

Abschätzung des zukünftigen Flächenbedarfs von Photovoltaik-Freiflächenanlagen

Jonas Böhm, Andreas Tietz



Thünen Working Paper 204

M. Sc. Jonas Böhm

Thünen-Institut für Betriebswirtschaft

Johann Heinrich von Thünen-Institut

Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei

Bundesallee 63

38116 Braunschweig

Tel.: +49 531 596 5162

E-Mail: jonas.boehm@thuenen.de

Dipl.-Ing. agr. Andreas Tietz

Thünen-Institut für Lebensverhältnisse in ländlichen Räumen

Johann Heinrich von Thünen-Institut

Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei

Bundesallee 64

38116 Braunschweig

Tel.: +49 531 596 5247

E-Mail: andreas.tietz@thuenen.de

Titelfoto: Fly and Dive - stock.adobe.com

Thünen Working Paper 204

Braunschweig/Germany, November 2022

Zusammenfassung

In diesem Working Paper wird eine Abschätzung des möglichen zukünftigen Bedarfs an landwirtschaftlichen Flächen für den Ausbau von Photovoltaik-Freiflächenanlagen in Deutschland erarbeitet. Für die Abschätzung werden aktuelle politische Ziele sowie verschiedene Energieszenarien betrachtet, um den Bedarf an installierter PV-Leistung in einem vollständig transformierten Energiesystem zu ermitteln. Die benötigte PV-Leistung kann auf verschiedenen Flächen (wie z.B. Dachflächen, Agrarflächen) installiert werden. Wie viele der Anlagen auf landwirtschaftlichen Flächen errichtet werden, hängt von vielen Faktoren ab und kann sich zukünftig sehr unterschiedlich entwickeln. Darüber hinaus wird der zukünftige Flächenbedarf von der spezifischen Flächeninanspruchnahme, also wie viel Fläche je installierter Leistung benötigt wird, beeinflusst. Alle drei Einflussgrößen sind mit einer hohen Unsicherheit behaftet.

Als wahrscheinlichste Entwicklung werden das aktuelle politische Ziel von 215 GWp installierter Leistung bis 2030 und von 400 GWp für ein vollständiges transformiertes Energiesystem bis 2040, ein Anteil von 50 % auf landwirtschaftlichen Flächen sowie eine spezifische Flächeninanspruchnahme von 1,4 ha/MWp angenommen. Darauf basierend ergibt sich eine Flächeninanspruchnahme bei einem transformierten Energiesystem (Jahr 2040) von 280.000 ha. Das entspricht einem Anteil an der aktuell landwirtschaftlich genutzten Fläche von 1,7 %. Die Spannweite aller betrachteten Szenarien liegt zwischen 0,3 % und 4 %, was die hohe Unsicherheit der Prognose aufzeigt.

Schlüsselwörter: Erneuerbare Energien, Photovoltaik, Flächeninanspruchnahme, Energiewende, Deutschland

Abstract

In this working paper, an estimation of the possible future demand for agricultural land for the expansion of ground-mounted photovoltaic systems in Germany is developed. For the estimation, current political goals as well as different energy scenarios are considered in order to determine the demand for installed PV capacity in a fully transformed energy system. The required PV power can be installed on different areas (e.g. rooftops, agricultural area). The number of installations on agricultural land depends on many factors and can develop very differently in the future. In addition, the future demand for land is influenced by the specific land use, i.e. how much land is needed per installed capacity. All three factors are subject to a high degree of uncertainty.

The most probable development is assumed to be the current political target of 215 GWp installed capacity by 2030 and for a fully transformed energy system 400 GWp installed capacity by 2040, a share of 50 % on agricultural land and a specific land use of 1.4 ha/MWp. Based on this, the land use for a transformed energy system (year 2040) is 280,000 ha. This corresponds to a share of 1.7 % of the currently agricultural used area. The range of all scenarios considered is between 0.3 % and 4 %, which shows the high uncertainty of the forecast.

Keywords: Renewable energies, photovoltaics, land use, energy transition, Germany

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	i
Abstract	i
1 Einleitung	1
2 Ableitung von Annahmen zur Entwicklung wichtiger Einflussfaktoren für den künftigen Flächenbedarf	1
2.1 Annahmen zum künftigen Bedarf an installierter PV-Leistung	1
2.2 Annahmen zum künftigen Anteil von Freiflächenanlagen an der PV-Leistung	2
2.3 Annahmen zur spezifischen Flächeninanspruchnahme	3
3 Ergebnisse	5
4 Diskussion	5
5 Fazit und Ausblick	7
Literaturverzeichnis	9
Anhang	13

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Spezifische Flächeninanspruchnahme verschiedener Anlagengrößen	4
Tabelle 2:	Flächenbedarf und Flächenanteil unter Berücksichtigung verschiedener Annahmen	5

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Bisher installierte PV-Leistung in Deutschland und Ausbauziele im EEG 2023	2
Abbildung 2:	Historische spezifische Flächeninanspruchnahme im Vergleich	3

