016	1016	1016	1016	1016	1016	1016	1016	1016	1016	1016	1016	1016	1016	1016	1016	1016
	10°	1008	1022	1035	1047	1058	1067	1076	1083	1089	1091	1091	1089	1085	1078	1069	1059	1046	1033	1018
	20°	991	1017	1041	1064	1084	1102	1118	1131	1140	1146	1147	1143	1135	1123	1107	1087	1064	1039	1011
	30°	968	1003	1036	1067	1094	1118	1139	1157	1170	1178	1179	1175	1165	1149	1128	1101	1071	1036	999
	40°	941	982	1021	1056	1088	1114	1139	1161	1177	1186	1188	1184	1173	1156	1131	1101	1065	1024	979
	50°	909	953	993	1031	1063	1092	1119	1142	1160	1169	1174	1169	1160	1141	1116	1084	1045	1002	953
	60°	870	914	954	990	1023	1050	1078	1101	1119	1130	1134	1133	1123	1107	1082	1051	1012	967	918
	70°	824	865	902	937	965	991	1015	1039	1056	1068	1073	1073	1066	1051	1030	1000	963	921	872
	80°	768	804	839	868	894	915	937	957	973	985	991	993	989	978	959	934	901	862	818
	90°	703	736	764	789	809	825	843	860	873	884	891	896	895	888	874	853	826	792	752

Abbildung 23: Jährliche solare Einstrahlungsmenge auf ebene Flächen in Hamburg für Ausrichtungen von West über Süd bis Ost (Azimut 90° bis -90°) und Neigung der bestrahlten Fläche von 0° bis 90° (Inklination) für nicht verschattete Flächen (Quelle: Eigene Berechnungen, Einstrahlungsdaten aus [23])

Photovoltaik-Anlagenpreise und Entwicklung der EEG-Vergütung

Die aktuellste, deutschlandweite repräsentative Studie zu PV-Anlagenpreisen stammt vom März 2019 [18]. Seither weisen die Preise eine relativ große Volatilität auf aufgrund von zeitweisen Versorgungsengpässen bei Modulen, Wechselrichtern und auch Montagegestellen, so dass es teilweise zu Preisanstiegen kam. Generell hat sich die Versorgungslage wieder entspannt, allerdings steigt die Nachfrage aufgrund der politischen Rahmenbedingungen derzeit deutlich, so dass auch deshalb vorübergehend wieder Preisanstiege möglich sind. Bislang hat sich die Preissituation noch nicht stabilisiert. Allerdings wird allgemein davon ausgegangen, dass der Langfristtrend der Preisreduktion von PV-Anlagen weiterhin anhält, auch wenn die künftigen Preissenkungen nicht mehr so hoch sein werden wie früher.

Vor diesem Hintergrund wurden im April 2023 auf Basis von Internetrecherchen typische PV-Anlagenpreise ermittelt und Preisänderungsraten im Vergleich zur Studie aus dem Jahr 2019 berechnet. Die Wirtschaftlichkeitsberechnungen spiegeln somit den Stand für den April 2023 wider, für den die genutzten Eingangsdaten recherchiert wurden. Die Preisannahmen stellen somit grobe Abschätzungen dar und die tatsächlichen Preise können künftig davon deutlich abweichen, nach oben wie nach unten, was bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen ist.

In Tabelle 5 sind die in diesem Gutachten genutzten PV-Anlagenpreise dargestellt. Die PV-Anlagenpreise auf Gründach sind dabei um 15 % gegenüber den PV-Anlagenpreisen auf dem Schwarzdach reduziert, weil die Aufständigung hier bereits in den Gründachkosten integriert ist (siehe Kapitel 3.5.3). Die PV-Anlagenpreise hängen von der Anlagengröße ab, so dass sich bei Ost-West-Ausrichtung auf dem Schwarzdach günstigere Preise ergeben als bei Süd-Ausrichtung, da eine größere Leistung auf derselben Fläche montiert werden kann.

Nach § 1 Abs. 2 EEG 2023 strebt die Bundesregierung an, den Anteil des aus erneuerbaren Energien erzeugten Stroms am Bruttostromverbrauch auf mindestens 80 Prozent im Jahr 2030 zu steigern. Dies setzt voraus, dass die Einspeisevergütung den realen Markt- und Preisentwicklungen angepasst wird. Um dies zu erreichen, wird die Höhe der Vergütung des Solarstroms regelmäßig der Marktentwicklung angepasst. Sie bleibt nach

§ 49 EEG im Jahr 2023 konstant und sinkt ab dem 1. Februar 2024 halbjährlich um 1 % ab. Durch die EEG-Novelle 2023 haben sich die Bedingungen für die Vergütung der solaren Strahlungsenergie verbessert und gewährleisten eine größere Planungssicherheit, da die Vergütungsabsenkung nicht mehr von der installierten Leistung in einem gewissen Zeitraum abhängig ist.

Wirtschaftlichkeitsberechnungen

Tabelle 5: Ermittelte PV-Systempreise Stand 1. Quartal 2023 in Abhängigkeit von der Anlagengröße auf Gründächern (GD) und Schwarzdächern (SD)

PV-Anlagengröße			PV-Anlagenpreise	
Dachgröße	Süd-Ausrichtung auf SD + GD Ost-West-Ausrichtung auf GD	Ost-West-Ausrichtung auf SD	Süd-Ausrichtung auf SD*	Ost-West-Ausrichtung auf SD*
	kW	kW	€/kW	€/kW
50 m²	2,1	2,9	1.548	1.538
100 m²	6,1	8,6	1.499	1.468
200 m²	14,7	20,9	1.395	1.318
500 m²	46,2	65,5	1.145	1.100
2000 m²	215	305	1.001	941
5000 m²	563	799	931	931

* Auf dem Gründach sind die PV-Anlagenpreise 15 % günstiger als auf dem Schwarzdach, da das Montagesystem bereits vom Ersteller des Gründaches montiert wird und in den Gründachkosten enthalten ist.

Die Anlagenpreise hängen von der Anlagengröße ab und sind deshalb bei Ost-West-Ausrichtung auf dem Schwarzdach geringer, da hier eine größere PV-Leistung installiert werden kann.

Eingangsdaten der Wirtschaftlichkeitsrechnung für PV-Anlagen

Als Eingangsdaten für die Wirtschaftlichkeitsrechnungen mit der in Kap. 3.3.2 vorgestellten Software werden die in Tabelle 6 aufgelisteten Eingangsdaten verwendet, die in den vorigen Kapiteln hergeleitet wurden, den regulativen Rahmenbedingungen entsprechen oder die typische Werte für die verbleibenden Parameter darstellen.

*Tabelle 6: Verwendete Eingangsdaten für die Wirtschaftlichkeitsrechnungen
(entsprechend der Eingangsparameter des verwendeten Wirtschaftlichkeitsrechners)*

Parameter	Verwendete Werte	Erläuterung
Anlagenleistung und Kosten der PV-Anlage (ohne MWSt)	Nach Fallgruppe, siehe Tabelle 5	Systempreise aus der letzten Studie extrapoliert mit einer durchschnittlichen Preisentwicklung aus [24–27]
Batteriespeicher	Keiner	Nicht relevant
Vorlaufkosten	3 % der Anlagenkosten	Für Planung und Zwischenfinanzierung Mehrwertsteuer, typischer Wert
Laufende Kosten	1 % der Anlagenkosten pro Jahr	Typischer Wert
Dachmiete	Keine	Für die gewählten Fallgruppen nicht relevant
Solarstromertrag Südausrichtung Ost-West Ausrichtung	987 kWh/kWp/a 814 kWh/kWp/a	[28]
Ertragsminderung pro Jahr	0,3 % pro Jahr	Typischer Wert
Eigenverbrauch (Direktnutzung)	0 % oder 25 % des Solarertrags	Laut [18], S. 37 stellt 25 % den Mindestanteil dar
Inbetriebnahme	Jahr 2023	
Darlehen	Kein Darlehen	
Direktvermarktung - bis 10 kW - 11 bis 40 kW - 41 bis 100 kW - 100 bis 400 kW - 400 bis 1000 kW	Nein Nein Nein Ja Ja	Über 100 kW verpflichtend, darunter freiwillig
Kleinunternehmerregelung (KUR)	Nein	Typ Investor unbekannt
Umstellung auf KUR im 7. Jahr	Nein	Typ Investor unbekannt
Inflationsrate	2 % pro Jahr	Erwartete Inflationsrate [29]
Zinssatz Barwertermittlung	3 % pro Jahr	Stand 2023
Zinssatz bei Wiederanlage	0 %	Nicht vorgesehen
Jährlicher Stromverbrauch - bis 10 kW - 11 bis 40 kW - 41 bis 100 kW - 1 bis 100 kW - 101 bis 750 kW	2.862 kWh/a 20.578 kWh/a 64.678 kWh/a 300.748 kWh/a 788.435 kWh/a	Annahme: Stromverbrauch ist etwa gleich dem Jahresertrag der PV-Anlage
Jährliche Grundgebühr Strom (netto)	0 €/a	Grundgebühr ist im Strompreis bereits enthalten

			Wirtschaftlichkeitsberechnungen
Strompreis im ersten Jahr (brutto)			
- bis 10 kW	33,7 ct/kWh	Bis 100 kW: Haushaltsstrom-	
- 11 bis 40 kW	33,7 ct/kWh	preis, Mittelwert für 01-	
- 41 bis 100 kW	33,7 ct/kWh	06/2023 aus [30]	
- 101 bis 400 kW	21,38 ct/kWh	ab 101 kW Industriestrom-	
- 401 bis 1000 kW	21,38 ct/kWh	preis, Preis von 2021 aus [17]	
Strompreisteigerung	1,5 % pro Jahr	Typischer Wert	
Stromerlös bei Direktvermarktung (DV)	Nach Fallgruppe, siehe Tabelle 3		
Jährliche Steigerung des Erlöses bei Direktvermarktung	0 % pro Jahr		
Gewerbebetrieb			
- bis 10 kW	Nein	Typische Annahme	
- größer 10 kW	Ja		
Ökostromumlage (EEG-Umlage)	0 ct/kWh	Seit Anfang 2023 entfallen	
Individueller Steuersatz (in den ersten 10 Jahren)	30 %	Typischer Wert	
Steuersatz (danach)	30 %	Typischer Wert	
20 % Sonderabschreibung	Ja	Abschreibung von 19 % im 1. und 1 % im 5. Betriebsjahr	

3.5.3

Kostenrichtwerte Schwarzdach und begrüntes Dach

In der Studie zur ökonomischen Bewertung von Hamburgs Gründächern wird aufgezeigt, dass die Gründachkosten im Schnitt 1,5 % der Bauwerkskosten bei ein- bis zweigeschossigen Bauwerken ausmachen, wobei mit zunehmender Gebäudehöhe der Anteil der Dachfläche an der Bruttogeschossfläche und damit der Kostenanteil für die Dachbegrünung sinkt. Im Fazit wird festgestellt, dass die Auswertung der Kosten zu den Gründächern sehr komplex ist und vielfach Vergleichsdaten fehlen. Außerdem können die Kosten je nach Anbieter, Eigenschaften eines Daches sowie Aufbau der Begrünung stark variieren. [31]

Im Rahmen dieses Gutachtens wurden verschiedene Anbieter von Gründächern und Solargründächern befragt und Daten erhoben. Eine repräsentative Ermittlung war jedoch aufgrund des heterogenen Marktes und der begrenzten Ressourcen nicht möglich. Die ermittelten Daten wurden mit anderen Datenquellen abgeglichen, so dass die Werte aus Sicht der Gutachter eine gute Mittelwertschätzung darstellen. Trotzdem sei nochmals darauf hingewiesen, dass die Kosten im Markt stark variieren.

In diesem Kapitel werden Richtwerte für Kosten von Grün- und Schwarzdächern, sowie Einsparungen, die aufgrund von Gründächern erzielt werden, aufgezeigt.

Kostenrichtwerte Schwarzdach

Es wurden die Nettokosten für Schwarzdächer (Folien- oder Bitumendach, ungeschützt, frei bewittert, ohne Kies) ermittelt, differenziert nach Herstellung (Material und Einbau), Wartung, Reparaturen, Rückbau und Entsorgung. Hierzu wurde eine Umfrage bei ausführenden Dachdecker-Betrieben in Hamburg vorgenommen. Die in Tabelle 7 dargestellten Werte resultieren als Mittelwert der angegebenen Preise aus der Befragung [32–34].

Die Schwarzdächer wurden in diesem Gutachten als ungeschützte, frei bewitterte Dächer ohne Kiesschüttung angenommen, da in Hamburg nur etwa 10 % der Flachdächer eine Kiesauflage bekommen [34]. Bei Betrachtung von Dächern mit Kiesschüttungen, müssten diese Kosten noch dazu addiert werden.

Eine größenabhängige Kostenermittlung war nicht möglich, so dass die genannten Kostenrichtwerte für alle Dachflächengrößen angenommen werden.

Tabelle 7: Kostenrichtwerte für Herstellung, Wartung und Rückbau eines Schwarzdaches

Kostenart	Kostenrichtwerte Schwarzdach 500 m ²		
	Netto (ohne Ust.)	Brutto (mit Ust.)	Häufigkeit
Herstellung (Material und Einbau)	37,50 €/m ²	44,63 €/m ²	einmalig
Rückbau und Entsorgung	79,00 €/m ²	94,01 €/m ²	einmalig
Wartung und Reparaturen	1,00 €/m ² /a	1,19 €/m ² /a	jährlich
<i>Optional</i>			
Zusatzkosten Kiesschüttung	12,00 €/m ²	14,28 €/m ²	einmalig

Kostenrichtwerte Gründach

Die ermittelten aktuellen Kostenrichtwerte für Herstellung, Instandhaltung und Wartung für verschiedene Gründach-Varianten beruhen auf Daten eines Ausführungsfachbetriebs aus Hamburg, der über Jahrzehnte eine Vielzahl an Dächern in Hamburg und Umgebung begrünt hat und als eines der marktführenden Unternehmen der Region gilt. Eine Plausibilitätsprüfung der abgefragten Daten erfolgte durch Abgleich bei anderen Ausführungsfachbetrieben in Freiburg, Reutlingen und Saarbrücken.

In Tabelle 8 sind die Kostenrichtwerte für den Gründachaufbau von 10 cm aufgelistet, die in der Wirtschaftlichkeitsberechnung angenommen werden. Zusätzlich sind Werte für 4-5 cm und 15 cm angegeben, um den Gründachmarkt breiter abzubilden. Die höheren Kosten bei 4-5 cm resultieren aus der zusätzlichen Verwendung einer vorkultivierten Sedum-Moos-Vegetationsmatte, die aufgrund der geringen Substratdicke eingesetzt werden muss. Die dargestellten Werte beinhalten die Nettokosten in Euro für die Herstellung (Material und Einbau) von ein- und mehrschichtigen Gründachaufbauten und für die spätere Instandhaltung (Pflege) und Wartung. Die Bestandteile der ein- und mehrschichtigen Bauweisen sind in Kapitel 2.1 beschrieben.

Tabelle 8: Kostenrichtwerte extensiver Gründächer auf Flachdächern (0-5° Dachneigung) für unterschiedliche Aufbauhöhen

Kostenart	Größe	Einheit	Kostenrichtwerte (netto) Extensives Gründach (0-5° DN)		
Vegetationsform			Sedum-Moos	Sedum-Kräuter-Gräser	Gräser-Kräuter
Höhe Gründachaufbau			4-5 cm	10 cm	15 cm
Herstellung einschichtiger Aufbau	50 m²	€/m² einmalig	120	80	96
	100 m²	€/m² einmalig	72	60	68
	200 m²	€/m² einmalig	56	36	50
	500 m²	€/m² einmalig	48	32	40
	2000 m²	€/m² einmalig	44	28	36
	5000 m²	€/m² einmalig	40	24	32
Herstellung mehrschichtiger Aufbau	50 m²	€/m² einmalig	150	100	120
	100 m²	€/m² einmalig	90	75	85
	200 m²	€/m² einmalig	70	45	56
	500 m²	€/m² einmalig	60	40	50
	2000 m²	€/m² einmalig	55	35	45
	5000 m²	€/m² einmalig	50	30	40
Instandhaltung	50 m²	€/m² jährlich	6	8	8
	100 m²	€/m² jährlich	4	4,5	5
	200 m²	€/m² jährlich	3	3,5	4
	500 m²	€/m² jährlich	2,5	2,5	3
	2000 m²	€/m² jährlich	1,5	1,5	2
	5000 m²	€/m² jährlich	1	1	1,5
Darin nicht enthaltene Mehrkosten					
Wurzelfeste Dachabdeckung		€/m² einmalig	2,5	2,5	2,5

Tabelle 9 listet zum Vergleich die Kostenrichtwerte für das Biodiversitäts- und Retentions Gründach auf. Für diese beiden Begrünungsformen wurden keine Wirtschaftlichkeitsberechnungen durchgeführt, allerdings kann eine höherwertige Dachbegrünung von Interesse sein, wenn eine Kombination Gründach und Solaranlage nicht möglich ist.

Auch wenn in der Wirtschaftlichkeitsberechnung nur Dachbegrünungen auf Flachdächern bis 5° Dachneigung berücksichtigt werden, sind in Tabelle 10 zur Vollständigkeit und für weitere Fälle der Gründachpflicht bei Dächern bis 10° Dachneigungen auch die Kostenrichtwerte von Schrägdachbegrünungen aufgeführt.

Tabelle 9: Kostenrichtwerte Biodiversitäts- und Retentions Gründach in mehrschichtiger Bauweise auf Flachdach (0-5° Dachneigung)

Kostenart	Größe	Einheit	Kostenrichtwerte (netto) Sonderausführungen	
			Biodiversitäts- gründach	Retentions- gründach extensiv
Höhe Gründachaufbau			10 cm partiell bis 30 cm	16 cm
Herstellung	50 m²	€/m² einmalig	120	125
	100 m²	€/m² einmalig	85	90
	200 m²	€/m² einmalig	50	65
	500 m²	€/m² einmalig	45	60
	2000 m²	€/m² einmalig	40	55
	5000 m²	€/m² einmalig	35	50
Instandhaltung	50 m²	€/m² jährlich	12	10
	100 m²	€/m² jährlich	7	6
	200 m²	€/m² jährlich	4,5	4
	500 m²	€/m² jährlich	3	2,5
	2000 m²	€/m² jährlich	2	1,5
	5000 m²	€/m² jährlich	2	1

Tabelle 10: Kostenrichtwerte Begrünungen auf Flachdächern 5-10° und Schrägdächern 10-30° Dachneigung (DN)

Kostenart	Größe	Einheit	Kostenrichtwerte Begrünung 5-30° Dachneigung (netto)			
			DN 5-10° ohne Schubsicherung		DN 10-30° mit Schubsicherung	
Höhe Gründachaufbau			10 cm	15 cm	10 cm	15 cm
Herstellung	50 m²	€/m² einmalig	110	125	200	220
	100 m²	€/m² einmalig	75	85	125	135
	200 m²	€/m² einmalig	52	60	100	120
	500 m²	€/m² einmalig	45	58	100	110
	2000 m²	€/m² einmalig	40	52	95	105
Instandhaltung	50 m²	€/m² jährlich	10	12	15	15
	100 m²	€/m² jährlich	6	6	10	10
	200 m²	€/m² jährlich	5	5	6	6
	500 m²	€/m² jährlich	3	4	5	5
	2000 m²	€/m² jährlich	2	3	4	4

Kostenrichtwerte Solargründach (nur Gründachanteil)

Die Kosten für Solargründächer weisen eine große Schwankungsbreite auf, da sie von verschiedenen Faktoren abhängen, wie dem Verhältnis der Modul- zur Gründachfläche, der Verlegeart der PV-Module und den Abständen zwischen den PV-Modulreihen sowie den objektbezogenen Gegebenheiten (Gebäudehöhe, Zugänglichkeit, Dachgröße, ...).

Zur Ermittlung typischer Kosten für Solargründächer wurden objektbezogene Daten von einem Hamburger Ausführungsfachbetrieb erhoben, der eine Vielzahl an Solargründächern in Hamburg und Umgebung umgesetzt hat und mit aktuellen Angebotsdaten bei Ausführungsfachbetrieben in Freiburg, Reutlingen und Saarbrücken abgeglichen.

Tabelle 11 zeigt Kostenrichtwerte für die Herstellung (Material und Einbau) des Gründachaufbaus sowie für die Instandhaltung (Pflege) und Wartung von Solargründächern. Enthalten sind die Kosten für Material und Einbau der auflastgehaltenen Solaraufständerung (PV-Modul-Montagegestelle), weitere Kosten der PV-Anlage sind nicht enthalten.

Tabelle 11: Kostenrichtwerte Solargründach auf Flachdach mit 0-5° Dachneigung inklusive PV-Montagegestell und ohne sonstige PV-Anlagenkosten

Kostenart	Größe	Einheit	Kostenrichtwerte (netto) Solargründach ¹ nur Gründachanteil	
			Bandbreite	Im Gutachten verwendet
Höhe Gründachaufbau			ca. 9-15 cm	ca. 9 –11 cm
Herstellung	50 m²	€/m² einmalig	100-200	150
	100 m²	€/m² einmalig	100-200	150
	200 m²	€/m² einmalig	80-150	100
	500 m²	€/m² einmalig	70-120	70
	2000 m²	€/m² einmalig	65-110	65
	5000 m²	€/m² einmalig	55	55
Instandhaltung	50 m²	€/m² jährlich	5-12	8,3
	100 m²	€/m² jährlich	4-8	4,7
	200 m²	€/m² jährlich	3-10	3,7
	500 m²	€/m² jährlich	2-6	2,8
	2000 m²	€/m² jährlich	2-5	2,0
	5000 m²	€/m² jährlich	1,5	1,5

¹ Enthalten sind die Kosten für das Gründach inkl. des Montagegestells für die PV-Module, weitere PV-Anlagenkosten sind nicht enthalten

Die Kostenrichtwerte berücksichtigen nicht die Förderung von Gründächern in Hamburg (siehe Anhang Kapitel 5.3).

3.6

Nutzen und Kostenvorteile von Dachbegrünungen

3.6.1

Übersicht der ökonomischen Vorteile von Dachbegrünungen

Dachbegrünungen weisen über die Fähigkeit zur Retention von Regenwasser, zur Steigerung der Biodiversität und zur Verbesserung des Mikroklimas noch einige weitere Vorteile auf. Für die Wirtschaftlichkeitsrechnung wurden deshalb deren Nutzung und die damit verbundenen ökonomischen Vorteile für die Gebäudeeigentümer:innen und die Gesellschaft soweit möglich ermittelt und berücksichtigt.

In den folgenden Unterkapiteln werden die Vorteile und der Nutzen von Dachbegrünungen näher beschrieben und soweit möglich quantifiziert. Die Werte, die ermittelt wurden und in die Wirtschaftlichkeitsberechnungen einfließen, sind in der Tabelle 12 im Überblick dargestellt.

Tabelle 12: Übersicht der Nutzen von Dachbegrünungen und ermittelte ökonomische Vorteile für Gebäude in Hamburg

Kapitel	Nutzen von Dachbegrünungen	Ökonomischer Wert des Nutzens	Direkter Nutzen für Gebäudeeigentümer:innen
3.6.2	Schutz der Dachabdichtung: Verlängerung der Lebensdauer	Schwarzdach: 25 Jahre Gründach: 40 Jahre	Ja, in Amortisation abgebildet
3.6.3	Retention: Senkung der Kosten für Mulden-Rigolen-Versickerungen	39,50 €/m ² einmalig	Ja
3.6.4	Retention: Senkung der Niederschlagswassergebühr um 50%	0,38 €/m ² jährlich	Ja
3.6.5	Wärmedämmung des Gebäudes: Senkung der Heizkosten	0,06 €/m ² jährlich	Ja
3.6.6	Kühlwirkung im Gebäude: Senkung der Kühlkosten	0,03 €/m ² jährlich	Ja
3.6.7	Kühlungswirkung auf die PV-Module	4 % Solarstrom-Mehrertrag	Ja
3.6.8	Steigerung Immobilienwert	2,4 €/m ² jährlich	Ja
3.6.9	Luftreinigung (PM ₁₀ , CO ₂ , NO ₂ , SO ₂)	0,137 €/m ² jährlich	Gesellschaftlicher Nutzen
3.6.10	Kühleffekte durch Verdunstung: Vermeidung von Hitzeinseln	Nicht ermittelbar / in Wirtschaftlichkeitsrechnung nicht berücksichtigt	Gesellschaftlicher Nutzen
3.6.11	Biodiversitätsfördernde Wirkung von Gründächern		Gesellschaftlicher Nutzen
3.6.12	Lärminderung		Ja
3.6.13	Brandschutz		Ja

Bislang ist keine umfassende und repräsentative quantitative Übersicht über die ökonomischen Nutzen von Gründächern bekannt, sondern nur Beschreibungen der Effekte sowie nationale und internationale Untersuchungen zu einzelnen Faktoren oder für konkrete Dachaufbauten und Pflanzenverwendungen, die nicht verallgemeinerbar sind. Für dieses Gutachten wurde deshalb im Folgenden die vorhandene Literatur ausgewertet und durch eigene Recherchen und Berechnungen ergänzt und die verschiedenen ökonomischen Nutzen bei ausreichender Datenlage quantifiziert.

