



Photovoltaik-Freiflächenanlagen in Deutschland

Ein Überblick zu Flächenkulissen, Potenzialen, Finanzierung, Nachhaltigkeit und Produktionskapazitäten (Stand Januar 2024)

// Kaya Dünzen, Susanne Krieger, David Ritter

Diese Überblicksstudie wurde im Rahmen eines Eigenmittelprojektes des Öko-Instituts mit einer Ko-Finanzierung durch EnergieVision erstellt, um einen besseren Überblick zur aktuellen Situation bei PV-Freiflächenanlagen in Deutschland zu bekommen. In der Annahme, dass es auch für Personen außerhalb des Öko-Instituts hilfreich sein kann, haben wir uns entschieden das Papier zu veröffentlichen. Für Hinweise können Sie uns gerne eine E-Mail schreiben.

Version vom 17.04.24 mit Anpassungen zur Regelung von Freiflächenanlagen an Straßen und Schienen.

Öko-Institut e.V | Freiburg | Darmstadt | Berlin

Das Öko-Institut ist eines der europaweit führenden, unabhängigen Forschungs- und Beratungsinstitute für eine nachhaltige Zukunft. Seit der Gründung im Jahr 1977 erarbeitet das Institut Grundlagen und Strategien, wie die Vision einer nachhaltigen Entwicklung global, national und lokal umgesetzt werden kann. Das Institut ist an den Standorten Freiburg, Darmstadt und Berlin vertreten.

www.oeko.de | info@oeko.de

Kontakt

Kaya Dünzen | +49 761 45295-286 | k.duenzen@oeko.de

Inhaltsverzeichnis

Einleitung & Kernergebnisse	4
Flächenkulisse für PV-Freiflächenanlagen	6
Allgemein	6
Weiterführende Literatur zum Thema	15
Potenziale & Leistungszubau	16
Entwicklung des Anlagenbestandes	16
Verteilung des Freiflächenbestandes	18
Leistungszubau und zukünftige Flächeninanspruchnahme	19
Flächenpotenziale in Deutschland	20
Weiterführende Literatur zum Thema	26
Finanzierung	27
Historische Entwicklung der Stromgestehungskosten	27
Entwicklung der Marktwerte für Solarenergie	27
Prognostizierte Stromgestehungskosten und Marktwerte	29
Historische Entwicklung der Ausschreibungsergebnisse für PV	30
Weiterführende Literatur zum Thema	31
Nachhaltigkeit	32
Zentrale Kriterien für ökologische Nachhaltigkeit bei PV-FFA	32
Ökologische Dimensionen von ausgewählten Anlagentypen	33
Nachhaltigkeitsaspekte in der aktuellen Gesetzgebung	35
Weiterführende Literatur zum Thema	37
Akzeptanz	38
Die Akzeptanz von PV-FFA in Deutschland – Status Quo	38
Konfliktlandkarte: Akzeptanz und Landnutzung in der Solarenergie	39
Finanzielle Partizipation von Bürgerinnen an PV-FFA	42
Weiterführende Literatur zum Thema	43
Produktionskapazitäten von Komponenten für PV-Anlagen	44
Deutschland – Status quo	44
Pläne zu Steigerung der Produktionskapazität	46
Weiterführende Literatur zum Thema	47
Literaturverzeichnis	48

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1. Flächenkategorien der Förderkulisse des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) 2023. Eigene Darstellung.	7
Abbildung 2. Entwicklung des Bestandes an Solaranlagen auf Dach und in der Freifläche (FFA) von 2000-2022 und geplanter deutscher EE-Ausbaupfad für die Solarenergie in Gigawatt (GW). Eigene Darstellung, Daten nach BNetzA 2023a.	17
Abbildung 3. Entwicklung des Kapazitätszubaus für Dach- und Freiflächenanlagen (FFA) von 2007-2022 und geplante Ausschreibungsvolumina für Solaranlagen des ersten Segments in Gigawatt (GW). Eigene Darstellung, Daten nach BNetzA 2023a.	17
Abbildung 4. Anteil der PV-Freiflächenanlagen an der Landkreisfläche in Deutschland 2022 (IÖR 2023).	18
Abbildung 5. Verteilung der Flächeninanspruchnahme des Freiflächenbestandes Ende 2022. Quelle: bosch & partner; ZSW (2023)	19
Abbildung 6. Zusammenstellung von verschiedenen Flächenpotenziale für Deutschland. Eigene Darstellung, Daten nach ZSW; bosch & partner 2019; ZSW; bosch & partner 2023; Fraunhofer ISE 2023b; Öko-Institut 2024.	25
Abbildung 7. Entwicklung der Monatsmarktwerte (MW) seit 2018 bis Oktober 2023 von Solar und Spotmarktpreis in Deutschland, gemäß Anlage 1 (zu §23a EEG) Nr. 5.2. Eigene Darstellung, Daten nach Netztransparenz.de 2023.	28
Abbildung 8. Gegenüberstellung der zukünftigen Marktwertenerwartung und Stromgestehungskosten von PV-FFA, bei Inbetriebnahme Jahr 2024. Der Zeithorizont entspricht mit 20 Jahren der durchschnittlichen Vergütungsdauer nach EEG. Quelle: BMWK 2023c.	29
Abbildung 9. Entwicklung der Ausschreibungsergebnisse für Solarenergie im ersten Segment. Bis 2020 wurden innerhalb des ersten Segments auch Dachanlagen geregelt. Quelle: Energy Brainpool (2023b).	31
Abbildung 10. PV-Herstellungskapazitäten nach Ländern und Regionen im Jahr 2021. Quelle: IEA 2022a. APAK = Asiatisch-pazifischer Raum ohne Indien und China.	45

Einleitung & Kernergebnisse

Ein klimaneutrales Energiesystem setzt einen signifikanten Ausbau an erneuerbaren Energien (EE) voraus. Neben Windenergie wird Photovoltaik (PV) eine besonders große Rolle spielen. Um dies zu erreichen, hat die aktuelle Bundesregierung sich zum Ziel gesetzt, neben PV-Dachanlagen auch Freiflächenanlagen stärker in den Fokus zu nehmen und die in den nächsten Jahren ansteigenden Zubauziele hälftig auf Dach- und Freiflächenanlagen aufgeteilt. Zum Vergleich: Ende 2023 entfielen ca. 30% der installierten PV-Anlagen in Deutschland auf Freiflächenanlagen. Um den Freiflächenausbau zu stärken, wurden letztes Jahr in der Novelle des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) diverse Neuerungen für die PV-FFA beschlossen. Allerdings birgt der Ausbau von PV-Freiflächenanlagen (PV-FFA) ein gewisses Konfliktpotenzial, da sie mit anderen Nutzungsformen konkurriert. Um diese Nutzungskonflikte zu vermeiden, sollte zum einen weiterhin ein großer Anteil des PV-Ausbaus auf Dachflächen erfolgen und Freiflächen-Anlagen vorrangig auf vorbelasteten oder versiegelten Flächen erfolgen.

Im Folgenden geben wir einen Überblick zum aktuellen Stand von PV-FFA in Deutschland. Die Studie deckt folgende Themen ab:

- Gesetzliche Regelungen der Flächenkulisse von PV-FFA im Rahmen der Neu-erung des EEG 2023
- Flächenpotenziale von PV-FFA und Leistungszubau
- Finanzierungslandschaft von PV-Anlagen
- Nachhaltigkeitsaspekte mit besonderem Fokus auf Naturschutz
- Akzeptanz und Darstellung der Konfliktpotenziale
- Produktionskapazitäten von PV-Anlagen

Kernergebnisse

- Zum 31.12.2023 waren in Deutschland 81,9 GW Photovoltaik installiert. Davon entfielen 29% auf Freiflächenanlagen. Im EEG 2023 ist eine hälftige Aufteilung des Zubaus auf Dach- und Freiflächenanlagen geplant. Dafür wurden die Ausschreibungsvolumina für Freiflächenanlagen schrittweise deutlich erhöht und sollen ab dem Jahr 2025 9,9 GW pro Jahr betragen.
- Insgesamt ist das Flächenpotenzial wesentlich größer als der benötigte Zubau von 200 GW bis 2040. Dieser könnte bereits vollständig durch PV-Anlagen auf vorbelasteten Flächen (z.B. Parkplätze, Randstreifen, Gewerbegebiete) gedeckt werden. Sogenannte benachteiligte Gebiete auf landwirtschaftlichen Flächen müssten, wenn überhaupt nur in sehr geringem Umfang in Anspruch genommen werden. Anlagen außerhalb der EEG-Flächenkulisse erscheinen in diesem Kontext nicht notwendig.
- Erhebliches technisch-realisiertes Potenzial, mit gleichzeitigen Synergieeffekten liegen auf landwirtschaftlichen Flächen, Mooren und Gewässern durch die Nutzung von Agri-, Moor-, und Floating-PV vor. Da diese Anlagen durch höhere Kosten Wettbewerbsnachteile aufweisen, ist ein separates Ausschreibungssegment in der Planung.
- Würden die bis 2040 vorgesehenen PV-FFA ausschließlich auf mit Energiepflanzen belegten Flächen erfolgen, bräuchte es nur 9% der dafür aktuell belegten Fläche. Aufgrund des wesentlich höheren Energieertrags von PV im Vergleich zu Biomasse könnte mit diesem Bruchteil der Fläche jedoch das 2,4 fache der Energie erzeugt werden.
- Für die nächsten Jahre werden sinkende Modulpreise und damit sinkende Stromgestehungskosten erwartet. Jedoch haben die verschiedenen Krisen der letzten Jahre zu Lieferengpässen und auch zwischenzeitlich zu steigenden Anlagenpreisen geführt. Da auch bei den möglichen Erlösen von PV an der Strombörse ein Rückgang erwartet wird, könnten auch längerfristig zusätzliche Finanzierungselemente notwendig sein.
- Der Bau von PV-Freiflächenanlagen kann sowohl negative als auch potenziell positive Effekte für Biodiversitäts-, Klimaschutz- und Nachhaltigkeitsziele haben. Je nach Vornutzung der Flächen kann es zu einer Aufwertung der Biodiversität und des Klimaschutzes kommen (z.B. bei sogenannten vorbelasteten Flächen oder bei Wiedervernässung bei Moor-PV). Um Biodiversitätsstandards bei PV-FFA zu garantieren, bietet sich die Einführung neuer Flächenkategorien wie Biodiversitäts-PV oder extensive Agri-PV an.
- Solarkraft ist die beliebteste EE-Technologie. Solardächer und Solarparks erhalten insgesamt sehr hohe Zustimmung. PV-FFA gehen mit Bedenken bezüglich der Flächennutzung einher: Die Akzeptanz der Bürger:innen kann durch einen Fokus auf vorbelastete Flächen, eine Mehrfachnutzungen wie Agri-PV und finanzielle Beteiligung, z.B. im Sinne von vergünstigtem Zugang zu Strom, positiv beeinflusst werden.
- Seit den 2010er Jahren ist ein Abbau von Arbeitsplätzen und Produktionskapazitäten in der deutschen und europäischen Solarindustrie mit einer Verlagerung nach Asien, insbesondere nach China, zu beobachten. Die Produktionskapazitäten in Deutschland und der EU sind daher derzeit gering.
- Die sozial-ökologische Dimension von PV-Anlagen, insbesondere in Bezug auf Ressourcenbeschaffung, sollte verstärkt in den Fokus genommen werden. Weltweit ist die Verfügbarkeit von Schlüsselrohstoffen wie Silber, Silizium und Indium begrenzt, was die Produktion von PV-Zellen beeinträchtigen könnte. Trotz des Recyclingpotenzials von PV-Modulen wird dieses noch nicht ausreichend genutzt.

Flächenkulisse für PV-Freiflächenanlagen

Allgemein

Die Flächennutzung von solarer Strahlungsenergie und deren Vergütungsmöglichkeiten werden im Erneuerbaren-Energien-Gesetz (EEG) geregelt. Hier wird zwischen Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen) des ersten und des zweiten Segments unterschieden. Das erste Segment umfasst Freiflächenanlagen (FFA) und PV-Anlagen, die auf oder an baulichen Anlagen errichtet werden sollen, die weder Gebäude noch Lärmschutzwände sind (siehe § 3 Nr. 41a EEG). Im zweiten Segment sind alle Anlagen, die auf Gebäuden und Lärmschutzwänden installiert wurden (BSW Solar 2023).

In der Regel werden PV-FFA im Außenbereich nach §35 Baugesetzbuch (BauGB) nicht privilegiert. Das bedeutet, dass für diese Anlagen eine Bauleitplanung in der Form eines Flächennutzungsplans und/oder eines Bebauungsplans notwendig ist. Erst auf Grundlage der Planung ist die Erteilung einer Baugenehmigung möglich. Die planerische Ausweisung neuer Flächen für PV-FFA ist aufgrund der verschiedenen eingebundenen Planungsebenen häufig sehr aufwändig.

PV-FFA, die unter die folgenden aufgeführten teilweise zusammengeführten Flächenkategorien fallen und eine installierte Leistung von 20 MW nicht überschreiten (siehe §37 Abs. 3 EEG), sind nach dem EEG förderfähig. Das bedeutet, dass sie in einer Ausschreibung auf eine Vergütung bieten können. Die Höchstwerte für die Ausschreibungen der PV-FFA sind in §48 EEG festgelegt.

Die Illustration in Abbildung 1 zeigt die Flächen auf welchen PV-Anlagen im Rahmen des EEGs 2023 gebaut werden können. Die einzelnen Flächen der hier dargestellten Flächenkulisse werden im Folgenden beschrieben.



Abbildung 1. Flächenkategorien der Förderkulisse des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) 2023. Eigene Darstellung.

An Straßen und Schienen



Neben Autobahnen und Schienenwegen mit mindestens zwei Hauptgleisen können innerhalb eines Abstandes von 500 m EEG-geförderte PV-FFA errichtet werden. Ge-regelt ist dieser Teil der PV-FFA Flächenkulisse in §37 Abs. 1 Nr. 2c EEG 2023. Die Vergütungsregelung gemäß §48 Abs. 1 Nr. 3 Buchstabe c) Doppelbuchstabe aa) er-fasst auch eingleisige Schienenwege (Clearingstelle | EEG KWKG 2023).

// Im Rahmen der EEG-Aktualisierung im Jahr 2023 wurde der Abstand zu den Ver-kehrswegen von 200 m auf 500 m erweitert. Möglich war das durch eine Verbesse-rung der Rahmenbedingungen im Baurecht. Die Außenbereichsprivilegierung von Vorhaben zur Nutzung von solarer Strahlungsenergie (gemäß §35 Abs. 1 Nr. 8 BauGB) privilegiert PV-FFA längs der Verkehrswege im übergeordneten Netz bis zu einer Entfernung von 200 m.

Versiegelte Fläche einschließlich Parkplatz-PV



Versiegelte Flächen und Parkplatz-PV werden im EEG unabhängig voneinander ge-regelt. Aus Darstellungszwecken wurden beiden Flächen grafisch zusammengefasst.

PV-Anlagen auf versiegelten Flächen sind nach §37 Abs. 1 Nr. 2d EEG förderfähig. Bei dieser Fläche muss es sich bei der Aufstellung oder Änderung des Bebauungs-plans¹ um eine bereits versiegelte Fläche handeln.

Mit dem EEG 2023 wurde als neue förderfähige PV-FFA-Fläche die Parkplatz-PV eingeführt, deren Vorgaben in §37 Abs. 1 Nr. 3d und §85c Abs. 2 EEG geregelt sind.

¹ Ein Bebauungsplan ist eine Festlegung von möglichen Bebauungen sowie deren Art und Weise von festgelegten Grundstücken. Außerdem werden den Grundstücken bestimmte Bestimmungen und Nutzungsmöglichkeiten zugesprochen. Bebauungspläne sind aus dem Flächennutzungsplan zu entwickeln, welcher die möglichen Arten der Flächen- bzw. Bodennutzung in einem entsprechenden Gebiet festlegt (siehe hierzu §§8 und 9 BauGB).

// Um Parkplatz-PV wettbewerbsfähiger zu machen, soll für sie ein eigene Ausschreibungssegment eingeführt werden (siehe **Potenziale & Leistungszubau**).

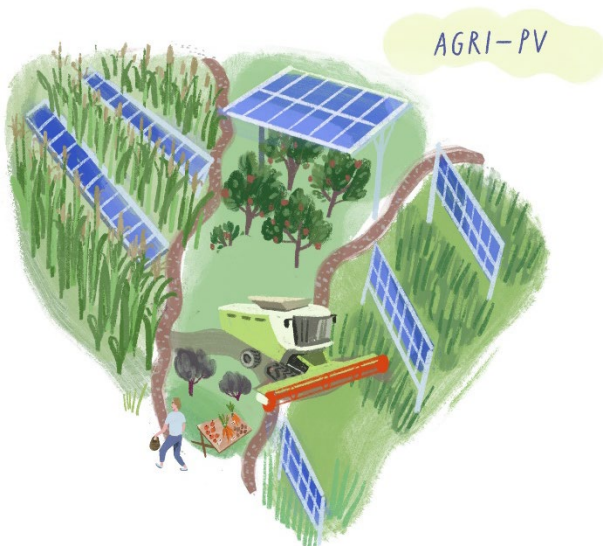
Konversionsfläche



Gemäß §37 Abs. 1 Nr. 2b EEG können Konversionsflächen, die für den Zweck der Solarenergienutzung umgestaltet werden, gefördert werden. Bei Konversionsflächen handelt es sich um Flächen mit ehemaliger (verkehrs-)wirtschaftlicher, wohnungsbau-licher oder militärischer Nutzung. Darunter können beispielsweise ehemalige Trup-penübungsplätze oder alte Braunkohlereviere fallen.

// Laut ZSW; bosch & partner (2023) wird ein Großteil der neu errichteten PV-FFA mit 11.700 ha auf Konversionsflächen installiert. Sie machen aktuell 36% der gesamten PV-FFA Flächen aus.

Agri-PV



Seit dem EEG 2023 werden auch Agri-PV-Anlagen durch das EEG gefördert (siehe §37 Abs. 1 Nr. 3a, b, c EEG bzw. §85c Abs. 1 EEG und weiterführend §48 Abs. 1 Satz 1 Nr. 5 EEG). Sie gehören zu den besonderen Anlagen nach §85c EEG und erhalten im Jahr 2023 eine zusätzliche Vergütung von 1,2 ct/kWh nach §38b EEG. Agri-PV-Anlagen ermöglichen eine Doppelnutzung mit landwirtschaftlicher

Tätigkeit auf derselben Fläche. Die Fläche unter oder neben den Modulen kann je nach Art der Agri-PV-Anlage (hochaufgeständert oder bodennah) mit Nutzpflanzen wie Mais, mehrjährige oder Dauerkulturen wie Erdbeeren oder Apfelbäumen oder Dauergrünland bewirtschaftet werden. Bei der Kombination von Dauergrünland und Agri-PV kann die Fläche jedoch keine naturschutzrechtliche Relevanz haben.

// Im Rahmen des Solarpaket II der Solarstrategie ist geplant, dass kleine PV-FFA mit einer installierten Leistung bis 1 MW, oder 6 MW bei Bürgerenergieanlagen gezielt gefördert werden sollen. Wann es hier zu einer Umsetzung kommt, ist noch nicht klar. Um die Wettbewerbsfähigkeit zu steigern, sollen Agri-PV zusätzlich ein eigenes Ausschreibungssegment erhalten (siehe **Potenziale & Leistungszubau**).

Gewerbe- oder Industriegebiet



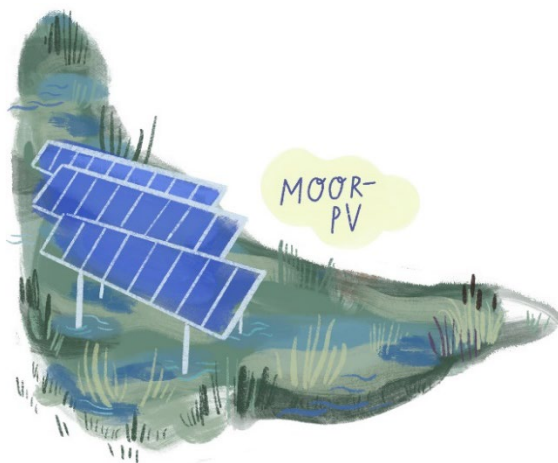
Anlagen innerhalb von Gebäudestrukturen, die den §§8 oder 9 der Baunutzungsverordnung (BauNVO) entsprechen, können gemäß §37 Abs. 1 Nr. 2e EEG 2023 gefördert werden. Darunter fallen Flächen in einem Gewerbe- oder Industriegebiet. Gewerbegebiete dienen vorwiegend der Unterbringung von nicht erheblich belästigenden Gewerbebetrieben. Typisch für ein Gewerbegebiet sind Gewerbebetriebe aller Art einschließlich Anlagen zur Erzeugung von Strom oder Wärme aus solarer Strahlungsenergie oder Windenergie, Lagerhäuser, Lagerplätze und öffentliche Betriebe, Geschäfts-, Büro- und Verwaltungsgebäude, Tankstellen, Anlagen für sportliche Zwecke (siehe §8 BauNVO). Industriegebiete dienen der ausschließlichen Unterbringung von Gewerbebetrieben, die in anderen Baugebieten unzulässig sind. Typisch für eine Industriegebiet sind Gewerbebetriebe aller Art einschließlich Anlagen zur Erzeugung von Strom oder Wärme aus solarer Strahlungsenergie oder Windenergie, Lagerhäuser, Lagerplätze und öffentliche Betriebe, Tankstellen (siehe §9 BauNVO).

Flächen im Eigentum der Bundesanstalt für Immobilienaufgaben



Flächen, die im Eigentum der Bundesanstalt für Immobilienaufgaben (BImA) sind, sind gemäß §37 Abs. 1 Nr. 2g EEG förderfähig. Voraussetzung für die Förderfähigkeit ist, dass diese Flächen seit dem 31.10.2013 im Eigentum der BImA sind oder von dieser verwaltet werden. Für eine Flächenentwicklung muss die BImA diese Flächen im Internet² für die Entwicklung von Solarenergie veröffentlicht und freigegeben haben. Die BImA übernimmt verschiedene Aufgaben, darunter die Vermietung und Anmietung von Gebäuden, den Neubau von Immobilien, die Instandsetzung bestehender Gebäude sowie den Verkauf von Gebäuden und Grundstücken im Falle, dass sie nicht mehr vom Staat benötigt werden.