1 Einleitung

Der Ausbau von Photovoltaik-(PV)-Anlagen zur solaren Stromerzeugung bekommt im Rahmen der Energiewende gesellschaftlich und politisch eine immer größer werdende Bedeutung. Um die ambitionierten Ausbauziele für eine Transformation des Energiesystems zu erreichen, muss ein starker Zubau an PV-Leistung erfolgen. Dieser Zubau beschränkt sich aus Kostengründen nicht nur auf die Dachflächen, sondern es werden auch Photovoltaikanlagen auf Freiflächen errichtet. Deutschlandweit ist mit Stand 2018 eine Fläche von 25.500 ha mit PV-Freiflächenanlagen bebaut. Darunter befinden sich 17.100 ha vormalig landwirtschaftlich genutzte Flächen. Der Anteil von PV-Freiflächenanlagen an der aktuell landwirtschaftlich genutzten Fläche nimmt mit 0,1 % deutschlandweit einen verhältnismäßig geringen Anteil ein (Böhm et al., 2022a). Trotz dieses vergleichsweise kleinen Anteils rückt die Flächennutzungskonkurrenz zwischen solarer Stromerzeugung mit PV-Freiflächenanlagen und der landwirtschaftlichen Produktion zunehmend in den Fokus.

Die ambitionierten politischen Ausbauziele lassen für die nächsten Jahre einen starken Zuwachs und damit eine zunehmende politische Diskussion um steigende Flächennutzungskonkurrenzen erwarten. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, wie viel landwirtschaftliche Fläche bei einem transformierten Energiesystem für PV-Freiflächenanlagen benötigt wird.

In diesem Thünen Working Paper wird eine Abschätzung des zukünftigen Bedarfs an landwirtschaftlicher Fläche für PV-Freiflächenanlagen vorgenommen. Die zukünftige Flächenbeanspruchung durch PV-Freiflächenanlagen hängt dabei insbesondere von drei Faktoren ab:

- (1) Bedarf an installierter Photovoltaik-Leistung
- (2) Anteil von Freiflächenanlagen an der PV-Leistung
- (3) Spezifische Flächeninanspruchnahme (Fläche je installierter Leistungseinheit).

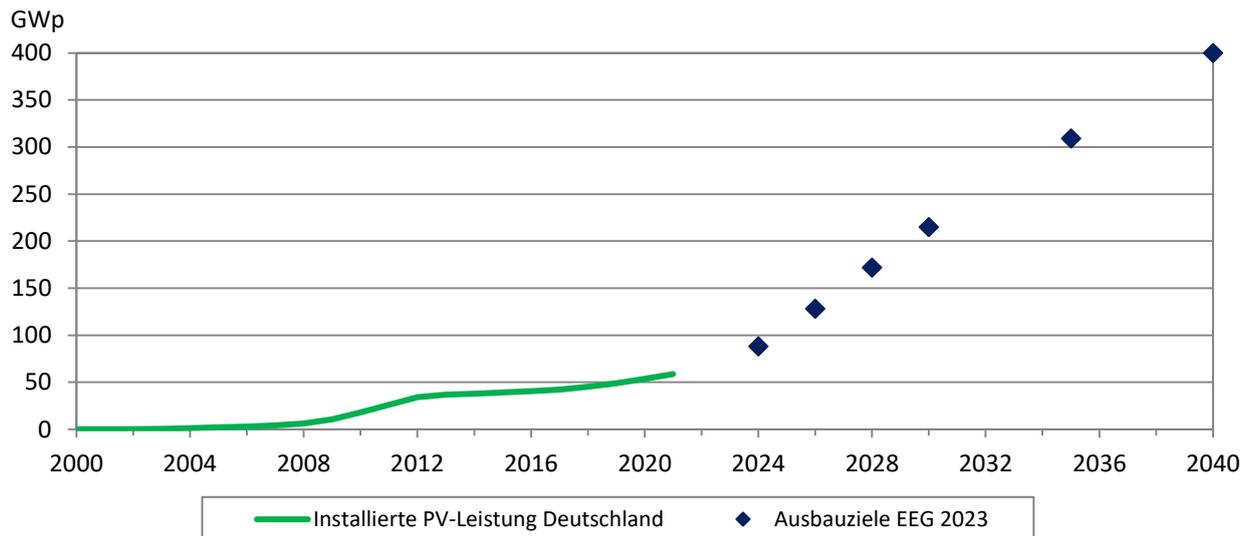
Alle drei Einflussgrößen sind mit einer hohen Unsicherheit behaftet, da sowohl technischer Fortschritt als auch energiepolitische Rahmenbedingungen die Entwicklung und den Bedarf beeinflussen werden. Vor diesem Hintergrund werden zunächst in Kapitel 2 für die einzelnen Einflussfaktoren die künftig zu erwartenden Entwicklungen abgeleitet. Anschließend werden die erwarteten Schwankungsbereiche der einzelnen Einflussfaktoren in Kapitel 3 zusammengefasst und auf dieser Basis Spannweiten zum Flächenbedarf abgeleitet. Die Ergebnisse werden in Kapitel 4 vor dem Hintergrund der aktuellen technischen und politischen Rahmenbedingungen diskutiert. Das Working Paper schließt mit einem zusammenfassenden Fazit und Ausblick.