3.6.2

Schutz der Dachabdichtung

Der Schutz der Dachabdichtung wird durch eine Begrünung wesentlich erhöht. Der verbesserte mechanische Schutz der Dachabdichtung beispielsweise vor extremen Wetterereignissen wie Hagel und Sturm, Beanspruchungen bei Wartungsarbeiten sowie thermischer Belastung durch Sonnenstrahlung. Starke Temperaturschwankungen können bei ungeschützten Dachabdichtungen Rissbildungen durch schnelles Ausdehnen und Zusammenziehen der Folie oder Bitumenbahnen verursachen. Durch die Begrünung werden diese Temperaturschwankungen der Abdichtung im Winter wie auch im Sommer signifikant reduziert [35]. Messungen belegen, dass die Oberflächentemperatur von Dachbegrünungen 25° C geringer sein können als von Kies- oder Bitumendächern. Durch das Gründach kann sich die Temperaturamplitude der darunter liegenden Abdichtungsebene von 50 auf 10 Kelvin reduzieren [36, 37]. Dadurch verlängert sich die Lebensdauer eines begrünten Daches gegenüber einem ungeschützten Dach deutlich.

Experten gehen etwa von einer doppelten Lebensdauer für Dachabdichtungen von Gründächern im Vergleich zu Schwarzdächern aus (siehe Tabelle 13).

Tabelle 13: Typische Lebensdauern von Flachdach-Abdichtungen verschiedener Dacharten (Literaturangaben)

Dachart	Lebensdauer der Dachabdichtung	Quelle
Abdeckung des Schwarzdaches (ohne Kiesschüttung)	15–25 Jahre 20 Jahre	[31] [38]
Abdeckung des Schwarzdaches unterhalb der Kiesschüttung	20–30 Jahre	[39]
Dachabdichtung unter einem extensiv begrünten Dach	40 Jahre	[38]

Eine Umfrage des Bundesverband GebäudeGrün (BuGG) gemeinsam mit dem Zentralverband des Deutschen Dachdeckerhandwerks (ZVDH) unter Dachdeckerbetrieben ergab, dass die Lebensdauer einer Dachabdichtung bis zur ersten größeren Reparatur unter einem Gründach zu etwa 55% und unter einem Solargründach zu etwa 45 % bei über 20 Jahren liegt. Dagegen liegt die Lebensdauer einer ungeschützten Dachabdichtung bis zur ersten größeren Reparatur zu etwa 35 % zwischen 16 und 20 Jahren und nur zu etwa 25 % darüber und einer nicht begrünten Dachabdichtung mit PV-Anlage zu etwa 25 % zwischen 16 und 20 Jahren und etwa 15 % darüber [40] (siehe Abbildung 24 und Abbildung 25).

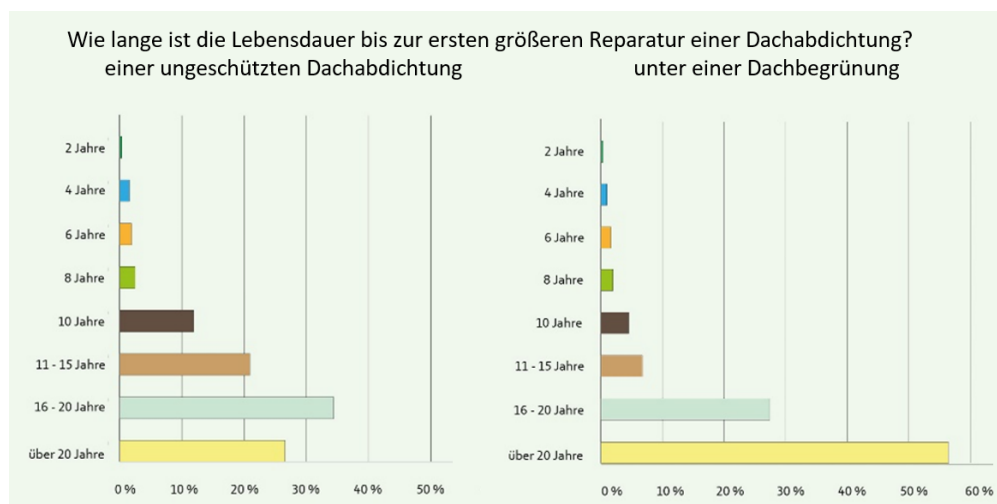


Abbildung 24: Lebensdauer einer Dachabdichtung bis zur ersten größeren Reparatur, mit und ohne Dachbegrünung, ohne PV-Anlage (Quelle: Umfrage BuGG 2021)

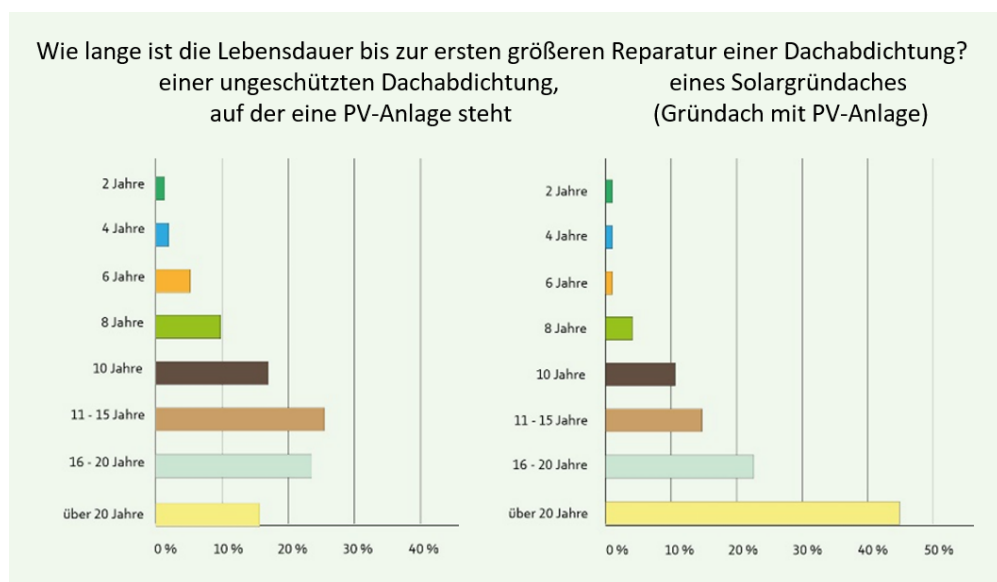


Abbildung 25: Lebensdauer einer Dachabdichtung bis zur ersten größeren Reparatur, mit und ohne Dachbegrünung, mit PV-Anlage (Quelle: Umfrage BuGG 2021)

Auf Basis der vorliegenden Daten werden für die Dachabdichtungen von Flachdächern folgende Lebensdauern angenommen: Schwarzdach 25 Jahre und Gründach/Solargründach 40 Jahre.

3.6.3

Retention – Senkung der Kosten für Mulden-Rigolen-Versickerungen

Durch die zunehmende Versiegelung der Grundstücke wird das Sielnetz in Hamburg immer mehr belastet, gleichzeitig nimmt die Intensität von Starkregenereignissen aufgrund des Klimawandels deutlich zu. Somit steigt die Gefahr von Überflutungen und die dezentrale Regenwasserbewirtschaftung ist eine wichtige Maßnahme zur Entlastung der

Kanalisation. Dazu zählt die Versickerung in Mulden und Rigolen, die flächige Versickerung in Grünanlagen sowie die Wasserrückhaltung durch Dachbegrünungen [41]. Eine Dachbegrünung kann der Versickerungsfläche auf dem Grundstück angerechnet werden, wodurch sich die Dimension und die Kosten der gewählten Versickerungsanlage verkleinert [34].

Bei einem Aufbau der Dachbegrünung mit einer möglichst langen Wasserspeicherung kann der Regenabfluss verringert werden. Eine extensive Dachbegrünung mit einem Aufbau von 9 - 11 cm hat einen mittleren Abflussbeiwert von etwa 0,5 gegenüber einem Schwarzdach von 0,9. Der mittlere Abflussbeiwert entspricht dem über die gesamte Dauer des betrachteten Niederschlagsereignisses gemittelten Verhältnis des Abfluss- zum Niederschlagsvolumen [42]. Ein Retentionsdach hingegen kann, abhängig vom Aufbau, sogar einen mittleren Abflussbeiwert von 0 aufweisen (siehe Kapitel 2.1.4).

Als Beispiel wird im Folgenden die Mulden-Rigolen-Versickerung in Kombination mit einer extensiven Dachbegrünung mit einem Aufbau von 9 - 11 cm betrachtet. Wie in Abbildung 26 dargestellt, wird bei der Mulden-Rigolen-Versickerung das Regenwasser kurzfristig in der Mulde gespeichert und dann versickert und der Rigole zugeführt. Diese entspricht einem zweiten Speicher und versickert das Wasser erneut langsam in den Untergrund [43].

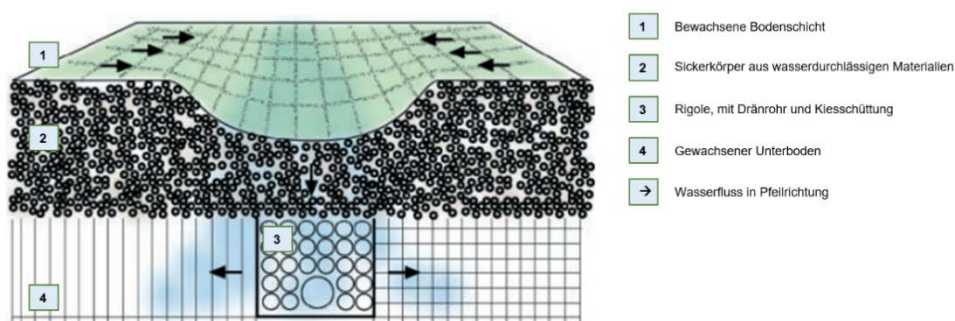


Abbildung 26: Prinzip-Schnitt Mulden-Rigolen-Versickerung (Quelle: [43])

Wird auf dem Gebäude eine Dachbegrünung umgesetzt, kann die Mulden-Rigole auf der Grünfläche wesentlich kleiner gebaut werden, wie die Daten in Tabelle 14 für eine Dachfläche von 500 m² zeigen. Die Dimensionierung der Mulden-Rigolen-Versickerungsanlage wurde mit Hilfe der "Berechnung einer Regenwasserversickerungsanlage nach DWA-A 138" mit den Wetterdaten von Hamburg berechnet [44]. Der Kostenrichtwert wurde mit dem "Regen Rechner" der Stadt Berlin ermittelt [45] und beläuft sich für das in Tabelle 14 beschriebene Beispiel auf 79 €/m² abflusswirksame Fläche (A_u). Die abflusswirksame Fläche beinhaltet alle Flächen, von welchen tatsächlich Niederschlagswasser in die öffentliche Abwasserbeseitigungseinrichtung geleitet wird. Die Kosten der Mulden-Rigolen-Versickerungsanlage können je nach Situation und Ausführung zwischen 67 € und 129 €/m² betragen [45].

Tabelle 14: Kostenvergleich einer Mulden-Rigole ohne und mit Kombination mit Dachbegrünung (Quelle: [44, 45])

	Mulden-Rigole ohne Dachbegrünung	Mulden-Rigole in Kombination mit einer Dachbegrünung
Art der Dachfläche	ungeschützt, bewittert	begrünt
Dachgröße	500 m ²	500 m ²
Abflussbeiwert Dachfläche	1,0 ψ m	0,5 ψ m
Abflusswirksame Fläche	500 A _u	250 A _u
Benötigtes Muldenvolumen	9,14 m ³	3,6 m ³
Länge der Rigole	66,67 m	66,67 m
Kosten der Mulden-Rigolen-Versickerung	39.500 €	19.750 €

Durch die begrünte Dachfläche reduziert sich die erforderliche Größe der Mulden-Rigolen-Versickerung und halbieren sich die Kosten für ihre Herstellung um 19.750 € bei 500 m² Gründachfläche, was 39,50 €/m² entspricht.

Auf Basis der vorliegenden Daten wird für den Retentions-Vorteil von Gründächern durch Reduzierung der Größe der erforderlichen Mulden-Rigolen-Versickerung einmalig eine Kosteneinsparung von 39,50 € pro m² Gründachfläche angenommen.

3.6.4

Retention – Senkung der Niederschlagswassergebühr

Aufgrund des Wasserrückhaltevermögens vermindern Gründächer sowohl den Spitzenabfluss als auch den mittleren Abfluss von Regenwasser. Aus diesem Grund gewährt die Freie und Hansestadt Hamburg bei Installation eines Gründaches eine Reduktion der Niederschlagswassergebühr um 50 %.

Nach §1 Absatz 2 der Verordnung über die Höhe der Sielbenutzungsgebühr beträgt der Gebührensatz für die Berechnung der Niederschlagswassergebühr je Kalenderjahr 0,76 Euro je Quadratmeter [...] maßgeblicher Grundstücksfläche [46].

Nach § 13a Absatz 2 des Sielabgabengesetzes werden „nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik hergestellte Gründächer mit einer Mindestschichtstärke von fünf Zentimetern, die in das öffentliche Sielnetz einleiten, [...] bei der Berechnung der Niederschlagswassergebühr nur zu 50 vom Hundert berücksichtigt“ [47].

Aufgrund der Abgabenordnung reduziert sich durch die Retention eines extensiven Gründachs die Niederschlagswassergebühr in Hamburg um jährlich 0,38 € pro m² Gründach.

3.6.5

Wärmedämmung des Gebäudes – Senkung der Heizkosten

Der Gründachaufbau stellt eine zusätzlich wärmedämmende Schicht dar und reduziert den Heizenergiebedarf des Gebäudes. Die wärmedämmende Wirkung wird von mehreren Faktoren beeinflusst, u.a. der Zusammensetzung, der Feuchte und der Höhe des Substrats sowie dem Deckungsgrad der Vegetation, der den Wärmeübergang vom Substrat zur Außenluft beeinflusst. Aufgrund der Abhängigkeit von der Feuchte und der Art der Vegetation ist die resultierende wärmedämmende Wirkung auch abhängig von der Wasserverfügbarkeit und dem lokalen Klima. [39, 48, 49]

Der Literatur ist zu entnehmen, dass bei einem 10 cm hohen Substrat ein extensiv bepflanztes Gründach einen zusätzlichen Durchlasswiderstand R von 0,14 bis 0,40 $\text{m}^2\text{K/W}$ unter maximaler Wassersättigung erreicht [39]. Dies entspricht einer Wärmeleitfähigkeit λ von 0,400 W/mK gegenüber einem guten Wärmedämmmaterial, das einen Wert zwischen 0,020 und 0,040 W/mK aufweist. Unter der Annahme, dass das Flachdach nach Sanierung oder bei Neubau den vom Gebäudeenergiegesetz mindestens geforderten U -Wert von 0,20 $\text{W/m}^2\text{K}$ aufweist (entspricht einem R -Wert 5 $\text{m}^2\text{K/W}$) reduzieren sich die Wärmeverluste durch das Gründach um 4,8 % unter der Annahme eines mittleren R -Wertes von 0,25 $\text{m}^2\text{K/W}$ für den Gründachaufbau.

Bei einer Heizgradtagzahl von 3108 Kd (Mittelwert 2003 bis 2022 am Standort Hamburg, Heizgrenztemperatur 12°C , Raumtemperatur 20°C [50]) errechnet sich für das Flachdach ohne Gründach ein jährlicher Heizwärmeverlust von 14,9 kWh pro m^2 Dachfläche, die das beheizte Gebäude nach oben abschließt, und mit dem Gründach von 14,2 kWh . Das Gründach reduziert somit den jährlichen Wärmebedarf um 0,7 kWh pro m^2 Gründach, was bei Heizwärmekosten von 0,08 €/kWh einer Einsparung von 0,06 € pro m^2 Gründach pro Jahr entspricht.

Zusätzlich zur wärmedämmenden Wirkung der Substratschicht führt die Begrünung dazu, dass der Strahlungsaustausch zwischen der Umgebung und der Dachoberfläche reduziert wird, sowohl tagsüber die solare Bestrahlung als auch nachts, was den Strahlungsaustausch mit der kalten Atmosphäre angeht. Weiter wird durch die Bedeckung die Luftgeschwindigkeit über der Substratschicht reduziert, was den Wärmeübergang von der Luft zum Substrat reduziert. So konnte beispielsweise eine reduzierte Temperaturamplitude zwischen Tag und Nacht von 20 K an der Oberfläche eines begrünten Flachdaches gegenüber 50 K bei einem Bitumendach gemessen werden [51].

Allerdings liegen bislang keine belastbaren Daten vor, wie stark sich im Winter einerseits die Außentemperatur zwischen Substratschicht und Vegetation und andererseits der Wärmeübergangswiderstand von der Außenluft zum Substrat durch die reduzierte Luftbewegung unter der Vegetation erhöht. Diese Effekte des Gründachs reduzieren zusätzlich den Heizwärmebedarf des Gebäudes, können aber nicht verlässlich quantifiziert werden, weshalb sie nicht berücksichtigt werden.

Auf Basis der vorliegenden Daten wird für den wärmedämmenden Effekt von Gründächern eine jährliche Kosteneinsparung bei den Heizkosten von 0,06 €/m^2 angesetzt.

3.6.6

Kühlwirkung im Gebäude: Senkung der Kühlkosten

Aufgrund des Klimawandels ist zu erwarten, dass die sommerlichen Temperaturen und damit der Klimatisierungsbedarf von Räumen künftig kontinuierlich zunehmen werden. Das trifft auch auf Hamburg zu, auch wenn die Temperaturen dort geringer sind als im Süden von Deutschland. In Hamburg ist der Einsatz mechanischer Kühlung laut § 13 HmbKliSchG nur zulässig, wenn die bestimmungsgemäße Nutzung des Gebäudes nicht durch bautechnische oder andere geeignete Maßnahmen auf wirtschaftlich vertretbare Weise erreicht werden kann.

Ein Gründach ist eine bauliche Maßnahme, die den Kühlbedarf reduziert. Dies erfolgt durch die Dämmwirkung des Substrats, die den Wärmefluss ins Gebäude reduziert, durch die Verschattung der Vegetation, die die Solarstrahlung reduziert und durch die Reduktion der Luftbewegung unterhalb der Pflanzen, die den Wärmeübergang von der Luft zum Substrat vermindert. Diese Wirkungen der Begrünung reduzieren sowohl den Heizwärme- als auch den Klimatisierungsbedarf. Ein Gründach weist darüber hinaus noch eine zusätzliche aktive Kühlwirkung durch Evapotranspiration auf. Diese entsteht durch Verdunstung von Feuchtigkeit durch die Pflanzen (Transpiration) und das Substrat (Evaporation). Bei der Verdunstung entzieht die Feuchte der Umgebungsluft Wärme und kühlt somit die Luft und das Substrat [52]. Im Folgenden wird die Energie- und Kosteneinsparung durch den verminderten Kühlbedarf abgeschätzt. Dabei sei auch darauf hingewiesen, dass der reduzierte Kühlbedarf zusätzlich auch positive indirekte Wirkungen hat wie die Vermeidung der Abwärme von Kältemaschinen und damit Dämpfung des Wärmeinsel-Effektes, die nicht berücksichtigt sind.

Im ersten Schritt wurde der reduzierte Kühlbedarf aufgrund der verbesserten Dämmung des Gründaches mit 10 cm Substrataufbau berechnet unter der Annahme, dass die Räume in den Gebäuden auf 20° C gekühlt werden, sobald die Außentemperatur 22° C übersteigt. Da Hamburg mit 45 Kd (Kelvintage) im langjährigen Mittel nur eine relativ geringe Anzahl von Kühlgradtagen aufweist [50], reduziert sich die Kühlungsenergie nur von 0,23 auf 0,22 kWh pro m² Gründach. In einem Klimagerät beträgt das Verhältnis produzierte Kälte zur eingesetzten Strommenge typischerweise 3:1. Wird nur die zusätzliche Dämmwirkung des Substrats berücksichtigt, berechnet sich somit eine Einsparung von nur etwa 0,2 ct pro m² Gründachfläche pro Jahr aufgrund des geringeren Kühlbedarfs.

Im zweiten Schritt wurde der Einfluss der aktiven Kühlung durch die Verdunstung des Gründachs betrachtet. Diese reduziert die Umgebungstemperatur und damit die Temperaturdifferenz zwischen der Außenluft und dem Innenraum und senkt so die benötigte Kühlenergie. Die Kühlwirkung auf die Außenluft ergibt sich aus der verdunsteten Feuchtigkeitsmenge. So wurde für ein Retentionsdach in Deutschland in den Monaten Juni, Juli und August 2021 eine Evapotranspiration von 146,4 mm, 91,8 mm und 68,0 mm pro Monat auf einem Retentionsdach in Göggingen-Krauchenwies in Süddeutschland gemessen. Im Durchschnitt betrug die Evapotranspiration in diesem Zeitraum 3,33 mm pro Tag [53]. Damit werden im Schnitt ca. 3,3 Liter Wasser pro m² Retentionsdach und Tag verdunstet. Bei einer spezifischen Verdunstungskälte (physikalisch korrekt: Verdampfungsenthalpie) von etwa 2,5 MJ pro Liter Wasser [54] errechnet sich eine tägliche Kühlungsenergiemenge von 2,3 kWh pro m² Retentions-Gründach in diesen Sommermonaten. Im Vergleich dazu weisen Flachdächer mit Bitumenbelag nur einen mittleren

Verdunstungsanteil von etwa 10 % der Niederschlagsmenge auf [54], die in Baden-Württemberg im langjährigen Mittel in den Monaten Juni bis August in der Summe 292 mm betrug [55]. Daraus errechnet sich eine Verdunstungsmenge von 0,32 mm pro Tag und eine Kühlenergie von 0,22 kWh pro m² Bitumendach, was 9,5 % der Kühlenergie des Gründaches ausmacht.

Messungen und Berechnungen belegen die deutliche Wirkung von Gründächern auf das Mikroklima. Wie stark sich dabei jedoch die Temperatur über dem Substrat tatsächlich reduziert und damit den Kühlbedarf im Gebäude aufgrund der reduzierten Temperaturdifferenz zwischen Innenraum und Außenluft vermindert, ist allerdings schwer abzuschätzen, auch weil diese vom Grad der Abschattung, der Luftfeuchtigkeit und den lokalen Luftströmungen abhängt. Hinzu kommt, dass die Temperaturreduktion durch den Kühleffekt des Gründachs im Vergleich zum Bitumendach im Tagesverlauf nicht konstant ist, sondern sich ständig ändert. In Berlin wurde eine Temperaturamplitude zwischen Tag und Nacht bei der Oberflächentemperatur eines Gründachs von 20 K gemessen gegenüber der Amplitude der Oberfläche eines Bitumendaches von 50 K [51].

Unter der Annahme, dass im Mittel die Lufttemperatur über dem Gründachsubstrat mehrere Kelvin geringer ist als die Außentemperatur, wird vereinfachend davon ausgegangen, dass in Hamburg der Wärmeeintrag durch das Gründach, der eine Kühlung erfordert, im Wesentlichen vermieden wird. Dies liegt daran, dass Hamburg nur 12 Kühltage mit einer Gradtagzahl von 45 Kd und 32 Sommertage mit einer Tageshöchsttemperatur von mehr als 25° C aufweist [56] und somit bereits eine Temperaturreduktion von wenigen K den Wärmeeintrag in die Räume durch das Gründach weitgehend vermeidet. In Süddeutschland konnte eine Temperaturreduktion von 8 K bei PV-Modulen über Gründächern ermittelt werden (siehe Kapitel 3.6.7). Auch wenn hier noch andere Effekte eine Rolle spielen, zeigt es doch, dass von mehreren Kelvin Temperaturreduktion ausgegangen werden kann. Für andere Standorte mit höheren Außentemperaturen gilt diese vereinfachende Annahme nicht mehr und es sind Untersuchungen notwendig, wie stark der Kühlungseffekt auf die Außentemperatur oberhalb der Dachfläche tatsächlich ist. Aufgrund der zuvor genannten Effekte wird angenommen, dass der gesamte sommerliche Wärmeeintrag ins Gebäude von 0,22 kWh pro m² Dachfläche, der in Hamburg bei einem Schwarzdach an Sommertagen aktiv gekühlt werden muss, durch das Gründach vermieden werden kann. Dadurch ergibt sich eine Stromeinsparung für die Kühlung von 0,077 kWh/m²a, was bei einem Strompreis von 40 ct/kWh einer jährlichen Kosteneinsparung von 0,03 € pro m² Gründach entspricht.

Zu bedenken ist, dass die langjährigen Mittelwerte keine Rückschlüsse darauf zulassen, wie hoch der Kühlbedarf in Jahren mit einem heißen Sommer sein wird. So wies das Jahr 2018 beispielsweise 99 Kd Kühlgradtage und damit einen doppelt so hohen Wert wie im langjährigen Mittel auf.