Moor-PV



Mit der Einführung des EEG 2023 wurden Moor-PV-Anlagen gemäß §37 Abs. 1 Nr. 3e EEG bzw. §85c Abs. 1 EEG in die Förderkulisse aufgenommen. Diese Anlagen müssen auf einem wiedervernässten Moor errichtet werden, das ursprünglich entwässert und landwirtschaftlich genutzt wurde. Die Bedingung für die Förderfähigkeit der Moor-PV ist die Wiedervernässung der Fläche. Die Fläche kann zusätzlich landwirtschaftlich genutzt werden, und zwar im Rahmen einer Paludikultur³.

// Um Moor-PV insgesamt wettbewerbsfähiger zu machen, sind hierfür separate Ausschreibungssegmente in der Planung (siehe **Potenziale & Leistungszubau**).

² <https://erneuerbare-energien.bundesimmobilien.de/angebote-potenzialflaechen-b175063af58cbbd7> - letzter Zugriff: 05.02.2024

³ Paludikultur bezeichnet die Nutzung nasser Moorstandorte, üblicherweise mit dem Anbau von Röhrichten und zunehmend auch zur Energiegewinnung aus Biomasse.

Benachteiligtes Gebiet

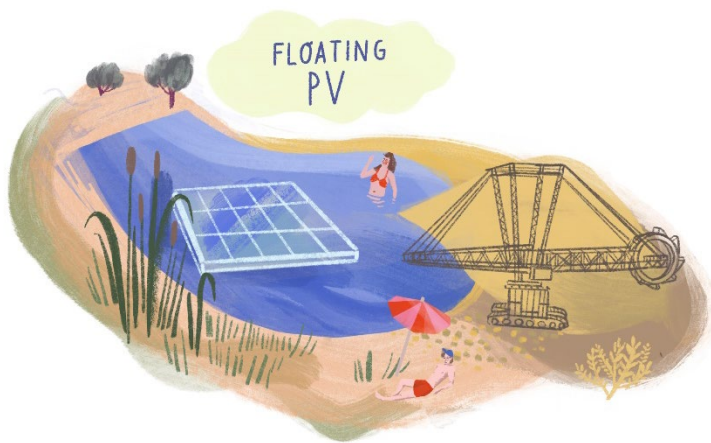


Auf Acker- und Grünflächen mit schwachem landwirtschaftlichem Ertrag können EEG-geförderte PV-FFA errichtet werden. Die entsprechende gesetzliche Regelung befindet sich in §37 Abs. 1 Nr. 2h, i EEG. Die Flächen müssen als sogenannte benachteiligte Gebiete gelten, was einen schwachen landwirtschaftlichen Ertrag voraussetzt. Entscheidend ist die Bodengüte⁴. Zusätzlich darf die lokale Bevölkerung nicht auf die landwirtschaftliche Nutzung der Fläche angewiesen sein. Die Definition eines benachteiligten Gebiets wird auf EU-Ebene durch verschiedene Richtlinien festgelegt, während die spezifische EEG-Definition in §3 Nr. 7a, b EEG zu finden ist. Damit eine PV-FFA auf einem benachteiligten Gebiet im Rahmen des EEG gefördert werden kann, muss die Fläche zunächst von dem entsprechenden Bundesland freigegeben werden. Dieses Verfahren nennt sich Opt-In-Regelung, da die Länder die Entscheidungshoheit über die optionale Freigabe über Anzahl und Ausmaß der Flächen für eine EEG-Förderung haben.

// Im Rahmen der PV-Solarstrategie des BMWK (2023a) soll es zur Öffnung der benachteiligten Gebiete kommen. Wie bereits erwähnt liegt die Entscheidungshoheit über die Öffnung der Flächenkulisse des EEG bei den Bundesländern. Das führt jedoch auch dazu, dass bisher lediglich neun Bundesländer die benachteiligten Gebiete geöffnet haben. Zukünftig ist geplant, diese Logik der Länderöffnungsklausel umzukehren. Flächen werden dann für die EEG-Ausschreibung grundsätzlich vollumfänglich geöffnet, solange die Länder diese Flächen nicht explizit ausschließen (Opt-Out-Regelung).

⁴ Die Bodengüte bezieht sich auf die Fähigkeit eines Bodes, eine effiziente landwirtschaftliche Produktion zu ermöglichen.

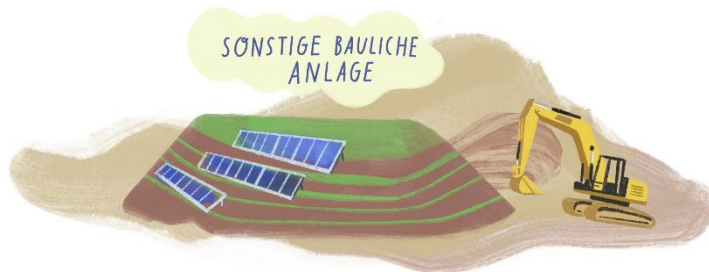
Floating-PV



Neu innerhalb der Flächenkulisse des EEG ist die Floating-PV. Gemäß §37 Abs. 1 Nr. 2j EEG können PV-FFA auf künstlichen und erheblich veränderten Gewässern schwimmend errichtet werden. Beide Gewässerarten werden durch §3 Nr. 4 und 5 des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG 2023) geregelt. Dabei ist ein Uferabstand von mindestens 40 Metern erforderlich, und die Flächenbedeckung des Gewässerkörpers darf 15% der Oberfläche nicht überschreiten.

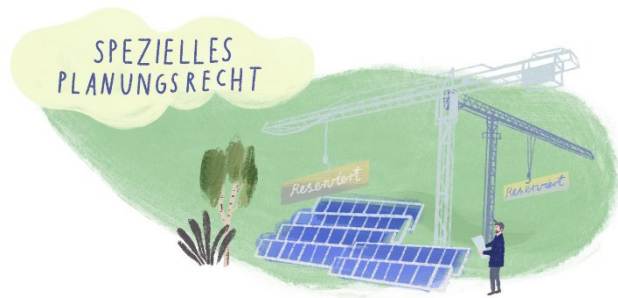
// Um Floating-PV wettbewerbsfähig gegenüber PV-FFA zu machen, sind separate Ausschreibungssegmente in der Planung (siehe **Potenziale & Leistungszubau**).

Sonstige bauliche Anlagen



PV-FFA auf sonstigen baulichen Anlagen werden gemäß §37 Abs. 1 Nr. 1 EEG gefördert. Als sonstige bauliche Anlagen gelten Flächen, die ursprünglich für einen anderen Zweck als die Erzeugung von Solarenergie errichtet wurden. Es handelt sich hierbei jedoch nicht um Gebäude oder Lärmschutzwände, da diese nicht zu den Solaranlagen des ersten Segments zählen. Ein Beispiel für eine solche Fläche wäre ein Deponiehügel.

Fläche mit speziellem Planungsrecht



Unter die Flächen mit speziellem Planungsrecht wurden zwei ähnliche Flächenkategorien zusammengefasst.

Die erste Kategorie umfasst Flächen, die gemäß §37 Abs. 1 Nr. 2f EEG durch ein Planfeststellungsverfahren⁵ nach Planungsrecht genehmigt wurden. Dies kann entweder ein klassisches Planfeststellungsverfahren, ein ähnliches Verfahren von überörtlicher Bedeutung oder ein Verfahren nach dem Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) für den Bau einer öffentlich zugänglichen Abfallbeseitigungsanlage sein.

Die zweite Kategorie betrifft Flächen, die in einem alten Bebauungsplan, vor dem 1. September 2003, festgelegt wurden (siehe §37 Abs. 1 Nr. 2d EEG). Diese zeitbezogene Formulierung zielt darauf ab, alte Investor:innen zu schützen. Der Bebauungsplan darf nicht nachträglich geändert worden sein, um den Bau einer Solaranlage zu ermöglichen. Zudem sollte die ursprüngliche Definition der Fläche im Bebauungsplan keine zu enge Zweckbestimmung enthalten, die mit einer PV-Nutzung nicht vereinbar wäre. Auch hier dient die zeitbezogene Formulierung dem Schutz bestehender Investor:innen.

Weiterführende Literatur zum Thema

- Eine umfassende Analyse zu Fragestellungen rund um die Flächenkulisse des EEG (2023) bietet der Zwischenbericht von ZSW; bosch & partner (2023)

⁵ Ein Planfeststellungsverfahren ist ein Genehmigungsverfahren innerhalb des Planungsrechts. Es fällt meist an bei größeren Vorhaben und Eingriffen bzw. Auswirkungen auf öffentlichen bzw. privaten Belange. Das Planfeststellungsverfahren ist in den §§72 bis 78 Verwaltungsverfahrensgesetz (VwVfG) und in entsprechenden Fachrechten (z.B. Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG)) geregelt. Im Rahmen eines Planfeststellungsverfahrens werden verschiedene Untersuchungen durchgeführt, wie beispielsweise eine Umweltverträglichkeitsprüfung oder andere naturschutzrechtlich relevante Prüfungen. Außerdem haben betroffene Bürger:innen die Möglichkeit sich innerhalb einer einmonatigen Frist die vorläufigen Pläne anzusehen, sich zu informieren und ggf. auch Einspruch zu erheben.

Potenziale & Leistungszubau

„Auf einen Blick“

- Zum 31.12.2023 waren in Deutschland 81,9 GW Photovoltaik installiert. Davon entfielen 29% auf Freiflächenanlagen. Im EEG 2023 ist eine hälftige Aufteilung des Zubaus auf Dach- und Freiflächenanlagen geplant. Dafür wurden die Ausschreibungsvolumina für Freiflächenanlagen schrittweise deutlich erhöht und sollen ab dem Jahr 2025 9,9 GW pro Jahr betragen. Um die Zubauziele von PV-FFA zu erreichen, benötigt es einen signifikanten jährlichen Zuwachs bei den PV-FFA.
- Derzeit erfolgt die Installation von PV-FFA hauptsächlich auf Konversionsflächen, Ackerland oder in Industrie- und Gewerbegebieten. Jedoch existieren beträchtliche technisch-realisierte Potenziale mit gleichzeitigen Synergieeffekten liegen auf landwirtschaftlichen Flächen, in Mooren und auf Gewässern, durch die Nutzung von Agri-, Moor-, und Floating-PV. Aufgrund ihrer höheren Kosten und daraus resultierenden Wettbewerbsnachteilen ist für sie ein separates Ausschreibungssegment in der Planung.
- Das Flächenpotenzial übersteigt deutlich den benötigten Zubau von 200 GW bis 2040. Bereits vorbelastete Flächen, wie Parkplätze, Randstreifen oder Gewerbegebiete könnten diesen Bedarf vollständig decken. Eine Nutzung von sogenannten benachteiligten Gebieten auf landwirtschaftlichen Flächen wäre nur in sehr begrenztem Umfang erforderlich, wenn überhaupt. PV-FFA außerhalb der EEG-Förderkulisse erscheinen in diesem Zusammenhang nicht notwendig zu sein.
- Die Flächeneffizienz von PV-FFA ist deutlich höher als die von Energiepflanzenanbau. Mit 9% der aktuell genutzten Energiepflanzenfläche könnte der bis 2040 vorgesehene PV-FFA-Ausbau umgesetzt werden und gleichzeitig das 2,4-fache an Energie mit PV-FFA erzeugt werden.

Entwicklung des Anlagenbestandes

Seit dem Inkrafttreten des EEG im Jahr 2000 hat sich die installierte Leistung für PV insgesamt deutlich erhöht und liegt Ende 2023 bei 82 GW. Seit dem Jahr 2010 nimmt auch die installierte Leistung an PV-FFA deutlich zu (siehe **Abbildung 2**). Grund für den sprunghaften Zuwachs zwischen 2010 und 2012 war eine Überförderung der Solarenergie (Energy Brainpool 2023b). Auf die Überförderung in den Jahren 2010-2012 wurde mit Deckelungen in den Jahren 2013 bis 2018 reagiert (siehe **Abbildung 3**). Daher blieb die prozentuale Verteilung zwischen Dach und FFA seit 2010 auf einem ähnlichen Niveau (siehe **Abbildung 2**). Seit dem Jahr 2019 gab es wieder vermehrt Dynamiken bei den Ausschreibungen. Während die installierte Leistung von PV-FFA lange auf einem ähnlichen Niveau blieb, konnte im Jahr 2022 deutlich höhere Zunahmen verzeichnet werden. Die prozentuale Verteilung liegt 2022 und 2023 jeweils bei 71% (Dachanlagen) und 29% (FFA).

Dennoch stellt die Erreichung der EE-Zielwerte nach §4 EEG 2023 beim aktuellen Leistungszubau eine Herausforderung dar (siehe **Abbildung 2**). Entsprechend muss der jährliche Zubau deutlich zunehmen. Um den Ausbau gezielt zu fördern, werden die Ausschreibungsvolumina für Freiflächensolaranlagen nach §28a EEG 2023 schrittweise angehoben und liegen in den Jahren 2025 bis 2029 bei jährlich 9,9 GW (siehe **Abbildung 3**). In **Abbildung 3** ist für das Jahr 2023 zu berücksichtigen, dass

der Zubau an PV-FFA nicht mit dem Ausschreibungsvolumen im gleichen Jahr zu vergleichen ist, da zwischen Ausschreibung und Realisierung stets ein gewisser Zeitverzug liegt.

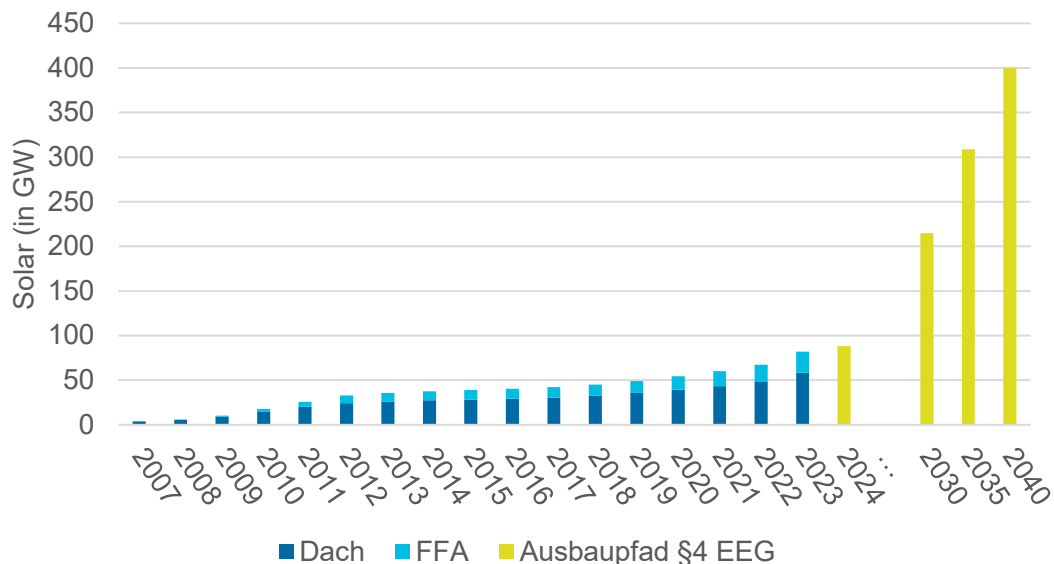


Abbildung 2. Entwicklung des Bestandes an Solaranlagen auf Dach und in der Freifläche (FFA) von 2000-2022 und geplanter deutscher EE-Ausbaupfad für die Solarenergie in Gigawatt (GW). Eigene Darstellung, Daten nach BNetzA 2023a.

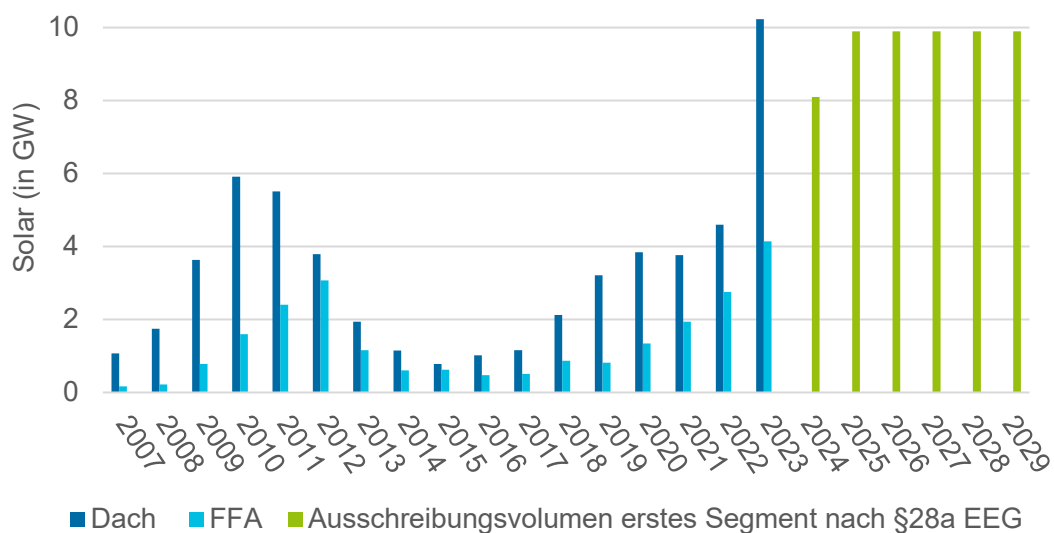


Abbildung 3. Entwicklung des Kapazitätszubaues für Dach- und Freiflächenanlagen (FFA) von 2007-2022 und geplante Ausschreibungsvolumina für Solaranlagen des ersten Segments in Gigawatt (GW). Eigene Darstellung, Daten nach BNetzA 2023a.

Verteilung des Freiflächenbestandes

Regionalisierte Flächeninanspruchnahme

In der folgenden **Abbildung 4** wird die räumliche Verteilung von PV-FFA in Deutschland dargestellt. Dabei fällt eine eindeutige Konzentration der Anlagen in Ostdeutschland und Bayern auf. Die Zubaurate ist hier entsprechend hoch; ebenso in Teilen von Rheinland-Pfalz und des Saarlandes, sowie im Norden von Schleswig-Holstein. Demgegenüber ist in großen Teilen von Westdeutschland die Landkreisfläche deutlich geringer von PV-FFA belegt.

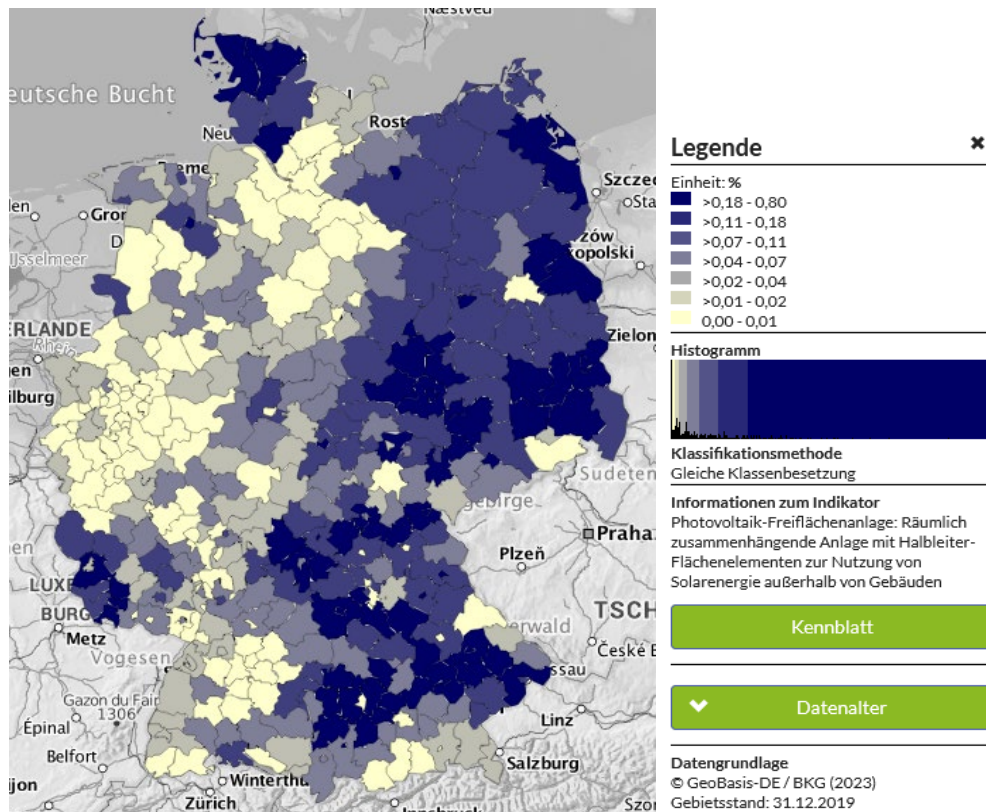


Abbildung 4. Anteil der PV-Freiflächenanlagen an der Landkreisfläche in Deutschland 2022 (IÖR 2023).

Die folgende **Abbildung 5** stellt die Flächenverteilung des Freiflächenbestandes im Jahr 2022 dar. Die Daten beruhen auf Hochrechnungen basierend auf dem Marktstammdatenregister von 2020 (ZSW; bosch & partner 2023). Die entsprechenden Flächendefinitionen können in Kapitel **Flächenkulisse für PV-Freiflächenanlagen** nachgelesen werden.

Der Großteil der PV-FFA liegt in Konversionsgebieten und auf Ackerland (60%). An den übrigen 40% haben vor allem die versiegelten Flächen und Flächen mit einem Bebauungsplan für das Gewerbe- und Industriegebiet den größten Anteil. Mit lediglich 1.300 ha haben PV-FFA auf Grünland einen sehr geringen Anteil an der dargestellten Flächenkulisse.