2 Ableitung von Annahmen zur Entwicklung wichtiger Einflussfaktoren für den künftigen Flächenbedarf

2.1 Annahmen zum künftigen Bedarf an installierter PV-Leistung

Der Bedarf an installierter PV-Leistung in einem transformierten Energiesystem hängt stark von dem Transformationspfad ab. Wie viel Strom zukünftig benötigt wird, ist unter anderem von der Sektorkopplung, also der Verbindung der Sektoren Strom, Verkehr und Wärme, abhängig. Zudem wird der Bedarf an PV-Leistung nicht nur vom Strombedarf determiniert, denn diese kann auch innerhalb eines gewissen Rahmens durch Windkraft substituiert werden. Die Anteile von PV-Leistung und Windkraft können in diesem Rahmen flexibel gestaltet werden. Im EEG 2023 werden Zielwerte für die installierte PV-Leistung von 215 GWp¹ im Jahr 2030 sowie 400 GWp im Jahr 2040 festgelegt (Deutscher Bundestag, 2022). Die bisherige Entwicklung sowie die Ausbauziele im EEG 2023 sind in Abbildung 1 dargestellt, die verdeutlicht, wie ambitioniert die neuen politischen Ziele sind.

¹ Watt peak ist die etablierte Maßeinheit für die Nennleistung von PV-Anlagen und gibt deren Leistung unter Normbedingungen (25°C Zelltemperatur, 1.000 W/m² Strahlung, 90° Einstrahlungswinkel) an (Günnewig et al., 2007).

Abbildung 1: Bisher installierte PV-Leistung in Deutschland und Ausbauziele im EEG 2023

Quellen: Eigene Darstellung nach Deutscher Bundestag (2022) und statista (2022).

Neben politischen Zielgrößen können auch Energieszenarien herangezogen werden, um den künftigen PV-Bedarf zu prognostizieren. Für die Ableitung von Energieszenarien werden unterschiedliche energiewirtschaftliche Modelle eingesetzt, die verschiedene Transformationspfade und Kostenstrukturen berücksichtigen und ein mögliches Energiesystem der Zukunft simulieren. Eine Auswertung der Literatur von 18 aktuellen umfassenden Energieszenarien mit Sektorkopplung ergibt im Mittel einen PV-Leistungsbedarf von 220 GWp (siehe Anhang). Die angegebene benötigte PV-Leistung in den Energieszenarien reicht von 49 bis zu 660 GWp. Auch wenn die Simulationsergebnisse aufgrund unterschiedlicher Annahmen teilweise stark von den genannten Mittelwerten abweichen und auf erhebliche Unsicherheiten hindeuten, ist festzuhalten, dass politische Ausbauziele in etwa den Ergebnissen von Energieszenarien zu künftig transformierten Energie- und Stromsystemen entsprechen. Vor diesem Hintergrund wird für die nachfolgenden Kalkulationen, analog zum politisch vorgezeichneten Ziel, von einem Gesamt-PV-Bedarf zwischen 215 GWp im Jahr 2030 und 400 GWp im Jahr 2040 ausgegangen.

2.2 Annahmen zum künftigen Anteil von Freiflächenanlagen an der PV-Leistung

Der zuvor genannte Leistungsbedarf bezieht sich auf die PV-Gesamtleistung. Diese PV-Leistung kann auf verschiedenen Flächen installiert werden. Insbesondere auf Dach- und Fassadenflächen sowie landwirtschaftlichen Flächen sind zuletzt Anlagen errichtet worden (Böhm et al., 2022a). In der Vergangenheit wurden zudem großflächige Industriebrachen bzw. Konversionsflächen für den Bau von PV-Freiflächenanlagen verwendet. Aktuell liegt der Anteil von PV-Freiflächenanlagen bei knapp 28 % der gesamten installierten PV-Leistung (Kelm et al., 2019).

Die künftige Entwicklung der Flächeninanspruchnahme wird von der politischen Steuerung, der Flächenverfügbarkeit sowie der Wettbewerbsfähigkeit hinsichtlich der Stromgestehungskosten und Einspeisevergütung abhängen. Da die Stromgestehungskosten bei PV-Freiflächenanlagen nur etwa halb so hoch sind wie bei Dachanlagen, sind sie aus ökonomischer Sicht zu bevorzugen (Kost et al., 2021). Die Ausnutzung des Dach- und Fassadenflächenpotenzials wird somit stark von der politischen Förderung abhängen, was eine Projektion erschwert. Vor diesem Hintergrund werden drei Szenarien hinsichtlich des künftigen Anteils von PV-Freiflächenanlagen berücksichtigt:

- (1) 25 % Anteil: Dieses Szenario entspricht einer Fortschreibung des bisherigen Anteils.
- (2) 50 % Anteil: Dieses Szenario basiert auf verschiedenen ökonomisch optimierten Energieszenarien (siehe Anhang) sowie Einschätzungen von Verbänden (BSW, 2022).