Für Deutschland wurde eine doppelt so hohe Klimatisierungseinsparung durch Gebäudebegrünung von 0,06 € pro m² Gründach berechnet [39], was darauf zurückgeführt werden kann, dass der Klimatisierungsbedarf in Hamburg niedriger liegt als im Süden von Deutschland. Eine Verallgemeinerung der Einsparung bei der Klimatisierung auf ganz Deutschland ist somit nicht möglich und es kann von höheren Einsparungen in südlicher gelegenen Standorten ausgegangen werden.

Weiter ist zu berücksichtigen, dass nur die Energiekosteneinsparung für die Klimatisierung durch das Gründach abgeschätzt wurde und nicht die vermiedene Anschaffung eines Klimagerätes. Diesbezüglich lassen sich allerdings keine verallgemeinerbaren Aussagen treffen, so dass diese bewusst nicht berücksichtigt werden. Ebenfalls nicht berücksichtigt ist, dass durch den Klimawandel die Sommertage und Kühlgradtage zunehmen werden, so dass der abgeschätzte Einspareffekt künftig zunehmen wird. Somit stellt das Ergebnis eine konservative Bewertung des Einspareffektes dar.

Aufgrund der Datenlage und auf Basis der dargestellten Annahmen wird von einer jährlichen Kosteneinsparung bei der Klimatisierung von Räumen durch Gründächer in Höhe von 0,03 € pro m² Gründach ausgegangen.

3.6.7

Ertragssteigerung Photovoltaik

Durch die Evapotranspiration (Verdunstung von Wasser durch Pflanzen und Substrat) einer Dachbegrünung wird der Luft Wärme entzogen und die PV-Module über dem Gründach werden etwas gekühlt. Da der Wirkungsgrad der üblicherweise eingesetzten Solarzellen aus kristallinem Silizium mit steigender Temperatur abnimmt, erhöht sich durch die Kühlung der Solarstromertrag. Allerdings kann der Kühleffekt nur schwer quantifiziert werden, da er von vielen Faktoren abhängt. In Tabelle 15 sind nationale und internationale Forschungsergebnisse zum Solarstrom-Mehrertrag aufgelistet. In Experimenten wurde ein Mehrertrag zwischen 0,05 % und 6,0 % ermittelt, wobei in Pittsburgh, USA sogar ein Minderertrag von 0,5 % gemessen worden war. Der simulierte Mehrertrag lag bei bis zu 8,3 % in Hongkong. Eine Ursache für die unterschiedlichen Ergebnisse liegt sicherlich auch in der unterschiedlichen Gestaltung der Referenzdächer, gegenüber denen der Mehrertrag ermittelt wurde.

Der Gründachanbieter ZinCO hat bei vergleichenden Messungen am Standort Nürtingen in Deutschland eine durchschnittliche Temperaturabsenkung von 8 Kelvin von PV-Modulen über Gründächern im Vergleich zu PV-Modulen über einem Bitumendach gemessen und daraus eine mittlere Leistungssteigerung von 4 % errechnet [57]. Da andere Messungen in Deutschland eine Erhöhung bis zu 6 % ergaben und diese in anderen Ländern allerdings geringer ausfallen, wird im Folgenden ein Wert von 4 % angenommen.

Auf Basis der vorliegenden Daten wird von einer Steigerung des Solarstromertrags von 4 % auf einem Gründach gegenüber einem Schwarzdach ausgegangen.

Tabelle 15: Zusammenfassung der Forschungen zur Ertragssteigerung der PV-Module durch eine Dachbegrünung

Autoren, Erscheinungsjahr	Art der Untersuchung	Ort	Solarstrom- Mehrertrag (%)
Köhler et al., 2007	Experiment	Deutschland, Berlin	6,0
Witmer, 2010	Simulation	USA	0,55-0,08
ZinCo GmbH, 2010	Experiment	Deutschland, Nürtingen	4,0

Hui & Chan, 2011	Experiment	China, Hongkong	4,3
	Simulation	China, Hongkong	8,3
Perez et al., 2012	Experiment	Amerika, New York	2,42
Nagengast et al., 2013	Experiment	USA, Pittsburgh	-0,5
	Simulation	USA	0,7-1,3
Hendarti, 2013	Experiment	Singapur, Singapur	<1,0-2,0
Chemisana & Lemnatou, 2014	Experiment	Spanien, Lleida	1,29-3,33
Alshayeb & Chang, 2016	Experiment	USA	0,62
Baumann et al., 2016	Experiment	Schweiz, Winterthur	0,7
Osma et al., 2016	Experiment	Kolumbien, Bucaramanga	1,0 – 2,8
Ogaili & Sailor, 2016	Experiment	USA	0,7 - 1,2
Alshayeb & Chang, 2018	Experiment	USA	1,4
El Helow 2018	Experiment	Kanada, Toronto	0,5
Osma-Pinto & Ordóñez-Plata, 2019	Experiment	Kolumbien, Bucaramanga	(-1,0 ± 0,4)
			1,0 ± 0,4
			1,3 ± 0,4
			0,05 ± 0,4
Cavadani & Cook, 2021	Simulation	Schweiz, Dübendorf	1,83
			1,76
Irga et al., 2021	Experiment	Australien, Sydney	3,63
Kaewpraek et al., 2021	Experiment	Thailand, Songkhla	2,0
Arenandan et al., 2022	Experiment	Malaysia, Selangor	1,6
Fleck et al., 2022	Experiment	Australien, Sydney	4,5

Wirtschaftlichkeitsberechnungen

3.6.8

Steigerung Immobilienwert

Wie sich Grün am Gebäude zur Wertsteigerung einer Immobilie auswirken kann, zeigt das Projekt Bosco Verticale gut auf. Die Immobilienpreise haben sich bei diesem Projekt verdoppelt [58]. Allerdings ist der grüne Wohnturm bei den Fassadenbegrünungen einzuordnen und den Bewohnern direkt zugänglich.

Verschiedene Immobilienplattformen sowie eine Studie der University of Wisconsin Milwaukee weisen darauf hin, dass ein grünes Umfeld den Wert eines Gebäudes steigern kann. Erreichbare Grünflächen im Umkreis von 500 Metern erhöhen den Gebäudewert um 5 %. Ein gepflegter Garten in unmittelbarer Hausnähe kann den Immobilienwert um 10 bis 16 % steigern. Extensive Dachbegrünungen sind in ihrer Nutzung nicht mit einem Garten gleichzusetzen, dennoch werden auch hier von Immobilienfirmen eine positive Wirkung auf den Gebäudewert genannt. Neben der Verbesserung des Wohnumfeldes und der ästhetischen Wirkung sind dies auch die verminderten Instandhaltungs- und Betriebskosten sowie die geringeren Energiekosten [59], [60].

In einer US-amerikanischen Studie wurde die Immobilienwertsteigerung von Gründächern in einer probabilistischen, sozialen Kosten-Nutzen-Analyse ermittelt. Die Autoren weisen jedoch darauf hin, dass die wirtschaftlichen Auswirkungen auf das Gebäude sehr schwierig einzuschätzen sind. Zur quantitativen Ermittlung wurde die Präferenzmethode verwendet. Bei dieser Methode werden Personen nach ihrer Bereitschaft befragt, für ein bestimmtes Gut mehr zu bezahlen. Im Falle eines Gebäudes wird ermittelt, wieviel Personen mehr zu zahlen bereit wären, würde ihr Gebäude in der Nähe von Grünflächen stehen. Für ein Gebäude in der Nähe von Grünflächen wurde eine erhöhte Zahlungsbereitschaft von 6 % und für den Blick auf eine Grünfläche von 8 % ermittelt. Begrünte Dächer bieten nicht den gleichen Nutzen wie lokale Parks. Somit gehen die Autoren davon aus, dass der ästhetische Nutzen von extensiv begrünten Dächern zwischen 2 % und 5 % des Immobilienwerts liegt. [61]

Unter der Annahme, dass der soziale Nutzen der Wertsteigerung eines Gebäudes entspricht und die Daten von USA auf Deutschland übertragbar sind, wurde unter Berücksichtigung von typischen Immobilienwerten und einer Lebensdauer von Gründächern von 40 Jahren für Gebäude mit extensiv begrünten Dächern ein Kostenvorteil durch die Steigerung des Immobilienwert von jährlich 2,4 – 10,2 €/m² berechnet. Diese Wertsteigerung wirkt sich sowohl auf den Kauf- wie auch auf den Mietpreis aus. Die hier betrachtete Wertsteigerung bezieht sich auf die mögliche Mietpreiserhöhung, die bei Installation eines Gründaches erzielt werden können. Die Umrechnung der Wertsteigerung auf den Mietpreis weist Unsicherheiten auf und ist Schwankungen in der lokalen Preisfindung des Immobilienmarktes ausgesetzt. Als belastbarer Wert wird von einem aktuellen Mietpreis von mindestens 10 € pro m² Wohnfläche pro Monat für Hamburg ausgegangen für neue oder sanierte Gebäude, die von der Solargründach-Pflicht betroffen sind (siehe auch Hamburger Mietenspiegel [62]). Bei einer Jahresmiete von 120 €/m² und einer Wertsteigerung von 2% (siehe oben), ergibt sich eine mögliche Mietpreissteigerung um 2,40 € pro m² Mietfläche pro Jahr bzw. 0,20 €/m² pro Monat. Bei einer höheren Miete von 17 €/m² pro Monat und einer Immobilienwertsteigerung von 5% errechnet sich die mögliche Mietpreissteigerung zu 10,2 €/m² pro Jahr bzw. 0,85 €/m² pro Monat.

In der Wirtschaftlichkeitsberechnung wird angenommen, dass große Gebäude vornehmlich als Gewerbeflächen von Unternehmen angemietet werden. Die oben genannten Untersuchungen beziehen sich aber primär auf Wohngebiete. Deshalb wird der Nutzen der Immobilienwertsteigerung nur für kleinere Gebäude mit Flachdächern bis 500 m² Dachfläche angenommen. Weiter muss eine Annahme getroffen werden in Bezug auf die Umrechnung von Mietfläche auf Gründachfläche. Da davon auszugehen ist, dass der oben hergeleitete Effekt mit steigender Zahl von Geschossen abnimmt, wird die ermittelte Immobilienwertsteigerung für ein eingeschossiges Wohnhaus mit Flachdach angenommen, bei dem die Gründachfläche der Wohnfläche entspricht.

Auf Basis der vorliegenden Daten wird von einem Kostenvorteil aufgrund der durch Gründächer verursachten Wertsteigerung von Immobilien von jährlich 2,4 € pro m² Gründach ausgegangen für Gebäude mit Flachdächern bis 500 m². Für größere Dachflächen von oftmals gewerblich genutzten Gebäuden ist der Nutzen ungewiss und wird deshalb mit 0 €/m² angesetzt.

3.6.9

Luftreinigungswirkung

Luftschadstoffe wie Feinstaub (Partikelgröße $PM_{2,5}$ und PM_{10}), Ozon (O_3), Stickstoffdioxide (NO_2) und Schwefeldioxide (SO_2) sind bei zu hoher Konzentration für den Menschen schädlich. Mögliche Auswirkungen können Herzkreislaufprobleme, Atemwegsbeschwerden, Asthma, Bronchitis und Husten sein. Zudem steigt das Risiko, an Lungenkrebs oder Atemwegsinfektionen zu erkranken [63]. Die übermäßige Freisetzung von Luftschadstoffen wirkt sich nicht nur auf den Menschen, sondern auch auf die Natur aus. So können Stoffkreisläufe und Ökosysteme geschädigt werden.

Insbesondere in Städten wird die Konzentration von Luftschadstoffen regelmäßig überschritten [31, 32]. Auch in Hamburg liegen die Messwerte für Feinstaub mehrmals jährlich über den Grenzwerten [64]. Im Jahr 2020 waren in Europa 96 % der städtischen Bevölkerung einer über den Empfehlungen der Weltgesundheitsorganisation liegenden Feinstaubkonzentration ausgesetzt und sind 238.000 Menschen aufgrund von Luftverschmutzung vorzeitig gestorben [65].

Dachbegrünungen können zur Luftreinhaltung beitragen, indem sie durch passive Filterung und Lenkung der Luftströme Schadstoffe absorbieren [66]. In kanadischen Studien wurde abgeschätzt, dass durch 109 ha begrünte Dächer acht Tonnen Luftschadstoffe entfernt werden können [67]. Eine weitere Studie aus Chicago zeigt auf, dass jährlich 1675 kg Luftschadstoffe durch 19,8 ha begrünte Dächer absorbiert werden können [68]. Im Jahr 2018 wurde in einer Wirtschaftlichkeitsanalyse der Wert der Luftreinigung von Gründächern ermittelt. Dabei werden folgende Werte angegeben [66]:

- CO_2 : etwa 0,39 kg/m²/a
- NO_2 : 0,001 bis 0,002 kg/m²/a
- PM_{10} : 0,001 bis 0,003 kg/m²/a
- SO_2 : 0,001 kg/m²/a

Der monetäre Nutzen durch die Schadstoffbindung (CO_2 , NO_2 , SO_2 , PM_{10}) wird dabei anhand der sozialen Kohlenstoffkosten („Social cost of carbon“) sowie den Kosten durch die Luftverschmutzung für 2020 gemessen. Die sozialen Kohlenstoffkosten beziehen sich auf das Ausmass der Schäden, welche eine Tonne CO_2 in Bezug auf das Wohlergehen der Menschheit anrichtet. Der monetäre Nutzen, der sich aus der CO_2 -Reduktion ergibt, wird durch diese sozialen Kohlenstoffkosten von 34 €/t für das Jahr 2020 [61] und den dadurch vermiedenen Schaden berechnet (Kostenvermeidungsmethode). Auf gleicher Basis wird die NO_2 -Absorption und das dadurch vermiedene Erderwärmungspotenzial (entspricht 298 kg CO_2) beigezogen. Für PM_{10} und SO_2 werden die Werte basierend auf 103.800 €/t resp. 3.500 €/t berechnet [62].

Auf Grund der Methode der vermiedenen Kosten wurde für die Luftreinigung durch extensive Gründächer ein monetärer Wert von 0,137 €/m² ermittelt [66]. Eine Kosten-Nutzen-Analyse für begrünte Dächer ergab ähnliche Werte für die Schadstoffabsorption am Beispiel der Stadt Helsinki. Für NO_x liegen die Werte bei 0,05–0,07 €/m² und für SO_2 bei 0,15–0,21 €/m². Für die Bindung von PM_x wird ein signifikant höherer Wert von 4,75–6,62 Euro angegeben. Diese Werte sind jedoch auf Helsinki bezogen und es wird darauf hingewiesen, dass diese für jede Stadt variieren können [69]. Konkrete Werte zur PM_x Absorption in Hamburg liegen nicht vor, zur Ermittlung müssten entsprechende Studien erstellt werden.

Da die vermiedenen Kosten durch die Luftreinigung durch Dachbegrünungen stark ortsabhängig sind, für Hamburg aber keine Studien vorliegen, wird im Rahmen dieses Gutachtens auf das eher konservative Ergebnis der kanadischen Studie zurückgegriffen, das am ehesten auf Hamburg übertragbar scheint.

Auf Basis der vorliegenden Daten wird von einem Kostenvorteil aufgrund der Luftreinigungswirkung von Gründächern von 0,137 €/m² pro Jahr ausgegangen.

3.6.10

Kühleffekte durch Verdunstung: Vermeidung von Hitzeinseln

Die Folgen des Klimawandels sind insbesondere in Städten spürbar. Aufgrund des hohen Anteils versiegelter Flächen und fehlender Grünräume, der eingeschränkten Windzirkulation sowie der anthropogenen Wärmeabgabe bilden sich im Sommer Hitzeinseln [70]. Diese bewirken, dass die mittlere Lufttemperatur in Innenstädten im Vergleich zum Umland oftmals 1-3 K und in windschwachen, wolkenlosen Sommernächten sogar bis 10 K höher liegen können [71]. Messungen des Deutschen Wetterdienstes ergaben, dass der Temperaturunterschied zwischen der Innenstadt und dem Umland in Hannover im August 2023 bis zu 4,9 K betrug [72]. Um die natürliche Stadtkühlung zu begünstigen, sind verschiedene Maßnahmen möglich [64, 70, 73]:

- **Beschattung durch Stadt- und Straßenbäume:** Durch die Schattenwirkung sind Bäume eine effektive Maßnahme zur Luftkühlung sowie der Verringerung der Überhitzung von Straßen- und Wegeflächen
- **Reduzierung des Reflexions- und Wärmespeichervermögens der Oberflächenmaterialien** (Aufheizung): Reduzierung der versiegelten Flächen
- **Verdunstung über Wasserflächen:** Offene, bewegte Wasserflächen sind aufgrund der Verdunstungskühlung wichtige klimaökologische Ausgleichselemente
- **Verbesserung der Ventilationsbedingungen, Kaltluftsysteme** (Windfelder/ lokale Windsysteme)
- **Verminderung der anthropogenen Wärmeabgabe** (Verkehr, Klimaanlage, Gewerbe und Industrie)
- **Schaffung von Grünräumen:** Öffentliche Grünräume stellen die wichtigsten klimaökologischen Ausgleichsräume im Siedlungsraum dar

Zu den Grünräumen werden auch Dachbegrünungen gezählt, da sie einen nachweislich positiven Effekt auf das Stadtklima haben [74, 75]. Dabei ist die Kühlungsleistung einer Dachbegrünung durch die Evapotranspiration des Substrates und der Pflanzen direkt über der Dachoberfläche am höchsten. Nach Köhler und Kaiser (2018) kann ein begrüntes Dach bei 10 cm Aufbau im Sommer 1,5–2 l/m² x Tag evaporieren [76]. Umfasst der Begrünungsaufbau jedoch nur wenige Zentimeter, so wird die Verdunstungsleistung in langen Trockenperioden eingestellt. Dennoch können Dachbegrünungen, wenn sie großflächig im Stadtgebiet umgesetzt werden, einen erheblichen, klimapositiven Effekt auf gesamtstädtischer Ebene bewirken. Nach Pfoser (2013) sind durch großflächige intensive Dachbegrünungen Reduktionen der urbanen Wärmeinseln um bis zu 1,7 K möglich. Je bodennaher die Dachbegrünung liegt, umso höher der Effekt auf den Aufenthaltsbereich des Menschen. Großflächige, eher niedrige Gebäude wie Gewerbehallen oder Infrastrukturbauten haben klimaökologisch hohe Potenziale [70, 71].

Anhand „eines systematischen Reviewverfahrens“ und der Analyse von 123 wissenschaftlicher Studien wurden die Klimafolgenanpassungsleistungen von Dachbegrünungen untersucht. Durch Dachbegrünungen konnten bezüglich deren stadtklimatischen Potenzials deutliche Reduktionen der Temperaturen in der Umgebung von Gebäuden bzw. in gesamten Stadtteilen nachgewiesen werden. Durchschnittstemperaturen wurden im Mittel um 0,6 K herabgesenkt, die maximalen Abkühlungspotenziale erreichten bis zu 3,8 K. Dafür waren insbesondere das verfügbare Wasserdargebot und großflächige Umsetzung von Dachbegrünungen entscheidende Parameter. [77]

Eine Studie von Karlsson und Ziebarth (2018) zeigt die negativen Auswirkungen von Hitzetagen auf die Gesundheit des Menschen [78]. Der Beitrag untersucht die Auswirkungen extremer Temperaturen auf die Bevölkerung anhand von Sterbefällen und Krankenhauszahlungen über einen Zeitraum von 10 Jahren. Dabei zeigen die untersuchten Modelle, dass während Hitzeereignissen die Sterblichkeit um etwa 12% und die Krankenhauseinweisungen um etwa 6% ansteigen. Die gesundheitsbezogenen volkswirtschaftlichen Kosten können sich dabei auf bis zu 5 Mio. € pro 10 Mio. Einwohner pro Hitzetag mit Höchsttemperaturen über 30° C kumulieren.

In der Studie vom Umweltbundesamt zu den Kosten und Nutzen von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel wurde der mikroklimatische Nutzen von Dachbegrünungen anhand der Vermeidung von hitzebedingten Todesfällen für die Stadt Düsseldorf quantifiziert. Wie Tabelle 16 zeigt, liegt der Nutzen bei mindestens 4-8 Mio. Euro unter der Annahme, dass nur 5 % der Bevölkerung davon profitieren [79].

Tabelle 16: Nutzen von Dachbegrünungen zu vermiedene Sterbefälle (pro Jahr) [79]

	Anstieg der Mortalität in %	Sterbefälle je 1000 EW	Annahme Anteil profitieren-der EW in Düsseldorf			
			50 %	30 %	15 %	5 %
Status quo (Durchschnitt in D)		10,4				
Sterbefälle bei starker Wärmebelastung	9,3	11,4				
Sterbefälle bei extremer Wärmebelastung (min)	12	11,6				
Sterbefälle bei extremer Wärmebelastung (max)	14,8	11,9				
Vermiedene Sterbefälle durch grüne Dächer (min)		0,3	82	49	25	8
Vermiedene Sterbefälle durch grüne Dächer (max)		0,6	168	101	50	17
Nutzen in Mio. € bei Verlust von 8 Lebensjahren (min)			39	23	12	4
Nutzen in Mio. € bei Verlust von 8 Lebensjahren (max)			79	48	24	8

Hinweis: Der Status Quo Wert zur Sterblichkeit beruht auf den durchschnittlichen Werten für Deutschland, gemäß Statistischem Bundesamt. Der Anstieg der Mortalität bei unterschiedlichen Wärmebelastungen beruht auf Koppe & Jendritzky (2004) [80]

Wie sich eine flächendeckende Dachbegrünung auf die Hitzeminderung in einer Stadt auswirken kann, zeigt das ADAM-Projekt des Deutschen Wetterdienstes. Mittels einer Simulation im Stadtklimamodell MUKLIMO_3 wurde für die Stadt Essen die gefühlte Lufttemperatur ermittelt, einmal mit dem bestehenden Gründachkataster und einmal mit einem erweiterten Modell, bei dem alle Potentialflächen begrünt sind. Als Vergleich wurde eine Simulation ohne jegliche Begrünung durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Ausweitung der begrünter Dachflächen einen maßgeblichen Einfluss auf die Kühlwirkung im Stadtgebiet hat. Die Temperaturen wurde für die Erhöhung der Dachbegrünung um einen Anteil von 25 %, 50 %, 75 % und 100 % simuliert. Die maximale Temperaturreduktion betrug für diese Fälle -0,4 K, -0,8 K, -1,3 K und -1,8 K (siehe Abbildung 27) [81].

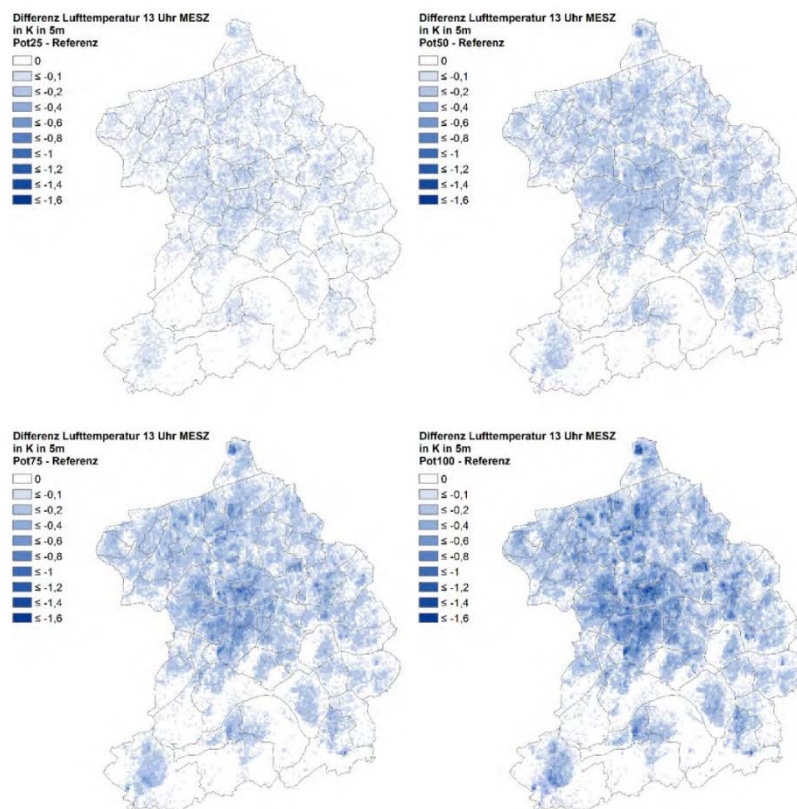


Abbildung 27: Simulation der möglichen Temperaturreduktion um 13 Uhr, welche durch eine Erhöhung der Dachbegrünungen um 25 %, 50%, 75% und 100% in der Stadt Essen erreicht werden kann. [81]

Die vorliegenden Studien bestätigen den relevanten Beitrag von Gründächern zur Hitzeminderung in Städten und damit deren Vorteile für die Erhaltung der Lebensqualität in der Stadt. Eine belastbare Quantifizierung der Temperaturreduktion und der resultierenden ökonomischen Vorteile ist aufgrund der nicht belastbaren Datenlage jedoch nicht möglich.