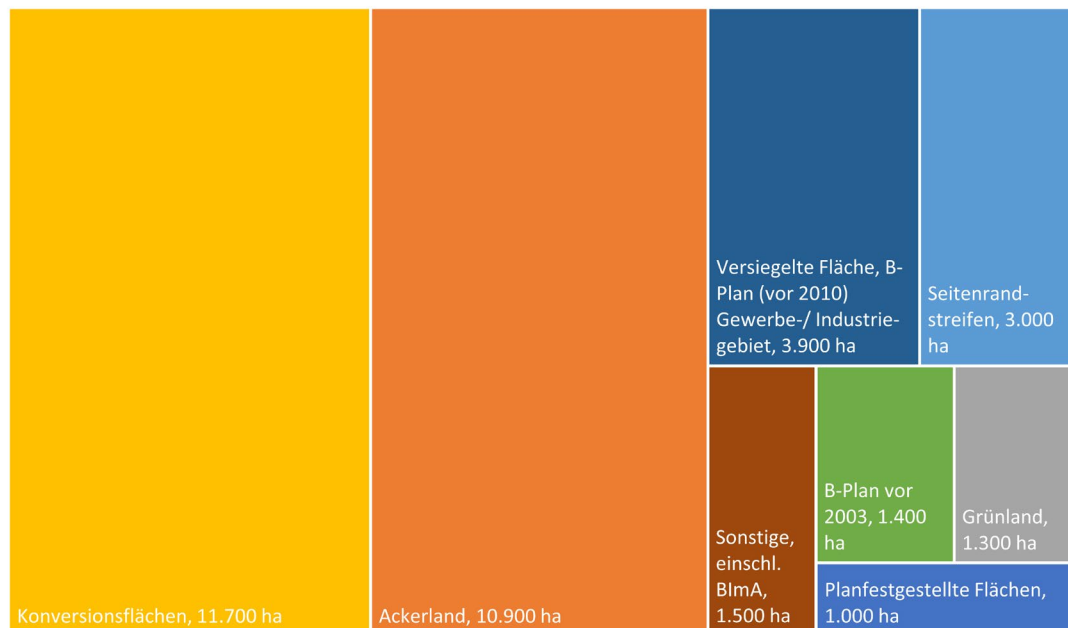


Abbildung 5. Verteilung der Flächeninanspruchnahme des Freiflächenbestandes Ende 2022. Quelle: bosch & partner; ZSW (2023)

Leistungszubau und zukünftige Flächeninanspruchnahme

Gemäß dem Ausbaupfad des §4 EEG (2023) ist eine Erhöhung der installierten Leistung von PV-Anlagen auf 400 GW bis 2040 vorgesehen, wobei der hierfür benötigte Zubau hälftig auf Dachanlagen und PV-FFA entfallen soll. Allerdings sind im Jahr 2022 von den vorgesehenen 200 GW erst 10% PV-FFA installiert. Wie **Abbildung 2** verdeutlicht, braucht es einen entsprechend ambitionierten Leistungszubau. Um den Ausbau zu unterstützen, werden die Ausschreibungsvolumina bis 2029 angehoben (vgl. §28a EEG 2023). Basierend auf aktuellen Zubautrends von PV-FFA unter Berücksichtigung des Anlagenbestands im Marktstammdatenregister (MaStR) von 2022 und einer Nutzungsdauer von 25 Jahren, könnte die geplanten Ausschreibungsvolumina bis 2040 zu einer installierten Leistung von 194 GW führen. Damit der Zielwert von 200 GW bis 2040 erreicht werden kann benötigt es für PV-FFA ab 2026 einen jährlichen Brutto-Zubau von 11 GW, statt den geplanten 9,9 GW (ZSW; bosch & partner 2023).

Die künftige Flächeninanspruchnahme ist entscheidend für den geplanten Leistungszubau von PV-Anlagen. Die Flächeninanspruchnahme hängt von der technischen Weiterentwicklung der Module ab. Hierbei sind insbesondere der Wirkungsgrad und die Leistungsdichte, also die Leistung pro Fläche, relevant. Diese liegt aktuelle etwa bei 1 MW/ha. Im Jahr 2010 lag dieser Wert noch bei 0,35 MW/ha. Die Leistungsdichte von Neuanlagen könnte, abhängig von den erreichten Modulwirkungsgraden, bis 2030 auf 1,33 MW/ha und bis 2040 auf 1,54 MW/ha erhöht werden (ZSW; bosch & partner 2023). Der Wirkungsgrad von kommerziellen Wafer-PV-Modulen ist in den letzten zehn Jahren durchschnittlich um 0,3-0,5 Prozentpunkte pro Jahr auf 20-21% gestiegen (Fraunhofer ISE 2023a; 2023b).

Effizienzsteigerung durch Repowering

Der Begriff "Repowering" bezieht sich auf den Ersatz von bestehenden Energieerzeugungsanlagen durch modernere. Das Hauptziel dabei ist die Steigerung des Leistungsertrags und die Aktualisierung der Anlagen auf den neuesten technischen Stand. In Deutschland wurde durch die Novelle des Energiesicherungsgesetz (EnSiG) vom 30.09.2022 das aktive Repowering von PV-FFA ermöglicht (Enkhardt 2022). Dadurch ist es jetzt möglich, auch funktionstüchtige Komponenten auszutauschen und dadurch die Leistung der Anlage zu steigern. Bislang war dies nur bei technischen Defekten, Diebstahl oder Beschädigungen möglich.

Flächenpotenziale in Deutschland

Flächenpotenzialanalysen werden durchgeführt, um eine Abschätzung vorzunehmen, wie viel Fläche in Deutschland für PV-FFA verfügbar ist. Im Fokus dieser Überblicksstudie stehen ausgewählte Flächenkategorien innerhalb der Förderkulisse des EEG. Dabei wird besonders das theoretische, das technisch-realiserbare und real-nutzbare Potenzial untersucht. Das theoretische Potenzial bezieht sich auf die maximal mögliche Nutzung einer Technologie unter der Annahme, dass alle verfügbaren Ressourcen genutzt werden können. Das technisch-realiserbare bzw. technische Potenzial berücksichtigt basierend auf der theoretisch verfügbaren Fläche, technologische und physikalische Begrenzungen, die sich aus der Topografie der Landschaft und technischen Eigenschaften der APV ergeben. So können Verschattung oder Hangneigung das technische Potenzial beeinflussen. Das real-nutzbare Potenzial berücksichtigt basierend auf dem technischen Potenzial weitere limitierende Faktoren, wie Naturschutz, Infrastruktur und Wirtschaftlichkeit und wird dabei unter Einfluss der definierten rechtlichen sowie raum- und umweltplanerischen Bedingungen gebildet. Jedoch liegen hierfür besonders wenige Berechnungen vor, so dass im Folgenden das theoretische und besonders das technisch-realiserbare Potenzial genauer betrachtet werden.

Landwirtschaftliche Flächen

An der Gesamtfläche Deutschlands macht die landwirtschaftlich genutzte Fläche mit 16,6 Millionen Hektar 46,4% der Fläche aus (FNR 2023). Dabei muss jedoch in verschiedene Flächen differenziert werden, die sich mehr oder weniger anbieten. Grundsätzlich steht PV-FFA auf landwirtschaftlicher Fläche in direkter Konkurrenz mit anderen Nutzungsarten wie Nahrungs- oder Futtermittelerzeugung. Jedoch ist die Nutzung von landwirtschaftlicher Fläche als PV-FFA nicht uneingeschränkt möglich und gesetzlich geregelt. Entsprechend werden die Flächenkategorien des EEGs genauer betrachtet.

Zukünftig könnten laut Hochrechnungen des Thünen-Instituts bis 2040 280.000 Hektar landwirtschaftlicher Fläche beansprucht werden, um ein Ausbauziel von 400 GW_p bis 2040 zu erreichen. Hierbei ist zu beachten, dass gemäß §4 EEG (2023) für PV-FFA lediglich 200 GW als Ausbaupfad anzulegen sind. Die berechnete Fläche von 280.000 ha entspricht einem Anteil von 1,7% der derzeit landwirtschaftlich genutzten Fläche. Jedoch variiert die Spannweite der berechneten Szenarien stark, und diese Prognosen bergen eine große Unsicherheit. Zur Entlastung des Flächendrucks auf

landwirtschaftliche Flächen gibt es jedoch verschiedene PV-Konzepte, wie beispielsweise Agri-PV, die mit geringeren Verlusten an landwirtschaftlicher Fläche einhergehen, oder eine Fokussierung auf benachteiligte Gebiete, um die Konkurrenz zur Nahrungs- oder Futtermittelerzeugung zu reduzieren. Diese werden im Folgenden näher beleuchtet.

Flächeneffizienz von PV-FFA im Vergleich zu Biomasse

Viele der in Deutschland geförderten Energien werden auf landwirtschaftlicher Fläche erzeugt. Allerdings nimmt der Energiepflanzenanbau im Vergleich zur PV-FFA einen größeren Anteil ein. Laut Böhm (2023) beanspruchen aktuell nur 0,1% der PV-FFA landwirtschaftliche Fläche, während es bei Biogas- und Biodieselerzeugung insgesamt 11,8% sind. Des Weiteren ist die Stromerzeugung pro Flächen bei PV-FFA höher als die von Bioenergie (ifeu 2022; Böhm 2023). Laut Böhm (2023) können auf 1 ha PV-FFA bis zu 230 Haushalte mit Strom versorgt werden können, während es beim Anbau von Bioenergiemaß auf einem Hektar Fläche nur sieben Haushalten sind. Hier wird ein durchschnittlicher Stromverbrauch von 3.100 kWh/Haushalt/Jahr zu Grunde gelegt. Die Analysen für Wärme und Mobilität ergeben ein ähnliches Bild. Folglich kann mit PV-FFA deutlich mehr Energie je Hektar landwirtschaftlicher Fläche erzeugt werden als mit Energiepflanzen. Dabei wäre es besonders raumverträgliche Option, wenn bis 2040 die für den Ausbau von PV-FFA notwendigen Flächen ausschließlich auf Flächen für den Anbau von Energiepflanzen verwendet würden, um das Zubauziel von 200 GW zu erreichen. Bei einer Belegungsdichte von 1 MW/ha bräuchte es für diesen Zubau nur 9% der aktuell mit Bioenergie belegten Fläche von 2,3 Millionen Hektar (FNR 2023). Da Photovoltaik im Vergleich zur Bioenergie einen deutlich höheren Energieertrag liefert, könnte mit diesem Bruchteil der Bioenergie-Fläche das 2,4-fache an Energie erzeugt werden.⁶

Benachteiligte Gebiete

Die Bedingungen für die benachteiligten Gebiete werden auf EU-Ebene definiert. Die daraus resultierende Fläche hat sich zuletzt aufgrund einer angepassten Grundlage im Jahr 2018 verändert. Das theoretische PV-Nutzungspotenzial beläuft sich auf rund 9 Millionen Hektar, was etwa 25% der gesamten Fläche Deutschlands entspricht und mehr als die Hälfte der aktuell genutzten landwirtschaftlichen Flächen ausmacht (FNR 2023; ZSW; bosch & partner 2023). Umgerechnet liegt ein theoretisches Flächenpotenzial von 9000 GW auf benachteiligten Gebieten vor, wenn ein Flächenbesatz von 1 MW/ha zugrunde gelegt wird. Zur Berechnung der Raumverträglichkeit wird ein nutzbares Potenzial von 1,5% angenommen, hierbei haben wir uns an den Berechnungen der Stiftung Klimaneutralität (2021) orientiert. Durch diese konservative Abschätzung ergibt sich ein Flächenpotenzial auf den benachteiligten Gebieten von 135 GW. Diese starke Reduzierung von theoretisch verfügbaren Flächen zu realnutzbaren Potentialen wirft die Frage auf, ob diese durch die Gesetzgebung definierte und im Rahmen des EEGs förderfähige Potenzialfläche nicht von vorneherein niedriger dimensioniert werden sollte, um damit eine klarere Flächensteuerung zu

⁶ Dabei wurde der Faktor 28 zugrunde gelegt, um das Verhältnis der Energieerzeugung zwischen PV und Bioenergie darzustellen Böhm (2023).

erreichen. Unter Umständen können dadurch auch aufkommende Akzeptanzprobleme vermieden werden.

Durch die veränderten Abgrenzungen der benachteiligten Gebiete befinden sich nun etwa 43,5% der landwirtschaftlich genutzten Flächen in benachteiligten Gebieten. Davon sind etwa 32,8% aufgrund von erheblich naturbedingten Gründen als benachteiligt einzustufen und 3,5% entfallen auf Berggebiete. Zusätzlich sind 6,4% auf besondere Gründe als benachteiligte Gebiete eingestuft. Es ist zu beachten, dass 40% der gesamten landwirtschaftlich genutzten Fläche in Deutschland in Schutzgebieten liegen (BMEL 2023a). Entsprechend sollte die Nutzung von PV-FFA kritisch abgewogen werden. Diese Aspekte werden im Kapitel **Nachhaltigkeit** stärker beleuchtet. Insgesamt ist zu berücksichtigen, dass Naturschutzbelange das technische Nutzungspotenzial stark beeinflussen (ZSW; bosch & partner 2023).

Moorböden

Moor-PV ist erst seit der Einführung der aktuellen Flächenkulisse des EEG im Jahr 2023 förderfähig. Die Förderfähigkeit gemäß §37 EEG 2023 erfordert, dass entwässerter, landwirtschaftlich genutzter Moorboden bei der Nutzung von Moor-PV wieder vernässt wird. In den moorreichen Bundesländern (Niedersachsen, Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg und Bayern) beträgt die bewirtschaftete Fläche organischer Böden insgesamt 1.285.000 Hektar, was etwa 7-8% der landwirtschaftlichen Fläche entspricht. Gegenwärtig werden diese Flächen zu 26% als Ackerland und etwa 74% als Grünland genutzt (UBA 2021). Die Nutzung von Moor-PV kann zu Synergieeffekten auf der Fläche führen. So kann eine THG-Senkenleistung auf der Fläche durch die Wiedervernässung ermöglicht werden oder durch eine extensive Flächenbewirtschaftung der Moore Habitate für verschiedene Arten entstehen. Das Fraunhofer ISE geht in seinen Potenzialberechnungen zu Moor-PV von 1,1 Millionen Hektar landwirtschaftlich genutzter Moore aus und legt eine Belegungsdichte von 0,25-0,6 MW_p pro Hektar zugrunde. Abhängig von dieser Belegungsdichte ergibt sich ein technisches Potenzial von 270-660 GW_p (Fraunhofer ISE 2023b). Expert:innen behaupten, dass eine jährliche Wiedervernässung von 50.000 ha braucht, um ausreichend zur Klimaneutralität Deutschlands beizutragen (Bröer 2023).

Agri-PV

Das erschließbare Potenzial für Agri-PV (APV) in Deutschland wird stark von der vorliegenden Nutzungskonkurrenz beeinflusst. In einer Potenzialstudie zu Agri-PV des Öko-Institut (2024) wird eine technisch-realisierebare Gesamtfläche von ca. 13 Millionen Hektar identifiziert. Hierbei handelt es sich um die Fläche, die unter technischen und rechtlichen Restriktionen sowie naturschutzrechtlichen Belangen grundsätzlich für die Nutzung von Agri-PV zur Verfügung steht. Auf Basis des gesamten technisch-realisierebaren Potenzials wurde das erschließbare Potential ermittelt, indem Gebiete mit besonderen Synergieeffekten und geringer Nutzungskonkurrenz herausgestellt wurden.

Synergieeffekte ergeben sich vor allem in Kombination mit Kernobst, Wein oder Beerenanbau, d.h. in Kombination mit dem Anbau von Dauerkulturen. Unter Nutzung eines Datensatzes zur satellitengestützten Landnutzungsklassifikation von Preidl et al. (2020) wurde in der Studie ein erschließbares Agri-PV Potenzial in Kombination mit Dauerkulturen von ca. 400.000 ha identifiziert. Auf diesen Flächen können hochaufgeständerte PV-Anlagen installiert werden, so dass durch die Schutzwirkung der

Module (bspw. Hagelschutz) Synergieeffekte mit dem Anbau der Dauerkulturen entstehen. Unter Verwendung eines möglichen Flächenbesatz für hochaufgeständerte PV-Anlagen von 737 kW_p/ha nach Jäger et al. (2022) ergibt sich ein Ertragspotenzial für Agri-PV in Kombination mit dem Anbau von Dauerkulturen von 465 GW.

Neben den Synergieeffekten wurde als weitere erschließbare Flächen Gebiete mit geringer Nutzungskonkurrenz zu landwirtschaftlicher Nutzung oder zu Freiflächen-PV identifiziert. Hierfür wurde das Soil Quality Rating⁷, das Auskunft über die Eignung von Böden für die landwirtschaftliche Nutzung gibt herangezogen. Flächen mit einer geringen Nutzungskonkurrenz werden für eine geringe (SQR 50-60) bis mittlere Bodengüte (SQR 60-70) gesehen. Dies trifft auf eine Fläche von ca. 3,9 Millionen Hektar zu. Auf diesen Flächen bietet sich die Errichtung von vertikal aufgeständerten APV mit bifazialen Modulen an. Diese Module lassen von ihrer Vorder- und Rückseite Sonnenstrahlen durch und ermöglichen so eine höhere Energieausbeute. Mit einem Flächenbesatz von 293 kW_p/ha nach Jäger et al. (2022) ergibt sich ein Ertragspotenzial von 1.154 GW.

Der restliche Anteil an dem ermittelten technisch-realisierbaren Gesamtpotenzial steht in Konkurrenz zur landwirtschaftlichen Nutzung bei einer sehr hohen Bodengüte oder zur klassischen PV-FFA bei einer sehr niedrigen Bodengüte. Diese Fläche umfasst 8,7 Millionen Hektar. Unter Verwendung eines Flächenbesatzes von 350 kW_p/ha nach Fraunhofer ISE (2022) ergibt sich ein Ertragspotenzial von 3.074 GW bei bodennaher PV-FFA. Wie stark und in welcher Form eine Ausnutzung dieses Potenzials für Photovoltaikanlagen stattfinden wird, ist unklar.

Insgesamt ergibt sich aus den Potenzialanalysen der Studie des Öko-Institut (2024) ein technisch-realisierbares Potenzial von 4.525 GW für APV. Davon werden 1.619 GW als besonders geeignetes erschließbares Potenzial identifiziert. Die Stromerzeugung aus Agri-PV-Anlagen ist momentan deutlich teurer als bei klassischen FFA, was insbesondere an den höheren Kosten für Material und Montage der Anlagen liegt (ZSW; bosch & partner 2023). Es ist noch unklar, wie sich die wirtschaftliche Attraktivität von Agri-PV entwickelt, da sich die bisher errichteten Anlagen noch überwiegend im experimentellen Stadium befinden. Sowohl die Kosten als auch der finanzielle Nutzen durch Synergieeffekte wird sich erst noch zeigen. Eine ausführlichere Erläuterung zu den Vorteilen und Synergien von Agri-PV findet sich in den Kapitel **Nachhaltigkeit** und **Akzeptanz**.

Vorbelastete Flächen

Vorbelastete Flächen eignen sich aufgrund ihrer Eigenschaften bevorzugt für eine Entwicklung von PV-FFA. Insbesondere aus naturschutzfachlicher Sicht sind Flächen an Verkehrsstraßen, auf Halden, Konversionsflächen mit hohem Versiegelungs- oder Kontaminationsgrad, brachliegende ehemals genutzte oder intensiv genutzte landwirtschaftliche Flächen besonders für eine Umnutzung als PV-FFA geeignet. Für Deponien, Halden, Brachflächen in Industrie und Gewerbegebieten und in Bergbaufolgelandschaften (Konversionsflächen) wurde ein theoretisches Flächenpotenzial von 36.000 ha geschätzt (ZSW; bosch & partner 2019). Bei einer Umrechnung von 1 MW/ha beträgt das Flächenpotenzial 36 GW. Diese Standorte sind stark durch menschliche Einflüsse verändert und bieten sich für eine prioritäre Entwicklung von

⁷ Abkz: SQR, mit einer Skala von 0-102 Bodenpunkten. Böden mit sehr geringer Qualität haben einen SQR < 50; Böden mit hoher Qualität haben einen SQR > 70.

PV-FFA an. Auch bei Konversionsflächen ist der Kontaminationsgrad häufig entsprechend hoch. Hierbei braucht es jedoch eine detaillierte naturschutzfachliche Betrachtung, da einige Konversionsflächen naturschutzrechtlich relevant sein können.

Die Potenzialanalyse für die Parkplatz-PV basiert auf Hochrechnungen des Fraunhofer ISE. Es wurde eine theoretische Potenzialfläche für Parkplatz-PV von 47.060 ha angenommen. Daraus ergibt sich ein technisches Potenzial von 59 GW auf 28.400 ha. Eine vollständige Nutzung dieses technischen Potenzials könnte bedeuten, dass beinahe ein Viertel der angestrebten 215 GW installierter PV-Leistung bis 2030, die gemäß §4 Ausbaupfad EEG (2023) angestrebt wird, aus Parkplatz-PV stammen könnte. Perspektivisch könnte dieser Wert mit einer kontinuierlichen Fortschreibung der aktuellen Zubaurate an Parkplätzen weiter steigen (vgl. Erneuerbare Energien 02.03.2023; Fraunhofer ISE 2023b; Solarserver 2023).

Auch **Seitenrandstreifen an Autobahnen und Schienenwegen** gehören zu den vorbelasteten Flächen. Durch die Erweiterung des Seitenrandstreifens von 200 Metern auf 500 Meter wird das damit verbundene Flächenpotenzial von gut 2 Millionen Hektar auf mehr als 4,8 Millionen Hektar vergrößert (ZSW; bosch & partner 2023). Dadurch ergibt sich bei einem Flächenbesatz von 1 MW/ha ein theoretisches Flächenpotenzial von 4800 GW. Hierbei ist zu beachten, dass bei den einbezogenen Flächen Überschneidungen zu andern Flächenkategorien, wie benachteiligten Gebieten oder Acker- bzw. Grünland vorliegen. Zur Ermittlung des nutzbaren Potenzials wird der Nutzbarkeitsfaktor der Potenzialstudie von Stiftung Klimaneutralität (2021) für die Seitenrandstreifen von 4% angenommen. Dadurch sollen z.B. Siedlungsflächen, Wälder, Naturschutzgebiete u.ä. großzügig ausgeschlossen werden. Außerdem. Aufgrund der eher konservativen Berechnung des Flächenpotenzials verringert sich das Potenzial erheblich auf 192 GW. Aufgrund ihrer Eigenschaften bieten sich Flächen an Autobahnen oder Schienenwegen als Vorrangflächen für die Entwicklung von PV-FFA an. So sind sie häufig mit diversen Chemikalien, wie Blei oder Pestiziden, die bspw. eine landwirtschaftliche Nutzung einschränken können. Hierbei muss neben der Schadstoffbelastung auch die Bodengüte der Flächen berücksichtigt werden. Dabei scheint eine prioritäre Entwicklung von PV-FFA auf diesen Flächen ggü. anderen Potentialflächen vorteilhaft. Dennoch ist zu gewährleisten, dass beispielsweise Verkehrsteilnehmer:innen nicht geblendet werden.