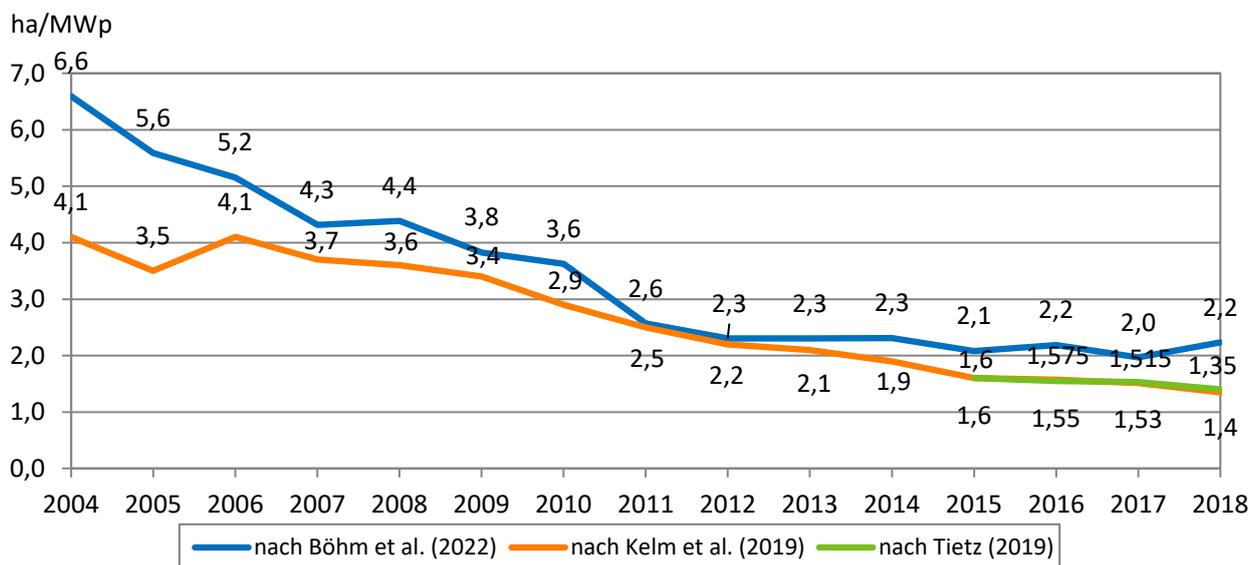
- (3) 75 % Anteil: Diesem Szenario liegt die Annahme zugrunde, dass der künftige Zubau aufgrund der derzeitigen energiewirtschaftlichen Krise stark forciert werden soll. Es ist davon auszugehen, dass ein Zubau auf Freiflächen deutlich schneller realisiert werden kann, da a) größere Anlagen umgesetzt werden können und b) weniger Akteure an der Umsetzung beteiligt sind.

Weiterhin wird angenommen, dass der Ausbau von PV-Freiflächenanlagen auf landwirtschaftlichen Flächen erfolgt, da die verfügbaren Konversionsflächen bereits größtenteils ausgeschöpft oder wirtschaftlich nicht erschließbar sind (Böhm, 2022b; Böhm et al., 2022a). Zudem wird angenommen, dass der restliche Zubau an PV-Leistung auf Dach- und Fassadenflächen oder weiteren flächenneutralen/integrierten Möglichkeiten, z. B. Agri-PV, Floating-PV, Fahrzeugintegrierte-PV, Verkehrswege-PV (über Parkplätzen/Autobahnen) erfolgt (Wirth, 2020). Zur Diskussion um die weiteren technischen Entwicklungen in diesem Bereich siehe Kapitel 4.

2.3 Annahmen zur spezifischen Flächeninanspruchnahme

Die spezifische Flächeninanspruchnahme beschreibt, wie viel Fläche je installierter PV-Leistung benötigt wird. Die Einheit ist dabei ha/MWp. Die spezifische Flächeninanspruchnahme hat somit einen direkten Einfluss auf die benötigte Fläche. Bisherige Arbeiten und eigene Untersuchungen (siehe Abbildung 2) zeigen, dass sich die spezifische Flächeninanspruchnahme über die Jahre hinweg stark verringert hat (Kelm et al., 2019; Tietz, 2019; Böhm et al., 2022a). Wichtige Gründe hierfür sind die technische Weiterentwicklung der Module, steigende Anlagen-Größen und effizientere Aufstelltechniken.

Abbildung 2: Historische spezifische Flächeninanspruchnahme im Vergleich



Anm.: Es werden von Kelm et al. (2019) und Tietz (2019) nur große Anlagen, welche in einer Ausschreibung des EEG teilgenommen haben, berücksichtigt.

Quelle: Eigene Darstellung nach Böhm et al. (2022a), Kelm et al. (2019) und Tietz (2019).

Einen großen Einfluss auf die spezifische Flächeninanspruchnahme hat die Anlagengröße. In Tabelle 1 sind spezifische Flächeninanspruchnahmen für verschiedene Anlagengrößen dargestellt. Die Flächenbedarfe wurden in Experteninterviews mit Projektierer*innen erhoben (Böhm et al., 2022b). Der Unterschied entsteht vor allem durch Skalierungseffekte, wie zum Beispiel Abstand zur Umzäunung. Die Differenz zwischen bisherigen Ergebnissen und Expertenangaben zu neuen Anlagen ist darauf zurückzuführen, dass es einerseits in den letzten Jahren einen technologischen Sprung in der Modulgröße gegeben hat (aktuelle Module sind deutlich größer), andererseits die verfügbare Fläche knapp geworden ist. Somit werden aktuell platzsparende Aufständervarianten gewählt, um die benötigte Fläche und den Pachtkostenanteil möglichst gering zu halten. Die Unterschiede bei

der Anlagengröße zeigen deutlich, dass durch große Anlagen der spezifische Flächenverbrauch reduziert werden kann.

Tabelle 1: Spezifische Flächeninanspruchnahme verschiedener Anlagengrößen

Installierte Leistung	750 kWp	2 MWp	5 MWp	20 MWp	100 MWp
Spezifische Flächeninanspruchnahme [ha/MWp]	2	1,3	1,2	1	0,9

Anm.: Spezifische Flächeninanspruchnahme inklusive Ausgleichsflächen innerhalb der Anlage.