Durch die zunehmende Versiegelung und Zersiedelung der Landschaft gehen Naturflächen als Lebensräume für Tiere und Pflanzen verloren. Der damit verbundene Verlust von zusammenhängenden Lebensräumen hat einen negativen Einfluss auf die Populationsdichte und Artenvielfalt, was neben der Abnahme der Individuen auch zu einem eingeschränkten genetischen Austausch führen kann [82]. Die Abnahme der Arten birgt auch ein Risiko für das Wohlergehen des Menschen und dessen wirtschaftlichen Tätigkeiten. Denn eine intakte Biodiversität bildet die Grundlage der funktionierenden Ökosysteme mit seinen für den Menschen lebenswichtigen Dienstleistungen. Ziel des Siedlungsgrüns muss es deshalb sein, die Bedürfnisse des Menschen mit denen der Artenförderung zu vereinen [83, 84].

In der Begrünung von brach liegenden Dachflächen liegt ein hohes Potenzial, um Lebensraum für die Tier- und Pflanzenvielfalt in der Stadt zu schaffen. Je mehr Dachflächen begrünt werden, umso besser kann die Vernetzung und der genetische Austausch stattfinden. Dabei gilt, je höher der Dachaufbau (Substrathöhe) und je mehr Strukturen auf dem Dach vorhanden sind, umso höher ist die Chance, einen intakten Lebensraum zu bieten (siehe auch Kapitel 2.1.1). Abbildung 28 zeigt die Korrelation von Substrathöhe und Anzahl Arten auf unterschiedlich begrünten Dächern, bei der Untersuchung konnte auf Gründächern auch seltene Tier- und Pflanzenarten nachgewiesen werden [85].

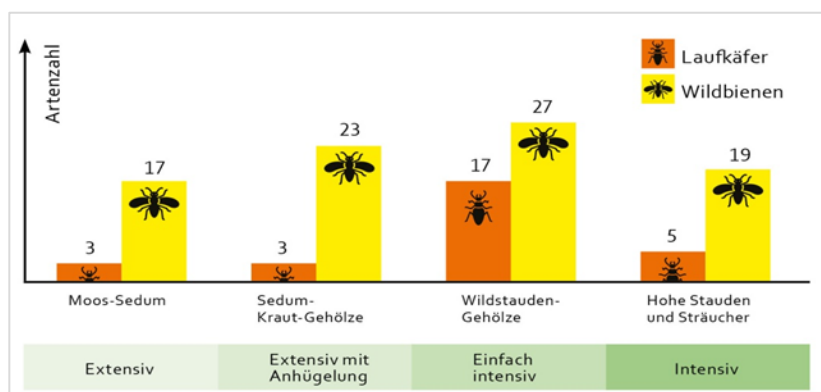


Abbildung 28: Artenzahlen an Wildbienen und Laufkäfern auf Gründächern in Abhängigkeit von der Vegetationsform [85]

Auch Solargründächer unterstützen die Biodiversität. Durch die Beschattung der Module entstehen verschiedene Schattenverhältnisse und Feuchtigkeitsstadien, was sich positiv auf die Bestandsentwicklung der Fauna und Flora auswirken kann. Die entsprechenden Abhängigkeiten sind noch Gegenstand von aktuellen Untersuchungen. Als Beispiel konnten im Rahmen des Projektes «SMART?Roofs» auf einem Solargründach der Prodega in Basel 33 Käferarten nachgewiesen werden. Darunter auch zwei stark gefährdete Arten [86, 87].

Sofern es das System erlaubt, kann die Substrathöhe durch wellenförmigen Einbau stärker variiert werden, ähnlich wie beim Biodiversitätsgründach (siehe Abbildung 7 und Abbildung 8). Dadurch lässt sich die Artenvielfalt gezielt erhöhen.

Biodiversitäts-Situation in Hamburg

Auf den Gründächern in Hamburg wurden ebenfalls geschützte Pflanzen und Käferarten nachgewiesen. In einer ökofaunistischen Untersuchung der Umweltbehörde in Hamburg in Zusammenarbeit mit der Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften wurden sieben Dächer genauer untersucht. Insgesamt wurden dabei 281 Arten auf den Dächern registriert, darunter auch mehrere seltene Arten und Arten, die auf der Roten Liste der bedrohten Tierarten stehen [87].

Weiter konnte, wie in Abbildung 29 dargestellt, auf sieben Gründächern in Hamburg durch Vegetationsaufnahmen nach Braun-Blanquet seltene, sich auf der Roten Liste befindenden Pflanzenarten nachgewiesen werden. Identifiziert wurden Arten aus den natürlichen Pflanzengesellschaften der Ruderalflora, Trocken- und Halbtrockenrasen sowie Fettwiesen. Auch diese Untersuchung zeigt, dass ein höherer Substrataufbau sowie verschiedene Strukturen zur Biodiversitätsförderung die dynamische Entwicklung der Vegetation und Artenvielfalt auf dem Dach positiv beeinflussen [88].

	Extensiv Nr. 1	Extensiv Nr. 2	Semi-Intensiv mit Biodiversitätsbausteinen	Semi-Intensiv	Intensiv	Solargründach	Retentionsgründach
Erstellungsjahr:	2008	2011	2021	2012	2005/2006	2015/2016	2020
Anzahl Arten:	18	13	36	27	23	21	24
Anzahl Rote-Liste Arten:	2	2	7	4	2	1	4
Foto der Dachfläche:							

Abbildung 29: Vegetationsanalysen Gründächer Hamburg: Tabellarische Übersicht der untersuchten Gründachtypen sowie der dazugehörigen Ergebnisse der Vegetationsaufnahmen [88]

In einer Untersuchung der deutschen Wildtier Stiftung sowie des Unternehmens Wall wurde der Mehrwert von kleinen Dachflächen auf Bushaltestellen untersucht (siehe Abbildung 30). Auf nur zwei untersuchten Dachflächen der Fahrgastunterstände Stadthausbrücke und der Osterstrasse konnten 25 Wildbienen- und 24 Wespenarten nachgewiesen werden. Dabei konnte die sehr seltene Goldwespenart (*Elampus konowi*) sowie eine Sandbienenart (*Andrena denticulata*), die auf der Vorwarnliste der bedrohten Arten Deutschlands aufgeführt ist, identifiziert werden [89]. Dies zeigt wie wertvoll jede Gründachfläche, unabhängig ihrer Größe, als Trittsteinbiotop sein kann.



Abbildung 30: Begrünte Dachfläche der Fahrgastunterstände in Hamburg (Quelle: BuGG)

Eine interne Auswertung der Abteilung Naturschutz der BUKEA hat ergeben, dass die naturschutzrechtliche Eingriffsregelung bei nur etwa 10-30% der in den Jahren 2007-2016 beschlossenen Bebauungspläne angewendet wurde. Eine pauschale Monetarisierung der Dachflächen ist nicht möglich. Eine Anrechnung kann nur fallweise in Form von Ökopunkten erfolgen. Zudem tragen bei vielen Bebauungsplangebieten die Vorhabenträger für die Gebäude nicht direkt die Kosten für die naturschutzrechtlichen Maßnahmen und andere Erschließungsmaßnahmen im Baugebiet, da die Grundstücke hiervon lastenfrei in einer Mischkalkulation von den Gebietsentwicklern an sie verkauft werden. Dies müsste mit mehr zeitlichem Vorlauf näher untersucht werden [83].

Wert der Biodiversitätsförderung durch Dachbegrünung

Der monetäre Wert der Biodiversitätsförderung durch Dachbegrünungen lässt sich anhand der Kosten, die eine Stadt für die Artenförderung aufwendet, ableiten. Dieser monetäre Wert kann durch die Anzahl der begrünbaren Dachflächen geteilt werden. Es ist jedoch zu beachten, dass Dachflächen nicht den gleichen ökologischen Wert wie Bodenhabitats aufweisen. Daher verringert sich der abgeleitete Wert um 40 bis 80 % [53, 58]. In Bezug auf die Stadt Lissabon wurde ein solcher monetärer Wert für die Biodiversitätsförderung durch Gründächer ermittelt. Dieser beläuft sich auf 0,54 Euro/m² für extensive Dachbegrünung und 1,63 €/m² für intensive Dachbegrünung. Im Vergleich dazu ergab die Berechnung für die Stadt Portland (USA) höhere Werte von bis zu 10,20 Dollar/m² für extensive Begrünung und bis zu 20,40 Dollar/m² für intensive Begrünung [53].

Verschiedene Studien zeigen, dass Gründächer einen relevanten Beitrag zum Erhalt und Steigerung der Biodiversität leisten. Es gibt zwar Ansätze, diesen Nutzen ökonomisch zu bewerten, allerdings sind diese Daten bislang nicht verallgemeinerbar, so dass die Förderung der Biodiversität durch Gründächer nicht in den Wirtschaftlichkeitsberechnungen berücksichtigt wurde.

3.6.12

Lärminderung durch Gründächer

Extensive Gründächer können den Schallschutz um bis zu 10 dB bei niedriger Frequenz und bis zu 20 dB bei mittleren Frequenzen erhöhen. Studien zeigen, dass die schalldämmenden Vorteile von Gründächern vergleichbar oder sogar besser sind als ein zusätzliches, wenn auch nicht spezifiziertes Deckenelement. Ausschlaggebend für eine effektive Schalldämmung ist die Schichtstärke des Substrataufbaus, dessen Porosität und Wassersättigungsverhalten sowie der Anteil an Wurzelmasse. Sobald sich eine Pflanzengesellschaft etabliert hat und möglichst flächendeckend ist, wirkt sich dies positiv auf die Lärminderung aus [90]. Eine Verminderung von 3 dB kann bereits eine Reduktion der Schallenergie um 50 % bedeuten. Bei einer Minderung um 10 dB reduziert sich die Schallenergie um 90 %, was etwa als Hälfte der Lautstärke empfunden wird [35].

Der Schallschutz durch Dachbegrünungen kann insbesondere in Stadtgebieten mit hoher Lärmbelastung, beispielsweise in der Nähe von Einflugschneisen, zu merklichen Kosteneinsparungen führen. In Lärm unbelasteten Gebieten wird dagegen von einem sehr geringen Nutzen ausgegangen. Bei großflächig angelegten Dachbegrünungen könnte generell auch die Geräuschkulisse der Innenstadt leicht gedämpft werden [69].

In Hamburg liegt der Flughafen relativ zentral im Stadtgebiet. Der Schallpegel von Fluglärm wird vom Menschen als besonders störend empfunden, weshalb der Lärmaktionsplan der Stadt Hamburg besonders darauf achtet [91]. Für die mit Fluglärm belasteten Gebiete in Hamburg (siehe Abbildung 31) würde eine Dachbegrünung somit einen Nutzen als Lärmschutz bieten.



Abbildung 31: Durch Fluglärm in Hamburg belastete Flächen, die im Jahr 2022 eine Größe von 11,52 km² aufwiesen [92]

2022 waren 11,52 km² durch Fluglärm mit dem Höchstwert von 62 dB(A) belastet (grüne Linie in der Abbildung). Von der gesamten Stadtfläche (755,2 km²) sind dies ca. 1,5 %. Aufgrund des kleinen Anteils der Fluglärm belasteten Gebiete wird der monetäre Wert

nicht in die Kosten-Nutzen Betrachtung miteinbezogen, auch wenn dieser in diesen Gebieten signifikant ist.

Da nur 1,5 % der Stadtfläche stark durch Fluglärm belastet ist, werden Einsparungen aufgrund der Lärm mindernden Wirkung von Gründächern in der allgemeinen Wirtschaftlichkeitsrechnung für die gesamte Stadt Hamburg nicht berücksichtigt. Im betroffenen Einzelfall können sie jedoch eine signifikante Höhe erreichen.

Verkehrslärm ist eine relevante Lärmquelle, die die gesamte Stadt betrifft. Da dieser jedoch im Wesentlichen über die Fassaden und Fenster und nur in geringem Umfang über die Dächer in die Gebäude gelangt, ist der lärmreduzierende Effekt von Gründächern bei Verkehrslärm relativ gering und wird deshalb nicht betrachtet.

3.6.13

Brandschutz durch Gründächer

In der Brandschutztechnischen Auslegung (BPD BTA) der Freien und Hansestadt Hamburg gelten Dachbegrünungen weitestgehend als harte Bedachungen [93]. Folgende Anforderungen werden dabei an extensive Dachbegrünungen gestellt:

„Zu § 30 Abs. 4 Nr. 2; Begrünte Dächer

Bei extensiv begrünten Dächern²⁸ ist ein ausreichender Widerstand gegen Feuer und strahlende Wärme gegeben, wenn

- eine mindestens 3 cm starke Substratschicht mit höchstens 20 Gewichtsprozent organischen Bestandteilen vorhanden ist (bei anderen Begrünungsaufbauten ist als Nachweis einer „harten Bedachung“ ein Nachweis nach DIN 4102-4 Teil 7 zu führen);*
- Gebäudeabschlusswände, Brandwände oder Wände, die anstelle von Brandwänden zulässig sind, mindestens 0,30 m über das begrünte Dach (bezogen auf die Oberkante Substratschicht) geführt sind;*
- Sofern diese Wände aufgrund bauordnungsrechtlicher Bestimmungen nicht über Dach geführt werden müssen, genügt auch eine 0,30 m hohe Aufkantung aus nicht brennbaren Baustoffen oder ein 1,00 m breiter Streifen aus massiven Platten (Baustoffklasse A) oder aus einer mindestens 5 cm starken Schicht aus Grobkies;*
- vor Öffnungen in der Dachfläche (z. B. Dachfenster, Lichtkuppeln) und vor Wänden mit Öffnungen ein mindestens 0,5 m breiter Streifen aus Platten (Baustoffklasse A) oder aus einer mindestens 5 cm starken Schicht aus Grobkies aufgebracht wird (außer wenn die Brüstung der Wandöffnung mehr als 0,80 m über Oberkante Substrat hoch ist);*
- vor Dachausstiegen eine Fläche von 1,00 m x 1,00 m mit Platten (Baustoffklasse A) belegt ist oder mit einer mindestens 5 cm starken Schicht aus Grobkies versehen wird;*

- *bei aneinandergereihten, giebelständigen Gebäuden im Bereich der Traufe ein in der Horizontalen gemessener, mindestens 1 m breiter Streifen nachhaltig unbegrünt bleibt und mit einer Dachhaut aus nicht brennbaren Baustoffen versehen wird.“*

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

Gründächer können den Brandschutz verbessern und somit zu Kosteneinsparungen durch Vermeidung anderweitiger Brandschutzmaßnahmen führen. Allerdings lassen sich diese nicht verallgemeinern, so dass sie in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung nicht berücksichtigt wurden.

3.7

Wirtschaftlichkeitsberechnungen

3.7.1

Steuerliche Aspekte der Wirtschaftlichkeitsberechnungen

In Kapitel 3.5 sind die Invest- und Instandhaltungskosten von Gründächern netto, d.h. ohne Umsatzsteuer (USt.) angegeben. Für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit sind jedoch für viele Gebäudeeigentümer:innen die Buttokosten inkl. USt. relevant.

Nettokosten wären zu verwenden, wenn die Gebäudeeigentümer:innen vorsteuerabzugsberechtigt sind und sie damit die bezahlte Umsatzsteuer vom Finanzamt wieder zurückerhalten. Vorsteuerabzugsberechtigt sind Unternehmen, die selbst Umsatzsteuer ausweisen und an das Finanzamt abführen. Private Eigentümer:innen, die Gebäude und Wohnungen selbst nutzen, fallen nicht darunter. Doch auch Eigentümer:innen, die Gebäude und Wohnungen vermieten, bezahlen meist keine Umsatzsteuer, da die Vermietung nach § 4 Nummer 12 Umsatzsteuergesetz (UStG) befreit ist. Allerdings können sie freiwillig nach § 9 UStG für eine Umsatzsteuerpflicht optieren. Dann muss von den Mieter:innen auf die Miete zusätzlich Umsatzsteuer bezahlt werden und die Eigentümer:innen können die für die Herstellung und den Betrieb des Gebäudes anfallende Umsatzsteuer als Vorsteuer geltend machen. Dies ist dann vorteilhaft, wenn an gewerblich tätige Mieter:innen vermietet wird, deren Miete eine Geschäftsausgabe ist und sie somit die Umsatzsteuer auf die Miete als Vorsteuer geltend machen können.

Für die Wirtschaftlichkeitsberechnungen wird davon ausgegangen, dass die kleineren Gebäude bis 500 m² Flachdachgröße Wohngebäude sind mit Selbstnutzung oder mit steuerbefreiter Vermietung. Für sie werden Bruttokosten inkl. USt. angesetzt. Für

Gebäude mit Flachdächern von 2.000 m² oder 5.000 m² wird angenommen, dass diese von Unternehmen genutzt werden, die vorsteuerabzugsberechtigt sind. Deshalb werden für diese beiden Größen die Nettokosten angesetzt.

Für PV-Anlagen muss die Umsatzsteuer nicht berücksichtigt werden, da seit Januar 2023 nach § 12 Absatz 3 Nummer 1 Satz 1 UStG der Umsatzsteuersatz auf 0 Prozent für die Lieferungen von Solarmodulen an den Betreiber einer Photovoltaikanlage reduziert ist. Eingeschlossen sind dabei die für den Betrieb einer Photovoltaikanlage wesentlichen Komponenten und die Speicher, die dazu dienen, den mit Solarmodulen erzeugten Strom zu speichern. Dies gilt, sofern die Photovoltaikanlage auf oder in der Nähe von Privatwohnungen, Wohnungen sowie öffentlichen und anderen Gebäuden, die für dem Gemeinwohl dienende Tätigkeiten genutzt werden, installiert wird [94]. Alle anderen, z.B. auf und an gewerblichen Gebäuden installierte PV-Anlagen, werden in der Regel gewerblich betrieben, so dass die Eigentümer:innen vorsteuerabzugsberechtigt sind und die Nettowerte verwendet werden können.

Eine Übersicht, welche Kosten für welche Anlagengrößen brutto oder netto angesetzt wurden, ist in Tabelle 17 dargestellt.

Tabelle 17: Übersicht, welche Kosten in der Wirtschaftlichkeitsrechnung brutto (mit USt.) und welche netto (ohne USt.) angesetzt wurden

Flachdach- größe	Art der Mieter:in- nen der Wohnung bzw. des Gebäudes	Invest + Instand- haltungskosten		Einsparungen durch Nutzen		
		Schwarzdach Gründach	PV-Anlage	Mulden- Rigolen	Wert- steigerung Immobilie	Nutzen sonst
50 m ² - 500 m ²	Privat	Brutto	Netto	Brutto	Ja	Brutto = Netto
2.000 m ² – 5.000 m ²	Gewerblich	Netto	Netto	Netto	Nein	Netto

Sonstige steuerliche Vorteile, z.B. in Bezug auf die Einkommenssteuer, wurden in den Wirtschaftlichkeitsberechnungen nicht berücksichtigt, da sie stark von der steuerlichen Situation der Eigentümer:innen abhängen. Beispielsweise können Eigentümer:innen die Investitionen in ein wärmedämmendes Gründach nach § 35c Einkommenssteuergesetz (EStG) steuerlich geltend machen, wenn das Gebäude mindestens 10 Jahre alt ist und ausschließlich für eigene Wohnzwecke genutzt wird.

3.7.2

Kostenübersicht der Wirtschaftlichkeitsberechnungen

Die in den Wirtschaftlichkeitsberechnungen verwendeten Kosten werden im Folgenden zusammenfassend dargestellt, die Herleitung der Kosten ist in Kapitel 3.5 und 3.6 beschrieben.

Unterschieden wird hierbei nach einmaligen Kosten, die in Tabelle 18 und nach jährlichen Kosten, die in Tabelle 19 zusammengefasst sind. Die spezifischen Kosten pro Dachfläche sind für die verschiedenen Komponenten angegeben. Für die Gründachkosten wurden die Richtwerte für einer extensive Begrünung mit ca. 10 cm Gründachaufbauhöhe für eine 0-5° Dachneigung in mehrschichtigem Aufbau verwendet (siehe Tabelle 8), die typisch für Gründächer sind. Die Kosten für die Dachabdichtung sind für alle Dacharten dieselben, jedoch hat das Gründach eine längere Lebensdauer von 40 anstatt 25 Jahren. Weitere Kostenvorteile von Gründächern z.B. dass sie wesentlich weniger Schadensanfällig bei Großhagelereignissen sind, wurden nicht berücksichtigt, da diese nicht verallgemeinerbar sind.

Tabelle 18: Spezifische einmalige Kosten der verschiedenen Komponenten in Abhängigkeit der Dachgröße, bei welcher Dachart diese anzusetzen sind, ist mit einem „X“ vermerkt

Einmalige Investitionskosten (in den Wirtschaftlichkeitsberechnungen angesetzt, Angaben in m² Gründach)						
	Dach- Abdich- tung	Dach- begrü- nung (ohne PV-Anlage)	Dach- begrü- nung (bei Solar- gründach)	Wurzel- schutz Gründach	PV- Anlage (auf Gründach)	PV- Anlage (auf Schwarz- dach)
Schwarz- dach	25 Jahre	-	-	-	-	-
Gründach	40 Jahre	X	-	X	-	-
Solar- gründach	40 Jahre	-	X	X	X	-
PV-Dach	25 Jahre	-	-	-	-	X
Dachgröße	€/m²	€/m²	€/m²	€/m²	€/m²	€/m²
50 m²		119,0 ³	178,5 ³		73,18 ⁴	86,09 ⁴
100 m²	44,63	89,3 ³	178,5 ³	2,98 ³	95,17 ⁴	111,96 ⁴
200 m²	+ 94,01 ¹	53,6 ³	119,0 ³		101,86 ⁴	119,84 ⁴
500 m²		47,6 ³	83,3 ³		98,72 ⁴	116,14 ⁴
2.000 m²	37,5	35 ⁵	65 ⁵	2,5 ⁵	95,55 ⁵	112,41 ⁵
5.000 m²	+ 79,0 ²	30 ⁵	55 ⁵		91,78 ⁵	107,97 ⁵

¹ Brutto-Werte und ² Netto-Werte für Einbau sowie Rückbau und Entsorgung der Dachabdichtung

³ Brutto-Werte, da private Mieter:innen oder Eigennutzung

⁴ Netto- = Brutto-Werte, da Umsatzsteuer 0

⁵ Netto-Werte, da gewerbliche Mieter:innen mit Vorsteuerabzugsberechtigung

Die Kosten pro kW PV-Leistung nehmen mit der Anlagengröße und damit mit der Größe der Dachfläche ab. Da die PV-Kosten aber auf den m² Gründach bezogen sind und das

Gründach einen 1 m breiten Randstreifen zusätzlich zur Solarinstallationsfläche aufweist, der bei kleinen Flächen einen deutlich größeren Anteil als bei großen Flächen ausmacht, steigen in Tabelle 18 die PV-Anlagenpreise pro m² Gründach bis 200 m² Dachfläche an und nehmen erst dann mit der Größe ab. Die PV-Anlagenpreise sind auf dem Gründach 15 % geringer, da das Montagegestell bereits in den Gründachkosten enthalten ist.

Gründächer weisen gegenüber Schwarzdächern höhere Instandhaltungskosten auf, allerdings profitieren sie von reduzierten Niederschlagswassergebühren, die jährlichen Kosten sind in Tabelle 19 zum Vergleich pro m² Dachfläche differenziert nach der Dachgröße angegeben. Auch die Instandhaltungskosten der PV-Anlage sind angegeben, allerdings nicht die Einnahmen bzw. die Einsparung für den Solarstrom, die den Kosten gegenübergestellt werden.

Tabelle 19: Spezifische jährliche Betriebskosten der verschiedenen Komponenten in Abhängigkeit der Dachgröße, bei welcher Dachart diese anzusetzen sind, ist mit einem „X“ vermerkt

Jährliche Betriebskosten						
(in den Wirtschaftlichkeitsberechnungen angesetzt, Angaben in m ² Gründach)						
	Nieder- schlags- wasser- gebühren	Nieder- schlags- wasser- gebühren	Instand- haltung Schwarz- dach	Instand- haltung Gründach (ohne PV-Anl.)	Instand- haltung Gründach (bei PV-Anl.)	Instand- haltung PV- Anlage
Schwarz- dach	X	-	X	-	-	-
Gründach	-	X	-	X	-	-
Solargrün- dach	-	X	-	-	X	X
PV-Dach	X	-	X	-	-	X
Dachgröße	€/ (m ² *a)	€/ (m ² *a)	€/ (m ² *a)	€/ (m ² *a)	€/ (m ² *a)	€/ (m ² *a)
50 m ²	0,76	0,38	1,19	9,52	9,88	0,86
100 m ²			1,19	5,36	5,59	1,12
200 m ²			1,19	4,17	4,4	1,20
500 m ²			1,19	2,98	3,33	1,16
2.000 m ²			1,00	1,5	2,0	1,12
5.000 m ²			1,00	1,0	1,5	1,25

Niederschlagswassergebühren: Brutto = Netto, da ohne USt.

Instandhaltungskosten Schwarz-/Gründach: bis 500 m² brutto, ab 2.000 m² netto

Instandhaltungskosten PV-Anlage: immer netto, da bis 500 m² Umsatzsteuer 0

Tabelle 20 listet alle berücksichtigten Kostenvorteile der Dachbegrünung pro m² Gründach auf (Herleitung siehe Tabelle 12 und Kapitel 3.6). Die Einsparungen durch die verlängerte Lebensdauer der Dachabdichtung und die Mulden-Rigolen-Versickerungen fallen einmalig an, alle anderen Einsparungen sind jährlich geltend zu machen.