Floating-PV

Gemäß §37 EEG 2023 können nun auch schwimmende PV-Anlagen, auch als Floating-PV bezeichnet, gefördert werden. Diese Förderung ist jedoch auf künstliche und erheblich veränderte Gewässer beschränkt, wobei die Belegung mit PV dieser Gewässer auf maximal 15% begrenzt ist. Diese Beschränkung führt zu einer Reduktion der Potenzialfläche. Laut Berechnungen des Fraunhofer ISE (2023b) ergibt sich für Floating-PV ein technisches Potenzial von 44 GW_p. Demgegenüber stehen die Potenziale des ZSW; bosch & partner (2023). In ihrem Zwischenbericht schreiben sie von einer für Deutschland real nutzbaren Fläche von 365 km² für Floating-PV sowie möglicherweise weiteren 1.516 km² bei kleineren Seen. Wenn ein Flächenbesatz von 1 MW/ha für die Gewässerpotenzialfläche angelegt wird, ergibt sich ein Flächenpotenzial von 188 GW_p. Die Potenziale weichen entsprechend weit voneinander ab, was an verschiedenen Berechnungsmethoden und einzubeziehenden Daten liegen könnte.

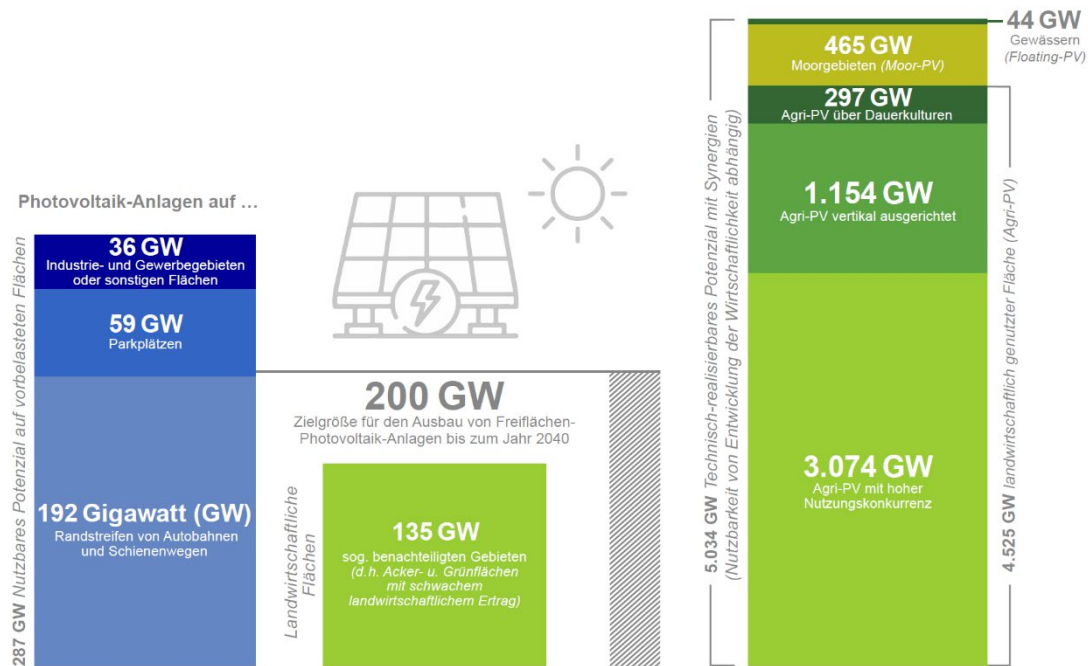


Abbildung 6. Zusammenstellung von verschiedenen Flächenpotenzialen für Deutschland. Eigene Darstellung, Daten nach ZSW; bosch & partner 2019; ZSW; bosch & partner 2023; Fraunhofer ISE 2023b; Öko-Institut 2024.

// FAZIT // In **Abbildung 6** werden die Flächenpotenzialanalysen verschiedener Kategorien des EEG dargestellt. Es zeigt sich, dass für das Ausbauziel von 200 GW PV-FFA insgesamt ausreichend Potenzial vorhanden ist. Dabei sollten bereits belastete Flächen bei der Inanspruchnahme bevorzugt werden, um eine konfliktarme Flächenbelegung zu gewährleisten. Eine ausführliche Begründung für diese bevorzugte Flächenbelegung findet sich in den Kapiteln **Nachhaltigkeit** und **Akzeptanz**. Diese vorbelasteten Flächen sind im ausreichenden Maße vorhanden. Auf ihnen liegt ein nutzbares Potenzial von ca. 290 GW vor, was allein schon deutlich über dem notwendigen Ausbaupfad liegt. Hierbei ist wichtig zu erwähnen, dass es bei den Potenzialen von Seitenrandstreifen teilweise Überschneidungen mit landwirtschaftlichen Flächen und benachteiligten Gebieten geben kann. Wie schnell und vollständig diese Flächen in die tatsächliche Umsetzung gebracht werden können, ist mit Unsicherheiten belegt. Daher sollten auch weitere Flächen zur Verfügung gestellt werden. Zusätzliches raumverträgliches Potenzial gibt es auf sogenannten Synergie-PV-Flächen. Unter Synergie-PV verstehen wir PV-FFA, die neben ihrer Klimaschutzwirkung durch den Zubau von EE, potenzielle Synergieeffekte für die Natur ermöglichen oder durch eine Mehrfachnutzung zu einer möglichen Akzeptanzsteigerung der Bevölkerung beitragen können. Zu Synergie-PV zählen wir neben Agri-, und Moor-PV auch die Floating-PV. Durch die Synergie-PV könnte sich ein erhebliches technisch-realisiertes Potenzial von 5.034 GW erschließen. Jedoch ist bei diesen Flächen unklar, wie viel von diesem Potenzial in der Realität umgesetzt werden kann. Momentan wird der Hochlauf der Synergie-PV durch die hohen Kosten durch eine höhere Aufständigung, komplexere Installationstechnologien und den niedrigeren Flächenbesatz noch deutlich negativ beeinflusst. Zukünftig werden die Kosten durch mehr Erfahrung und Standardisierung reduziert werden können. Grundsätzlich wird es durch die geringere Flächenbelegungen und die teilweise höher liegenden Montage- und Materialkosten immer zu

höheren Kosten als bei klassischer PV-FFA kommen. Aufgrund dessen sind zusätzliche Einnahmeströme notwendig. Zunächst ist es sinnvoll das Segment separat in Ausschreibungen entwickeln zu lassen und so für mögliche Kostenreduktionen zu sorgen. Darüber hinaus ist zu prüfen, wie die Synergien auf der Fläche für zusätzliche Einnahmen sorgen können. Insgesamt zeigt es sich, dass die benachteiligten landwirtschaftlichen Flächen, wenn überhaupt, nur in sehr geringem Umfang genutzt werden müssen. Die in der Grafik dargestellten 135 GW basieren auf einem Nutzungsfaktor von 1,5%. Auch BfN (2022) unterstreichen, dass die technischen Potenziale auf bereits versiegelten Flächen ausreichend vorhanden sind und den benötigten PV-FFA-Zubau von 200 GW bis 2040 übersteigen. Unsere durchgeführte Flächenpotenzialabschätzung unterstützt diese Aussage. Zusätzlich teilen diese Position, mehrere Institute (siehe KNE 2016, UBA 2022b, NABU; BSW Solar 2021, NABU 2022). Für die bevorzugte Entwicklung von PV-FFA auf vorbelasteten Flächen braucht es jedoch eine klare Priorisierung der Flächenausweisungen sowie eine Optimierung der Vergütungsstruktur von Synergie-PV durch das EEG.

PV-FFA Potenzial außerhalb der EEG-Förderkulisse

Anlagen außerhalb der bisher genannten Förderkulisse sind im EEG nicht förderfähig und unterliegen dem Baurecht. Neben dem Flächenpotenzial für EEG-förderfähige Anlagen existiert auch Potenzial für nicht-förderfähige PV-Freiflächenanlagen. Die steigenden Strompreise machen sogenannte Power Purchase Agreement (PPA)-Anlagen, also direkte Stromlieferverträge, für Betreiber:innen und Investoren:innen immer attraktiver. Ist die Anlage größer als 20 MW, wird sie nicht mehr über das EEG gefördert und ist unabhängig von der Flächenkulisse des EEG (2023). Diese Begrenzung innerhalb der Förderkulisse des EEG soll überdimensionierte Anlagen unattraktiver machen, da sie aufgrund ihrer Größe die Landschaft erheblich verändern und die Akzeptanz der lokalen Bevölkerung negativ beeinflussen können.

Angesichts dieser Herausforderungen in Bezug auf Akzeptanz und Raumverträglichkeit ist eine genaue Betrachtung des tatsächlichen Potenzials, insbesondere im lokalen Kontext, entscheidend. Die durchgeführte Flächenpotenzialanalyse lässt die Entwicklung von PV-FFA außerhalb der EEG-Flächenkulisse als nicht notwendig erscheinen.

Weiterführende Literatur zum Thema

- Flächenpotenzialanalysen für PV-FFA:
 - PV- und Windflächenrechner des RLI (2021)
 - Weitere Flächenpotenzialanalysen von BMVI (2015), ZSW; bosch & partner (2019), Stiftung Klimaneutralität (2021), Fraunhofer ISE (2022), UBA (2022a), Fraunhofer IEE (2023) und Fakharizadehshirazi und Rösch (2023)
- Analyse zur Flächeninanspruchnahme:
 - ZSW; bosch & partner (2023)
- Effizienz von Modulen:
 - NREL (2023)

Finanzierung

„Auf einen Blick“

- Zukünftig sind sinkende Stromgestehungskosten aufgrund sinkender Modulpreise erwartbar. Jedoch haben die verschiedenen Krisen der letzten Jahre zu Lieferengpässen und auch zwischenzeitlich zu steigenden Anlagenpreisen geführt.
- Der Marktwert von Solarenergie ist aufgrund saisonaler Effekte und multipler Krisen deutlich dynamischer als zuvor.
- Die Finanzierung auf dem Energy-only Markt ist für Solarenergie zukünftig ungewiss und zusätzliche Förderelemente bei Auslaufen der EEG-Förderung könnten weiterhin notwendig.
- Besondere Anlagen (Agri-PV-, Moor-PV-, Parkplatz-PV und Floating-PV-Anlagen) haben gegenüber herkömmlichen PV-FFA einen Wettbewerbsnachteil, bieten aber zusätzlichen Nutzen. Hierfür sind separate Ausschreibungssegmente in der Planung.

Historische Entwicklung der Stromgestehungskosten

Stromgestehungskosten sind die Gesamtkosten, die aus Betreibersicht mit der Erzeugung von elektrischem Strom aus einer bestimmten Energiequelle verbunden sind. Diese Kosten umfassen sowohl Investitions- als auch Betriebsaufwendungen, die während des gesamten Lebenszyklus einer Stromerzeugungsanlage anfallen. Diese Gesamtkosten werden durch die erzeugte Energiemenge geteilt. Neben den Betriebs- sind auch die Produktionskosten gesunken, besonders durch den Ausbau von Produktionskapazitäten im asiatischen Raum (Fraunhofer ISE 2021). Jedoch haben die verschiedenen Krisen der letzten Jahre zu Lieferengpässen und auch zwischenzeitlich zu steigenden Anlagenpreisen geführt.

In ihren Berechnungen für den aktuellen EEG-Erfahrungsbericht nehmen Bosch & Partner; ZSW (2023) in Abhängigkeit von der Anlagengröße mittlere Stromgestehungskosten von 7,2 bis 7,6 ct/kWh an. Je nach Standortgüte oder Investitions- und Betriebskosten können die Stromgestehungskosten auch höher oder niedriger liegen. Im Jahr 2022 sind die Modulpreise laut einem Bericht von ITRPV um durchschnittlich 7% gesunken. Die Preiserfahrungskurve, die aus den durchschnittlichen Verkaufspreisen und den kumulierten Lieferungen berechnet wird, weist eine Lernrate von 24,4% für den Zeitraum von 1976 bis 2022 auf (Enkhardt 09.05.2023).

Entwicklung der Marktwerte für Solarenergie

Der Marktwert von Solarenergie bezieht sich auf die durchschnittlichen Erlöse, die über einen festgelegten Zeitraum auf dem Spotmarkt aus Solaranlagen erzielt werden. Dieser Marktwert unterliegt saisonalen Schwankungen, bedingt durch die eingeschränkte Verfügbarkeit solarer Strahlungsenergie in den Wintermonaten. Während dieser Zeit steigt die relative Wertigkeit aufgrund des geringeren Angebots an Sonnenenergie. Dadurch unterscheiden sich der Spotmarktpreis und der Marktwert für Solarenergie besonders stark in den Winter- und Übergangsmonaten. Im Sommer kehrt sich dieser Effekt um, da vermehrt solare Strahlungsenergie eingespeist wird und zu niedrigeren Preisen vermarktet werden. Dies führt zu Kannibalisierung, die

wiederum zu Preisdämpfungen führen. So entsteht für den Marktwert ein charakteristisches saisonales Profil.

Die Entwicklung des Marktwertes für Solar verläuft seit dem Beginn der Corona-Pandemie im Jahr 2021 deutlich dynamischer als in den Jahren zuvor (siehe **Abbildung 7**). Ende 2021 erreichten die Marktwerte pandemiebedingt erstmals Höchstwerte von über 25 ct/kWh. Damit liegt der Marktwert fünfmal über dem bisherigen Höchstniveau. Außerdem überstiegen die Marktwerte den Spotmarktpreis deutlich, was durch die saisonalen Effekte auf den Marktwert erklärt werden kann. Nach einem kurzen Absinken der Marktwerte im Februar 2022 setzte sich der Aufwärtstrend fort. Grund hierfür ist die Energiekrise ausgelöst durch den Ukrainekrieg. Im Sommer 2022 erreichten der Spotmarktpreis ein erneutes Rekordhoch und die bisher höchsten Marktwerte für Solar wurden erwirtschaftet. Diese bis Ende 2022 andauernden Dynamiken wurden weiterhin stark von der Energiekrise beeinflusst. Seit Anfang 2023 sinken der Marktwert Solar und der Spotmarktpreis wieder. Das prä-Krisenniveau ist jedoch noch nicht erreicht.

Zu prä-Krisenzeiten wichen der Spotmarktpreis und der Marktwert für Solarenergie zumeist nur aufgrund saisonaler Effekte in den Wintermonaten stärker voneinander ab. So lag der Marktwert von Solarenergie in den Übergangsmonaten bspw. von Oktober 2018 bis Januar 2019 oder von November 2019 bis Januar 2020 deutlich über dem Spotmarktpreis. Grund hierfür ist die begrenzte Verfügbarkeit von solarer Strahlungsenergie in den Wintermonaten und die daraus resultierende Steigerung der relativen Wertigkeit. Dieser Effekt begründet auch die starke Abweichung von Spotmarktpreis und Marktwert für Solarenergie im Dezember 2021. Jedoch gehen seit März 2023 die Werte für Solarenergie und Spotmarktpreis stark auseinander, und der Marktwert für Solar liegt deutlich unterhalb des Spotmarktpreises. Grund hierfür sind laut Energy Brainpool (2023a) die sehr hohen Einspeisewerte für Solarenergie an nachfrageschwachen Wochenenden sowie Feiertagen in Q2 2023. Diese haben noch stärker als in den Vorjahren zu geringen Marktwerten geführt (Energy Brainpool 2022; 2023c).

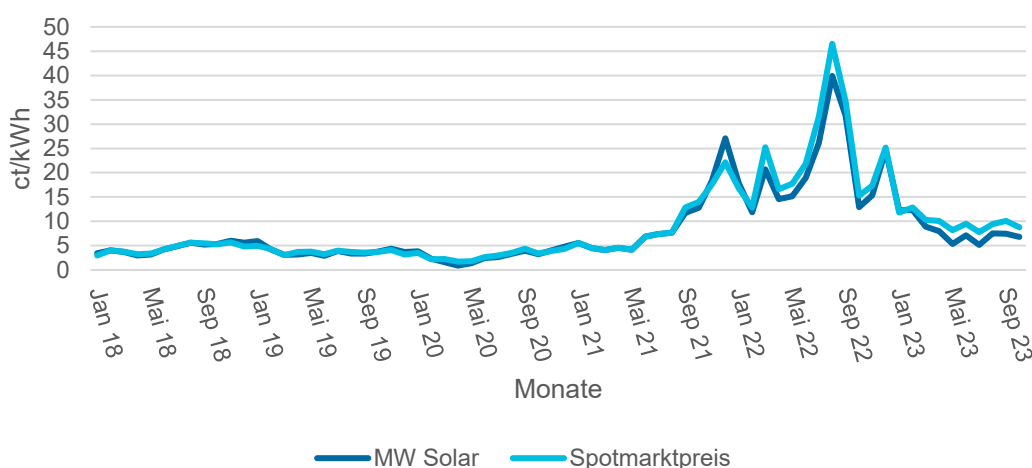


Abbildung 7. Entwicklung der Monatsmarktwerte (MW) seit 2018 bis Oktober 2023 von Solar und Spotmarktpreis in Deutschland, gemäß Anlage 1 (zu §23a EEG) Nr. 5.2. Eigene Darstellung, Daten nach Netztransparenz.de 2023.

In Monaten mit erhöhten Strompreisen konnte beobachtet werden, dass Solaranlagenbetreibern vermehrt ein Wechsel vom Marktprämienmodell in die sonstige Direktvermarktung vornehmen Energy Brainpool (2023b). Dies ist attraktiv, sobald sich abzeichnet, dass die Marktwerte längerfristig die Vergütungssätze übersteigen. Außerdem ergeben sich innerhalb der sonstigen Direktvermarktung durch den Verkauf von Herkunftsnachweisen zusätzliche Erlöse. Ab einer Größe von 20 MW sind PV-FFA laut §37 Abs. 3 EEG nicht mehr förderfähig. Ihre Erlöse können jedoch über PPAs direkt mit Stromabnehmern in bilateralen Verträgen geregelt werden. Somit können erhöhte Strompreise bzw. Marktwerte für Solarenergie den Bau von größeren Solaranlagen, insbesondere PV-FFA anreizen.

Der zukünftige Förderbedarf von PV-FFA hängt somit stark von der Entwicklung auf dem Strommarkt ab und wie sich der zukünftige Marktwert für Solarenergie verändert.

Prognostizierte Stromgestehungskosten und Marktwerte

In der folgenden **Abbildung 8** werden verschiedene szenarienbasierte Prognosen zur Marktwertentwicklung und Stromgestehungskosten von PV-FFA bei einem Inbetriebnahme Jahr 2024 dargestellt. So zeigt sich, dass bei den vorübergehend hohen Strompreisen in den letzten Jahren die Marktwerte von PV-FFA über den Stromgestehungskosten lagen. In diesem Zeitraum hat vermehrt eine Vergütung über die sonstige Direktvermarktung stattgefunden. Langfristig wird jedoch erwartet, dass die Marktwerte wieder deutlich unter die Stromgestehungskosten sinken werden. In diesem Fall könnten sich die PV-Anlagen nicht alleinig über den Energy-only (bzw. Spot) Markt finanzieren.

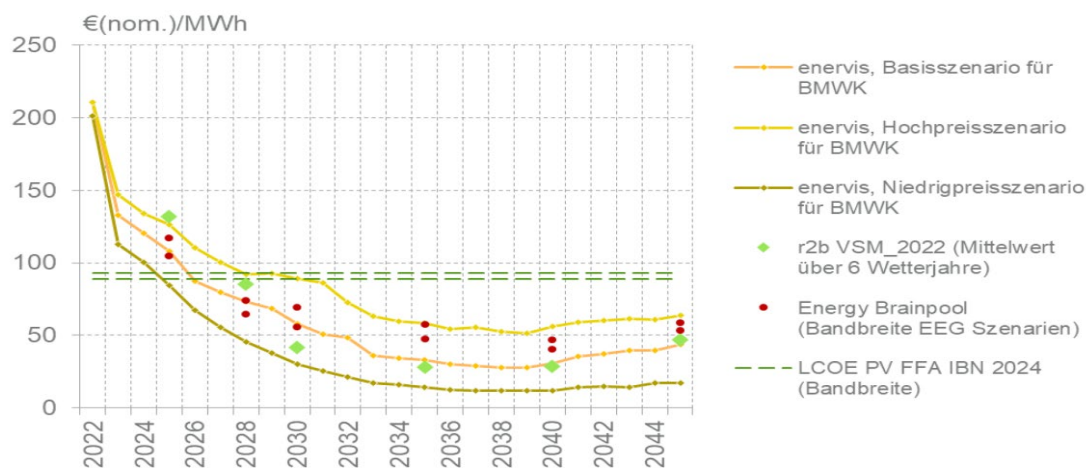


Abbildung 8. Gegenüberstellung der zukünftigen Marktwarterwartung und Stromgestehungskosten von PV-FFA, bei Inbetriebnahme Jahr 2024. Der Zeithorizont entspricht mit 20 Jahren der durchschnittlichen Vergütungsdauer nach EEG. Quelle: BMWK 2023c.