Quelle: Böhm et al. (2022b).

Vor dem Hintergrund der bisherigen Entwicklung werden drei Szenarien hinsichtlich des spezifischen Flächenbedarfs unterschieden:

- (1) 2,2 ha/MWp dient zur Fortschreibung der bisherigen spezifischen Flächeninanspruchnahme im Jahr 2018 über alle Anlagengrößen hinweg. Grundlage der Annahme sind die Ergebnisse von Böhm et al. (2022a), wobei das Basis-DLM² und das Marktstammdatenregister (MaStR)³ kombiniert betrachtet werden. Dieses Szenario ist für die Zukunft jedoch als sehr konservativ zu sehen und unterstellt, dass eher kleinere Anlagen realisiert werden (< 2 MWp).
- (2) 1,4 ha/MWp als Fortschreibung der spezifischen Flächeninanspruchnahme nach Kelm et al. (2019) und Tietz (2019) für das Jahr 2018. Dieses Szenario ist am wahrscheinlichsten, wenn künftig Anlagen verschiedener Anlagengrößen gebaut werden.
- (3) 1 ha/MWp zur Abbildung des technischen Fortschritts und der Annahme, dass künftig vermehrt Anlagen in der Größenordnung von 10 bis 20 MWp umgesetzt werden. Es ist somit eher als optimistisches Szenario einzustufen.

Ergänzend ist zu berücksichtigen, dass unterschiedliche Aufständervarianten ebenfalls den spezifischen Flächenbedarf beeinflussen und eine reine Fokussierung auf die herkömmliche Aufständervariante zu kurz greifen kann. Beispielsweise geben Cossu et al. (2021) für eine große Anlage bei einer herkömmlichen Aufständervariante einen Flächenbedarf von 1 ha/MWp an. Dieser steigt bei Tracking-Systemen auf 1,2 ha/MWp an und sinkt bei Giebel/Dach-Strukturen auf 0,6 ha/MWp. Allerdings generieren die Tracking-Systeme bei gleicher Leistung einen um 10 - 20 % höheren Stromertrag. Andere Prognosen des zukünftigen Flächenbedarfs für PV-Freiflächenanlagen gehen von 1,05 ha/MWp bzw. 0,7 ha/MWp in 2030 aus (Günnewig et al., 2022). Diesen Prognosen entgegen steht der zunehmende Trend, Naturschutzmaßnahmen innerhalb der PV-Anlage umzusetzen, was größere Reihenabstände und somit eine höhere spezifische Flächeninanspruchnahme bedeutet (bne, 2020). Die in Szenario (3) angedeutete weitere Senkung der spezifischen Flächeninanspruchnahme im Mittel über alle Anlagengrößen hinweg wird somit als sehr optimistisch angesehen.

Weiterhin hat auch das PV-Konzept starke Auswirkungen auf die spezifische Flächeninanspruchnahme. So werden beispielsweise in gezielt angelegten Biodiversitätssolarparks die Abstände zwischen den Modulen zur Biodiversitätsförderung vergrößert. Das ist zwar förderlich für die Biodiversität, erhöht aber die spezifische Flächeninanspruchnahme. Weitere Beispiele sind verschiedene Agri-PV-Konzepte, bei denen die Fläche sowohl für die solare Stromerzeugung als auch landwirtschaftlich genutzt wird. Bezogen auf die Anlagenfläche (die im Landschaftsbild betroffene Fläche) schwankt der Flächenbedarf der verschiedenen Agri-PV-Konzepte im Ackerbau zwischen 1,9 und 3,3 ha/MWp. Bezogen auf den Verlust an landwirtschaftlich nutzbarer Fläche haben sie hingegen nur eine spezifische Flächeninanspruchnahme von 0,15 bis 0,33 ha/MWp (Böhm, 2022a).

² Das Basis-DLM ist das digitale Landschaftsmodell von Deutschland, in dem die tatsächliche Flächennutzung auf Grundlage von Katasterdaten in Verbindung u. a. mit Luftbilddatenauswertung kartiert wird.

³ Ein seit 2021 verpflichtendes Register für alle stromerzeugenden Anlagen in Deutschland.

3 Ergebnisse

Die in den vorherigen Abschnitten abgeleiteten Annahmen zur künftigen Entwicklung für die Einflussgrößen – a) künftiger PV-Leistungsbedarf, b) Anteil Freiflächenanlagen sowie c) spezifischer Flächenbedarf – werden in der Tabelle 2 kombiniert und der jeweils daraus resultierende Flächenbedarf dargestellt. Dabei werden jeweils der absolute Flächenbedarf sowie der Anteil an der aktuellen landwirtschaftlich genutzten Fläche⁴ angegeben. Die Spannweite reicht von 0,3 - 4,0 %, wobei die Extremwerte als eher unwahrscheinlich einzustufen sind. Aufgrund der aktuellen Rahmenbedingungen erscheinen die Annahmen am wahrscheinlichsten, dass künftig 50 % des PV-Bedarfs durch Freiflächenanlagen gedeckt wird und die mittlere spezifische Flächeninanspruchnahme in der Größenordnung von 1,4 ha/MWp liegt. Es ergibt sich bei einem Ausbauziel von 215 GWp, was laut Energieszenarien eine realistische Annahme und bis 2030 als politisches Ziel ausgewiesen ist, ein Flächenbedarf von insgesamt 150.500 ha (inkl. dem aktuellen Bestand) bzw. 0,9 % der aktuell landwirtschaftlich genutzten Fläche. Für das Ausbauziel von 400 GWp bis zum Jahr 2040 besteht ein Flächenbedarf von 280.000 ha bzw. 1,7 %. Wie bereits beschrieben, beruhen diese Abschätzungen aber auf hohen Unsicherheiten und geben nur einen Anhaltspunkt für die tatsächliche Entwicklung.