Tabelle 20: Spezifische Kostenvorteile der Dachbegrünung bei Gründach und Solargründach

Wirtschaftlichkeitsberechnungen

Nutzen von Dachbegrünung	Kostenvorteile Dachbegrünung (in den Wirtschaftlichkeitsberechnungen angesetzt, pro m ² Gründach)			
	Flachdachgröße:	50 - 500 m ²	2.000 - 5.000 m ²	Einheit Häufigkeit
Einmalig anfallende Kostenvorteile				
Reduktion Investitionsbetrag für Dachabdichtung des Gründachs aufgrund längerer Lebensdauer (1)		37,5 %	37,5 %	- einmalig
Kosteneinsparung für Mulden-Rigolen-Versickerung (2)		39,50	33,19	€/m ² einmalig
Jährlich anfallende Kostenvorteile				
Senkung Niederschlagswassergebühr		0,38	0,38	€/m ² a jährlich
Senkung der Heizkosten		0,06	0,06	€/m ² a jährlich
Senkung der Kühlkosten		0,03	0,03	€/m ² a jährlich
Steigerung Immobilienwert		2,40	0	€/m ² a jährlich
Luftreinigungswirkung (3)		0,137	0,137	€/m ² a jährlich
Solarstrom-Mehrertrag durch Modul-Kühlung (4)		0,38	0,39	€/m ² a jährlich

(1) Die Lebensdauer der Dachabdichtung unter einem Gründach beträgt 40 Jahre ggü. einem Schwarzdach von 25 Jahren, damit beträgt die Investition für die Nutzungsdauer von 25 Jahren 62,5% (=25/40) und die Reduktion beträgt 37,5 %

(2) Mulden-Rigolen: brutto für Dächer bis 500 m² (private), netto ab 2.000 m² (gewerbliche Mieter:innen)
Immobilienwertsteigerung nur für Wohngebäude (Annahme: ab 2.000 m² gewerbliche Gebäude)

Sonstige Kosten sind Gebühren oder gering, so dass sie vereinfachend ohne Unterschied angesetzt werden

(3) Die Luftreinigungswirkung ist ein gesellschaftlicher Nutzen und muss deshalb bei einer betriebswirtschaftlichen Betrachtung (d.h. aus Sicht der Gebäudeeigentümer:innen) unberücksichtigt bleiben. Da der Anteil bei Flachdächern von 50 bis 500 m² nur etwa 5 % und von 2.000 – 5.000 m² nur etwa 23 % der jährlichen Einsparungen (ohne Solarstrom-Mehrertrag) ausmacht, ist der Effekt auf die Berechnungsergebnisse jedoch sehr gering und es wird aufgrund der Übersichtlichkeit nur die volkswirtschaftliche Berechnung durchgeführt.

(4) Der Solarstrom-Mehrertrag von 4 % führt zu Mehreinnahmen bei Volleinspeisung bei einem 200 m² Dach zu etwa 0,38 €/m²a und bei einem 2.000 m² Dach zu 0,39 €/m²a, für kleine Dächer fällt der Kostenvorteil kleiner, bei größeren Dächern größer aus, da die spezifische installierte PV-Leistung kleiner bzw. höher ist. Die Angabe für 50 – 500 m² Dachgröße bezieht sich auf das 200 m² Dach und für 2.000 – 5.000 m² auf das 2.000 m² Dach.

Alle Investitionskosten und -kosteneinsparung sind beispielhaft für ein 200 m² großes Solargründach in Abbildung 32 dargestellt. Dabei wird deutlich, dass bei einem Solargründach Kosteneinsparungen gegenüber einem Schwarzdach bzw. einem PV-Dach (ohne Begrünung) in allen Bereichen, d.h. der Dachabdichtung, der PV-Anlage und dem Gründach vorliegen. In der Summe betragen die Netto-Investitionskosten für ein Solargründach 226,36 Euro pro m² Dachfläche, die Mehrkosten gegenüber einem Schwarzdach (ohne PV-Anlage) betragen allerdings nur 87,73 Euro (39 %). Damit ist ein PV-Dach mit 258,48 Euro Investitionskosten teurer als ein Solargründach unter Berücksichtigung der Kostenvorteile.

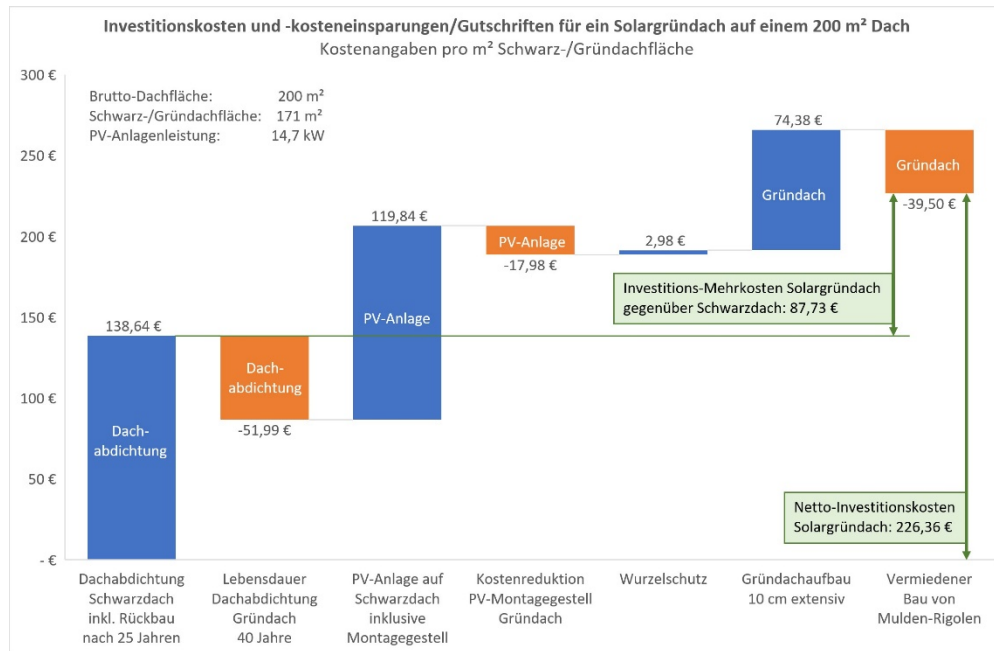


Abbildung 32: Investitionskosten und -kosteneinsparungen/Gutschriften für ein Solargründach auf einem 200 m² großen Dach, Kostenangaben pro m² Brutto-Dachfläche (blaue Balken: Kosten, orange Balken: Kosteneinsparungen bzw. Gutschriften)

Die jährlichen Betriebskosten sowie -kosteneinsparungen und Gutschriften für ein Solargründach auf einer 200 m² große Dachfläche sind in Abbildung 33 dargestellt. Durch die auch in Tabelle 20 aufgelisteten und erläuterten Kosteneinsparungen und Gutschriften ergeben sich Betriebs-Mehrkosten gegenüber einem Schwarzdach von nur 1,02 Euro pro m² Gründach und Jahr. Dabei ist der volkswirtschaftliche Vorteil von 0,137 Euro pro m² und Jahr aufgrund der Luftreinigungswirkung eingerechnet. Bleibt dieser in einer betriebswirtschaftlichen Rechnung unberücksichtigt, erhöhen sich die Betriebs-Mehrkosten auf 1,16 Euro pro m² Gründach pro Jahr. Dem gegenüber stehen jährliche Einnahmen für die Einspeisevergütung von 9,60 Euro pro m² Gründach, was deutlich macht, warum die Berücksichtigung der Luftreinigungswirkung keinen nennenswerten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung hat.

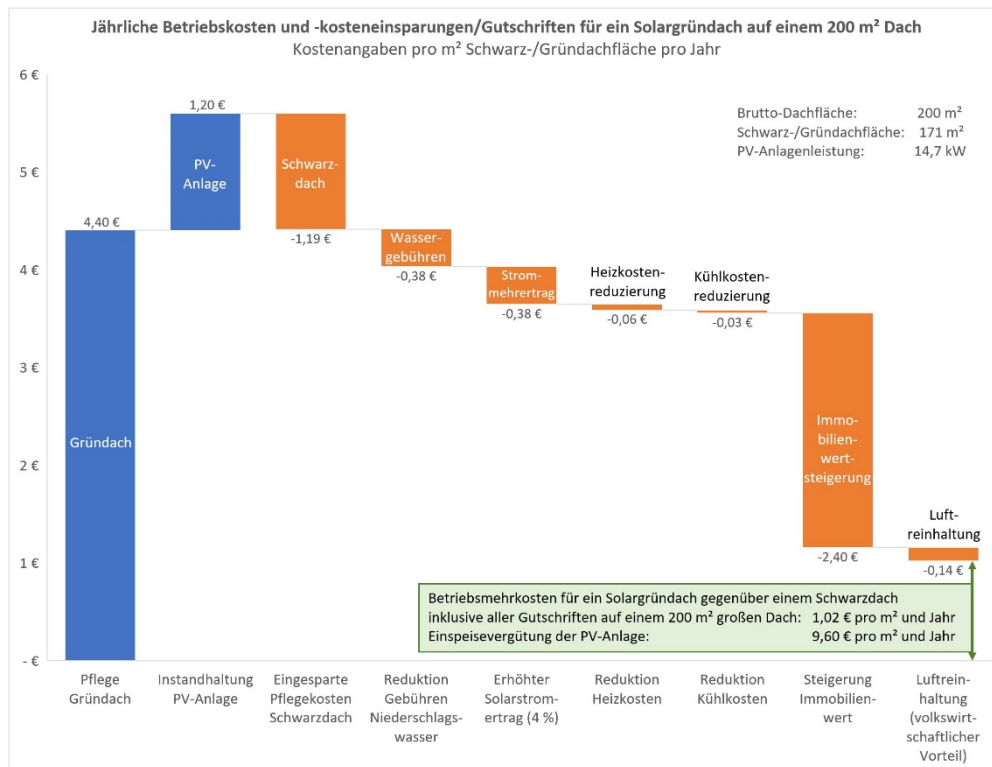


Abbildung 33: *Jährliche Betriebskosten und -kosteneinsparungen/Gutschriften für ein Solargründach auf einem 200 m² großen Dach, Kostenangaben pro m² Dachfläche und Jahr (blaue Balken: Kosten, orange Balken: Kosteneinsparungen bzw. Gutschriften), die jährliche Einspeisevergütung ist nicht grafisch dargestellt.*

Im Folgenden werden die **Invest- und Betriebs-Mehrkosten für die verschiedenen Dacharten (Gründach, Solargründach, PV-Dach) gegenüber einem Schwarzdach dargestellt**. Die Wirtschaftlichkeitsberechnungen beziehen sich auf eine Lebens- und Nutzungsdauer der Komponenten von 25 Jahren. Die verlängerte Lebensdauer der Dachabdichtung unter einem Gründach sowie der Dachbegrünung selbst von 40 Jahren wird berücksichtigt, indem jeweils nur die anteiligen Kosten für die Nutzungsdauer von 25 Jahre (25 von 40 Jahren, d.h. 62,5 %) angesetzt werden.

Beim **Solargründach** ergeben sich die in Tabelle 21 dargestellten spezifischen Mehrkosten gegenüber der Umsetzung eines Schwarzdaches (nicht begrüntes Dach ohne Kieschüttung). Die Invest-Mehrkosten (inkl. der PV-Anlagenkosten) nehmen mit der Dachgröße kontinuierlich ab. Die Kostenabnahme ist bei den Betriebs-Mehrkosten noch viel deutlicher. Die Kostenvorteile des Gründachs (siehe Tabelle 20) sind unabhängig von der Dachgröße, so dass ihr Anteil mit der Größe deutlich ansteigt. Ab 200 m² Dachgröße sind die Kostenvorteile in gleicher Größenordnung wie die Betriebs-Mehrkosten. Allerdings sind die Kostenvorteile durch das Gründach für 2.000 m² und 5.000 m² deutlich geringer, da hier keine Immobilienwertsteigerung angesetzt wird (siehe Kapitel 3.6.8). Die in den Wirtschaftlichkeitsberechnungen genutzten effektiven Betriebs-Mehrkosten liegen somit nur noch zwischen 0 und 1 € pro m² Gründach pro Jahr.

Tabelle 21: Spezifische Invest- und Betriebs-Mehrkosten Solargründach sowie Kostenvorteile in Abhängigkeit von der Dachgröße

Solargründach-Mehrkosten gegenüber Schwarzdach (bezogen auf Gründachfläche)				
Dachgröße Brutto	Invest- Mehrkosten einmalig	Betriebs- Mehrkosten jährlich	Kostenvorteile Gründach jährlich	Effektive Betriebs- Mehrkosten jährlich
m ²	€/m ²	€/(m ² *a)	€/(m ² *a)	€/(m ² *a)
50	96,9	9,30	3,007	6,29
100	118,9	5,21	3,007	2,20
200	88,4	4,04	3,007	1,03
500	63,0	3,04	3,007	0,03
2.000	62,4	1,63	0,607	1,02
5.000	52,4	0,98	0,607	0,37

Vergütung Solarstrom bzw. Einsparung Strombezugskosten sowie Solarstrom-Ertragssteigerung sind nicht berücksichtigt, Investkosten beinhalten die Gutschrift für Mulden-Rigolen-Versickerung.
Bis 500 m² werden Brutto-Kosten verwendet, ab 2.000 m² Netto-Kosten

Beim **Gründach** sind die Investkosten unter Berücksichtigung der Kostenvorteile für alle Dachgrößen geringer als beim Schwarzdach, so dass negative Mehrkosten resultieren (siehe Tabelle 22). Dies bedeutet, dass die geringeren Kosten für die Dachabdichtung und das Gründach aufgrund der verlängerten Lebensdauer von 40 Jahren sowie die Einsparungen bei der Mulden-Rigolen-Versickerung größer sind als die Investkosten für die Dachbegrünung.

Tabelle 22: Spezifische Invest- und Betriebs-Mehrkosten Solargründach sowie Kostenvorteile in Abhängigkeit der Dachgröße

Gründach-Mehrkosten gegenüber Schwarzdach (bezogen auf Gründachfläche)				
Dachgröße Brutto	Invest- Mehrkosten einmalig	Betriebs- Mehrkosten jährlich	Kostenvorteile Gründach jährlich	Effektive Betriebs- Mehrkosten jährlich
m ²	€/m ²	€/(m ² *a)	€/(m ² *a)	€/(m ² *a)
50	-13,4	8,33	3,007	5,32
100	-32,0	4,36	3,007	1,35
200	-54,4	3,17	3,007	0,16
500	-58,1	1,98	3,007	-1,03
2.000	-51,9	0,50	0,607	-0,11
5.000	-55,0	0,00	0,607	-0,61

Vergütung Solarstrom bzw. Einsparung Strombezugskosten sowie Solarstrom-Ertragssteigerung sind nicht berücksichtigt, Investkosten beinhalten die Gutschrift für Mulden-Rigolen-Versickerung.
Bis 500 m² werden Brutto-Kosten verwendet, ab 2.000 m² Netto-Kosten

Die Betriebs-Mehrkosten sinken ebenfalls stark ab bis auf 0 € pro m² für 5.000 m² Dachfläche, da die Instandhaltungskosten für das Gründach und das Schwarzdach sich nicht unterscheiden (siehe Tabelle 7 und Tabelle 8). Bei Berücksichtigung der Kostenvorteile des Gründachs ergeben sich ab 500 m² Dachgröße effektive Betriebs-Mehrkosten, die negativ sind.

Beim **PV-Dach** sind die Investitions- und Betriebskosten grundsätzlich höher als beim Schwarzdach, da die Kosten für die PV-Anlage hinzukommen und keine Gutschriften vorhanden sind, denn die Gutschriften beim Solargründach werden nur durch die Dachbegrünung verursacht. Tabelle 23 stellt die Mehrkosten für die PV-Anlage dar. Die Einnahmen bzw. die Einsparungen durch den erzeugten Solarstrom sind nicht aufgelistet, da sie vom Geschäftsmodell abhängen, sie werden in den folgenden Wirtschaftlichkeitsrechnungen berücksichtigt.

Tabelle 23: Spezifische Invest- und Betriebs-Mehrkosten des PV-Dachs in Abhängigkeit der Dachgröße

PV-Dach Mehrkosten gegenüber einem Schwarzdach (bezogen auf die Schwarzdachfläche)				
Dach- größe	PV-Module in Südausrichtung		in Ost-West Ausrichtung	
	Invest- Mehrkosten einmalig	Betriebs- Mehrkosten jährlich	Invest- Mehrkosten einmalig	Betriebs- Mehrkosten jährlich
m ²	€/m ²	€/m ²	€/m ²	€/m ²
50	86,1	0,86	121,0	1,92
100	112,0	1,12	155,7	1,56
200	119,8	1,20	160,7	1,61
500	116,1	1,16	158,4	1,58
2.000	112,4	1,12	150,0	1,50
5.000	108,0	1,25	153,3	1,53

3.7.3

Wirtschaftlichkeit Solargründach

Die Wirtschaftlichkeit von Solargründächern wurde für PV-Anlagen mit Modulen in Südausrichtung entsprechend der in Kapitel 3.3 beschriebenen Vorgehensweise berechnet unter Berücksichtigung aller Kostenvorteile wie in Tabelle 20 dargestellt. Die Ergebnisse der Amortisationszeiten zeigt Tabelle 24 für die unterschiedlichen Dachgrößen. Für 50 m² Dachfläche ist keine Amortisation (k.A.) innerhalb der Lebensdauer von 25 Jahren gegeben. Hier können die Einnahmen aus der Nutzung des Solarstroms und die Gutschriften aus den ökonomischen Nutzen der Begrünung die relativ hohen spezifischen Kosten für das kleine Gründach nicht ausgleichen.

Bei 100 m² Dachfläche liegt die Amortisationszeit des Solargründachs bei Volleinspeisung mit 25 Jahren gerade noch innerhalb der Nutzungsdauer, erreicht allerdings nicht die im Klimaschutzgesetz geforderte Wirtschaftlichkeitsschwelle von 20 Jahren. Bei 25 % Eigenverbrauch ist bereits eine Amortisationszeit von 17 Jahren gegeben. Ab 200 m²

Größe überwiegen die Einnahmen, Einsparungen und Kostenvorteile die Kosten für das Solargründach (PV-Anlage und Gründach) deutlich und es ergeben sich sehr attraktive Amortisationszeiten zwischen 6 und 13 Jahren.

Wirtschaftlichkeitsberechnungen

Tabelle 24: Amortisationszeiten für Solargründächer mit Modulen in Südausrichtung nach Dachgröße und Betriebsweise (Volleinspeisung bzw. 25 % Eigenverbrauch)

Amortisationszeiten Solargründächer mit Modulen in Südausrichtung				
Dachgröße	PV-Ver- gütungs- klasse	PV-Leistung	Amortisationszeit bei	
			Volleinspeisung	25 % Eigenverbrauch
m ²	kW	kW	Jahre	Jahre
50	bis 10	2,05	k.A.	k.A.
100	bis 10	6,05	25	17
200	10 – 40	14,7	13	10
500	40 – 100	46,2	8	6
2.000	100 – 400	214	8	9
5.000	400 – 1000	563	7	7

k.A. = keine Amortisation innerhalb der Nutzungsdauer von 25 Jahren

Bis zur Dachgröße von 500 m² wird zur Berechnung die feste Einspeisevergütung genutzt, ab 2.000 m² das Marktprämienmodell mit dem anzulegenden Wert

Bei 25 % Eigenverbrauch wird die restliche Solarstrommenge (75 %) eingespeist und nach EEG vergütet

Sensitivitätsanalyse – Reduzierte Lebensdauer der Dachbegrünung

Die Tatsache, dass die Dachabdichtung unter Gründächern sowie die Gründachaufbauten selbst mit ca. 40 Jahren eine deutlich längere Lebensdauer aufweisen als eine frei bewitterte Dachabdichtung (Schwarzdach) oder eine PV-Anlage mit einer Lebensdauer von ca. 25 Jahren, wird so berücksichtigt, dass nur 62,5 % der Gründachinvestitionskosten (25 von 40 Jahren) angesetzt werden in der Berechnung, die eine Nutzungsdauer von 25 Jahren umfasst.

Um den Einfluss der Lebensdauer des Gründaches und seiner Dachabdichtung auf die Wirtschaftlichkeit zu untersuchen, wurde diese zusätzlich auch für 25 statt 40 Jahren berechnet. Tabelle 25 zeigt die Amortisationsraten für beide Lebensdauern im Vergleich.

Tabelle 25: Amortisationszeiten Solargründach für unterschiedliche Lebensdauern der Dachbegrünung für ein 500 m² Dach

Amortisationszeiten Solargründach für unterschiedliche Lebensdauern Begrünung						
Lebensdauer Begrünung	Dachgröße	PV-Verfügungsklasse	PV-Leistung	Kosten Begrünung über 25 Jahre	Amortisationszeit bei Volleinspeisung	25 % Eigenverbrauch
Jahre	m²	kW	kW	EUR/m²	Jahre	Jahre
40	500	40 – 100	46,2	52,1	8	6
25	500	40 – 100	46,2	83,3	17	15

Bei 25 Jahren Lebensdauer fallen die vollen Investitionskosten von 83,3 EUR/m² über die Nutzungsdauer des Solargründachs von 25 Jahren an, bei 40 Jahren nur 62,5 % davon (25 / 40 Jahre), die Kostenangaben sind Brutto-Werte

Die Berechnungen wurden beispielhaft für das 500 m² Dach durchgeführt. Durch die Verkürzung der Lebensdauer der Dachbegrünung und der Dachabdichtung darunter von 40 auf 25 Jahre würde sich die Amortisationszeit von 8 auf 17 Jahre bzw. von 6 auf 15 Jahre deutlich verlängern. Bei kleineren Dächern ist der Effekt größer, bei größeren Dächern kleiner, da die flächenspezifischen Kosten des Gründachs stärker mit der Größe abnehmen als die spezifischen Kosten für die PV-Anlage und das Schwarzdach. Würde die verlängerte Lebensdauer des Gründachs und der darunter liegenden Dachabdichtung nicht berücksichtigt, würden sich die Amortisationszeiten generell verlängern und das 200 m² Gründach wäre vermutlich nicht mehr wirtschaftlich. Da die Lebensdauer von 40 Jahren für das Gründach und die darunterliegende Dachabdichtung allerdings in der Praxis erwiesen ist, stellt dies nur eine theoretische Betrachtung dar..

3.7.4

Wirtschaftlichkeit Gründach

Die Berechnung der Wirtschaftlichkeit eines Solargründaches kann nicht auf das Gründach angewandt werden, da keine regelmäßigen Einnahmen bzw. Einsparungen durch den Solarstrom erzielt werden. Allerdings kann sich durchaus eine Wirtschaftlichkeit im Vergleich zum Schwarzdach einstellen, wenn die Mehrkosten für das Gründach (teilweise) negativ sind. Deshalb sind zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit des Gründaches grundsätzlich die folgenden vier Fälle zu unterscheiden.

- **Fall 1: Invest- und Betriebskosten sind höher**
Die Investitionskosten des Gründachs sind höher als die des Schwarzdachs, die Betriebskosten liegen ebenfalls höher, in diesem Fall kann zu keinem Zeitpunkt ein wirtschaftlicher Vorteil des Gründaches gegenüber dem nicht begrüntem Dach erreicht werden
- **Fall 2: Investkosten höher, Betriebskosten niedriger**
Die Investitionskosten des Gründachs liegen über denen des Schwarzdachs, die Betriebskosten liegen jedoch niedriger. In diesem Fall kann eine

Wirtschaftlichkeit dann erreicht werden, wenn innerhalb der Lebensdauer der Vorteil in den Betriebskosten ausreicht, um die erhöhten Investitionskosten auszugleichen

- **Fall 3: Investitionskosten niedriger, Betriebskosten höher**
Die Investitionskosten des Gründachs liegen unter denen des Schwarzdachs, die Betriebskosten liegen jedoch darüber. Die Wirtschaftlichkeit kann erreicht werden, wenn der Vorteil in den Investitionskosten größer ist als die Betriebs-Mehrkosten über die Lebensdauer. Wird die Parität schon vor dem Ende der Nutzungsdauer erreicht, ist das Gründach nicht wirtschaftlich.
- **Fall 4: Invest- und Betriebskosten niedriger**
Die Investitionskosten und die Betriebskosten des Gründachs liegen unter denen des Schwarzdachs. In diesem Fall ist die Wirtschaftlichkeit des Gründaches ab Jahr 1 gegeben.