Zur vollständigen Deckung wäre ein zusätzliches Finanzierungselement notwendig. Die Entwicklung eines solchen Elements drängt insbesondere bei Blick auf die Ziele des Koalitionsvertrags der aktuellen Regierung (SPD; Bündnis 90/Die Grünen; FDP 2021). Hier wird angestrebt die EEG-Förderung mit Vollendung des Kohleausstiegs auslaufen zu lassen. Dadurch ergibt sich eine Finanzierungslücke für EE und somit auch für die PV-FFA.

Fokus: Finanzierung von „besonderen Anlagen“

Die Wirtschaftlichkeit von PV-FFA hängt von verschiedenen Einflussfaktoren ab, wie dem Standort und der Anlagengröße. Außerdem sind neben den Investitionskosten für Module, Wechselrichter und Aufständering auch die einmaligen Kosten relevant, wie der Netzanschluss, oder Betriebskosten, wie Wartung, ggf. Pachtpreis und Grünanlagenpflege (Böhm et al. 2022).

Vor allem besondere Anlagen, mit Synergieeffekten für den Naturschutz oder Sekundärnutzungsmöglichkeiten, wie Biodiversitäts-, Moor-PV und Agri-PV-Anlagen, haben deutlich höhere Investitions- und Betriebskosten. Zeitgleich sind sie meist auch schwieriger umzusetzen.

Aktuell erhalten von den im EEG aufgeführten besonderen Anlagen mit Vergütungsanspruch nur Agri-PV- und Moor-PV-Anlagen zusätzliche Zuschläge. Bei Agri-PV-Anlagen erhöht sich der anzulegende Wert im Jahr 2023 um 1,2 ct/kWh. Dieser Zuschlag reduziert sich bis 2028 sukzessive auf 0,5 ct/kWh; für die Moor-PV erhöht sich der anzulegende Wert um 0,5 ct/kWh. Um PV-FFA auf versiegelten Flächen und Mehrfachnutzungen anzureizen, plant das BMWK durch das Solarpaket I für Agri-PV, extensive Agri-PV, Floating-PV, Moor-PV und Parkplatz-PV eine eigene Ausschreibung einzuführen. Der Höchstwert soll 9,5 ct/kWh betragen; das Ausschreibungsvolumen soll zunächst bei 500 MW liegen. Dieses soll bis 2029 auf 3.000 MW erhöht werden (BMEL 2023b).

Historische Entwicklung der Ausschreibungsergebnisse für PV

Ab einer Leistung von 1.000 kWp sind PV-FFA, die unter §37 EEG fallen, über die Vergabe von Ausschreibungen geregelt (BNetzA 2023c). Hier geben PV-FFA Projektierer:innen Angebote für die Errichtung der Anlagen ab. Allerdings sind die Ausschreibungsmenge und der maximale Gebotswert vom Gesetzgeber limitiert. So wurde für den Ausschreibungstermin am 1. Dezember 2023 ein Ausschreibungsvolumen von 1.950 MW vorgesehen (BNetzA 2023b). Die Motivation für Ausschreibungen ist die Steigerung des Wettbewerbs und die Auswahl der günstigsten Angebote. Momentan liegt der Ausschreibungs-Höchstwert bei 7,37 ct/kWh (BNetzA 2023d).

Die folgende **Abbildung 9** stellt die Entwicklung der Ausschreibungen für PV-FFA (bis 2020 inkl. Dachanlagen) seit ihrer Einführung in Deutschland dar. Bereits nach Beginn der Ausschreibungen im Jahr 2015 waren diese von einem sehr hohen Wettbewerb geprägt. Da viele Unternehmen um die begrenzte Ausschreibungsmengen konkurrierten, gab es entsprechend viele Angebote, die Gebotswerte der Unternehmen waren jedoch sehr niedrig. Diese Entwicklung setzte sich bis zum Jahr 2022 fort. Ab hier gab es erstmals eine Unterzeichnung⁸, und das Interesse an Ausschreibungen war deutlich geringer. Als mögliche Gründe werden laut Energy Brainpool (2023b) angeführt, dass die gesetzlich festgelegten Höchstwerte durch die schrittweise Reduzierung nicht mehr attraktiv genug waren. Außerdem stiegen die Preise für Solarmodule und somit die Anlageninstallation stark an. Zu Beginn 2023 wurden die gesetzlich festgelegten Höchstwerte wieder erhöht, was zu einer erneuten Überzeichnung und einer gesteigerten Konkurrenz, wie in den Jahren zuvor, führte.

⁸ Unterzeichnung bedeutet, dass die Nachfrage nach den Ausschreibungen geringer ist als das Angebot. Es ist somit das Gegenteil von Überzeichnung.

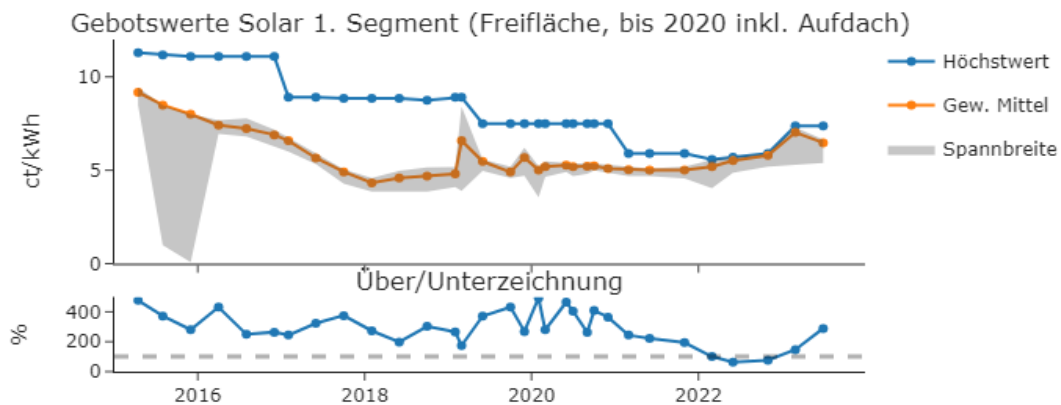


Abbildung 9. Entwicklung der Ausschreibungsergebnisse für Solarenergie im ersten Segment. Bis 2020 wurden innerhalb des ersten Segments auch Dachanlagen geregelt. Quelle: Energy Brainpool (2023b).

Weiterführende Literatur zum Thema

- Umfassende Analyse zur finanziellen Förderung von PV-FFA:
 - ZSW; bosch & partner (2023)
- Entwicklung der Marktwerte für Solarenergie:
 - Direktvermarktungs-Berichte von Energy Brainpool (2022), Energy Brainpool (2023c), Energy Brainpool (2023a), Energy Brainpool (2023b)
- Entwicklung zu Stromgestehungskosten nationaler und auf globaler Ebene:
 - Deutscher Bundestag (2022), Trinomics (2020), Fraunhofer ISE (2021)

Nachhaltigkeit

„Auf einen Blick“

- Der Bau von PV-FFA kann sowohl negative als auch potenziell positive Effekte für Biodiversitäts-, Klimaschutz- und Nachhaltigkeitsziele haben.
- Je nach Vornutzung der Flächen kann es zu einer Aufwertung der Biodiversität und Klimaschutzwirkung kommen, z.B. bei Moor-PV oder auf Flächen, die zuvor intensiv landwirtschaftlich genutzt wurden.
- Durch die aktuell diskutierte Biodiversitäts-PV als neues Segment für das EEG können sich weitere positive Nebeneffekte ergeben.
- Die sozial-ökologische Dimension von PV-Anlagen, v.a. in Ressourcenbeschaffung, die weit über lokale Effekte hinausgeht, sollten stärker in den Fokus genommen werden.

Zentrale Kriterien für ökologische Nachhaltigkeit bei PV-FFA

Grundsätzlich stellt der Bau und Betrieb einer PV-FFA unabhängig von ihrer Bauweise zunächst einen Eingriff in die Natur dar. So kann es zu einer Beeinträchtigung der Biodiversität oder zu einer Verschlechterung der Bodengüte sowie Bodenversiegelung kommen (KNE 2023). Bei punktueller Flächenversiegelung oder -verschattung können angrenzende Gewässersysteme und die Biodiversität sowie die Bodenwasser Verfügbarkeit stark beeinträchtigt werden und sich die Standortfaktoren der Fläche verändern (NABU; BSW Solar 2021). Doch nicht nur während des Betriebs, sondern auch in der Bauphase müssen Flora, Fauna und Wasserhaushalt besonders geschützt werden (Battisti et al. 2016).

// Negative Effekte können sich bei guter naturschutzfachlicher Begleitung reduzieren und es können sich sogar Chancen für die Biodiversität in Solarparks ergeben. So fallen Düngung und Pestizidbehandlung auf den Flächen häufig weg. Durch die extensivere Flächenbewirtschaftung können PV-FFA als störungsarme Habitate für gefährdete Tier- und Pflanzenarten dienen. Außerdem wirkt sich die extensive Bewirtschaftung positiv auf die Boden- und Wasserqualität sowie auf die Biodiversität, insbesondere von Offenlandarten aus (NABU 2022). Für bodenbrütende Vögel, wie Feldlerchen und Braunkehlchen können diese störungsarmen Solarparks nach der Inbetriebnahme als Brutplätze dienen. Das Anlegen von Strukturhabitaten, wie Hecken, Steinhaufen, Rohbodenstellen, Totholz oder Kleingewässern, kommt Arten wie Zauneidechsen, Steinschmätzern, Kreuzkröten oder verschiedenen Insektenarten zugute. Auch der Randbereich des Parks kann durch angebrachte Nistmöglichkeiten oder Sitzwarten von verschiedenen Arten genutzt werden (NABU; BSW Solar 2021). Damit diese Effekte ihre Wirkung entfalten können, sollte die Bodenverdichtung und -verletzung bei der Installation der Anlage möglichst geringgehalten werden. Bei der Errichtung von Zäunen um die Solarparks sollten insbesondere wandernde Arten berücksichtigt werden. Zäune stellen eine Barriere dar und begünstigen dadurch die Flächen- und Habitatfragmentierung. Um die Barriere für die Tiere gering zu halten, sollte der Bodenabstand sinnvoll gewählt und kein Stacheldraht angebracht werden.

// FAZIT // Negative Effekte auf die Biodiversität sind bei Flächen mit geringer oder ohne Vorbelastung deutlich relevanter. Zusätzlich beeinflussen diese Veränderungen Flächen mit empfindlichen Habitaten und besonderen Funktionen für bspw. Brut oder Nahrungssuche stärker. Jedoch kann die Naturverträglichkeit von Solaranlagen mit entsprechender Planung und Monitoring deutlich verbessert werden. So gibt es, neben den vorgestellten Synergieeffekten, verschiedene Möglichkeiten für ‚naturnahe Ansätze‘, die den Eingriff in die Natur durch bspw. Flächenauswahl, angepasste Modulreihenabstände oder verminderte Bodenversiegelung reduzieren. Der finanzielle Mehraufwand hindert Projektierer:innen meist auf diese höheren Standards zu setzen (UBA 2022b).

Ökologische Dimensionen von ausgewählten Anlagentypen

Agri-PV

Agri-PV Anlagen (APV) ermöglichen eine doppelte Flächennutzung durch die Produktion von Strom und landwirtschaftlichen Erzeugnissen. Die begrenzte Ressource „Land“ wird dadurch effizienter genutzt (UBA 2022b). APV, die über der landwirtschaftlichen Fläche aufgestellt sind, können zusätzlich Schutz vor intensiver Sonneneinstrahlung, Hitze, Frost und Hagel bieten. Durch die Entstehung eines Mikroklimas verbessert sich zusätzlich die Regulation des (Boden-) Wasserhaushaltes (Fraunhofer ISE 2022). Diese zusätzlichen Synergieeffekte können sogar zu einer Steigerung des Flächenertrags führen (UBA 2022b).

Floating-PV

Bei Floating-PV Anlagen handelt es sich um eine noch recht neue Form von PV-FFA. Daher ist ihr Einfluss auf das Ökosystem „See“ noch nicht abschließend wissenschaftlich geklärt, insbesondere auch, da es sich um stark veränderte und künstliche Gewässer handelt. Mögliche negative Wechselwirkungen zwischen Anlagen und dem Gewässer sowie am Gewässer lebenden und brütenden Arten können sowohl während des Betriebs als auch bei Wartung oder Reinigung auftreten. Außerdem kann der verminderte Strahlungseintrag durch die Beschattung und eventuelle Temperaturveränderungen die Photosyntheseleistung der Gewässer reduzieren, zeitgleich aber auch den Verdunstungsgrad reduzieren (BfN 2023). Diese Faktoren können Einfluss auf den Nährstoffumsatz nehmen und dadurch die Lebensraumfunktionen des Gewässers verändern (Leßmann 2023). Aufgrund negativer ökologischer Effekte empfiehlt der NABU natürliche Gewässer auch zukünftig für die Nutzung durch Floating-PV auszuschließen (2022).

Moor-PV

Moor-PV Anlagen bieten aus mehreren Gründen eine besondere Chance für den Klimaschutz. Aktuell sind Deutschlands Moorböden zu 92% entwässert, besonders für die land- und forstwirtschaftliche Nutzung (BMUV). Sobald der in den Mooren liegende Torf mit Luft in Berührung kommt, beginnen Zersetzungsprozesse, die Treibhausgase (THG) freisetzen. Diese tragen laut BMUV (2022) mit 6,7% zu den gesamten deutschen THG-Emissionen bei. Des Weiteren stehen die meisten Moorlebensraumtypen auf der Roten Liste der gefährdeten Biotoptypen und gelten als stark gefährdet bzw. sind vollständig von der Vernichtung bedroht (KNE 2022).

Um die Landwirt:innen zu einer solchen Agrarflächenumgestaltung anzureizen, werden entsprechende finanzielle Anreizstrukturen benötigt. Das EEG setzt hier höhere Vergütungssätze als bei den übrigen besonderen Anlagen an (siehe §38b Abs. 1 EEG 2023) und ermöglicht eine agrarwirtschaftliche Weiternutzung der Fläche als Paludikultur (siehe §37 Abs. 1 Nr. 3e EEG bzw. §85c Abs. 1 EEG). Grundsätzlich sieht eine EEG-geförderte Nutzung von Moor-PV die Wiedervernässung der Flächen vor. Dadurch können zusätzlich THG-Emissionen reduziert werden und auch Klimaschutzziele in der Landwirtschaft leichter erreicht werden. Außerdem werden die stark degradierten Moorflächen in einen naturnahen Zustand zurückgeführt, was sich positiv auf die Biodiversität auswirken kann (KNE 2022). Besonders in Mooregebieten ohne Schutzstatus bietet es sich an, diese in PV-FFA zu überführen und die Flächen dadurch ökologisch aufzuwerten (SMC 2023).

Allerdings wirkt sich die Nutzungsaufgabe und Wiedervernässung von Mooren nicht automatisch positiv auf die Biodiversität aus. Durch den Torfabbau oder die Entwässerung können bspw. Sekundärhabitats für geschützte Arten entstanden sein, die durch eine Wiedervernässung wegfallen. Daher müssen die Auswirkungen auf die Biodiversität in jedem Fall individuell abgewogen werden. Zusätzlich kann es während der Bauphase und der Bodenbearbeitung oder in Wartungsperioden zu erhöhten Emissionen kommen.

Deshalb muss ein besonderes Augenmerk auf den Bodenschutz gerichtet werden, um eventuelle Emissionen möglichst zu vermeiden. Außerdem stellt die grundsätzliche Wasserverfügbarkeit aufgrund der veränderten klimatischen Bedingungen eine große Herausforderung für die Wiedervernässung dar. Der lokale Grundwasserhaushalt oder angrenzende Fließgewässer sowie deren Artenvielfalt können negativ beeinflusst werden. Auch gibt es eine Wissenslücke zum größtmöglichen Verdunstungsschutz bei gleichzeitiger erfolgreicher Vegetationsentwicklung unterhalb der Module. So sollten Modulreihen möglichst hoch über der Vegetation stehen, versetzt, vertikal oder mit einem ausreichenden Reihenabstand. Auch die Verwendung von lichtdurchlässigen Modulen bietet sich an (KNE 2022).

// FAZIT // Freiflächen erfüllen mehrere Nutzen gleichzeitig, wie Grundwasserbildung, Versickerung, Wasserrückhaltebereiche, Sicherung der ökologischen Artenvielfalt sowie Nahrungsgrundlage. Selbst eine umweltverträglich aufgebaute Anlage setzt einen Eingriff in die Natur voraus und kann zumindest kurz- oder mittelfristige Folgen haben, welche die Vorteile einer PV-FFA gegenüber landwirtschaftlicher Flächennutzung schmälern kann. Jedoch sind die möglichen Synergieeffekte für Natur-, Arten- und Klimaschutz bei guter naturschutzfachlicher Betreuung nicht zu vernachlässigen. Insgesamt sollte der Fokus bei der zukünftigen Entwicklung von PV-FFA primär auf versiegelten und vorbelasteten Flächen liegen. Dadurch wird ein sparsameres Nutzen von unversiegelten Freilandflächen gewährleistet. Laut BfN (2022) sind die technischen Potenziale auf diesen bereits versiegelten Flächen ausreichend, und übersteigen den benötigten PV-FFA-Zubau von 200 GW bis 2040. Insbesondere aus naturschutzfachlicher Sicht sind Flächen an Verkehrsstraßen sowie Halden, Konversionsflächen mit hohem Versiegelungs- oder Kontaminationsgrad, brachliegende ehemals genutzte oder intensiv genutzte landwirtschaftliche Flächen besonders für die Umnutzung als PV-FFA geeignet. Diese Position, dass versiegelte und andere vorbelastete Flächen bevorzugt genutzt werden sollten, um den Nutzungsdruck auf andere Flächen zu verringern, teilen mehrere Institute (siehe KNE 2016, UBA 2022b, NABU; BSW Solar 2021, NABU 2022).

Nachhaltigkeitsaspekte in der aktuellen Gesetzgebung

Grundsätzlich regelt das Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG 2022) alle Eingriffe in die Natur und Landschaft über die Eingriffsbestimmungen der §§13f. Demnach sind alle vermeidbaren Beeinträchtigungen zu unterlassen (siehe §15 Absatz 1 BNatSchG). Über sogenannte Querschnittsklausen werden Vorhaben im Außenbereich, zu denen auch PV-FFA zählen, im Baugesetzbuch (BauGB 2023) geregelt (siehe §35 BauGB).

Innerhalb der für die PV-FFA geltenden Paragraphen des EEG 2023 wird kaum auf Naturschutzbelange Bezug genommen. Eine Steuerung der Flächenkulisse erfolgt primär über die geltende Förderstruktur des §37 EEG 2023. So gilt bspw. für besondere Anlagen⁹ nach EEG §37 Absatz 2 bzw. §85c, dass diese nicht auf naturschutzrechtlich relevanten Flächen, wie Nationalparks oder Naturschutzgebieten oder in einem Lebensraumtyp nach Natura 2000 (siehe FFH-Richtlinie, 92/43/EWG Anhang 1 der Europäische Kommission 2013, bzw. EU-Richtlinie 2006/105/EG des Europäischen Rates 2006) errichtet werden dürfen.

Auch außerhalb des EEG existieren gesetzliche Ansätze zur Regulierung des maximalen Flächenbedarfs von Anlagen. Im Rahmen der Raumplanung und den damit ggf. verbundenen Umweltverträglichkeitsprüfungen haben die Bundesländer einen gewissen Handlungsspielraum hinsichtlich der Eignungsausweisung von Flächen (MIRIG; MELUND 2021; MEID MV 2021; UVPG 2023).

Welche über die aktuellen Regelungen hinausgehende Vorschläge gibt es?

Insgesamt fehlen jedoch aktuell klare gesetzliche Kriterien für die Identifizierung, Steigerung oder Erhaltung der Biodiversität auf einer Fläche, die zeitgleich als PV-FFA genutzt wird. Beispielsweise gehen NABU & BSW Solar (2021) der Gebietsausschluss von Naturschutzgebieten, Naturparks und Natura 2000-Gebieten zu Erhaltung der vorhandenen Biodiversität nicht weit genug. Sie empfehlen die Erweiterung auf geschützte Biotop nach §30 BNatSchG, Feuchtgebiete nach Ramsar-Konvention von 1971, sowie auf die Kern- und Pflegezonen von Biosphärenreservaten (siehe hierzu §25 BNatSchG).

Im Folgenden werden weitere konkrete Vorschläge von verschiedenen Akteur:innen mit dem Ziel der Biodiversitätssteigerung vorgestellt:

Biodiversitäts-Solarparks

Um diese gesetzliche Lücke zu schließen, wurde bereits in der Solarstrategie des BMWK (2023a) der Biodiversitäts-Solarpark als „Standard“ für die Vision der Solarenergie 2035 genannt. Diese sollen neue Lebensräume für Pflanzen und Tiere innerhalb der Agrarlandschaft schaffen und damit die Naturverträglichkeit von Solarparks verbessern. Der zentrale Unterschied zwischen klassischen PV-FFA und Biodiversitätsanlagen liegt vor allem in der äußerst geringen Versiegelungsrate. So soll eine insgesamt funktionsfähige Grünfläche verbleiben und eine zielgerichtete Biotopverbesserung durch den Erhalt naturnaher Strukturen erreicht werden. Eine Einführung von Biodiversitätsparks könnte laut Solarstrategie des BMWK (2023a) zu einem jährlichen Zubau von 5 GW führen und würde 5000 ha Fläche benötigen.

⁹ Mit besonderen Anlagen sind die Moor-, Agri- oder Parkplatz-PV gemeint.

Das BMWK sieht hier Anschluss an die GLÖZ-Standards¹⁰, die Voraussetzung für die Flächenprämie der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) der EU sind. Ab 2024 sind Landwirt:innen verpflichtet, vier Prozent ihrer Gesamtfläche „als nicht produktive Fläche vorzuhalten“, um den guten landwirtschaftlichen und ökologischen Zustand (GLÖZ) zu erhalten (BMWK 2023a). Diese Flächen könnten sich laut BMWK für die Errichtung der Biodiversitäts-PV-Anlagen eignen. Die Flächen würden dann mehrjährig zur Steigerung der Biodiversität dienen und die Landwirt:innen könnten auf diesen nicht-produktiven Flächen zeitgleich wirtschaftliche Erträge generieren (BMWK 2023a). Die genauen Formalitäten befinden sich noch in der Abstimmung mit den entsprechenden Ressorts.