Tabelle 2: Flächenbedarf und Flächenanteil unter Berücksichtigung verschiedener Annahmen

	25 %-Anteil			50 %-Anteil			75 %-Anteil		
Spezifische Flächeninanspruchnahme [ha/MWp]	2,2	1,4	1	2,2	1,4	1	2,2	1,4	1
215 GWp (2030)									
Flächenbedarf [ha]	120.547	75.250	53.750	241.095	150.500	107.500	361.642	225.750	161.250
Anteil FFA an LF app.	0,7 %	0,5 %	0,3 %	1,4 %	0,9 %	0,6 %	2,2 %	1,4 %	1,0 %
400 GWp (2040)									
Flächenbedarf [ha]	224.274	140.000	100.000	448.549	280.000	200.000	672.823	420.000	300.000
Anteil FFA an LF app.	1,3 %	0,8 %	0,6 %	2,7 %	1,7 %	1,2 %	4,0 %	2,5 %	1,8 %

Anm.: FFA = PV-Freiflächenanlagen, Fett = wahrscheinlichste Szenarien.

Quelle: Eigene Berechnungen.

4 Diskussion

Anhand der Ergebnisse wird deutlich, dass selbst bei einem sehr forcierten Ausbau und unter pessimistischen Annahmen der Flächenbedarf auf weniger als 4 % der aktuell landwirtschaftlich genutzten Fläche beschränkt bleibt. Verglichen mit der Biogaserzeugung durch Energiepflanzen, deren Anbau aktuell 9,4 % der Fläche einnimmt, ist der benötigte Flächenanteil verhältnismäßig gering (BMEL, 2022a, 2022b). Da PV-Freiflächenanlagen auf die Fläche bezogen deutlich effektiver Strom erzeugen können (29- bis 76-mal mehr)⁵, kann durch eine Substitution der Energieerzeugung von Biogasanlagen durch PV-Freiflächenanlagen perspektivisch deutlich mehr landwirtschaftliche Fläche für die Nahrungsmittelproduktion verwendet werden.

Eine Option, den weiteren Flächenentzug für die Nahrungsmittelerzeugung zu begrenzen, könnte darin liegen, die PV-Freiflächenanlagen als Stilllegungsoptionen im Rahmen der flächenbezogenen Agrarförderung anzuerkennen. Hier wird künftig im Rahmen der Konditionalität ein Mindestanteil von 4 % angestrebt. Von verschiedener

⁴ Als insgesamt verfügbare landwirtschaftlich genutzte Fläche wird von 16,6 Mio. ha ausgegangen, dies ist die aktuell von Landwirten genutzte Fläche (LF) laut Agrarstatistik (BMEL, 2022b).

⁵ Eigene Berechnungen nach Böhm et al. (2022b) und Wissenschaftlicher Beirat Agrarpolitik (2007).

Seite wird in diesem Zusammenhang gefordert, dass als Voraussetzung für die Anerkennung eine gezielte Förderung der Biodiversität innerhalb der PV-Freiflächenanlagen erfolgen sollte (bne, 2021; KNE, 2022).

In der Diskussion zu beachten ist zudem, dass bis 2030 der Flächenverbrauch für Siedlungs- und Verkehrsfläche auf weniger als 30 ha pro Tag gesenkt werden soll (UBA, 2021). PV-Freiflächenanlagen werden trotz deren geringer Flächenversiegelung von 0,5 - 1 % (UM-BW, 2018) aktuell statistisch als Industriefläche erfasst und somit zur Siedlungs- und Verkehrsfläche gezählt. Bis 2040 entspricht der zusätzliche Flächenbedarf (Anstieg von 25.500 auf 280.000 ha) einem täglichen Flächenbedarf von 32 ha/Tag, sodass das politische Ziel einer deutlichen Verringerung des Flächenverbrauchs für Siedlungs- und Verkehrsfläche alleine durch den beschriebenen Ausbau überstiegen wird. Die statistische Erfassung von PV-Freiflächenanlagen als Industriefläche sollte allerdings überdacht werden, zumal PV-Freiflächenanlagen sehr geringe Flächenversiegelungen aufweisen und vergleichsweise einfach zurückgebaut werden können.

Die dargestellten Ergebnisse berücksichtigen zudem nicht, dass in den meisten Gemeinden Ausgleichsflächen für die Errichtung von PV-Freiflächenanlagen benötigt werden. Aufgrund der unzureichenden Datengrundlage ist keine einheitliche Abschätzung des Bedarfs an Ausgleichsfläche möglich (Tietz et al., 2012). Je nach Gemeinde und Projekt kann sich der Bedarf stark unterscheiden. Der deutschlandweite zukünftige Flächenbedarf inklusive Ausgleichsflächen hängt somit davon ab, wo die Anlagen tatsächlich errichtet werden und inwieweit künftig von der Option, Maßnahmen zur Erhöhung der Biodiversität innerhalb der Anlagen zu realisieren, Gebrauch gemacht wird.