In Tabelle 26 sind die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsanalysen für alle Gründächer dargestellt. Für die kleinste Dachgröße von 50 m² ist keine Wirtschaftlichkeit des Gründaches gegeben, da die Betriebskosten des Gründachs über 25 Jahre größer sind als die Kostenvorteile bei den Investitionskosten. Bei 100 m² ergibt sich ein grenzwertiger Fall, da die effektiven Betriebskosten nach 23,7 Jahren die Kostenvorteile der Investitionskosten aufgezehrt haben. Bei einer Dachgröße von 200 m² ergibt sich ebenfalls Fall 3, doch sind die Betriebskosten über 25 Jahre deutlich geringer als die Kostenvorteile der Investitionskosten, so dass die Wirtschaftlichkeit sicher gegeben ist. Ab 500 m² Dachgröße sind Gründächer sowohl bei den Investitionen als auch bei den Betriebskosten günstiger als Schwarzdächer, so dass die Wirtschaftlichkeit grundsätzlich gegeben ist. Bei den Investitions-Mehrkosten und den effektiven Betriebskosten wurden die Vorteile der Gründächer in Bezug auf die verlängerte Lebensdauer der Dachabdichtung und des Gründachs sowie die Einsparungen bei den Mulden-Rigolen berücksichtigt. Bei den effektiven Betriebskosten sind die geringeren Niederschlagswassergebühren und die sonstigen Guthchriften berücksichtigt (für die Immobilienwertsteigerung nur bis 500 m²).

Tabelle 26: Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsanalyse für Gründächer

Dachgröße	Gründach-/ Schwarz- dach- fläche	Wirtschaftlichkeit eines Gründaches gegenüber einem Schwarzdach		
		Investitions- Mehrkosten ¹	Effektive Betriebs- Mehrkosten ¹	Wirtschaftlichkeit
m ²	m ²	€/m ²	€/(m ² a)	
50	36.86	-13,4	5,32	Fall 3: nicht wirtschaftlich
100	81	-32,0	1,35	Fall 3: grenzwertig
200	171	-54,4	0,16	Fall 3: wirtschaftlich
500	456	-58,1	-1,03	Fall 4: wirtschaftlich
2.000	1.911	-51,9	-0,11	Fall 4: wirtschaftlich
5.000	4.851	-55,0	-0,61	Fall 4: wirtschaftlich

¹ spezifische Kosten bezogen auf die Gründach- bzw. Schwarzdachfläche

3.7.5

Wirtschaftlichkeit PV-Dach

Die Amortisationszeiten für PV-Dächer (ohne Begrünung) wurde entsprechend der in Kapitel 3.3 beschriebenen Methodik für die eingeführten Dachgrößen für zwei Betriebsweisen berechnet, der Volleinspeisung mit Vergütung nach EEG sowie dem Eigenverbrauch von 25 % des erzeugten Solarstroms und Einspeisung der restlichen 75 % des Solarstroms mit Vergütung nach EEG. Die Ergebnisse sind für die PV-Anlagen mit den Modulen in Süd-Ausrichtung und in Ost-West-Ausrichtung in Tabelle 27 dargestellt.

In allen Fällen wird die Amortisation innerhalb der Lebensdauer der PV-Anlage von 25 Jahren erreicht. Eine Amortisation innerhalb von 20 Jahren, wie in § 5 Absatz 1 Nummer 2 PVUmsVO als Wirtschaftlichkeitsschwelle gefordert, ist allerdings bei Ost-West-Ausrichtung der PV-Module bei Volleinspeisung und einer Dachgröße bis 200 m² nicht gegeben.

Die Berechnungen zeigen folgende grundsätzlichen Ergebnisse:

- Aufgrund des höheren Solarstromertrags ist die Wirtschaftlichkeit von nach Süden ausgerichteten PV-Anlagen größer als von nach Ost-West ausgerichteten PV-Anlagen. Die Ost-West-Ausrichtung wird allerdings trotzdem vielfach gewählt, da sie architektonisch besser zu integrieren ist und die Solarstromerzeugung gleichmäßiger über den Tag verteilt ist, was auch beim Eigenverbrauch Vorteile mit sich bringt. Für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit sollte allerdings die Südausrichtung als Referenz dienen, da die Gebäudeeigentümer:innen diese nutzen können und die Vorteile der Ost-West-Ausrichtung individuell und damit nicht verallgemeinerbar sind.
- Mit steigender Anlagengröße sinkt tendenziell die Amortisationszeit aufgrund der sinkenden spezifischen Anlagenpreise. Allerdings ist dies nicht immer der Fall, da mit steigender Anlagengröße auch die Einspeisevergütung sinkt und bei Großanlagen (2.000 m² und 5.000 m²) ein gewerblicher Betrieb angenommen wird, was u.a. bedeutet, dass ein Industriestrompreis angesetzt wurde, der deutlich unter dem privaten Strompreis liegt.
- Der deutlichste Unterschied zwischen Volleinspeisung und 25 % Eigenverbrauch des Solarstroms ist bei den Dachgrößen bis 200 m² zu verzeichnen. Durch den Eigenverbrauch des Stroms kann die Amortisationszeit deutlich gesenkt werden, da die Einspeisevergütung mit ca. 10 ct/kWh deutlich geringer ist als der Strombezugspreis mit ca. 34 ct/kWh.
- Bei den Dachgrößen 2.000 m² und 5.000 m² unterscheidet sich die Amortisationszeit zwischen Volleinspeisung und 25 % Eigenverbrauch deutlich weniger, da die Differenz von Industriestrompreis mit 21,4 ct/kWh zur Einspeisevergütung (bzw. der anzulegende Wert) mit ca. 6 bis 9 ct/kWh für den Solarstrom deutlich geringer ist als bei kleineren Anlagen mit einem Privatstromtarif.

Die Detailergebnisse der Berechnungen können dem Anhang entnommen werden.

Tabelle 27: Amortisationszeiten für PV-Dächer (ohne Gründach) mit Modulen in Südausrichtung nach Dachgröße und Betriebsweise (Volleinspeisung bzw. 25 % Eigenverbrauch)

Amortisationszeit von PV-Dächern (PV-Anlagen auf Schwarzdach)						
Dach- größe	Ausrichtung: Süd			Ausrichtung: Ost-West		
	PV- Leistung	Volleinspeisung	25 % Eigenverbrauch	PV- Leistung	Volleinspeisung	25 % Eigenverbrauch
m ²	kW	Jahre	Jahre	kW	Jahre	Jahre
50	2,05	19	13	2,90	23	17
100	6,05	18	13	8,59	22	16
200	14,7	18	14	20,9	22	16
500	46,2	15	13	65,5	19	16
2.000	214	15	16	305	18	18
5.000	563	15	15	799	20	18

Bis zur Dachgröße von 500 m² wird zur Berechnung die feste Einspeisevergütung genutzt, ab 2.000 m² das Marktprämienmodell mit dem anzulegenden Wert
Bei 25 % Eigenverbrauch wird die restliche Solarstrommenge (75 %) eingespeist und nach EEG vergütet

3.7.6

Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Solargründach, Gründach und PV-Dach

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnungen zusammengefasst und verglichen. Die Amortisationszeiten sind für das Solargründach, das Gründach und das PV-Dach in Tabelle 28 und in Abbildung 34 im Überblick dargestellt.

Tabelle 28: Amortisationszeiten der verschiedenen Dacharten im Vergleich nach Dachgröße

Amortisationszeiten Solargründach, Gründach und PV-Dach					
Dachgröße	Schwarz-/ Gründach Fläche	PV- Leistung ¹	Amortisationszeiten ² von		
			Solargründach	Gründach	PV-Dach
m ²	m ²	kW	Jahre	Jahre	Jahre
50	36.86	2,05	k.A. / k.A.	k.A.	19 / 13
100	81	6,05	25 / 17	k.A.	18 / 13
200	171	14,7	13 / 10	Amortisation	18 / 14
500	456	46,1	8 / 6	Amortisation	15 / 13
2.000	1.911	215	5.48 / 9	Amortisation	15 / 16
5.000	4.851	563	7 / 7	Amortisation	15 / 15

¹ Die PV-Anlagen des Solargründachs und PV-Dachs sind nach Süden ausgerichtet

² Der erste Wert der Amortisationszeit gibt die Anzahl der Jahre bei Volleinspeisung, der zweite Wert die Anzahl der Jahre bei 25 % Eigenverbrauch und 75 % Resteinspeisung an
k.A. = keine Amortisation innerhalb der Lebensdauer von 25 Jahren

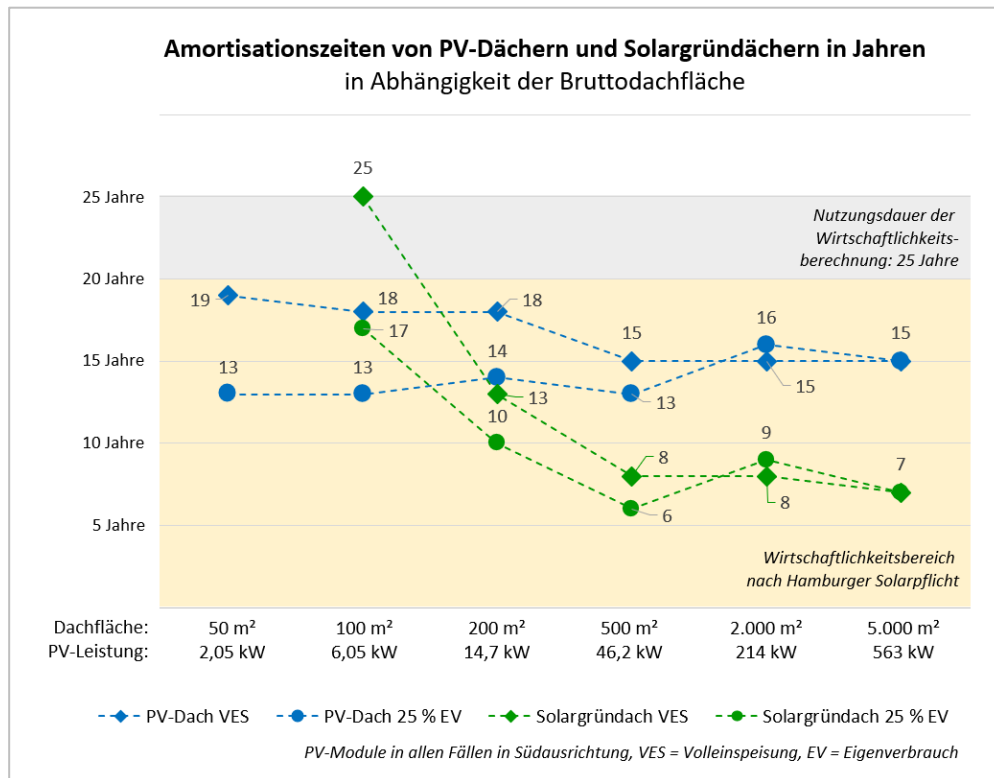


Abbildung 34: Amortisationszeiten von PV-Dächern und Solargründächern in Abhängigkeit der Dachfläche für Volleinspeisung (VES) und 25 % Eigenverbrauch (EV)

Mittelt man die Eingangsdaten für die Dachgrößen 100 m² und 200 m² berechnen sich für ein 150 m² großes Dach mit 10,4 kW PV-Leistung für ein Solargründach Amortisationszeiten von 17 Jahren bei Volleinspeisung und 13 Jahren bei 25 % Eigenverbrauch. Allerdings sei darauf hingewiesen, dass die Unsicherheiten für diese Berechnung größer sind als bei den anderen Berechnungen, da unbekannt ist, wie groß der Fehler bei der Mittelwertbildung der Kostenwerte ist. Die Berechnungsergebnisse sind im Detail in Kapitel 5.4 aufgelistet.

Die wesentlichen Erkenntnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnungen sind:

- **Solargründächer sind ab 150 m² Dachgröße in der Regel wirtschaftlich**
Solargründächer mit nach Süden ausgerichteten PV-Modulen weisen ab 150 m² Dachfläche generell und ab 100 m² Dachfläche bei 25 % Eigenverbrauch des Solarstroms Amortisationszeiten von deutlich unter 20 Jahren auf und sind somit wirtschaftlich im Sinne der Hamburger Solargründach-Pflicht. Solargründächer sind ab 200 m² Dachfläche sogar wirtschaftlich attraktiver als PV-Dächer (ohne Begrünung). Bei kleineren Dachflächen weisen Solargründächer in der Regel keine Amortisation innerhalb von 20 Jahren auf, da ihre flächenspezifischen Kosten relativ hoch sind.
- **Gründächer sind ab 200 m² kostengünstiger als Schwarzdächer**
Ab einer Dachgröße von 200 m² überwiegen die Kostenvorteile die Mehrkosten von Gründächern gegenüber Schwarzdächern, sodass sowohl Gründächer wirtschaftlicher als Schwarzdächer als auch Solargründächer wirtschaftlicher

als PV-Dächer (ohne Begrünung) sind. Bei Dachgrößen von 50 und 100 m² sind die flächenspezifischen Gründachkosten deutlich höher und werden von den Kostenvorteilen nicht aufgewogen, so dass sich keine Wirtschaftlichkeit für Gründächer einstellt.

- **PV-Dächer sind für alle Dachgrößen wirtschaftlich**

Trotz des Anstiegs der PV-Anlagenpreise in den vergangenen 2 Jahren sind PV-Dächer (ohne Begrünung) in allen Größen bei Südausrichtung wirtschaftlich, da die Vergütung bzw. der anzulegende Wert im EEG angepasst und die Bedingungen für den Betrieb von PV-Anlagen verbessert wurden. Die Amortisationszeiten mit 15 bis 19 Jahren sind aktuell weniger attraktiv als noch vor einigen Jahren. Allerdings wird in den kommenden Jahren eine weitere Absenkung der PV-Anlagenpreise erwartet, was die Wirtschaftlichkeit verbessern wird.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass typische Solargründächer und Gründächer in der Regel ab 150 m² Dachgröße im Sinne der Solargründach-Pflicht wirtschaftlich sind, teilweise auch schon darunter (z.B. bei Eigenverbrauchs des Solarstroms).

Da die Solargründach-Pflicht aufgrund der vorgegebenen Wirtschaftlichkeitsanforderung in § 5 Absatz 1 Nummer 2 PVUmsVO von maximal 20 Jahren Amortisationszeit nur für Dachgrößen ab etwa 150 m² greift, wird empfohlen, für kleinere Dächer die Installation von Solargründächern durch Förderanreize zu stimulieren.

Die Berechnungen basieren auf typischen Kosten und Annahmen von Kostenvorteilen, die im konkreten Fall deutlich geringer oder höher sein können. Somit sind Möglichkeiten zu schaffen, dass im Einzelfall die wirtschaftliche Vertretbarkeit bzw. Nicht-Vertretbarkeit nachgewiesen werden kann.

4.1

Grundlagen und Annahmen

Die **Wirtschaftlichkeit von Solargründächern ist dann nicht gegeben**, wenn für einen konkreten Fall eines Solargründaches im Vergleich zu den typischen Annahmen, die in Kapitel 3.7.2 und 3.7.3 genannt sind, entweder die Kosten soweit erhöht und/oder die Einnahmen bzw. Gutschriften soweit reduziert sind, dass die Amortisationszeit länger als 20 bzw. 25 Jahre beträgt. Nach Definition in Kapitel 3.2.2 bezieht sich die wirtschaftliche Vertretbarkeit auf die erwartete Lebensdauer des Solargründaches, die mit 25 Jahren angenommen wird, in der PV-Pflicht-Verordnung vom Dezember 2020 wurde diese auf 20 Jahre festgelegt. Unabhängig von der geforderten Amortisationsdauer ergeben sich vier grundsätzlich zu unterscheidende Fälle, in denen die Solargründächer möglicherweise nicht wirtschaftlich sind, die in Tabelle 29 erläutert werden.

Tabelle 29: Fälle, in denen die wirtschaftliche Vertretbarkeit möglicherweise nicht gegeben ist

1) Reduzierte Solareinstrahlung aufgrund ungünstiger Ausrichtung der PV-Module

Erläuterung:

Am höchsten ist der Solarstromertrag und die damit generierten Einnahmen oder Einsparungen, wenn die Solarstrahlung senkrecht auf das PV-Modul trifft. Je flacher der Einstrahlungswinkel ist, desto geringer die Solarenergiemenge, die das Modul erreicht. Die Sonne ist ständig in Bewegung, so dass sich auch die erzeugte Solarstrommenge ständig ändert. Betrachtet man ein ganzes Jahr, wird die höchste Solarstrommenge in Hamburg dann erzeugt, wenn das PV-Module in einer Neigung von 30° bis 40° nach Süden orientiert aufgestellt wird. Bei einer Neigung von 10° und einer Orientierung nach Westen oder Osten beträgt der Jahresstromertrag 85% vom Maximalwert bei Südausrichtung mit 40°. Wird das Modul senkrecht installiert nach Süden, sind es noch 75 % (siehe auch Abbildung 23).

Bewertung und Empfehlung:

PV-Anlagen können auf Flachdächern beliebig ausgerichtet und geneigt montiert werden. Bei optimaler Ausrichtung nach Süden mit 30° bis 40° Neigung ergibt sich eine Amortisationszeit zwischen 13 und 19 Jahren (siehe Tabelle 27). Andere, ungünstigere Orientierungen müssen nicht betrachtet werden. Denn es bleibt den Gebäudeeigentümer:innen überlassen, welche Orientierung und Neigung der PV-Module sie wählen, eine Einschränkung der Pflicht kann aber nicht damit begründet werden, dass freiwillig eine andere als die ökonomisch optimale Ausrichtung und Neigung der PV-Module gewählt wird.

Eine verminderte Wirtschaftlichkeit aufgrund einer nicht optimalen Ausrichtung der PV-Module ist auf Flachdächern nicht zu berücksichtigen.

2) Reduzierter Solarstromertrag aufgrund von Verschattungen

Erläuterung:

Wird die Dachfläche eines Gebäudes durch Aufbauten auf dem Dach (technische Anlagen, Treppenhäuser etc.), andere Gebäudeteile, benachbarte Gebäude, Bäume oder andere Störelemente teilweise verschattet, reduziert sich die jährliche Einstrahlungsmenge und damit die erzeugte Solarstrommenge der PV-Anlage. Eine Verschattung von PV-Modulen tritt meist nur temporär auf, da die Sonne kontinuierlich ihre Himmelsposition ändert. Außerdem erfolgt die Solareinstrahlung in Deutschland nur zu etwa 50 % direkt (der Sonnenstrahl erreicht auf dem kürzesten Weg von der Sonne das PV-Modul) und zu etwa 50% diffus (die Sonnenstrahlen werden an Wolken oder anderen Gegenständen reflektiert und erreichen aus allen Himmelsrichtungen das PV-Modul). Die diffuse Strahlung ist von einer Verschattung nur wenig betroffen. Entscheidend ist, wie stark die Einstrahlungsmenge und damit die erzeugte Solarstrommenge über das Gesamtjahr durch die Verschattung tatsächlich reduziert wird. Diese Reduktion ist meist geringer als vermutet. Wenn sie allerdings einen nennenswerten Betrag erreicht, kann die Wirtschaftlichkeit nicht mehr gegeben sein.

Bewertung und Empfehlung:

Durch eine signifikante Verschattung eines Flachdaches kann das Solargründach unwirtschaftlich werden. Um den durch die Verschattung verursachte Reduktion des Solarstromertrags und die daraus resultierende Verlängerung der Amortisationszeit nachzuweisen, sind entsprechende Verfahren zu definieren.

Dabei sollten folgende Anforderungen eingehalten werden:

- Die PV-Module, die aufgrund der Verpflichtung zu installieren sind, sind in optimaler Ausrichtung so auf dem Dach zu positionieren, dass die Verschattung minimiert wird (also z.B. ausreichende Abstände zu verschattenden Elementen).
- Der Solarstromertrag ist für ein ganzes Jahr mit einem Simulationsprogramm, das die Geometrie der verschattenden Elemente erfasst und ihre Verschattungswirkung berücksichtigt, für den konkreten Standort zu berechnen. Diese Berechnungen sind durch eine:n Solarexpert:in durchzuführen und darüber ein Bericht zu erstellen.
- Die Wirtschaftlichkeitsberechnung ist mit dem ermittelten jährlichen Solarstromertrag durchzuführen, um die Amortisationszeit zu berechnen.
- Wenn die Verschattung nur einen Teil des Daches betrifft, ist die nach Solargründach-Pflicht ermittelte PV-Anlagengröße soweit zu reduzieren, dass die Wirtschaftlichkeit wieder gegeben ist.

3) Erhöhte Kosten für die PV-Anlage aufgrund von Zusatzkosten

Erläuterung:

Gegenüber den in Kapitel 3.7.2 dargestellten durchschnittlichen Kosten von PV-Anlagen können die Kosten im Einzelfall auch deutlich abweichen. Dies ist im Neubau selten der Fall, da die Planung des Gebäudes und der Haustechnik bezüglich der Installationsflächen, der Statik, der Leitungsführung und der Einspeisepunkte auf die PV-Anlage hin angepasst werden können.

In Bestandsgebäuden kann es dagegen notwendig sein, die Statik des Daches zu verstärken, um die PV-Anlage aufzunehmen, ungewöhnlich lange Kabel aufgrund der

Fälle, in denen die Pflichten aus wirtschaftlichen Gründen nicht greifen

verfügbaren Leitungswege zu legen oder den Zählerkasten und möglicherweise weitere Teile der Hauselektrik zu erneuern, um die PV-Anlage fachgerecht installieren zu können. Wenn die Statik des Daches die Installation der PV-Anlage nicht zulässt, können beispielsweise auch Stahlträger über die Dachbreite gelegt werden, die sich nur auf den Außenwänden abstützen.

Wenn diese Zusatzkosten den Kosten der PV-Anlage zugerechnet werden, da sie im Zusammenhang mit der PV-Anlage entstehen, kann die Amortisationszeit so stark ansteigen, dass die Anlage unwirtschaftlich wird.

Diese Kosten hängen stark von den baulichen und sonstigen Bedingungen des Einzelfalls ab und müssen deshalb für den Einzelfall nachgewiesen werden.

Bewertung und Empfehlung:

Wenn nachgewiesen werden kann, dass die Kosten, die durch die Installation eines Solargründaches entstehen (Kosten für die PV-Anlage, das Gründach und die unvermeidbaren Zusatzkosten) zu einer Amortisationszeit führen, die länger ist als die Nutzungsdauer, ist das Solargründach wirtschaftlich nicht vertretbar und die Gebäudeeigentümer:innen sind von der Pflicht zu befreien.

Wenn nachgewiesen wird, dass die Zusatzkosten für die Installation einer PV-Anlage unvermeidbar sind und durch diese die Wirtschaftlichkeit nicht mehr gegeben ist, ist von der Pflicht zu befreien.

4) Erhöhte Kosten für das Gründach aufgrund baulicher Randbedingungen

Erläuterung:

Gegenüber den in Kapitel 3.5.3 und 3.7.2 dargestellten durchschnittlichen Kosten eines Gründaches können die Kosten im Einzelfall auch deutlich abweichen. Dies ist im Neubau seltener der Fall, da die Planung des Gebäudes und seines Daches das Gründach bereits berücksichtigen kann.

In Bestandsgebäude dagegen kann es bei Dachsanierungen der Fall sein, dass die Statik des Daches verstärkt werden müsste, um die zusätzliche Last des Gründaches aufzunehmen oder dass aufgrund von besonders verwinkelten und zerklüfteten Dachflächen oder aus sonstigen Gründen der Aufwand für die Erstellung des Gründaches besonders hoch ist.

Wenn aufgrund von unvermeidbaren Mehrkosten die Umsetzung eines konkreten Gründaches die Amortisationszeit so stark ansteigen lässt, dass diese länger ist als die Nutzungsdauer, dann ist die Wirtschaftlichkeit nicht mehr gegeben und eine Befreiung von der Pflicht begründet.

Diese Kosten hängen stark von den baulichen und sonstigen Bedingungen des Einzelfalls ab und müssen deshalb für den Einzelfall nachgewiesen werden.

Bewertung und Empfehlung:

Wenn nachgewiesen werden kann, dass die Kosten für die Installation des Gründaches (als Grundlage für das Solargründach) zu einer Amortisationszeit führen, die länger ist als die Nutzungsdauer, ist das Solargründach wirtschaftlich nicht vertretbar und die Gebäudeeigentümer:innen von der Pflicht zu befreien.

Bei wirtschaftlicher Nicht-Vertretbarkeit müssen die Verpflichteten die Möglichkeit haben, diese zu belegen. Hierzu ist eine Vorlage bereitzustellen, die den Nachweis ermöglicht, dass die Kosten unvermeidbar sind und eine Wirtschaftlichkeit entsprechend der festgelegten Definition nicht erreicht wird.

Fälle, in denen die Pflichten aus wirtschaftlichen Gründen nicht greifen

Hinweis: Die Rahmenbedingungen für die Durchführung der Wirtschaftlichkeitsrechnung sind zu definieren, um einheitliche, nachvollziehbare und vergleichbare Berechnungen zu erhalten und die Bewertung und ggf. Befreiung von der Pflicht einheitlich und gerecht erfolgt. Dabei können die in Kapitel 3 erläuterte und verwendete Berechnungsmethodik sowie die identifizierten Parameter verwendet oder diese bei Bedarf angepasst werden.