Gegenüber einer klassischen PV-FFA ist die Effizienz der Biodiversitäts-PV aufgrund eines reduzierten Flächenbesatzes geringer. Um diese Auswirkungen zu kompensieren und gleichzeitig Anreize zu schaffen, schlagen ZSW; bosch & partner (2023) vor, dass diese Defizite ausgeglichen werden. Das KNE (2023) schlägt hierzu außerdem vor, die Biodiversitätsparks rechtlich zu definieren und diesen besonderen Anlagentyp zu normen. Das würde eine privilegierte Zulassung dieser Anlagentypen erleichtern und eine erhöhte Vergütung ermöglichen. Die Integration und Definition von Biodiversitäts-PV innerhalb der Förderstruktur des EEG, wird mit den fachlich betroffenen Ressorts geprüft. Hier sollte außerdem geregelt werden, dass für Biodiversitäts-PV keine Ausgleichsflächen anfallen. Ausgleichsmaßnahmen sollten nur erforderlich sein, wenn aus artenschutzrechtlicher Sicht verschiedene Bedürfnisse der Arten nicht erfüllt werden, bspw. bei Verlust von Jagdgebieten von Greifvögeln. Auch außerhalb der Förderstruktur des EEG könnten Biodiversitätsanlagen, durch eine Verankerung im Landwirtschaftsgesetz, ermöglicht werden.

Extensiv bewirtschaftete Agri-PV-Anlagen

Neben den Biodiversitäts-Solarparks schlägt der BDEW (2023) vor, die bestehenden Arten der Agri-PV, um „extensiv bewirtschaftete Agri-PV“ Flächen zu erweitern. Sie ermöglichen eine dreifache Nutzung der Fläche mit Blick auf Klimaschutz, nachhaltige Landwirtschaft und Stärkung der lokalen Artenvielfalt. Die extensive und schonende Bodenbewirtschaftung führt einerseits zu einer Steigerung des Humusanteils und erhöht dadurch die Bodenfruchtbarkeit. Andererseits entstehen dadurch störungsärmere Habitate für Arten, was die Biodiversität positiv beeinflusst und erhält. Durch den Wegfall von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln ist ein positiver Effekt auf die Insektenvielfalt zu erwarten. Biotopstrukturen, wie vernässte oder trockene Bereiche, Gehölze oder Trockenmauern sollten während der gesamten Anlagenbetriebsdauer erhalten bleiben. Das kann in Vogelschutzgebiete von besonderem Vorteil sein.

Dabei ist es wichtig sicherzustellen, dass die extensive Nutzung dieser Flächen grundsätzlich förderfähig ist. Eine Förderung gemäß der GAP setzt eine nachgewiesene landwirtschaftliche Tätigkeit auf den Flächen voraus. Für die Einführung von extensiv bewirtschafteten Agri-PV-Flächen wäre eine Anpassung der bundesweiten GAP-Vorschriften notwendig, welche extensive Bewirtschaftung als landwirtschaftliche Tätigkeit anerkennt (BDEW 2023).

¹⁰ GLÖZ, Abkz.: guten landwirtschaftlichen und ökologischen Zustand

Sozio-ökologische Folgen von PV

Die Herstellung von Solaranlagen ist auf seltene Erden sowie verschiedene Metalle wie Kupfer, Aluminium, Kobalt, Nickel, Lithium, Chrom, Zink oder Platin angewiesen (IEA 2022c). Einige dieser Materialien gelten geopolitisch als kritisch einzustufen, wie beispielsweise Nickel, das überwiegend aus Russland importiert wird und für strategische Kriegsführungszwecke genutzt werden kann (Osusky 05.06.2023). Darüber hinaus sind mit dem Abbau dieser Rohstoffe oft negative soziale und ökologische Konsequenzen verbunden. In den Abbauregionen kann es zu erheblichen Umweltschäden, wie beispielsweise schwerwiegender Wasserverschmutzung oder einer Zunahme seismischer Aktivitäten durch die Förderung kommen (Giurco et al. 2019, Osusky 05.06.2023). Entlang der gesamten Lieferkette können Verstöße gegen soziale und ökologische Gerechtigkeit auftreten. In vielen Abbaubereichen wurden Landraub, Kinderarbeit, Menschenrechtsverletzungen und Umweltverschmutzung beobachtet, was zu Gesundheitsproblemen führt. Teilweise werden Abbaustandorte aufgrund dieser potenziellen Folgen in den Abbaubereichen nicht erschlossen (Florin und Dominish 2017, Giurco et al. 2019).

Durch Recycling könnten einige der sozio-ökologischen Herausforderungen gemindert werden. Eine Ausführung zum Recycling von PV-Anlagen befindet sich im Kapitel **Produktionskapazitäten von Komponenten für PV-Anlagen**.

Weiterführende Literatur zum Thema

- Zusammenstellung von Konflikten bei Flächeninanspruchnahme von PV-Freiflächenanlagen:
 - BMVI (2015)
- Weitere Informationen zu Moor-PV:
 - KNE (2022), Heinrich Böll Stiftung (2023), Greifswald Moor Centrum (2022)
- Weitere Informationen zu Agri-PV:
 - Fraunhofer ISE (2022)
- Auswirkung von PV-FFA auf Biodiversität und Umwelt:
 - ZHAW Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften; Energie-Schweiz (2021)
- Möglichkeiten für ein Monitoring und Biodiversitätsmanagementpläne für PV-FFA Flächen:
 - SolarPower Europe und BirdLife International (2022)
- Konkrete Maßnahmen für naturgerechte Solarparks:
 - NABU (2021), Deutscher Naturschutzring, et al. (2022), bne (2022)
- Zertifizierungsmöglichkeiten für naturgerechte PV-FFA:
 - EULE (2023)

Akzeptanz

„Auf einen Blick“

- Umfragen zeigen: Solarkraft ist die beliebteste erneuerbare Energie. Solarparks liegen auf Platz zwei hinter PV-Dach. Die generelle Akzeptanz wird von den aktuellen geopolitischen Entwicklungen beeinflusst. Neben Klimaschutz werden EE auch im Zusammenhang mit Energiesicherheit gesehen.
- Dennoch sollten während der Planung aufkommende Bedenken und gegenläufige Interessen bezüglich der Flächennutzung berücksichtigt werden.
- Mehrfachnutzungen von Flächen können helfen die Akzeptanz zu steigern und potenzielle Nutzungskonflikte abzumildern. Hierfür ist die Agri-PV ein zunehmend positives Beispiel.
- Bürger:innen an einer PV-FFA (in der Umgebung) finanziell zu beteiligen, hilft, um die Akzeptanz zu fördern. Umfragen zeigen aber, dass hier noch hoher Informationsbedarf besteht.

Die Akzeptanz von PV-FFA in Deutschland – Status Quo

Laut Akzeptanzumfragen der Agentur für Erneuerbare Energien (2022) befürwortet eine große Mehrheit (86%) der befragten Personen den Ausbau von erneuerbaren Energie (EE) in Deutschland (Stand Dezember 2022). Die insgesamt positiven Zustimmungswerte für EE sind vor allem auf die veränderte geopolitische Lage, insbesondere geprägt durch den völkerrechtswidrigen Angriffskrieg gegen die Ukraine und die daraus resultierenden hohen Energiepreise, zurückzuführen. EE werden daher zunehmend nicht nur im Kontext des Klimaschutzes, sondern auch im Kontext der Energiesicherheit gesehen und befürwortet (AEE 2022; EE.SH 2023).

Akzeptanzumfragen¹¹ zeigen klar: Solarkraft zählt zu den beliebtesten EE. Nachfolgend geben wir eine kompakte Übersicht über Detailspekte, die aus den Umfragen hervorgehen:

- PV-Dachanlagen finden größere Zustimmung als Solarparks
- Bei Vorerfahrungen mit PV-Anlagen in der unmittelbaren Umgebung steigt die Zustimmung zu PV-FFA
- Die städtische Bevölkerung ist prinzipiell positiver eingestellt gegenüber PV-FFA als die ländliche Bevölkerung
- Die Einstellung zu einem verstärkten Ausbau von PV-FFA ist nicht eindeutig (50% befürworten diesen)

// Insbesondere die Landbevölkerung befürchtet, dass die Energiewende auf Kosten von fruchtbaren Böden, bäuerlichen Betrieben, Tourismus, Natur und Landschaftsbild geht (Keller et al. 13.10.2021). Teilweise wird diese Diskussion auch sehr emotional geführt und versucht, Projekte zu verhindern (Finkler 25.09.2023). Die Bedenken sind divers und in großer Zahl vorhanden.

¹¹ Akzeptanzumfragen von Green Planet Energy (2021), AEE (2022) und EE.SH (2023).

Vor allem bei FFA werden Befürchtungen laut, dass es schwierig ist, die Anlagen gut in die Landschaft zu integrieren, dass Erholungsfunktion, Eigenart, Vielfalt und Schönheit der Landschaft beeinträchtigt werden oder Gebiete mit besonderer kultureller oder Sichtschutzfunktion sowie Bestandsschutz verloren gehen (BMVI 2015).

Konfliktlandkarte: Akzeptanz und Landnutzung in der Solarenergie

Bei PV-FFA kollidieren verschiedenen Landnutzungsinteressen miteinander. Daher kann es auf verschiedenen Ebenen zu Konflikten kommen:

Flächenkonkurrenz um landwirtschaftliche Flächen

In Deutschland steigt der Druck auf landwirtschaftliche Flächen, zum Beispiel aufgrund des Agrarstrukturwandels. FFA verstärken diese Flächenkonkurrenz:

- Flächenkonkurrenz mit Lebensmittelproduktion:
 - Die Nutzung von landwirtschaftlich produktiver Fläche konkurriert direkt mit der Erzeugung von Nahrungs- oder Futtermitteln. Die bisherigen Flächennutzer:innen befürchten beim Ausbau von PV-FFA auf ihrer Fläche insbesondere wirtschaftliche Verluste (UM BW 2019).
- Naturschutzfachliche Ansprüche an eine landwirtschaftliche Fläche:
 - Ertragsarme oder nährstoffarme Standorte können von besonderem Naturschutzwert sein, weshalb Naturschützer:innen den Ausbau auf solchen Standorten kritisch sehen (UBA 2022a; 2022b).
- Ansteigende Bodenpreise durch erhöhten Flächendruck und steigende Pachtpreise (siehe auch **Sozio-ökonomische Herausforderungen von PV-FFA**)

Die Vielfalt der Kriterien im Bereich der landwirtschaftlichen Flächen müssen hierbei abgewogen werden. Insgesamt ist der notwendige Flächenbedarf an landwirtschaftlicher Fläche unter Berücksichtigung der deutschen EE-Ausbauziele bis 2040 gering: Laut Berechnungen des Thünen-Instituts liegt dieser bei 1,7%, was 280.000 ha entspricht (Thünen-Institut 2022). Um den Druck auf die landwirtschaftlichen Flächen weiter zu reduzieren, könnte auch eine Fokussierung auf bereits vorbelastete Flächen erfolgen. Das ist auch aus naturschutzfachlicher Sicht förderlich. Eine weitreichende Ausführung dieses Arguments befindet sich in den Kapiteln **Nachhaltigkeit** und **Flächenpotenziale**. Des Weiteren kann die Installation von PV-FFA unter Umständen sogar Synergieeffekte für die Biodiversität haben und dadurch den naturschutzfachlichen Wert einer Fläche erhöhen.

Mehrfachnutzung durch Agri-PV

Agri-PV Anlagen bieten die Möglichkeit, Flächenkonkurrenzkonflikten Abhilfe zu schaffen. Agri-PV ist ein Konzept, bei dem PV-FFA auf Flächen so errichtet werden, dass dort gleichzeitig landwirtschaftliche Aktivitäten stattfinden können und damit eine Mehrfachnutzung der Fläche ermöglicht wird. Durch die zusätzliche Energieerzeugung können Landwirt:innen Mehreinnahmen generieren und unter Umständen bei Energieeigenverbrauch Kosten sparen. Das sichert die Betriebe zusätzlich ab. Außerdem sind die Flächenverluste im Vergleich zu klassischen PV-FFA geringer. Dieses übergreifende Set-Up zeigt Effekt: Die Akzeptanz für Agri-PV Anlagen ist in Landwirtschaftsverbänden größer als für „klassische“ PV-FFA. Andererseits stellen insbesondere hochaufgestellte Agri-PV Anlagen einen stärkeren Eingriff in das Landschaftsbild dar und können die Akzeptanz der Bevölkerung schmälern (ZSW; bosch & partner 2023).

Um eine Mehrfachnutzung zu fördern, braucht es jedoch verbesserte Vergütungsstrukturen für diese Anlagenart. Diese sollen mit der Einführung des Solarpaket I geschaffen werden. So wird für besondere Anlagen, zu denen auch die Agri-PV-Anlagen zählen, ein eigenes Ausschreibungssegment mit einem Höchstwert von 9,5 ct/kWh eingeführt. Das Ausschreibungsvolumen soll zunächst bei 500 MW liegen und bis 2029 auf 3.000 MW erhöht werden (BMWK 2023b; BMEL 2023b). Bei kleineren Anlagen, die aufgrund ihrer Größe nicht an Ausschreibungen teilnehmen, wird die reguläre gesetzlich festgelegte Vergütung 2024 auf 2,5 ct/kWh angehoben. Außerdem ist eine zeitgleiche Förderung nach EEG und GAP möglich (BBH 2023).

// Bei Flächennutzungskonflikten von PV-FFA ist es wichtig, diese stets im Vergleich zu anderen Nutzungsmöglichkeiten im Kontext der Energiegewinnung zu betrachten. So ist die Flächeneffizienz von PV-FFA höher als die von Bioenergie in der Stromerzeugung (ifeu 2022; Böhm 2023). Um die Flächennutzungskonkurrenz weiter zu minimieren, könnten die entsprechenden Bioenergieflächen in PV-FFA umgewandelt werden, was sich wiederum positiv auf die Akzeptanz hinsichtlich Landnutzung auswirken kann. Eine entsprechende Ausführung dazu befindet sich in Kapitel **Potenzi-ale & Leistungszubau**.

// Bedenken zur Flächeninanspruchnahme von PV-FFA und deren Konkurrenz zur Lebensmittelerzeugung können gemildert werden: Nur ein geringer Teil der landwirtschaftlich genutzten Fläche wird durch PV-FFA zugunsten des 400 GW Ausbauziels beeinflusst sein (Thünen-Institut 2022). Vor diesem Hintergrund erscheint die Forderung nach einer Umwidmung von derzeit für Bioenergie genutzten Flächen für PV-FFA zugunsten einer höheren Flächeneffizienz gerechtfertigt (ZSW; bosch & partner 2023). Diese Empfehlung wird von Öko-Institut (2023) unterstützt und eine Priorisierung von Klimaschutz durch Treibhausgassenken auf Landnutzungsflächen gegenüber Bioenergie befürwortet.

Naturverträglichkeit des Solarausbaus

Freiflächenanlagen stellen stets einen Eingriff in die Natur da: Sie verändern die Landschaft in der Bauphase und bringen zudem generelle, langfristige Landnutzungsänderungen mit sich. Eine nicht naturverträgliche Planung von Anlagen führt dazu, dass die Biodiversität eingeschränkt, die Bodengüte abgewertet und die

Bodenversiegelung verstärkt wird. Diesen Befürchtungen und negativen Effekten von PV-FFA kann jedoch mit einer guten naturschutzfachlichen Begleitung begegnet werden. Inwieweit Klimaschutz und Naturschutzbelange sich bei PV-FFA gegenüberstehen, ist in Kapitel **Nachhaltigkeit** näher ausgeführt.

Veränderung des Landschaftsbildes

Die unmittelbare Sichtbarkeit von PV-FFA beeinflusst die Betroffenheit und dadurch die Akzeptanz der lokalen Bevölkerung. Aufgrund ihrer Größe sowie der Reflexion des Sonnenlichts sind PV-FFA deutlich in der Landschaft sichtbar. Um die Landschaft nicht zu überfrachten, sollten PV-FFA möglichst gut in die Landschaft integriert werden. Das kann zum Beispiel umgesetzt werden, indem die Sichtachse zu Siedlungen oder zum Dorfmittelpunkt freigehalten wird oder Flächen mit geringer Sichtbarkeit bevorzugt werden, die aufgrund ihres Geländeprofiles oder von vorhandener Vegetation kaschiert werden können (UM BW 2019, UBA 2022b).

// Während die Größe für Solarparks in §37 Abs. 3 EEG auf 20 MW beschränkt wird, gibt es keine kategorische Größenbeschränkung für ungeförderter Solarparks bzw. sogenannte PPA-Anlagen¹². Einschränkungen sind hier über das entsprechende Planungsrecht möglich. Außerhalb der EEG-Förderung wird die 20-MW-Grenze deutlich überschritten (ZSW; bosch & partner 2023). Der bislang größte Solarpark „Weesow-Willmersdorf“ wurde in Brandenburg eröffnet. Die Fläche beträgt 209 ha, mit einer installierten Leistung von 187 MW (EnBW 2023). Im Herbst 2023 wird das ebenfalls ungeförderter Mega-Projekt „Energypark Witznitz“ auf einer ehemaligen Tagebaufläche in der Nähe von Leipzig ans Netz gehen, mit einer installierten Leistung von 650 MW (dpa 10.07.2023). Wenngleich große Solarparks deutlich zur Energiewende beitragen, stellt die eindeutige Sichtbarkeit der Anlagen einen Eingriff in das Landschaftsbild dar. Das kann wiederum die Akzeptanz der lokalen Bevölkerung mindern.

Sozio-ökonomische Herausforderungen von PV-FFA

Durch höhere Energiepreise an der Strombörse werden PV-FFA auch außerhalb der der EEG-Förderkulisse rentabel. Gegebenenfalls dienen diese ungeförderter Anlagen Großinvestor:innen als Kapitalanlagen. Im Falle dieser Bündelung des Kapitals bei einzelnen Akteur:innen entstehen keine wirtschaftlichen Vorteile für die lokale Bevölkerung. Da zumeist landwirtschaftliche Fläche für diese Anlagen genutzt werden, kann es durch diese Landentnahme zu einer Verdrängung von landwirtschaftlicher Nutzung kommen. Diese Dynamik wird durch die ansteigenden Bodenpreise verstärkt: Boden wird zum Spekulationsobjekt und die Wettbewerbsfähigkeit von Kleinbetrieben massiv beeinträchtigt. So zeigt eine Recherche des Correctiv, dass sich die Preise für einen Hektar Ackerland in Brandenburg in dem Zeitraum zwischen 2005 bis 2020 mehr als verdreifacht haben. Zu dieser Entwicklung können PV-FFA beitragen, da hier Flächen gewinnbringender verpachtet werden können, als bei einer rein landwirtschaftlichen Nutzung der Fläche (Keller et al. 13.10.2021).

// **FAZIT** // Vielen der ausgeführten Konfliktebenen kann mit einer stärkeren Fokussierung auf bereits vorbelastete Flächen begegnet werden. Dazu können Flächen zählen, wie Parkplatz-PV, PV-FFA an Seitenrandstreifen, PV-FFA auf baulichen Anlagen, in Industriegebieten sowie auf nicht-naturschutzrelevante Konversionsflächen.

¹² Bei PPA-Anlagen erfolgt der Vertrieb des Stroms über Power-Purchase-Agreements (PPA) oder Direktlieferverträge mit einem Stromabnehmer.

Grundsätzlich zählt dazu auch eine Fokussierung auf Dachanlagen, die ebenfalls zu vorbelasteten Flächen zählen. Auch NABU; BSW Solar (2021) empfehlen eher auf versiegelte, bzw. brachliegende Flächen zu setzen, da so weniger Konfliktpotenzial mit Landwirt:innen besteht.

Finanzielle Partizipation von Bürgerinnen an PV-FFA

Akzeptanz ist für den Ausbau von PV-Freiflächenanlagen entscheidend. Eine wirk-same Methode hierfür ist das finanzielle Profitieren der Bürger:innen an einer PV-FFA. Laut einer Umfrage von Erneuerbare Energien Schleswig-Holstein (2023) unterstützen demgegenüber etwa 50% der Befragten den Bau von EE-Anlagen, wenn der Strombezug von diesen Energieträgern verbilligt wird. Weitere Formen der (finanziellen) Beteiligung von Bürger:innen an PV-FFA sind deren aktive Einbindung in den Planungsprozess sowie eine finanzielle Beteiligung an der Anlage selbst. Akzeptanzumfragen zeigen jedoch, dass die beiden letztgenannten Beteiligungsoptionen nicht in gleichem Maße akzeptanzfördernd sind wie erstere (EE.SH 2023). Allerdings ergab eine Umfrage der Agentur für Erneuerbare Energien (2022) auch, dass fast die Hälfte der Befragten nicht ausreichend über finanzielle Beteiligungsmöglichkeiten informiert ist. 60% der Befragten wünschen sich zudem laut Green Planet Energy (2021) von mehr finanzielle Beteiligungsmöglichkeiten an lokalen PV-Anlagen.

Fokus – Grundlagen & Initiativen zur finanziellen Beteiligung

// In der EU wurde mit der Erneuerbaren-Energien-Richtlinie RED II ein Grundstein für Energy Sharing und die Stärkung von Energiegemeinschaften gelegt. Bürger:innen können dadurch zu Mitbetreiber:innen von Solarparks werden und den vor Ort erzeugten Strom direkt nutzen. Dies ermöglicht auch Personen ohne Eigenheim oder Zugang zu Mieterstrom die Teilhabe an der Energiewende (Klimareporter° 2021). In Deutschland könnten noch weitere Optionen innerhalb der bestehenden gesetzlichen Rahmenbedingungen genutzt werden. Es ist jedoch zu beachten, dass Beteiligungskonzepte wie Energy Sharing sehr komplex sein können und daher ein hoher Förderbedarf entstehen kann (UBA 2023).