Ein steigender Bedarf an Fläche für PV-Freiflächenanlagen, aber auch an Ausgleichsflächen, kann Einfluss auf den Bodenmarkt haben. Insbesondere die zum Teil sehr gute Wirtschaftlichkeit von PV-Freiflächenanlagen und die daraus resultierende hohe Zahlungsbereitschaft für die Fläche ist dabei von Bedeutung. So sind nach Böhm et al. (2022b) bei großen Anlagen Grundrenten⁶ von 10 bis 19 Tsd. €/ha/Jahr möglich. Ackerbaubetriebe haben im Durchschnitt der letzten Jahre Grundrenten von 270 €/ha/Jahr erwirtschaftet (Hansen et al., 2021). Dieser Vergleich offenbart eine erheblich höhere Rentabilität von PV-Freiflächenanlagen. Deutlich wird dies vor allem an der aktuellen Pachtgebote von über 2.500 €/ha/Jahr, welche für PV-Freiflächenanlagen gezahlt werden (Böhm et al., 2022b). Der Vergleich mit der deutschlandweiten durchschnittlichen Pacht von 274€/ha/Jahr zeigt, dass die Verpächter*innen große monetäre Anreize haben, die Fläche für eine PV-Freiflächenanlage zu verpachten. Da unsere Untersuchungsergebnisse aber zeigen, dass zur Erreichung der Ausbauziele nur auf 1,7 % der Fläche überhaupt PV-Freiflächenanlagen errichtet würden, ist zu erwarten, dass es nur zu regional begrenzten Konkurrenzsituationen kommen wird. Eine ähnliche Situation konnte in der Vergangenheit bei großen Baugebieten beobachtet werden.

Je nach betrachteter Region lassen sich neben den benannten Auswirkungen auf den Bodenmarkt auch weitere agrarstrukturelle Unterschiede ableiten. Aufgrund der guten Sonneneinstrahlung im Süden Deutschlands ist dort der wirtschaftliche Anreiz größer, PV-Freiflächenanlagen zu errichten (Böhm et al., 2022b). Da die landwirtschaftlichen Betriebsstrukturen im Süden deutlich kleiner sind, kann es bei Verlust von Pachtflächen durch den Bau einer größeren PV-Freiflächenanlage sogar zur Existenzgefährdung einzelner Betriebe kommen. Die kleinflächige Eigentümer- und Betriebsstruktur in Süddeutschland ist allerdings ein Hemmnis auf dem Weg zur Realisierung größerer Anlagen mit höherer Flächeneffizienz. In Ostdeutschland mit überwiegend sehr großen Betrieben wird die Beteiligung an dem Bau einer PV-Freiflächenanlage eher als Diversifizierungsmöglichkeit zur Einkommensstabilisierung wahrgenommen und nicht als Existenzgefährdung.

Der Bau einer PV-Freiflächenanlage kann auch zur Unterstützung weiterer Klimaschutzziele eingesetzt werden. So können PV-Freiflächenanlagen bei der Wiedervernässung von Mooren als wirtschaftliche Flächennutzungsoption betrachtet werden. Der Gesetzgeber hat diese Möglichkeit aufgegriffen und fördert mit dem EEG 2023 gezielt „Moor-PV“ (Deutscher Bundestag, 2022). Mit Blick auf die ehrgeizigen Ziele von Bund und Ländern zur Moor-

⁶ Maximale Zahlungsbereitschaft für den Faktor Boden nach Abzug aller anderen Kosten inkl. kalkulatorischer Entlohnung der Faktoren Arbeit und Kapital

Wiedervernässung, die sich auf eine spezifische Gebietskulisse konzentrieren, kann die Kombination von Moor-schutz und Photovoltaik als Beitrag gesehen werden, um die Existenz von landwirtschaftlichen Betrieben in die-sen Kulissen zu sichern (BMEL, 2021).

Ebenfalls neu gefördert werden Agri-PV, Floating-PV und Parkplatz-PV. Eine zukünftig großflächige Umsetzung dieser kombinierten Anlagenkonzepte könnte den zukünftigen Bedarf an landwirtschaftlicher Nutzfläche für die PV-Stromerzeugung deutlich senken. Aufgrund der höheren Stromgestehungskosten (diese Anlagen sind teurer als PV-Freiflächenanlagen) haben sich diese Konzepte marktgetrieben bisher nicht durchgesetzt. Insbesondere im Bereich Agri-PV besteht noch großer Forschungsbedarf, um die Wechselwirkungen mit der landwirtschaftli-chen Produktion zu verstehen und zu optimieren. Ein weiteres Hemmnis dieser flächensparenden PV-Konzepte sind fehlende rechtliche Rahmenbedingungen (z.B. korrekte statistische Flächenerfassung der Doppelnutzung). Zudem gibt es aktuell noch keine Norm, welche eine klare und eindeutige Abgrenzung der Agri-PV von herkömm-lichen PV-Freiflächenanlagen ohne Doppelnutzung mit intensiver landwirtschaftlicher Nutzung ermöglicht.