Fälle, in denen die Pflichten aus wirtschaftlichen Gründen nicht greifen

4.2

Vorschläge zur Regelung der wirtschaftlichen Zumutbarkeit von Solargründächern

Wie oben dargestellt ist davon auszugehen, dass bei einem Teil der verpflichteten Gebäudeeigentümer:innen die wirtschaftliche Vertretbarkeit bei der Pflichterfüllung nicht gegeben ist. Diese sind von der Pflicht auf Antrag zu befreien.

Für die Beantragung, Beurteilung und die Entscheidung über die Befreiung sollte ein klares und transparentes Verfahren etabliert werden, um nachvollziehbare, einheitliche und damit gerechte Entscheidungen zu treffen. Diese sollte deshalb folgenden Kriterien genügen:

- Für den Antrag auf Befreiung ist ein Formular bereitzustellen, in das alle beizubringenden Informationen einzutragen oder dem Nachweise beizulegen sind, die zur Beurteilung des Antrags erforderlich sind.
- Der Nachweis des aufgrund einer Verschattung reduzierten Solarstromertrags ist durch eine Simulationsrechnung einer Solarexpertin oder eines Solarexperten nachzuweisen.
- Die unvermeidbaren Zusatzkosten für die PV-Anlage oder die unvermeidbaren Mehrkosten für das Gründach aufgrund der baulichen und sonstigen konkreten Bedingungen des Bauvorhabens sind durch ein Angebot zu belegen und zu begründen. Alternativ könnten mehrere Angebote gefragt werden, was allerdings aufgrund des höheren Aufwands für die Antragsteller unangemessen erscheint.
- Es ist eindeutig zu definieren, wie die Wirtschaftlichkeitsrechnung durchzuführen ist und welche Randbedingungen zu verwenden sind. Hierzu könnte die in diesem Gutachten genutzte Vorgehensweise übernommen oder abgewandelt werden.

4.3

Verbesserung der Wirtschaftlichkeit von Gründächern

Wie die Übersicht der Amortisationszeiten in Tabelle 28 zeigt, ist die Wirtschaftlichkeit von Solargründächern bei einer Dachgröße von 50 m² nicht und bei einer Dachgröße von 100 m² nur bei 25 % Eigenverbrauch des Solarstroms gegeben. Ab einer Bruttodachgröße von 150 m² sind Solargründächer wirtschaftlich mit Amortisationszeiten zwischen 6 und 17 Jahren.

Bei der Wirtschaftlichkeitsrechnung wurden bis auf die Luftreinhaltungswirkung nur betriebswirtschaftliche Vorteile berücksichtigt (siehe Tabelle 12). Der gesellschaftliche Nutzen von Gründächern zum Erhalt der Biodiversität und der Vermeidung von Hitzeinseln

und Verbesserung der Mikroklimas durch aktive Kühlung der Umgebungsluft ließ sich im Rahmen des Gutachtens nicht ökonomisch bewerten. Allerdings wird die Bedeutung dieser Nutzen in Zukunft deutlich zunehmen, so dass weitere Untersuchungen und eine Berücksichtigung künftig sinnvoll wären.

Fälle, in denen die Pflichten aus wirtschaftlichen Gründen nicht greifen

Die Solargründach-Pflicht greift nicht bei Lösungen, die für die Gebäudeeigentümer:innen wirtschaftlich nicht vertretbar sind. Somit ist die Pflicht auch dann nicht gegeben, wenn der gesellschaftliche Nutzen ermittelt wird und so groß ist, dass er Solargründächer auch auf kleineren Dachflächen volkswirtschaftlich attraktiv macht.

Da es im Interesse der Stadt ist, die Umwelt- und volkswirtschaftlichen Vorteile von Gründächern generell zu erschließen, ist eine Förderung von Solargründächern für Dachgrößen kleiner 150 m² sinnvoll, um die Gebäudeeigentümer:innen anzureizen, diese auch ohne Solargründach-Pflicht umzusetzen.

Die Höhe einer möglichen Zuschussförderung sollte sich an den Erfahrungen mit bisherigen Förderhöhen und deren Anreizwirkung ausrichten. Für kleine Gründächer auf 50 m² Dachfläche sind die Pflegekosten bei externer Vergabe der Pflegearbeiten an einen Dienstleister so hoch sind, dass sich selbst bei einer 100 % Förderung der Investitionskosten keine Wirtschaftlichkeit einstellt. Bei 100 m² Dachfläche wäre bei 25 % Eigenverbrauch des Solarstroms eine 90 % Förderung der Investitionskosten von 150 €/m² erforderlich, um die Amortisationszeit von über 25 Jahre auf 20 Jahre zu reduzieren.

5.1

Antworten auf die Fragen der Expertenanhörung

Am 21. September 2023 fand eine öffentliche Expertenanhörung des Verkehrsausschusses mit dem Stadtentwicklungsausschuss der Bürgerschaft der Freien und Hansestadt Hamburg statt [95]. Die Gutachter wurden von der Auftraggeberin gebeten, einzelne Fragen, die im Rahmen der Anhörung aufgetreten sind, zu beantworten. Folgende Antworten wurden am 20. Oktober 2023 übermittelt:

1) Solargründach im Bestand: Was hat Vorrang, wenn das Dach nicht gleichzeitig ein Gründach und eine PV-Anlage aus statischen Gründen tragen kann.

Hierbei ist zu bedenken, dass das flächenspezifische Gewicht von PV-Anlagen deutlich geringer ist als von Gründächern.

- PV-Anlagen haben ein relativ geringes flächenspezifisches Gewicht, auf Flachdächern beträgt dieses ohne Beschwerung 7-14 kg/m² (Echtsolar¹) bis zu ca. 25 kg/m² (Solaranlagen Portal²), die Beschwerung beträgt zusätzlich 20 kg/m² oder mehr (entfällt jedoch bei Dachbegrünung).
- Extensive Gründächer haben ein deutlich höheres Gewicht bei 5 – 15 cm Gründachaufbau von 50 – 170 kg/m² (Optigrün³) oder bei 10 cm Gründachaufbau von 130 – 150 kg/m² (Dachbegrünungtotal⁴).

Wenn also das Dach kein Solargründach tragen kann, kann es vermutlich auch kein Gründach tragen, da die PV-Anlage das Gewicht nur um ca. 17 % erhöht (175 kg zu 150 kg pro m²). Allerdings kann davon ausgegangen werden, dass in vielen Fällen immer noch eine PV-Anlage installiert werden kann, da das flächenspezifische Gewicht der PV-Anlage nur ca. 17 % des Zusatzgewichts des Gründaches beträgt (ohne Beschwerung). Zusätzlich gibt es bei PV-Anlagen auch Leichtmodule, die das Gewicht noch reduzieren.

Vor diesem Hintergrund wird empfohlen, die Verordnung wie folgt zu gestalten:

Wenn das Bestandsdach aufgrund der Statik nachweislich kein Solargründach tragen kann, ist eine PV-Anlage ohne Gründach zu installieren. Sollte der Nachweis erbracht

¹ <https://echtsolar.de/photovoltaik-flachdach-gewicht/>

² <https://www.solaranlagen-portal.com/photovoltaik/flachdach>

³ <https://www.optigruen.de/fachthemen/extensive-dachbegrueung>

⁴ <https://dachbegrueungtotal.de/das-gewicht-eines-gruendachs.html>

werden, dass die Statik des Daches auch nicht geeignet ist, die Auflast einer PV-Anlage ohne Gründach zu tragen, entfällt die Pflicht vollständig.

2) Inwieweit reduzieren andere Dachnutzungen, z.B. Gemeinschaftsräume, Abstellfläche die Solargründach-Pflicht, welche Spielräume bestehen bei der Gestaltung?

Dachflächen mit unvermeidbaren Aufbauten oder technischen Anlagen sind heute von der PV-Pflicht und sollten künftig auch von der Solargründach-Pflicht ausgenommen sein. Abstellflächen und Reserveflächen wären darunter nicht zu zählen. Aufenthaltsflächen wie Dachterrassen zählen zu den unvermeidbaren Aufbauten und reduzieren die Dachfläche, für die die Solargründach-Pflicht gilt.

Eine entsprechende Regelung ist in der Verordnung aufzunehmen.

3) Gibt es bei Metaldächern spezielle Regelungen in der Solargründach-Pflicht, z.B. wenn Grundbucheinträge notwendig werden, wenn Dritte auf dem Dach PV-Anlagen oder Gründachaufbauten fest mit dem Metaldach verbinden?

Generell ist die Klärung von Versicherungs- und baurechtlichen Fragen bei den notwendigen Baumaßnahmen Aufgabe der Bauherr:innen und wurde bei der Solargründach-Pflicht nicht berücksichtigt.

Generell kommen Metaldächer im Bereich der Flachdächer nur selten vor. Für die Fälle, in denen sie realisiert sind und nachgewiesen werden kann, dass die Installation einer Dachbegrünung und PV-Anlage auf einem Flachdach mit Metallabdeckung zu unzumutbaren Kosten führt, ist eine Befreiung im Rahmen der üblichen Antragsmöglichkeiten aufgrund einer Unzumutbarkeit zu beantragen.

4) Erfüllen auch Retentionselemente aus Kunststoff und eine vollflächige Dachbedeckung mit PV-Modulen die Solargründach-Pflicht?

Der Vorteil der von der Fa. Sobeck genannten technischen Lösung gegenüber einem klassischen Solargründach ist, dass (bei ausreichender Dicke der Kunststoffelemente) dieselbe Retentionsfunktion erfüllt wird wie beim Solargründach, gleichzeitig aber eine größere PV-Leistung installiert werden kann.

Die Zielsetzung der Solargründach-Pflicht ist es allerdings, neben der Retentionsfunktion auch eine Kühlungsfunktion durch Verdunstung und einen Beitrag zur Biodiversitätsverbesserung durch die Pflanzen und der Schaffung eines Lebensraums für Insekten etc. zu schaffen. Der Verdunstungseffekt ist beim Solargründach nicht nur durch das Substrat, sondern auch durch die Pflanzen gegeben, so dass das Verdunstungsverhalten noch gleichmäßiger sein wird als allein über die Kunststoffelemente. Wie groß die Unterschiede sind, kann allerdings nicht bewertet werden. Allerdings stellt der Biodiversitätsverbessernde Effekt einen weiteren wichtigen Grund für die Nutzung von Solargründächern dar, so dass die vorgeschlagene Lösung nicht als Erfüllung der Solargründach-Pflicht gewertet werden kann.

7) Ist es sinnvoll, die Solargründach-Pflicht mit CO₂-Minderungswirkung zu bewerten?

Sowohl Gründächer als auch PV-Anlagen haben einen Minderungseffekt auf die CO₂-Emissionen. Diesen genau zu quantifizieren ist allerdings schwierig, weil er stark von den lokalen Bedingungen abhängt. Bei PV-Anlagen ist z.B. wichtig, welcher Strom durch die PV-Anlage verdrängt wird, zwar ist dies immer der Stromnetzbezug, dessen CO₂-Emissionswert hängt jedoch vom Nutzungsprofil des Gebäudes ab und ob z.B. Lasten in die Zeiten der Solarstromerzeugung verschoben werden wie z.B. das Laden von E-Fahrzeugen. Das Gründach reduziert die CO₂-Emissionen z.B. durch die Einsparung des Energiebedarfs zum Kühlen oder Heizen. Wie groß diese sind, hängt allerdings davon ab, welche Klimatisierungsgeräte und welche Heiztechnologien eingesetzt werden. Für das Gründach ist allerdings die Reduktion der CO₂-Emissionen ein Nebeneffekt. Die Hauptgründe sind die Verbesserung des Mikroklimas, Vermeidung des Hitzeinseleffektes, Retentionsfunktion als Schutz gegen Starkregenereignisse und ihre Folgen sowie die Verbesserung der Biodiversität.

Da die Solargründach-Pflicht aus einem Bündel von Gründen erlassen wird, die weit über die CO₂-Emissionsminderung hinausgeht und die Minderung nicht pauschaliert ermittelt werden kann, ist eine Bewertung der Installation eines Solargründachs in Bezug auf die CO₂-Minderungswirkung und möglicherweise eine Kopplung zum Umfang der Pflicht nicht zielführend.

5.2

Dachflächen und PV-Nennleistungen

Die Größe der Flachdächer hat einen erheblichen Einfluss auf die Kosten und die Wirtschaftlichkeit. Um dies zu untersuchen, wurden 6 verschiedene Größen von Flachdächern untersucht und für die verschiedenen Dacharten verglichen. Ausgehend von den Außenmaßen der Flachdächer wurde umlaufend eine Attika mit einer Breite von 50 cm abgezogen. Damit verbleibt die Gründachfläche. Der Randstreifen des Gründachs, der oftmals in Kies ausgeführt wird, ist Teil der Gründachfläche (siehe Tabelle 30).

Tabelle 30: Abmessungen der unterschiedlichen Flachdach- und Gründachgrößen, die im Gutachten verglichen werden

Flachdach Fläche	Gründach Fläche	Anteil Gründach an FD	Flachdach Breite	Flachdach Länge	Gründach Breite	Gründach Länge
m ²	m ²	%	m	m	m	m
50	36,86	74%	7,07	7,07	6,07	6,07
100	81	81%	10	10	9	9
200	171	86%	20	10	19	9
500	456	91%	20	25	19	24
2.000	1.911	96%	50	40	49	39
5.000	4.851	97%	100	50	99	49

Es wird angenommen, dass am Rand des Gründaches ein Streifen von 1 m freigelassen wird, um Zugang zur Solaranlage zu erhalten, die Fassade zu reinigen oder Fluchtwege freizulassen. Somit ist die Solarinstallationsfläche nochmals kleiner als die Gründachfläche, wie in Tabelle 31 dargestellt.

Bei der Ost-Westausrichtung ohne Gründach werden die PV-Modulreihen in 10 bis 15° Neigung abwechselnd nach Osten und nach Westen geneigt. Zwischen jeder zweiten Modulreihe ist ein Gehweg von z.B. 30 cm vorzusehen zur Wartung der Module. So ergibt sich eine Modulfläche, die ca. 87 % der Solarinstallationsfläche ausmacht.

Bei Südausrichtung der PV-Module auf einem begrünten Dach wird angenommen, dass die Breite einer Modulreihe der Breite des Weges zwischen der Modulreihe entspricht, damit noch genügend Licht auf die Begrünung fällt und diese leicht gewartet werden kann. Bei dieser Aufstellart macht die Modulfläche ca. 61 % der Solarinstallationsfläche aus. Zur Berechnung der installierbaren Leistung wurde vereinfacht angenommen, dass die Module einen Wirkungsgrad von 20 % aufweisen. Der Wirkungsgrad der PV-Module steigt kontinuierlich an, er beträgt heute oftmals bereits 22 %, bis zum Jahr 2030 wird mit einem Wirkungsgrad von 25 % gerechnet. Für die Wirtschaftlichkeitsberechnung ist dies aber unerheblich, da die Kosten in Euro pro installiertem Kilowatt angenommen sind.

Tabelle 31: Solarinstallationsfläche, PV-Modulfläche und PV-Leistung für Ost-West-Ausrichtung ohne Dachbegrünung sowie Süd- und Ost-West-Ausrichtung mit Dachbegrünung

Flachdachgröße	Solarinstallationsfläche			Modulfläche		PV Leistung	
	Breite	Länge	Fläche	Ost/West Ausrichtung ohne Gründach	Süd- oder OW-Ausrichtung mit Gründach	Ost/West Ausrichtung ohne Gründach	Südausrichtung oder OW mit Gründach
m ²	m	m	m ²	m ²	m ²	kW	kW
50	4,07	4,07	16,6	14,5	10,2	2,90	2,05
100	7	7	49	42,9	30,2	8,59	6,05
200	17	7	119	104	73,4	20,9	14,7
500	17	22	374	328	231	65,5	46,1
2.000	47	37	1.739	1.524	1.073	305	215
5.000	97	47	4.559	3.994	2.813	799	563

Zu Vergleichszwecken sind in Tabelle 32 die Größen von Schrägdächern (Referenzschrägdach) aufgelistet, die den Flachdach-Größen dieses Gutachtens entsprechen.

Tabelle 32: Größen von Referenzschrägdächern, die den Flachdachgrößen des Gutachtens entsprechen

Dachgröße Flachdach	PV- Leistung Süd-Ausrichtung	Leistungsklasse PV nach EEG	Größe Schrägdach, um die PV-Leistung zu installieren
m ²	kW	kW	m ²
50	2.05	<10	17.6
100	6.05	<10	42.3
200	14.69	10-40	92.2
500	46.15	40-100	262.4
2.000	214.60	100-400	1142.4
5.000	562.60	400-1.000	2916.0

Schrägdach: Dachparallele Installation der PV-Module mit einem Rand von 50 cm auf allen Seiten

5.3 Förderung der Dachbegrünung in Hamburg

Die Stadt Hamburg fördert freiwillig durchgeführte Dachbegrünungen von Gebäudeeigentümer:innen sowie Erbbauberechtigten an Wohn- und Nichtwohngebäuden einschließlich der Nebengebäude und Infrastrukturbauwerke [96].

Folgendes wird gefördert (Stand 07.07.23):

- Freiwillig durchgeführte Dachbegrünungen auf oberirdischen Geschossen (Neubau und Bestand)
- Ab 20 m² Nettovegetationsfläche und bis zu 30° Dachneigung
- Ab mind. 8 cm Substratdicke im Neubau und Bestand bei Gewerbe- und Garagenbauten sowie bei bestehenden Wohn- und Bürogebäuden und sonstigen Gebäuden
- Ab 12 cm Substratdicke beim Neubau von Wohngebäuden, Bürogebäuden und sonstigen Gebäuden
- Alle Kosten der Dachbegrünung im Zusammenhang mit Maßnahmen ab der Oberkante der Dachabdichtung sowie die Fertigstellungspflege

Die Förderkonditionen können der Webseite der Hamburgischen Investitions- und Förderbank (IFB) entnommen werden:

www.ifbhh.de/foerderprogramm/hamburger-gruendachfoerderung

5.4

Detailergebnisse PV-Dach in Süd- und Ost-West-Ausrichtung

Anhang

Tabelle 33: Detailergebnisse der Wirtschaftlichkeitsrechnung für Solargründächer in Süd- und in Ost-West-Ausrichtung

Dachgröße	Ausrichtung	Volleinspeisung (1) 25 % Eigenverbrauch (2)	Amortisationszeit	interner Zinsfuß	Stromgestehungskosten	Kapitalwert	Gesamte Stromerzeugung über 25 Jahre	gesamt EEG Vergütung über 25 Jahre	Direktverbrauch Einsparung über 25 Jahre	Direktvermarktung über 25 Jahre
			Jahre		€/kWh	€	MWh	€	T€	T€
50	Ost West	(1)	>25		0,296	-5.449	41	5.394	0	0
50	Süd	(1)	>25		0,244	-3200	50	6.540	0	0
100	Ost West	(1)	>25	-0,4%	0,154	-2.331	122	15.918	0	0
100	Süd	(1)	25	2,2%	0,127	186	148	19.301	0	0
200	Ost-West	(1)	16	5,2%	0,089	5.529	297	36.657	0	0
200	Süd	(1)	13	7,5%	0,074	9.839	360	44.448	0	0
500	Ost-West	(1)	9	12,3%	0,040	37.596	934	106.059	0	0
500	Süd	(1)	8	14,7%	0,039	46.573	1.132	128.600	0	0
50	Ost-West	(2)	>25		0,296	-4.405	41	2.552	4.232	0
50	Süd	(2)	>25		0,244	-3.277	50	3.094	5.131	0
100	Ost-West	(2)	23	2,7%	0,154	751	122	7.530	12.488	0
100	Süd	(2)	17	5,3%	0,127	4.080	148	9.131	15.142	0
200	Ost-West	(2)	13	8,0%	0,089	11.436	297	17.501	30.323	0
200	Süd	(2)	10	10,5%	0,074	17.002	360	21.221	36.767	0
500	Ost-West	(2)	8	14,7%	0,040	50.261	934	50.193	95.262	0
500	Süd	(2)	6	18,1%	0,033	65.425	1.133	60.860	115.508	0
2000	Ost-West	(1)	10	10,7%	0,050	127.607	4.343	0	0	451
2000	Süd	(1)	8	14,0%	0,042	181.250	5.266	0	0	548
5000	Ost-West	(1)	8	13,6%	0,034	375.344	13.208	0	0	1.219
5000	Süd	(1)	7	17%	0,028	501.308	16.015	0	0	1.478
2000	Ost-West	(2)	11	10,0%	0,050	123.671	4.343	0	281.029	212
2000	Süd	(2)	9	13,0%	0,042	175.867	5.266	0	340.756	256
5000	Ost-West	(2)	8	14,1%	0,034	417.930	13.208	0	854.610	624
5000	Süd	(2)	7	17,6%	0,028	552.945	16.015	0	1.036.241	756

Tabelle 34: Detaillierergebnisse der Wirtschaftlichkeitsrechnung für PV-Dächer (ohne Begrünung) in Süd- und in Ost-West-Ausrichtung

Anhang

	Dach- größe	Aus- rich- tung	Amor- tisa- tions- zeit	inter- ner Zins- fuß	Strom- geste- hungs- kosten	Kapi- talwert	Strom- erzeu- gung über 25 Jahre	EEG Ver- gütung über 25 Jahre	Direktver- brauch Einspa- rung über 25 Jahre	Direkt- vermark- tung über 25 Jahre
			Jahre		€/kWh	€	MWh	€	€	€
Volleinspeisung	50	Ost West	23	2,6%	0,124	278	58,7	7.630	0	0
		Süd	19	4,1%	0,103	736	50,3	6.540	0	0
	100	Ost West	22	3,1%	0,118	1.598	173,9	22.601	0	0
		Süd	18	4,4%	0,100	2.440	148,5	19.301	0	0
	200	Ost- West	22	3,0%	0,106	2.832	422,0	50.246	0	0
		Süd	18	4,6%	0,093	5.974	360,5	44.448	0	0
	500	Ost- West	19	4,1%	0,089	16.842	1.326,3	148.812	0	0
		Süd	15	5,8%	0,076	23.142	1.132,5	128.600	0	0
25 % Eigenverbrauch	50	Ost- West	17	5,1%	0,124	1.755	58,7	3.610	5.986	0
		Süd	13	7,5%	0,103	2.340	50,3	3.094	5.127	0
	100	Ost- West	16	5,6%	0,118	5.964	173,9	10.692	17.719	0
		Süd	13	7,9%	0,100	7.287	148,5	9.131	15.132	0
	200	Ost- West	16	5,6%	0,106	11.800	422,0	24.140	43.009	0
		Süd	14	7,1%	0,093	13.123	360,5	21.221	36.743	0
	500	Ost- West	16	5,8%	0,089	33.550	1.326,3	67.255	135.175	0
		Süd	13	7,8%	0,076	38.464	1.132,5	60.860	115.430	0
Volleinspeisung	2000	Ost- West	18	4,6%	0,076	83.846	6.167	0	0	622.401
		Süd	15	6,3%	0,067	107.983	5.266	0	0	547.921
	5000	Ost- West	20	3,6%	0,075	131.195	16.167	0	0	1.458.403
		Süd	15	5,8%	0,062	242.720	16.015	0	0	1.477.707
25 % Eigenver- brauch	2000	Ost- West	18	4,6%	0,076	85.999	6.167	0	399.121	296.328
		Süd	16	5,9%	0,067	76.889	5.252	0	339.879	255.796
	5000	Ost- West	18	4,6%	0,075	224.130	16.167	0	1.046.325	761.339
		Süd	15	6,6%	0,062	294.448	16.015	0	1.036.472	756.292

5.5 Gebäudekennndaten

Tabelle 35: Zuordnung von Dachflächengrößen zu Gebäudetypen des deutschen Gebäudebestands (Quelle: Wohngebäudetypologie TABULA [97])

Gebäudetyp	Baualter von	Baualter bis	Summe Boden Keller und Boden Erreich	Zugeordnete Dachfläche in diesem Gutachten
			m² Grundfläche	m² Dachfläche
EFH		1859	85,5	100
EFH	1860	1918	78,3	100
EFH	1919	1948	144,9	100
EFH	1949	1957	79,9	100
EFH	1958	1968	115,8	100
EFH	1969	1978	152,3	200
EFH	1979	1983	83,4	100
EFH	1984	1994	75,3	100
EFH	1995	2001	84,3	100
EFH	2002	2009	79,8	100
RH	1860	1918	60,0	50
RH	1919	1948	50,4	50
RH	1949	1957	81,2	100
RH	1958	1968	46,2	50
RH	1969	1978	60,9	50
RH	1979	1983	73,0	50
RH	1984	1994	56,1	50
RH	1995	2001	51,9	50
RH	2002	2009	70,7	50
MFH		1859	173,7	200
MFH	1860	1918	102,8	100
MFH	1919	1948	158,5	200
MFH	1949	1957	355,0	500
MFH	1958	1968	971,1	500
MFH	1969	1978	216,7	200
MFH	1979	1983	248,3	200
MFH	1984	1994	249,4	200
MFH	1995	2001	283,7	200
MFH	2002	2009	619,5	500
GMH	1860	1918	163,7	200
GMH	1919	1948	395,6	500

GMH	1949	1957	353,5	500
GMH	1958	1968	459,2	500
GMH	1969	1978	540,0	500
HH	1958	1968	754,9	500
HH	1969	1978	1469,0	2000

*EFH = Einfamilienhaus, RH = Reihenhaush, MFH = Mehrfamilienhaus,
GMH = Großes Mehrfamilienhaus, HH = Hochhaus*