// Gemäß §6 des EEG sind Anlagenbetreiber verpflichtet, Gemeinden, die von der Errichtung ihrer Anlage betroffen sind, finanziell zu beteiligen. Betreiber von PV-FFA können den Gemeinden gemäß §6 Abs. 3 EEG einseitige Zuwendungen ohne Gegenleistungen in Höhe von 0,2 ct pro tatsächlich eingespeister kWh anbieten. In der Solarstrategie des BMWK (2023a) wird eine Erweiterung der finanziellen Beteiligung vorgesehen. Neben den klassischen PV-FFA sollen auch die Betreibenden von Anlagen auf sonstigen baulichen Anlagen, von Floating-PV etc. die Kommunen finanziell beteiligen können. Eine konkrete Umsetzung liegt jedoch noch nicht vor.

// Eine weitere Option der Teilhabe an PV-FFA bieten Bürgerenergiegesellschaften. Bürgerenergiegesellschaften sind Zusammenschlüsse von Menschen, die ein Energieprojekt in ihrer Nähe realisieren und sich daran beteiligen möchten. Die Bundesregierung fördert diese Gesellschaften und befreit sie von der Teilnahme an Ausschreibungen für Anlagen mit einer Leistung von bis zu 6 MW (§22 Abs. 3 Nr. 3 EEG 2023). Dieses Konzept soll auch weiterhin gefördert werden, wie in der Solarstrategie des BMWK (2023a) dargelegt. Obwohl dieser partizipative Ansatz nicht explizit aus Akzeptanzumfragen hervorgeht, kann er ein Beitrag zur gesteigerten Akzeptanz in der Bevölkerung sein.

Weiterführende Literatur zum Thema

- Zusammenstellung von Konflikten bei Flächeninanspruchnahme von PV-Freiflächenanlagen:
 - BMVI (2015)
- Ansätze für die landschaftsgerechte Integration von PV-FFA
 - UBA (2022b)
- Weiterführende Literatur zu Bürgerenergiegesellschaften:
 - Gültige Änderungen zu Bürgerenergiegesellschaften durch das EEG 2023 ausgeführt durch Kapellmann Rechtsanwälte (2022)
 - Weitere Maßnahmen zur Förderung von Bürgerenergiegesellschaften im Rahmen der PV-Strategie des BMWK (2023a) in Handlungsfeld 3.6

Produktionskapazitäten von Komponenten für PV-Anlagen

„Auf einen Blick“

- Die Produktionskapazitäten in Deutschland und der EU sind im internationalen Vergleich beschränkt. Die gesamte Produktionskapazität in Deutschland beträgt im Jahr 2021 ca. 60 GW; Prognosen gehen von einer Verdopplung bis 2025 aus.
- Seit den 2010er Jahren hat vermehrt Arbeitsplatz- & Produktionskapazitätsabbau stattgefunden. Es kam zu einer Verlagerung von Kapazitäten nach Asien. Seitdem wird weitgehend aus Asien, v.a. China importiert.
- Die Ressourcenverfügbarkeit ist weltweit begrenzt, vor allem bei Schlüsselrohstoffen wie Silber, Silizium und Indium. Dadurch sind Produktionskapazitäten von PV-Zellen begrenzt. Das Recycling von PV-Modulen und verbauten Materialien wird, trotz seines hohen Potenzials zur Rückgewinnung wertvoller Rohstoffe, bisher nicht ausreichend genutzt.
- Laut der deutschen PV-Solarstrategie gibt es Pläne die Produktionskapazitäten in DE bzw. der EU wieder zu stärken.

Deutschland – Status quo

Deutschland produziert hauptsächlich PV-Module und Wechselrichter, hat aber mit dem *Wacker Konzern* auch eine bedeutende Fertigungsstätte für Polysilizium. Eine entsprechende Karte der Verteilung der Produktionsstandorte in Deutschland und den Nachbarländer ist in Solar Power Europe (2021) dargestellt:

- Produktionsstandorte für Wechselrichter befinden sich überwiegend in Süddeutschland, mit der Ausnahme von Solar Technology AG (SMA) in Hessen. SMA ist auf Platz 5 der weltweit führenden Wechselrichterhersteller (Wood Mackenzie 2022).
- Die Produktion von PV-Modulen findet vor allem in Ostdeutschland statt. Hier liegt auch Deutschlands einzige Produktionsstätte für Solarzellen des Herstellers Meyer-Burger (Fraunhofer ISE 2023b).

Insgesamt lagen die deutschen Produktionskapazitäten im Jahr 2021 bei 59,9 GW. Bis zum Jahr 2025 wird nach Angaben von Solar Power Europe mit einer Verdopplung der Produktionskapazitäten in Deutschland gerechnet (2021).

Deutschland im internationalen Vergleich

Im internationalen Vergleich ist die deutsche PV-Industrie mit den aktuellen Produktionskapazitäten nur bedingt wettbewerbsfähig (BMWK 2023a). Der größte Teil der in Deutschland installierten PV-Produkte wird daher importiert.

Seit den 2010er Jahren sind viele Arbeitsplätze in der PV-Branche verloren gegangen. Die entsprechenden Marktanteile gingen vor allem an den asiatischen Raum. Insbesondere China und andere asiatische Länder schufen in dieser Zeit attraktivere Investitions- und Kreditbedingungen und bauten so immense Produktionskapazitäten auf (Fraunhofer ISE 2023b). Laut Fraunhofer ISE (2023a) lagen in 2021 insgesamt 93% der weltweiten Produktionskapazitäten von Solarmodulen und Wechselrichtern in Asien (siehe **Abbildung 10**).

Im Fokus – PV-Produktion in China

Die Solarindustrie der Volksrepublik China hat in den letzten 20 Jahren einen enormen Aufschwung erlebt. Diese Entwicklung bezieht sich sowohl auf den Ausbau der Produktionskapazitäten, als auch auf deren Installation (NDRC; CNREC; CIFE 2019).

- China hat seit 2011 mehr als 50 Millionen USD in die PV-Wertschöpfungskette investiert. Das übersteigt die europäischen Investitionen um den Faktor 10 (IEA 2022b).
- Im Jahr 2021 fertigte China 75% der global installierten Module. Das entspricht 138 GW_p. Die jährliche Produktion hat sich seit 2010 um das 9,7-fache erhöht (Fraunhofer ISE 2023a).
- Zehn der weltweit führenden Anbieter von PV-Produktionsstätten befinden sich in China (IEA 2022b). Außerdem sind die fünf führenden Hersteller von Wechselrichtern ebenfalls in China ansässig (Statista 2023)¹³.

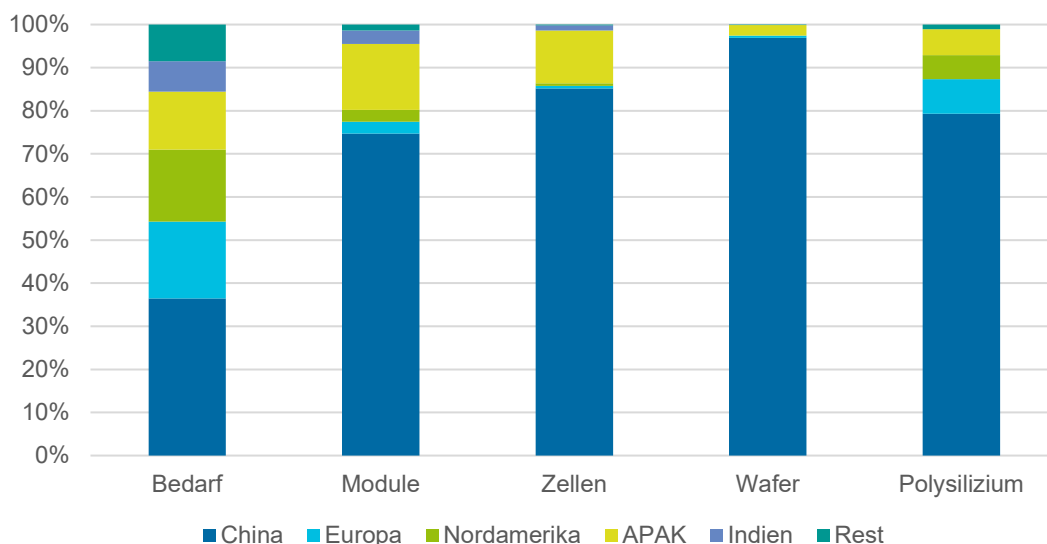


Abbildung 10. PV-Herstellungskapazitäten nach Ländern und Regionen im Jahr 2021. Quelle: IEA 2022a. APAK = Asiatisch-pazifischer Raum ohne Indien und China.

¹³ Marktanteil des weltweiten Wechselrichtermarktes in 2022 basierend auf den Auslieferungen: Huawei (29%), Sungrow Power Supply (23%), Ginlong Solis (8%), Growatt (6%), Goodwe (5%).

Begrenzte Produktionskapazitäten durch Ressourcenverfügbarkeit

Für die Herstellung von PV-Zellen werden Rohstoffe wie Silber, Silizium, Indium oder Kupfer benötigt (IEA 2022c). Die Verfügbarkeit dieser Rohstoffe ist jedoch grundsätzlich begrenzt. So ist nach einer Studie von Zhang et al. (2021) die Herstellungskapazität von Silber-basierten Solarzellen global auf 277-377 GW limitiert. Bei Indium sind die Einschränkungen noch größer: Für Indium-basierte Zellen liegt die ressourcenbegrenzte Herstellungskapazität laut den Wissenschaftler:innen bei 37 GW (Zhang et al. 2021). Auch andere Studien zeigen, dass die aktuell verfügbaren Technologien der PV-Industrie an Ressourcengrenzen stoßen, wenn es darum geht, den zukünftigen Bedarf an Solarenergie weltweit in Terrawatt-Höhe zu decken (Goldschmidt et al. 2021). Jedoch gibt es zu diesen Ressourcenverfügbarkeiten sowie zu Substitutionspotenzialen laut Fraunhofer ISE (2023b) widersprüchliche Aussagen. Diese Ressourcenproblematik können sich jedoch entspannen, indem z.B. weitere technologische Fortschritte erfolgen¹⁴, und/oder der Energiebedarf reduziert wird.

Recycling

Vor dem Hintergrund der Materialknappheit gewinnt das Recycling von PV-Anlagen deutlich an Relevanz. Aktuell haben PV-Module eine Lebensdauer zwischen 20-30 Jahren. Damit ist ein enormer Anteil an Wertstoff im Kreislauf gebunden. Seit 2014 ist die WEEE-Richtlinie (Waste Electrical and Electronic Equipment Directive) in Kraft. Dadurch werden Produzent:innen dazu verpflichtet, elektronische Geräte und Anlagen zurückzunehmen. Das betrifft auch PV-Anlagen, die auf diese Weise wieder in den Wertstoffkreislauf zurückgeführt werden sollen. Laut IRENA (2016) haben die technisch verwertbaren Rohstoffe aus PV-Paneelen bis 2030 einen Wert von bis zu 450 Millionen USD. Bis 2050 könnte dieser Wert auf 15 Milliarden USD steigen. Diese Werte zeigen: Das Recycling von PV-Modulen birgt ein großes Potenzial, Ressourcen (wieder) zu gewinnen, wird aber bisher wenig genutzt (BDEW 2022). Die Recyclingrate für Silber beispielsweise liegt allgemein bei 30-50%. Das Silber aus PV-Paneelen wird aber kaum recycelt. Stattdessen konzentriert sich das Recycling von PV-Modulen derzeit hauptsächlich auf Glas, Kupfer und Aluminium (Graedel et al. 2011, McLellan et al. 2013). Mit einem neuen Verfahren des Fraunhofer CSP ist es jedoch auch möglich, hochwertiges Silizium und größere Mengen Silber in den Wertstoffkreislauf zurückzuführen (2023).

Pläne zu Steigerung der Produktionskapazität

Sowohl in Deutschland als auch vor allem auf EU-Ebene gibt es verschiedene Initiativen, um Produktionskapazitäten zurück in die Region zu holen. Seit Ende 2022 arbeitet beispielsweise die European Solar PV Alliance (ESIA) an Maßnahmen, die den Ausbau der europäischen PV-Produktionskapazitäten entlang der Wertschöpfungskette unterstützen können.

¹⁴ Siehe exemplarisch für möglichen technologischen Fortschritt: PV²⁺ (<https://pv2plus.com/>). Das Unternehmen verwendet Kupfer anstelle von Silber für die Kontakte der Solarzellen, um deren Leistung und Nachhaltigkeit zu verbessern.

Auch das BMWK (2023a) sieht in seiner neu veröffentlichten PV-Strategie Maßnahmen zur Erweiterung der Produktionskapazitäten vor. „Lieferketten sichern und wettbewerbsfähige, europäische Produktion anreizen“ lautet der Titel eines der 11 wichtigsten Handlungsfelder der Strategie. Die vorgestellten Maßnahmen scheinen jedoch vorerst eher auf übergeordneter Ebene anzusetzen: Zum einen ein Stakeholder Dialog, eingerichtet durch das BMWK unterstützt durch die dena, mit dem Ziel, Hemmnisse für einen Produktionshochlauf zu analysieren sowie fördernde Maßnahmen zu erarbeiten. Zum anderen ein Fokus auf die europäische Plattform für Transformati-onstechnologien, die genutzt werden soll, um die Produktionskapazitäten der EU in strategisch wichtigen Bereichen, wie Produktion, Handel, Technologieeinsatz zu fördern (Clean Tech Europe 2023).

Aktuell gibt es in Deutschland Diskussionen, ob ein sogenannter Resilienzbonus eingeführt werden soll. Bei diesem könnten PV-Anlagen mit deutschen oder europäischen Komponenten einen Aufschlag auf den Vergütungssatz erhalten oder in einem gesonderten Ausschreibungssegment antreten (Enkhardt 18.12.2023).

Weiterführende Literatur zum Thema

- Wertschöpfungskette der PV:
 - IEA 2022b
 - Solar Power Europe (2021)

Literaturverzeichnis

- AEE - Agentur für Erneuerbare Energien (2022): Umfrage: Wunsch nach Versorgungssicherheit beflügelt Akzeptanz von Erneuerbaren Energien Agentur für Erneuerbare Energien (Hg.). Online verfügbar unter <https://www.unendlich-viel-energie.de/themen/akzeptanz-erneuerbarer/akzeptanz-umfrage/umfrage-wunsch-nach-versorgungssicherheit-befluegelt-akzeptanz-von-erneuerbaren-energien>, zuletzt aktualisiert am 12.12.2022, zuletzt geprüft am 27.06.2023.
- Battisti, C.; Poeta, G.; Fanelli, G. (2016): Anthropogenic Threads, Chapter 8. In: Battisti, C.; Poeta, G. und Fanelli, G. (Hg.): An Introduction to Disturbance Ecology. A Poad Map for Wildlife Mangement and Conservation: Springer Nature, S. 73–85.
- BauGB (2023): Baugesetzbuch, BauGB, Fassung vom 04.01.2023.
- BBH - Becker Büttner Held (2023): Agri-PV: Schluss mit der Angst vor dem Verlust der EU-Direktzahlungen Becker Büttner Held (Hg.). Online verfügbar unter <https://www.bbh-blog.de/alle-themen/energie/agri-pv-schluss-mit-der-angst-vor-dem-verlust-der-eu-direktzahlungen/>, zuletzt aktualisiert am 06.07.2023, zuletzt geprüft am 09.11.2023.
- BDEW (2022): PV-Anlagen: Im Angesicht der Entsorgungswelle BDEW (Hg.). Online verfügbar unter <https://www.bdew.de/online-magazin-zweitausend50/stoffwechsel/pv-anlagen-im-angesicht-der-entsorgungswelle/>, zuletzt aktualisiert am 04.07.2022, zuletzt geprüft am 13.09.2023.
- BDEW (Hg.) (2023). Flächenkonkurrenzen reduzieren, Synergien nutzen, 12 Impulse, um die Potenziale von Agri-PV und anderen besonderen Solaranlagen zu heben. Positionspapier.
- BfN - Bundesamt für Naturschutz (2023): Häufig gefragt: Auswirkungen von schwimmenden PV-Anlagen auf Natur und Landschaft Bundesamt für Naturschutz (Hg.). Online verfügbar unter <https://www.bfn.de/haeufig-gefragt-auswirkungen-von-schwimmenden-pv-anlagen-auf-natur-und-landschaft>, zuletzt aktualisiert am 24.10.2023, zuletzt geprüft am 11.01.2024.
- BfN - Bundesamt für Naturschutz (Hg.) (2022). Eckpunkte für einen naturverträglichen Ausbau der Solarenergie, Positionspapier. Oktober 2022.
- BMEL - Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2023a): Gemeinsame Agrarpolitik (GAP) - GAP-Strategieplan für die Bundesrepublik Deutschland Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (Hg.). Online verfügbar unter <https://www.bmel.de/DE/themen/landwirtschaft/eu-agrarpolitik-und-foerderung/gap/gap-strategieplan.html>, zuletzt aktualisiert am 14.11.2023, zuletzt geprüft am 05.12.2023.
- BMEL - Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2023b): Solarpaket der Bundesregierung verabschiedet Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (Hg.). Online verfügbar unter <https://www.bmel.de/SharedDocs/Meldungen/DE/Presse/2023/230816-agri-pv.html>, zuletzt aktualisiert am 16.08.2023, zuletzt geprüft am 14.02.2024.
- BMUV - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (Hg.) (2022). Nationale Moorschutzstrategie, zuletzt geprüft am 13.09.2023.

- BMVI - Bundesminister für Verkehr und digitale Infrastruktur (2015): Räumliche differenzierte Flächenpotentiale für erneuerbare Energien in Deutschland, BMVI-Online-Publikation. Nr. 08/2015.
- BMWK - Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2023a): Photovoltaik-Strategie, Handlungsfelder und Maßnahmen für einen beschleunigten Ausbau der Photovoltaik. Stand 05.05.2023.
- BMWK - Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (Hg.) (2023b). Überblickspapier Solarpaket, Berlin, 16.08.2023, zuletzt geprüft am 14.02.2024.
- BMWK (2023c): 1. Sitzung der AG 1 der PKNS - Sicherung der Finanzierung von Erneuerbaren Energien (AG EE). Guidehouse; Consentec; Öko-Institut; Neon Neue Energieökonomik; Fraunhofer ISI; r2b Energy Consulting, 25.04.2023.
- BNatSchG (2022): Gesetz über Naturschutz und Landschaftspflege (Bundesnaturschutzgesetz), BNatSchG, Fassung vom 08.12.2022.
- bne - Bundesverband Neue Energiewirtschaft (2022). Gute Planung von PV-Freiflächenanlagen.
- BNetzA - Bundesnetzagentur (2023a): Aktuelle Einheitenübersicht | Markstammdatenregister (MaStR) Bundesnetzagentur (Hg.). Online verfügbar unter <https://www.marktstammdatenregister.de/MaStR/Einheit/Einheiten/OeffentlicheEinheitenuebersicht>, zuletzt aktualisiert am 07.12.2023, zuletzt geprüft am 07.12.2023.
- BNetzA - Bundesnetzagentur (2023b): Bundesnetzagentur - Ausschreibungen Bundesnetzagentur (Hg.). Online verfügbar unter <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Ausschreibungen/start.html>, zuletzt aktualisiert am 06.12.2023, zuletzt geprüft am 06.12.2023.
- BNetzA - Bundesnetzagentur (2023c): Bundesnetzagentur - Ausschreibungsverfahren Bundesnetzagentur (Hg.). Online verfügbar unter <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Ausschreibungen/Solaranlagen1/Ausschreibungsverfahren/start.html>, zuletzt aktualisiert am 06.12.2023, zuletzt geprüft am 06.12.2023.
- BNetzA - Bundesnetzagentur (Hg.) (2023d). Festlegung des Höchstwerts 2024, AZ 4.08.01.01/1#23, zuletzt geprüft am 18.01.2024.
- Böhm, J. (2023): Vergleich der Flächenenergieerträge verschiedener erneuerbarer Energien auf landwirtschaftlichen Flächen – für Strom, Wärme und Verkehr. In: *Berichte über Landwirtschaft - Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft* 101 (1), S. 1–35. DOI: 10.12767/BUEL.V101I1.462.
- Böhm, J.; Witte, T. d.; Plaas, E. (2022): PV-Freiflächenanlagen, Rahmenbedingungen und Wirtschaftlichkeit. In: *Berichte über Landwirtschaft - Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft* 100 (2).
- bosch & partner; ZSW - Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (Hg.) (2023): Kelm, T.; Jachmann, H. Vorbereitung und Begleitung bei der Erstellung eines Erfahrungsberichts gemäß § 97 Erneuerbare-Energien-Gesetz, Teilvorhaben solare Strahlungsenergie. Stromgestehungskosten von Photovoltaikanlagen des ersten Segments (Freiflächenanlagen), zuletzt geprüft am 13.02.2024.
- Bröer, G. (2023): Moor-PV: viel Potenzial, kaum Praxis. In: *Solarthemen* 569, S. 1–3, zuletzt geprüft am 16.11.2023.

- BSW Solar (Hg.) (2023). Ausschreibungen für Solaranlagen des ersten Segments (PV-FFA), Leitfaden zur Teilnahme am Ausschreibungsverfahren für Photovoltaikanlagen des ersten Segments gemäß EEG 2023. Online verfügbar unter <https://www.bsw-solar-shop.de/produkt/leitfaden-zu-den-ausschreibungen-fuer-solaranlagen-des-ersten-segments-pv-ffa-60538941>, zuletzt geprüft am 05.02.2024.
- Cleantech for Europe (2023): Cleantech for Europe Cleantech for Europe (Hg.). Online verfügbar unter <https://www.cleantechforeurope.com/>, zuletzt aktualisiert am 07.12.2023, zuletzt geprüft am 07.12.2023.
- Clearingstelle | EEG KWKG (2023): Welche Vergütung gibt es für Solaranlagen entlang von Schienenwegen und Autobahnen?, Häufige Rechtsfrage Nr. 239 Clearingstelle | EEG KWKG (Hg.). Online verfügbar unter <https://www.clearingstelle-eeg-kwkg.de/haeufige-rechtsfrage/239>, zuletzt aktualisiert am 05.09.2023, zuletzt geprüft am 08.04.2024.
- Deutscher Bundestag (Hg.) (2022). Gestehungskosten von Strom im Vergleich, Ausarbeitung WD 5-3000-005/22. Wissenschaftliche Dienste.
- Deutscher Naturschutzring; BUND; Deutsche Umwelthilfe; Germanwatch; Greenpeace; NABU; WWF (2022). Solaranlagen: Chance für Naturschutz, Erfordernis für Klimaschutz, Forderungen der Umwelt- und Naturschutzorganisation für einen naturverträglichen Ausbau.
- dpa (10.07.2023): Solarkraftwerk: Energiepark Witznitz geht im Herbst ans Netz. In: *Die ZEIT*, 10.07.2023. Online verfügbar unter https://www.zeit.de/news/2023-07/10/energiepark-witznitz-geht-im-herbst-ans-netz?utm_referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F, zuletzt geprüft am 13.09.2023.
- EE.SH (Hg.) (2023): Clorius, S.; Goldschmidt, T.; Hrach, M. Umfrage zur Akzeptanz erneuerbarer Energien in Schleswig Holstein.
- EEG (2023): Gesetz für den Ausbau Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2023), EEG, Fassung vom 22.05.2023.
- EnBW (2023): Der EnBW-Solarpark in Weesow-Willmersdorf EnBW (Hg.). Online verfügbar unter <https://www.enbw.com/erneuerbare-energien/solarenergie/solar-park-weesow/>, zuletzt aktualisiert am 13.09.2023, zuletzt geprüft am 13.09.2023.
- Energy Brainpool (Hg.) (2022): Huneke, F.; Claußner, M.; Kellermann, C.; Ritter, D.; Haller, M.; Seebach, D. Monitoring der Direktvermarktung: Jahresbericht 2021 & Ausblick 2022, Im Auftrag des BMWi. Energy Brainpool; Öko-Institut. Berlin / Freiburg. Online verfügbar unter https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/Berichte/monitoring-der-direktvermarktung-jahresbericht-2021-und-ausblick-2022.pdf;jsessionid=F95557E995CEC6777D345AEF2D0BBD8E?__blob=publicationFile&v=2, zuletzt geprüft am 04.03.2022.
- Energy Brainpool (Hg.) (2023a): Ritter, D.; Seebach, D.; Haller, M.; Bogner, J.; Claußner, M. Monitoring der Direktvermarktung: Quartalsbericht (06/2023), Im Auftrag des BMWK. Öko-Institut; Energy Brainpool. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/publikation/monitoring-der-direktvermarktung-quartalsbericht-06-2023/>, zuletzt geprüft am 27.02.2024.
- Energy Brainpool (Hg.) (2023b): Ritter, D.; Seebach, D.; Haller, M.; Dünzen, K.; Schwartz, J.; Brinkhaus, M. Monitoring der Direktvermarktung: Quartalsbericht (09/2023), Im Auftrag des BMWK. Öko-Institut; Energy Brainpool. Berlin

- & Freiburg. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/publikation/monitoring-der-direktvermarktung-quartalsbericht-09-2023/>, zuletzt geprüft am 27.02.2024.
- Energy Brainpool (Hg.) (2023c): Ritter, D.; Seebach, D.; Haller, M.; Huneke, F.; Claußner, M.; Bogner, J. Monitoring der Direktvermarktung: Jahresbericht 2022 & Ausblick 2023, Im Auftrag des BMWK. Öko-Institut; Energy Brainpool. Berlin & Freiburg.
- Enkhardt, S. (09.05.2023): ITRPV: Modulpreise sind 2022 um durchschnittlich sieben Prozent gesunken. In: *pV magazine*, 09.05.2023. Online verfügbar unter <https://www.pv-magazine.de/2023/05/09/itrpv-modulpreise-sind-2022-um-durchschnittlich-sieben-prozent-gesunken/>, zuletzt geprüft am 13.12.2023.
- Enkhardt, S. (18.12.2023): Habeck bereitet Pilotausschreibung für Resilienzbonus vor. In: *pV magazine*, 18.12.2023. Online verfügbar unter <https://www.pv-magazine.de/2023/12/18/habeck-bereitet-pilotausschreibung-fuer-resilienzbonus-vor/>, zuletzt geprüft am 14.02.2024.
- Enkhardt, S. (2022): EnSiG-Novelle erlaubt aktives Repowering von Solarparks und Ausschreibungsanlagen bis 100 Megawatt PV Magazine (Hg.). Online verfügbar unter <https://www.pv-magazine.de/2022/09/28/ensig-novelle-erlaubt-aktives-repowering-von-solarparks-und-ausschreibungsanlagen-bis-100-megawatt/>, zuletzt aktualisiert am 28.09.2022, zuletzt geprüft am 27.06.2023.
- Erneuerbare Energien (02.03.2023): PV-Symposium: 59 Gigawatt Solarleistung sind auf Parkplätzen möglich. In: *Erneuerbare Energien*, 02.03.2023. Online verfügbar unter <https://www.erneuerbareenergien.de/technologie/solar/pv-symposium-59-gigawatt-solarleistung-sind-auf-parkplaetzen-moeglich>, zuletzt geprüft am 05.12.2023.
- EULE (2023): EULE - das Prinzip für Anlagenbetreiber EULE (Hg.). Online verfügbar unter <https://eule-energiewende.de/fuer-anlagenbetreiber/>, zuletzt geprüft am 27.06.2023.
- Europäische Kommission (2013): Richtlinie 92/43/EWG.
- Europäischer Rat (2006): Richtlinie 2006/105/EG.
- Fakharizadehshirazi, E.; Rösch, C. (2023): Germany's potential for ground-mounted photovoltaics on nonrestricted suitable agricultural areas and its spatial distribution. preprint - not peer reviewed. In: *SSRN Electronic Journal*, zuletzt geprüft am 14.06.2023.
- Finkler, V. (25.09.2023): Anfeindungen wegen Solar-Acker: Bauer berichtet von Anschlägen. In: *EFAHRER.com*, 25.09.2023. Online verfügbar unter https://efahrer.chip.de/news/anfeindungen-wegen-solar-acker-bauer-berichtet-von-anschlaegen_1014989, zuletzt geprüft am 04.12.2023.
- Florin, N.; Dominish, E. (2017): Sustainability Evaluation of Energy Storage Technologies, Report prepared by the Institute of Sustainable Futures for the Australian Council of Learned Academies.
- FNR - Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (Hg.) (2023). Basisdaten Bioenergie Deutschland 2024, Diagramme. Tabellen. Kennwerte. Online verfügbar unter https://www.fnr.de/fileadmin/Projekte/2023/Mediathek/Broschuere_Basisdaten_Bioenergie_2023_web.pdf.
- Fraunhofer CSP (2023): PV-Recycling & Kristallisation Fraunhofer CSP (Hg.). Online verfügbar unter <https://www.csp.fraunhofer.de/de/kompetenzfelder/pv->

- recycling-kristallisation.html, zuletzt aktualisiert am 13.09.2023, zuletzt geprüft am 13.09.2023.
- Fraunhofer IEE (Hg.) (2023): Pape, C.; Geiger, D. Regionalisierung des Ausbaus der Erneuerbaren Energien, zuletzt geprüft am 14.06.2023.
- Fraunhofer ISE (Hg.) (2021): Kost, C.; Shammugam, S.; Fluri, V.; Memar, A. D.; Schlegl, T. Stromgestehungskosten erneuerbare Energien.
- Fraunhofer ISE (Hg.) (2022). Agri-Photovoltaik: Chance für Landwirtschaft und Energiewende, Ein Leitfaden für Deutschland. Stand April 2022.
- Fraunhofer ISE (Hg.) (2023a). Photovoltaics Report. Unter Mitarbeit von PSE Projects GmbH.
- Fraunhofer ISE (Hg.) (2023b): Wirth, H. Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Online verfügbar unter www.pv-fakten.de, zuletzt geprüft am 01.03.2023.
- Giurco, D.; Dominish, E.; Florin, N.; Watari, T.; McLellan, B. (2019): Requirements for Minerals and Metals for 100% Renewable Scenarios. In: Teske, S. (Hg.): Achieving the Paris Climate Agreement Goals. Global and Regional 100% Renewable Energy Scenarios with Non-energy GHG Pathways for +1.5°C and +2°C. Cham: Springer Nature, S. 437–457.
- Goldschmidt, J. C.; Wagner, L.; Pietzcker, R.; Friedrich, L. (2021): Technological learning for resource efficient terawatt scale photovoltaics. In: *Energy & Environmental Science* 14 (10), S. 5147–5160. DOI: 10.1039/D1EE02497C.
- Graedel, T. E.; Aood, J.; Birat, J.-P.; Buchert, M.; Hagelüken, C.; Reck, B. K.; Sibley, S. F.; Sonnemann, G. (2011): What Do We Know About Metal Recycling Rates? In: *Journal of Industrial Ecology* 15 (3), S. 355–366. DOI: 10.1111/j.1530-9290.2011.00342.x.
- Green Planet Energy (Hg.) (2021). Wie Bürger:innen entscheidend zum Erfolg der Energiewende beitragen können - und was sie dafür von der neuen Bundesregierung erwarten, Den Photovoltaik-Boom entfesseln.
- Greifswald Moor Centrum (Hg.) (2022): Nordt, A.; Abel, S.; Hirschelmann, S.; Lechtape, C.; Neubert, J. Leitfaden für die Umsetzung von Paludikultur (Greifswald Moor Centrum-Schriftenreihe, 05/ 2022).
- Heinrich Böll Stiftung (Hg.) (2023). Mooratlas 2023. Heinrich Böll Stiftung; BUND; Succow Stiftung; Greifswald Moor Centrum.
- IEA - International Energy Agency (2022a): Solar PV manufacturing capacity and production by country and region, 2021-2027 International Energy Agency (Hg.). Online verfügbar unter <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/solar-pv-manufacturing-capacity-and-production-by-country-and-region-2021-2027>, zuletzt aktualisiert am 23.11.2022, zuletzt geprüft am 07.11.2023.
- IEA - International Energy Agency (Hg.) (2022b). Special Report on Solar PV Global Supply Chains.
- IEA - International Energy Agency (Hg.) (2022c). The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions, World Energy Outlook Special Report.
- ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (Hg.) (2022): Fehrenbach, H.; Bürck, S. CO₂-Opportunitätskosten von Biokraftstoffen in Deutschland. Heidelberg, zuletzt geprüft am 08.11.2023.
- IRENA; IEA-PVPS (Hg.) (2016). End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels.

- Jäger, M.; Vaccaro, C.; Boos, J.; Junghardt, J.; Strebel, S.; Anderegg, D.; Rohrer, J.; Schibli, B. (2022): Machbarkeitsstudie Agri-Photovoltaik in der Schweizer Landwirtschaft, zuletzt geprüft am 27.03.2024.
- Kapellmann Rechtsanwälte (2022): Bürgerenergiegesellschaften im EEG 2023 Kapellmann Rechtsanwälte (Hg.). Online verfügbar unter <https://www.kapellmann.de/de/beitraege/buergerenergiegesellschaften-im-eeeg-2023>, zuletzt aktualisiert am 08.07.2022, zuletzt geprüft am 07.12.2023.
- Keller, G.; Daniels, J. von; Huth, K.; Schubert, B.; Donheiser, M.; Sprick, C.; Mayr, I.; Zick, V.; Stahl, S. (13.10.2021): Glühende Landschaft, Darum gefährden Solar-Investoren Natur und Landwirtschaft in Brandenburg. In: *correctiv.org*, 13.10.2021. Online verfügbar unter <https://correctiv.org/aktuelles/klimawandel/2021/10/08/darum-gefaehrden-solar-investoren-natur-und-landwirtschaft-in-brandenburg/>, zuletzt geprüft am 27.06.2023.
- KNE - Kompetenzzentrum Naturschutz und Energiewende (2016): Berücksichtigung des Naturschutzes bei der Planung von PV-Freiflächenanlagen auf Konversionsflächen, Antwort 88 Kompetenzzentrum Naturschutz und Energiewende (Hg.). Online verfügbar unter <https://www.naturschutz-energiewende.de/fragenundantworten/88-beruecksichtigung-naturschutz-pv-freiflaechenanlagen-konversions-flaechen/>, zuletzt aktualisiert am 30.11.2016, zuletzt geprüft am 12.07.2023.
- KNE - Kompetenzzentrum Naturschutz und Energiewende (Hg.) (2022). Photovoltaik auf wiedervernässten Moorböden, Eine neue Flächenkulisse im EEG 2023.
- KNE - Kompetenzzentrum Naturschutz und Energiewende (Hg.) (2023). Photovoltaik-Strategie des BMWK vom 10.03.2023, Stellungnahme des Kompetenzzentrums Naturschutz und Energiewende KNE.
- Leßmann, D. (2023): Neue Herausforderungen durch die Energiewende für den Gewässerschutz in Deutschland, Gewässerthermie und schwimmende Photovoltaik. In: Ergebnisse der Jahrestagung 2022. Deutsche Gesellschaft für Limnologie (DGL) und deutsche und österreichische Sektion der Societas Internationalis Limnologiae (SIL). Konstanz, 19.-23.09.2022. Deutschen Gesellschaft für Limnologie (DGL). Essen: Eigenverlag der DGL, S. 89–94.
- McLellan, B.; Corder, G.; Ali, S. (2013): Sustainability of Rare Earths—An Overview of the State of Knowledge. In: *Minerals* 3 (3), S. 304–317. DOI: 10.3390/min3030304.
- MEID MV - Ministerium für Energie, Infrastruktur und Digitalisierung Mecklenburg-Vorpommern (Hg.) (2021). Pegel & Backhaus: Mehr Photovoltaik wagen!, Kriterien für breitere Nutzung (Pressemitteilung, 122/21).
- MIRIG - Ministerium für Inneres, ländliche Räume, Integration und Gleichstellung Schleswig-Holstein; MELUND - Ministerium für Energie, Landwirtschaft, Umwelt Natur und Digitalisierung Schleswig-Holstein (Hg.) (2021). Grundsätze zur Planung von großflächigen Solarfreiflächenanlagen im Außenbereich, Gemeinsamer Beratungserlass des Ministeriums für Inneres, ländliche Räume, Integration und Gleichstellung und des Ministeriums für Energie, Landwirtschaft, Umwelt Natur und Digitalisierung.
- MOVE ON Energy (2023): Energiepark Witznitz – MOVEON Energy MOVE ON Energy (Hg.). Online verfügbar unter <https://www.moveon-energy.de/energiepark-witznitz/>, zuletzt aktualisiert am 13.09.2023, zuletzt geprüft am 13.09.2023.

- NABU (Hg.) (2021). Der naturverträgliche Ausbau der Photovoltaik, Nutzung von Solarenergie in urbanen und ländlichen Räumen, auf Dächern und in der Fläche. Info | Photovoltaik. Unter Mitarbeit von Mieritz, T.
- NABU (Hg.) (2022). Solarparks naturverträglich ausbauen, Anforderungen des NABU an naturverträgliche Photovoltaik Freiflächenanlagen.
- NABU; BSW Solar (Hg.) (2021). Kriterien für naturverträgliche Photovoltaik-Freiflächenanlagen, Gemeinsames Papier. Stand April 2021.
- NDRC; CNREC; CIFE (Hg.) (2019). China Renewable Energy Outlook, Executive Summary. 2019, zuletzt geprüft am 07.11.2023.
- Netztransparenz.de (2023): Marktwertübersicht Netztransparenz.de (Hg.). Online verfügbar unter <https://www.netztransparenz.de/Erneuerbare-Energien-Gesetz/Marktpremie/Marktwerte>, zuletzt aktualisiert am 01.10.2023, zuletzt geprüft am 22.11.2023.
- NREL (2023): Best Research-Cell Efficiency Chart NREL (Hg.). Online verfügbar unter <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>, zuletzt geprüft am 27.06.2023.
- Öko-Institut (Hg.) (2023): Hennenberg, K.; Böttcher, H. Biomasse und Klimaschutz, Im Rahmen des Vorhabens „Wissenschaftliche Analysen zu aktuellen klimapolitischen Fragen im Bereich der Energieeffizienz insbesondere in den Sektoren Industrie, GHD und Gebäude“ (67KE0064). Berlin, Darmstadt. Online verfügbar unter https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Biomasse-und-Klimaschutz_BMWK.pdf, zuletzt geprüft am 24.11.2023.
- Öko-Institut (Hg.) (2024): Kohler, M.; Wingenbach, M. Potenzialflächen für Agri-Photovoltaik, Eine GIS basierte Potenzialanalyse für Deutschland. Freiburg. Online verfügbar unter <https://zenodo.org/records/10878761>.
- Osusky, L. (05.06.2023): Russlands Angriffskrieg, Indonesien und das Nikeldilemma. In: *Tagesspiegel Background Energie & Klima*, 05.06.2023.
- Preidl, S.; Lange, M.; Doktor, D. (2020): Land cover classification map of Germany's agricultural area based on sentinel-2A data from 2016. In: *Remote Sensing of Environment* 240, S. 111673. DOI: 10.1594/PANGAEA.910837.
- RLI - Reiner Lemoine Institut (2021): Der PV- und Windflächenrechner Reiner Lemoine Institut (Hg.). Online verfügbar unter <https://reiner-lemoine-institut.de/pv-windflaechenrechner/>, zuletzt aktualisiert am 15.10.2021, zuletzt geprüft am 07.12.2023.
- SMC (2023): Nasse Landwirtschaft und Solarzellen im Moor SMC (Hg.). Online verfügbar unter <https://www.sciencemediacenter.de/alle-angebote/rapid-reaction/details/news/nasse-landwirtschaft-und-solarzellen-im-moor/>, zuletzt aktualisiert am 09.01.2023, zuletzt geprüft am 13.09.2023.
- Solar Power Europe (Hg.) (2021). EU Market Outlook for Solar Power, 2021-2025.
- SolarPower Europe; BirdLife International (2022). Solar, Biodiversity, Land Use, Best Practice Guidelines.
- Solarserver (2023): Enormes Potential für Photovoltaik auf Parkplätzen Solarserver (Hg.). Online verfügbar unter <https://www.solarserver.de/2023/04/26/enormes-potential-fuer-photovoltaik-auf-parkplaetzen/>, zuletzt aktualisiert am 26.04.2023, zuletzt geprüft am 05.02.2024.
- SPD; Bündnis 90/Die Grünen; FDP (2021). Mehr Fortschritt wagen, Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit. Koalitionsvertrag 2021 – 2025 zwischen der Sozialdemokratischen Partei Deutschlands (SPD), BÜNDNIS 90 / DIE

- GRÜNEN und den Freien Demokraten (FDP). Online verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/re-source/blob/974430/1990812/1f422c60505b6a88f8f3b3b5b8720bd4/2021-12-10-koav2021-data.pdf?download=1>, zuletzt geprüft am 14.07.2023.
- Statista (2023): PV inverter market share globally by shipments | Statista. Online verfügbar unter <https://www.statista.com/statistics/1003705/global-pv-inverter-market-share-shipments/>, zuletzt aktualisiert am 17.04.2023, zuletzt geprüft am 04.05.2023.
- Stiftung Klimaneutralität (Hg.) (2021). Photovoltaik (PV) - Potenziale, Literatur-recherche. Berlin, zuletzt geprüft am 26.02.2024.
- Thünen-Institut (Hg.) (2022): Böhm, J.; Tietz, A. Abschätzung des zukünftigen Flächenbedarfs von Photovoltaik-Freiflächenanlagen (Thünen Working Paper, 204).
- Trinomics (Hg.) (2020). Final Report Cost of Energy (LCOE, Energy costs, taxes and the impact of governments interventions on investments.
- UBA - Umweltbundesamt (Hg.) (2021): UBA - Umweltbundesamt. Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2021, Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 - 2019 (Climate Change, 43/2021). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/berichterstattung-unter-der-klimarahmenkonvention-6>, zuletzt geprüft am 26.04.2022.
- UBA - Umweltbundesamt (Hg.) (2022a). Anpassung der Flächenkulisse für PV-Freiflächenanlagen im EEG vor dem Hintergrund erhöhter Zubauziele, Notwendigkeit und mögliche Umsetzungsoptionen (Texte | 76/2022).
- UBA - Umweltbundesamt (Hg.) (2022b). Umweltverträgliche Standortsteuerung von Solar-Freiflächenanlagen, Abschlussbericht (Texte | 141/2022).
- UM BW - Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (Hg.) (2019). Freiflächensolaranlagen, Handlungsleitfaden.
- UN (1971): Übereinkommen über Feuchtgebiete von internationaler Bedeutung, insbesondere als Lebensraum für Wasser- und Watvögel. Fundstelle: UN Treaty Series No. 14583. As amended by the Paris Protocol, 3 December 1982, and Regina Amendments, 28 May 1987.
- UVPG (2023): Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung, UVPG.
- WHG (2023): Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz), WHG, Fassung vom 04.01.2023.
- Wood Mackenzie (2022): Global top 10 solar PV inverter vendors account for 82% of market share Wood Mackenzie (Hg.). Online verfügbar unter <https://www.woodmac.com/press-releases/global-top-10-solar-pv-inverter-vendors-account-for-82-of-market-share/>, zuletzt aktualisiert am 08.07.2022, zuletzt geprüft am 04.05.2023.
- Zhang, Y.; Kim, M.; Wang, L.; Verlinden, P.; Hallam, B. (2021): Design considerations for multi-terawatt scale manufacturing of existing and future photovoltaic technologies: challenges and opportunities related to silver, indium and bismuth consumption. In: *Energy & Environmental Science* 14 (11), S. 5587–5610. DOI: 10.1039/D1EE01814K.
- ZHAW Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften; EnergieSchweiz (Hg.) (2021): Schlegel, J. Auswirkung von Freiflächen-Photovoltaikanlagen auf Biodiversität und Umwelt, Literaturstudie.

ZSW - Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg; bosch & partner (Hg.) (2019). Untersuchung zur Wirkung veränderer Flächenrestriktionen für PV-Freiflächenanlagen, Kurzstudie im Auftrag der innogy SE.

ZSW - Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg; bosch & partner (Hg.) (2023): Kelm, T.; Jachmann, H.; Fidaschek, Stefan, Liebhart, Laura; Günnewig, D.; Johannwerner, E. Vorbereitung und Begleitung bei der Erstellung eines Erfahrungsberichts gemäß §97 EEG, Teilvorhaben solare Strahlungsenergie. Zwischenbericht - Juni 2023, zuletzt geprüft am 01.02.2024.