Anhang

- [1] HAMBURGISCHE BÜRGERSCHAFT: *Hamburgisches Gesetz zum Schutz des Klimas (Hamburgisches Klimaschutzgesetz - HmbKliSchG) vom 20. Februar 2020* (idF v. 20. 2. 2020) (2020)
- [2] HAMBURGISCHE BÜRGERSCHAFT: *Verordnung zur Umsetzung der Pflichten zur Nutzung von Photovoltaik und erneuerbarer Energien bei der Wärmeversorgung nach dem Hamburgischen Klimaschutzgesetz und zur Änderung der Verordnung über Schornsteinfegerarbeiten* (idF v. 22. 12. 2020) (2020). URL <https://www.hamburg.de/klimaschutzgesetz/> – Überprüfungsdatum 2023-08-20
- [3] HAMBURGISCHE BÜRGERSCHAFT: *Gesetz zur Stärkung des Klimaschutzes und des Ausbaus der erneuerbaren Energien in Hamburg (Klimaschutzstärkungsgesetz)* (idF v. 13. 12. 2023) (2023)
- [4] HAMBURGISCHE BÜRGERSCHAFT: *Hamburgisches Gesetz zum Schutz des Klimas (Hamburgisches Klimaschutzgesetz - HmbKliSchG) vom 20. Februar 2020* (idF v. 23. 12. 2023) (2023). URL <https://www.landesrecht-hamburg.de/bsha/document/jlr-KlimaSchGHA2020rahmen> – Überprüfungsdatum 2022-02-12
- [5] HAMBURGER SENAT: *Verordnung zur Umsetzung der Pflichten zur Nutzung von Photovoltaik auf Dach- und Stellplatzflächen nach dem Hamburgischen Klimaschutzgesetz* (idF v. 16. 4. 2024) 2024. URL <https://www.hamburg.de/content-blob/18527360/1485314710a459c90a1ac9e0e22af22d/data/d-hmb-klischstaerkvo-pvumsvo.pdf> – Überprüfungsdatum 2024-04-20
- [6] BUNDESVERBAND GEBÄUDEGRÜN E.V. (BuGG) (Hrsg.); MANN, G. (Mitarb.); Gohlke, R., Wolff, F. (Mitarb.): *BuGG-Marktreport Gebäudegrün 2022*. Berlin, 2022
- [7] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT LANDSCHAFTSENTWICKLUNG LANDSCHAFTSBAU E. V. (FLL): *Dachbegrünungsrichtlinien – Richtlinien für Planung, Bau und Instandhaltung von Dachbegrünungen*. Bonn, 2018
- [8] BUNDESVERBAND GEBÄUDEGRÜN E.V. (BuGG) (Hrsg.): *BuGG Fachinformation "Begrüntes Umkehrdach" : Basisinformationen, Planungshinweise, Beachtenswertes*. Berlin, 2022
- [9] BUNDESVERBAND GEBÄUDEGRÜN E.V. (BuGG) (Hrsg.): *Fachinformation "Solar-Gründach"*. Berlin, 2019
- [10] FREIE UND HANSESTADT HAMBURG, BEHÖRDE FÜR UMWELT, KLIMA, ENERGIE UND AGRARWIRTSCHAFT (BUKEA) (Hrsg.): *Hamburger Naturdach : Pflanzenliste für die extensive Dachbegrünung mit regionalen Arten; Durchwurzelbare Aufbaudicke: 8 -15 cm; Stand: 15.02.2022*. 2022
- [11] FREIE UND HANSESTADT HAMBURG, BEHÖRDE FÜR UMWELT UND ENERGIE (BUE) (Hrsg.): *Handreichung zur Pflege und Wartung von Dachbegrünungen*. 2020
- [12] STRYI-HIPP, Gerhard ; XU-SIGURDSSON, Bin ; STRECKER, Jana ; LONGO, Fabio: *Gutachten über die Grenzen der technischen Möglichkeit und die wirtschaftliche Vertretbarkeit der in § 16 des Hamburgischen Klimaschutzgesetzes erlassenen Nutzungspflicht solarer Strahlungsenergie (PV-Pflicht)*. 2020

- [13] BUNDESTAG: *Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden (Gebäudeenergiegesetz - GEG)* (idF v. 20. 7. 2022)
- [14] WIRTSCHAFTSLEXIKON24.COM: *Interner Zinssatz*. URL <https://www.wirtschaftslexikon24.com/d/interner-zinssatz/interner-zinssatz.htm> – Überprüfungsdatum 20.07.2023
- [15] DR. ALFRED KÖRBLEIN / UMWELTINSTITUT MÜNCHEN E.V.: *Wirtschaftlichkeit von Solarstrom*, 2023. URL <https://umweltinstitut.org/energie-und-klima/mitmachaktionen/wirtschaftlichkeit-von-solaranlagen/> – Überprüfungsdatum 2023-04-10
- [16] KOST, Christoph ; SHAMMUGAM, Shivenes ; JÜLCH, Verena ; NGUYEN, Huyen-Tran ; SCHLEGL, Thomas: *Stromgestehungskosten erneuerbare Energien*. 2018
- [17] BUNDESVERBAND DER ENERGIE- UND WASSERWIRTSCHAFT E.V. BDEW: *BDEW-Strompreisanalyse April 2023 : Haushalte und Industrie*. 20.04.2023
- [18] ZSW ; BOSCH & PARTNER: *Vorbereitung und Begleitung bei der Erstellung eines Erfahrungsberichts gemäß § 97 Erneuerbare-Energien-Gesetz, Teilvorhaben II c: Solare Strahlungsenergie : Abschlussbericht erstellt im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie*. Stuttgart/Hannover, 2019
- [19] BUNDESVERBAND SOLARWIRTSCHAFT E.V.: *Solarbatterien boomen exponentiell*. 02.03.2023. URL <https://www.solarwirtschaft.de/2023/03/02/solarbatterien-boomen-exponentiell/> – Überprüfungsdatum 2023-08-10
- [20] EU SCIENCE HUB: *Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) : Performance of grid connected PV*. URL https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html – Überprüfungsdatum 2023-07-10
- [21] DWD: *Trend der Jahressummen der Globalstrahlung : Globalstrahlung 1983 bis 2022 in Deutschland*. URL https://www.dwd.de/DE/leistungen/solarenergie/Trend_seit1983.html?nn=16102 – Überprüfungsdatum 2023-08-10
- [22] BUNDESMINISTERIUM DER FINANZEN (Hrsg.): *AfA-Tabelle für die allgemein verwendbaren Anlagegüter ("AV")*. 2000
- [23] KRÄHENMANN, S.: *Ortsgenaue Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere und extreme Witterungsverhältnisse*. 2016
- [24] SOLARANLAGEN-PORTAL.COM: *Photovoltaikkosten 2023 im Überblick*. URL <https://www.solaranlagen-portal.com/photovoltaik/kosten#photovoltaik-kosten-2023-im-berblick> – Überprüfungsdatum 2023-06-29
- [25] NOY, Yannick van ; (KEINE ANGABE): *Solaranlage Kosten: Was kostet eine PV-Anlage in 2023?* URL <https://www.enpal.de/magazin/solaranlage-kosten> – Überprüfungsdatum 2023-06-29
- [26] SOLARSERVER.DE: *Photovoltaik-Preisindex: PV-Solarmodule Preisentwicklung*. URL <https://www.solarserver.de/photovoltaik-preis-pv-modul-preisindex/> – Überprüfungsdatum 2023-06-29
- [27] CO2-ONLINE.DE: *Solaranlage: Kosten & Förderung 2023*. URL <https://www.co2online.de/modernisieren-und-bauen/photovoltaik/kosten-und-finanzierung/#c191276> – Überprüfungsdatum 2023-06-29

-
- [28] EUROPEAN COMMISSION: *PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM*. URL https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/ – Überprüfungsdatum 2023-06-29
 - [29] TAGESSCHAU.DE: *So entwickeln sich die Preise*. URL <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/konjunktur/inflation-prognosen-101.html> – Überprüfungsdatum 2023-06-29
 - [30] VERIVOX: *Strompreisentwicklung in Deutschland*. URL <https://www.verivox.de/strom/strompreisentwicklung/> – Überprüfungsdatum 2023-08-02
 - [31] FREIE UND HANSESTADT HAMBURG, BEHÖRDE FÜR UMWELT UND ENERGIE (BUE) (Hrsg.): *Hamburgs Gründächer; Eine ökonomische Bewertung*. 2017
 - [32] MÜLLER, Marc: *Befragung Kostenermittlung*. Mail. BuGG (Adressat)
 - [33] STRUCK, Ralf: *Befragung zur Kostenermittlung*. Mail. 2023. BuGG (Adressat)
 - [34] DÖHLE, Lea: *Kosten-Nutzen-Analyse von Retentions Gründächern im Vergleich zu Extensivgründächern und Kiesdächern*. Hamburg, HafenCity Universität - Universität für Baukunst und Metropolenentwicklung, Fachbereich Umweltgerechte Stadt- und Infrastrukturplanung. Bachelorthesis. 2022
 - [35] KOLB, Walter: *Dachbegrünung : Planung, Ausführung, Pflege : 93 Farbfotos, 24 Zeichnungen, 12 Tabellen*. Stuttgart : Ulmer, 2016
 - [36] KÖHLER, Manfred ; MALORNY, Winfried.: *Wärmeschutz durch extensive Gründächer*. 2009, S. 195–212
 - [37] SCHARF, Bernhard ; PITHA, Ulrike ; TRIMMEL, H.: *Thermal performance of green roofs*. Copenhagen, 2012
 - [38] BBSR: *Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB)*. 2017
 - [39] PFOSE, Nicole ; JENNER, Nathalie ; HENRICH, Johanna ; HEUSINGER, Jannik ; WEBER, Stephan: *Gebäude Begrünung Energie : Potenziale und Wechselwirkungen*. 2013
 - [40] BUNDESVERBAND GEBÄUDEGRÜN E.V. (BuGG) (Hrsg.); MANN, G. (Mitarb.); Gohlke, R., Wolff, F. (Mitarb.) : *BuGG-Marktreport Gebäudegrün 2021 : Dach-, Fassaden- und Innenraumbegrünung, Deutschland*. 2021
 - [41] BECKER, Carlo ; HÜBNER, Sven ; SIEKER, Heiko ; GILLI, Stefano ; POST, Mike: *Überflutungs- und Hitzevorsorge durch die Stadtentwicklung : Strategien und Maßnahmen zum Regenwassermanagement gegen urbane Sturzfluten und überhitzte Städte*. 2015
 - [42] BAUFORMELN.DE: *Abflussbeiwert*. URL <https://www.bauformeln.de/wasserbau/hydrologie/abflussbeiwert> – Überprüfungsdatum 2023-08-20
 - [43] FREIE UND HANSESTADT HAMBURG, BEHÖRDE FÜR STADTENTWICKLUNG UND UMWELT (Hrsg.): *Dezentrale naturnahe Regenwasserbewirtschaftung : Ein Leitfaden für Planer, Architekten, Ingenieure und Bauunternehmer*. 2006
 - [44] DWA - DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABWASSER UND ABFALL E.V.: *Berechnung einer Regenwasserversickerungsanlage nach DWA-A 138 : Von der Mulde bis zum Sickerschacht : Umweltamt Bottrop*, 2005. URL <https://www.bottrop.de/klima-umwelt-natur/regenwassermanagement/index.php> – Überprüfungsdatum 2023-06-10

- [45] BERLINER REGENWASSERAGENTUR: *RegenRechner*. URL <https://regenwasseragentur.berlin/kosten-regenwasserbewirtschaftung-berechnen/?measure=mulden-rigolen-system> – Überprüfungsdatum 16.08.23
- [46] HAMBURGER SENAT: *Verordnung über die Höhe der Sielbenutzungsgebühr* (idF v. 6. 12. 2016). URL <https://www.landesrecht-hamburg.de/bsha/document/jlr-Siel-GebVHA2012pP3/part/S> – Überprüfungsdatum 17.08.23
- [47] HAMBURGISCHE BÜRGERSCHAFT: *Sielabgabengesetz* (idF v. 20. 4. 2012). URL <https://www.landesrecht-hamburg.de/bsha/document/jlr-SielAb-gHA2005V3P13/part/X> – Überprüfungsdatum 2023-07-10
- [48] BERARDI, Umberto ; GHAFARIANHOSEINI, AmirHosein ; GHAFARIANHOSEINI, Ali: *State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs*. In: *Applied Energy* 115 (2014), S. 411–428
- [49] LIU, Karen (Hrsg.); BASKARAN, Bas (Hrsg.): *THERMAL PERFORMANCE OF EXTENSIVE GREEN ROOFS IN COLD CLIMATES*, 2005
- [50] INSTITUT FÜR WOHNEN UND UMWELT (IWU) (Hrsg.): *Gradtagzahlen-Deutschland.xlsx*. 2023
- [51] SCHMIDT, Marco: *Energy saving strategies through the greening of buildings, the example of the institute of physics of the Humboldt-University in Berlin-Adlershof, Germany*. Rio 3 - World Climate & Energy Event, Rio de Janeiro, Brazil, 2003
- [52] STANGL, R ; MEDL, A ; SCHARF, B ; PITHA, U: *Wirkungen der grünen Stadt : Studie zur Abbildung des aktuellen Wissenstands im Bereich städtischer Begrünungsmaßnahmen*. 2019 (Berichte aus Energie- und Umweltforschung 12)
- [53] GÖBNER, Dominik ; MOHRI, Milena ; KRESPACH, Justine Jasmin: *Evapotranspiration Measurements and Assessment of Driving Factors: A Comparison of Different Green Roof Systems during Summer in Germany*. In: *Land* 10 (2021), Nr. 12, S. 1334
- [54] HARLAB, Ralf: *Verdunstung in bebauten Gebieten, Evapotranspiration in Urban Areas : Dissertation an der TU Dresden*. 2008
- [55] WIKIPEDIA: *Zeitreihe der Niederschlagssummen in Deutschland seit 1881 : Mittelwert (1961–1990) für die Niederschläge der Bundesländer in Deutschland*. URL https://de.wikipedia.org/wiki/Zeitreihe_der_Niederschlagssummen_in_Deutschland_seit_1881 – Überprüfungsdatum 2023-08-20
- [56] GERICS CLIMATE SERVICE CENTER GERMANY: *Klimaänderungen in Hamburg : Temperaturveränderungen*. URL https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Klima%C3%A4nderungen_in_Hamburg – Überprüfungsdatum 2023-08-22
- [57] ZINCO GMBH: *Dachbegrünung erhöht Erträge der Photovoltaik*. URL <https://www.zinco.de/solarmessung> – Überprüfungsdatum 2023-07-13
- [58] FISCHER, Sabine von: *Hype ums Hochhausgrün: Es ist Spektakel und Klimaschutz in einem, aber die Buchhaltung geht nicht immer auf : Das Feigenblatt des 21. Jahrhunderts hängt an den Hochhäusern. Bepflanzte Fassaden machen weltweit Schlagzeilen, aber dabei fehlt die Weitsicht*. In: *Neue Zürcher Zeitung* 2021 (2021-02-10)

- [59] BELLER, A.: *Trend: Dachbegrünung – wie Eigentümer davon profitieren!* URL <https://www.beller-immobilien.de/trend-dachbegruenung-wie-eigentuemer-davon-profitieren/> – Überprüfungsdatum 17.08.23
- [60] MADISON, Catherine: *Impact of Green Infrastructure on Property Values within the Milwaukee Metropolitan Sewerage District Planning Area*. 2013
- [61] BIANCHINI, Fabricio ; HEWAGE, Kasun N.: *Probabilistic social cost-benefit analysis for green roofs: A lifecycle approach*. In: *Building and Environment* 58 (2012), S. 152–162
- [62] BEHÖRDE FÜR STADTENTWICKLUNG UND WOHNEN: *Mietenspiegel 2021 der Freien und Hansestadt Hamburg : Erhebungsstichtag 01.04.2021*. 2021
- [63] UMWELTBUNDESAMT: *Gesunde Luft*. In: *Schwerpunkt - Das Magazin des Umweltbundesamtes* (2019), Nr. 1, S. 20–42. URL https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2546/publikationen/sp_1-2019_web.pdf
- [64] NABU: *Da liegt was in der Luft : Messungen des NABU zeigen hohe Luftschadstoffbelastung durch Schiffe*. URL <https://www.nabu.de/umwelt-und-ressourcen/verkehr/schifffahrt/messungen/16819.html> – Überprüfungsdatum 16.08.23
- [65] EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY: *Europe's air quality status 2022*. [Luxembourg] : [Publications Office of the European Union], 2022 (Web report no. 05/2022)
- [66] TEOTÓNIO, Inês ; SILVA, Cristina Matos ; CRUZ, Carlos Oliveira: *Eco-solutions for urban environments regeneration: The economic value of green roofs*. In: *Journal of Cleaner Production* 199 (2018), S. 121–135
- [67] CURRIE, Beth Anne ; BASS, Brad: *Estimates of air pollution mitigation with green plants and green roofs using the UFORE model*. In: *Urban Ecosystems* 11 (2008), Nr. 4, S. 409–422
- [68] YANG, Jun ; YU, Qian ; GONG, Peng: *Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago*. In: *Atmospheric Environment* 42 (2008), Nr. 31, S. 7266–7273
- [69] NURMI, Väinö ; VOTSIS, Athanasios ; PERRELS, Adriaan ; LEHVÄVIRTA, Susanna: *Green Roof Cost-Benefit Analysis: Special Emphasis on Scenic Benefits*. In: *Journal of Benefit-Cost Analysis* 7 (2016), Nr. 3, S. 488–522
- [70] BAFU: *Hitze in Städten : Grundlage für eine klimaangepasste Siedlungsentwicklung*. Bern, 2018 (Umwelt-Wissen Nr. 1812)
- [71] FACHPLANUNG HITZEMINDERUNG: *Fachplanung Hitzeminderung : Programm Klimaanpassung*. Zürich, 2022
- [72] DWD: *Wärmeinseln - Stadtklimastationen*. URL https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/klimawirk/stadt/pl/projekt_waermeinseln/sksm/sksm_node.html – Überprüfungsdatum 2023-08-29
- [73] BAUMÜLLER, Nicole; Universität Stuttgart (Mitarb.): *Stadt im Klimawandel : Klimaanpassung in der Stadtplanung : Grundlagen, Maßnahmen und Instrumente*. 2018
- [74] HUANG, Yi-Yu ; CHEN, Chien-Teh ; LIU, Wen-Tsan: *Thermal performance of extensive green roofs in a subtropical metropolitan area*. In: *Energy and Buildings* 159 (2018), S. 39–53

- [75] IMRAN, H. M. ; KALA, J. ; NG, A.W.M. ; MUTHUKUMARAN, S.: *Effectiveness of green and cool roofs in mitigating urban heat island effects during a heatwave event in the city of Melbourne in southeast Australia*. In: *Journal of Cleaner Production* 197 (2018), S. 393–405
- [76] KÖHLER, Manfred ; KAISER, Daniel: *Evidence of the Climate Mitigation Effect of Green Roofs—A 20-Year Weather Study on an Extensive Green Roof (EGR) in Northeast Germany*. In: *Buildings* 9 (2019), Nr. 7, S. 157
- [77] RICHTER, Michael: *Klimafolgenanpassung durch Dachbegrünung - Quantifizierung des Potenzials durch Vergleich internationaler Studien und Messungen an Hamburger Beispielen*. Hamburg, HafenCity Universität, Umweltgerechte Stadt- und Infrastrukturplanung. Dissertation. 2022
- [78] KARLSSON, Martin ; ZIEBARTH, Nicolas R.: *Population health effects and health-related costs of extreme temperatures: Comprehensive evidence from Germany*. In: *Journal of Environmental Economics and Management* 91 (2018), S. 93–117
- [79] UMWELTBUNDESAMT: *Kosten und Nutzen von Kosten und Nutzen von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel : Analyse von 28 Anpassungsmaßnahmen in Deutschland*. Berlin, 2012
- [80] KOPPE, C. ; JENDRITZKY, G.: *Die Auswirkungen der Hitzewellen 2003 auf die Mortalität in BadenWürttemberg : Gesundheitliche Auswirkungen der Hitzewelle im August 2003*. 2004
- [81] DEUTSCHER WETTERDIENST (Hrsg.): *Analyse der thermischen Wirkung von Analyse der thermischen Wirkung von Dachbegrünung mittels Stadtklimamodellierung : Endbericht zum Projekt ADAM*. Offenbach, 2022
- [82] UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.): *Durch Umweltschutz die biologische Vielfalt erhalten : Ein Themenheft des Umweltbundesamtes*. 2015
- [83] WSL: *Mekblatt für die Praxis: Biodiversität in der Stadt - für Mensch und Natur*. Birmensdorf, 2012
- [84] KOWARIK, I. ; BARTZ, R. ; BRECK, M.: *Ökosystemleistungen in der Stadt – Gesundheit schützen und Lebensqualität erhöhen : Naturkapital Deutschland*, Berlin (2016)
- [85] MANN, Gunter: *Vorkommen und Bedeutung von Bodentieren (Makrofauna) auf begrünten Dächern in Abhängigkeit von der Vegetationsform : Dissertation*. 1998
- [86] SCHNELLMANN, N.: *SMART?Roofs: Biodiversität und Solaranlagen – Biomonitoring mit Heuschrecken und Käfern auf Kombinationsanlagen Dachbegrünung und PV-Nutzung in Basel*. Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften, IUNR. Bachelorthesis. 2018
- [87] BRENNISEN, S.: *SMARTRoofs - welche Biodiversität können wir in Kombinationsanlagen Gründach/Solarenergienutzung erwarten?* Berlin, 2022
- [88] KÜHNAPFEL, M.: *Flora auf unterschiedlichen Gründachtypen in Hamburg*. In: *Gebäude Grün* (2023), Nr. 2, S. 16–20
- [89] DEUTSCHE WILDTIERSTIFTUNG: *Seltene und bedrohte Wildbienenarten in der Hamburger Innenstadt nachgewiesen*. URL <https://www.deutschewildtierstiftung.de/aktuelles/seltene-und-bedrohte-wildbienenarten-in-der-hamburger-innenstadt->

nachgewie-

sen#:~:text=Seit%20Juni%202021%20lief%20die,D%C3%A4chern%20Nah-
rungspflanzen%20f%C3%BCr%20Insekten%20wachsen. – Überprüfungsdatum
17.08.23

- [90] CONNELLY, Maureen ; HODGSON, Murray: *Experimental investigation of the sound transmission of vegetated roofs*. In: *Applied Acoustics* 74 (2013), Nr. 10, S. 1136–1143
- [91] FREIE UND HANSESTADT HAMBURG, BEHÖRDE FÜR UMWELT, KLIMA, ENERGIE UND AGRARWIRTSCHAFT (BUKEA) (Hrsg.): *Lärmaktionsplan für Hamburg (Dritte Stufe) Überprüfung und Fortschreibung des Lärmaktionsplans Hamburg 2013*. 2021
- [92] HAMBURG AIRPORT: *Fluglärm und Lärmschutz*. URL <https://www.hamburg-airport.de/de/unternehmen/verantwortung/fluglaerm-und-laermschutz-3686> – Überprüfungsdatum 17.08.23
- [93] FREIE UND HANSESTADT HAMBURG, BEHÖRDE FÜR STADTENTWICKLUNG UND WOHNEN (BSW) (Hrsg.): *Bauprüfdienst (PBD) 2023-2 : Brandschutztechnische Auslegungen (BPD BTA)*. 2023
- [94] BUNDESFINANZMINISTERIUM: *FAQ „Umsatzsteuerliche Maßnahmen zur Förderung des Ausbaus von Photovoltaikanlagen“*. URL <https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/FAQ/foerderung-photovoltaikanlagen.html>. – Aktualisierungsdatum: 2023-06-23 – Überprüfungsdatum 2023-08-25
- [95] BÜRGERSCHAFT DER FREIEN UND HANSESTADT HAMBURG (Hrsg.): *(Wort-)Protokoll der öffentlichen gemeinsamen Sitzung des Verkehrsausschusses mit dem Stadtentwicklungsausschuss mit Livestream gemäß § 56 Absatz 1 Satz 4 der Geschäftsordnung der Hamburgischen Bürgerschaft : 22. Wahlperiode, Verkehrsausschuss Nr. 22/38, Stadtentwicklungsausschuss Nr. 22/33, Sitzungsdatum: 21. September 2023*. 2023
- [96] IFB HAMBURG: *Hamburger Gründachförderung*. URL <https://www.ifbhh.de/foerderprogramm/hamburger-gruendachfoerderung> – Überprüfungsdatum 07.07.23
- [97] INSTITUT WOHNEN UND UMWELT: *Deutsche Wohngebäudetypologie : Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden ; erarbeitet im Rahmen der EU-Projekte TABULA - "Typology approach for building stock energy assessment", EPISCOPE - "Energy performance indicator tracking schemes for the continuous optimisation of refurbishment processes in European housing stocks"*. 2., erw. Aufl. Darmstadt : IWU, 2015