Die Diskussion zeigt auf, dass die tatsächliche zukünftige Flächenbeanspruchung von zahlreichen – auch politi-schen – Rahmenbedingungen abhängt. Prognosen von Günnewig et al. (2022) zufolge werden bis 2030 lediglich 107.000 ha für PV-Freiflächenanlagen benötigt. In dieser Studie wird infolge des technischen Fortschritts zukünf-tig von einer niedrigeren spezifischen Flächeninanspruchnahme ausgegangen. Der mögliche technische Fort-schritt erschwert somit eine genaue Prognose.

5 Fazit und Ausblick

Um die ambitionierten aktuellen Ausbauziele der Bundesregierung zu erreichen, bedarf es eines starken Zubaus an PV-Leistung in den nächsten Jahren. Dieser Zubau wird aufgrund von stark begrenzten Installationskapazitäten nicht nur auf Dachflächen erfolgen können. Die gute Skalierbarkeit der Installationskapazitäten von PV-Freiflächenanlagen kann somit zunehmend an Bedeutung gewinnen.

Wie hoch der zukünftige Flächenbedarf von PV-Freiflächenanlagen ist, hängt von drei Faktoren ab: (a) der tat-sächlich benötigten PV-Leistung, (b) dem Anteil, der auf der Freifläche errichtet wird sowie (c) vom spezifischen Flächenbedarf. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Prognosen aller drei Variablen mit hohen Unsi-cherheiten behaftet sind. Somit schwankt die Abschätzung des Flächenbedarfs bei einem transformierten Ener-giesystem zwischen 0,3 % und 4 % der aktuell landwirtschaftlich bewirtschafteten Fläche. Am wahrscheinlichsten wird ein Flächenbedarf von 150.500 ha (0,9 %) bis zum Jahr 2030 sowie 280.000 ha (1,7 %) bis 2040 angesehen. Das entspricht einem Bedarf von ca. 32 ha/Tag bis 2040. Es handelt sich somit um eine durchaus relevante Um-widmung von landwirtschaftlicher Fläche, insbesondere wenn berücksichtigt wird, dass auch andere Nutzungsmöglichkeiten, wie Industrie- oder Verkehrsflächen ebenfalls landwirtschaftliche Fläche entziehen werden.

Ein stärkerer Bau von PV-Freiflächenanlagen geht mit einer stärkeren Nachfrage nach landwirtschaftlicher Fläche einher und wird c.p. nicht ohne Einfluss auf den Bodenmarkt bleiben. Vor allem aufgrund der hohen Pachtzah-lungsbereitschaft ist dies zu erwarten. Da PV-Freiflächenanlagen nicht überall errichtet werden können, sind re-gionale Unterschiede bei den Pachtmarktwirkungen absehbar. Im Hinblick auf die Konkurrenzsituation zur Nah-rungsmittelerzeugung sind PV-Freiflächenanlagen aufgrund der 29 – 76-fach höheren Flächenenergieerträge deutlich der Energieerzeugung mit Biogas (Fläche zur Biogaserzeugung derzeit 9,4 %) überlegen. Bei Verwendung von Batteriespeichern zum Ausgleich der einstrahlungsbedingten Leistungsschwankungen könnten PV-Freiflächenanlagen eine vergleichbare Flexibilität wie bei der Verstromung von Biogas erreichen und damit den Anbau von Energiepflanzen substituieren. Sollte dies realisiert werden, dann würde mehr Fläche für die Nah-rungsmittelproduktion zur Verfügung stehen. Es gibt eine Reihe von PV-Konzepten (wie z. B. Agri-PV), die mit weniger Verlust an landwirtschaftlicher Fläche einhergehen. Diese sind aber mit höheren Kosten verbunden.

Aufgrund der sehr guten Wirtschaftlichkeit von PV-Freiflächenanlagen gibt es aktuell sehr viele Anfragen bei den Gemeinden für Flächennutzungsänderungen für PV-Flächen. Aufgrund der Fülle der Anfragen dauern die Geneh-migungsverfahren aktuell meist sehr lange. Das hemmt den Ausbau und verhindert damit die

gesamtgesellschaftliche Zielerreichung. Des Weiteren hemmen verschiedene rechtliche Rahmenbedingungen, wie das im EEG festgelegte Verbot des Eigenverbrauchs bei manchen Anlagen, die sinnvolle Integration und Realisation von PV-Freiflächenanlagen.

Eine Möglichkeit, um einen unkontrollierten Zubau und eine Überforderung der örtlichen Gemeinden zu verhindern, besteht in der Steuerung der regionalen Verteilung (z.B. max. Flächenanteil von PV-Freiflächenanlagen in Höhe von X %). Es könnten politische Richtlinien erarbeitet werden, welche klare Vorgaben zur Genehmigungsfähigkeit von PV-Freiflächenanlagen im Bebauungsplan machen. Beispielsweise könnten die Gemeinden generell angewiesen werden, einen Zielwert der erzeugten PV-Strommenge pro Jahr zu erreichen und die dafür benötigte Fläche auszuweisen. Dabei sollten der regionale Strombedarf sowie die Aufnahmefähigkeit der Netzinfrastruktur und Naturschutzaspekte berücksichtigt werden, um den Zubau in Richtung eines effizienten Einsatzes von Photovoltaik zu steuern. Dies dürfte im Ergebnis dazu führen, dass regional unterschiedlich große Flächenanteile für PV-Freiflächenanlagen vorgesehen werden sollten.

Aus gesamtgesellschaftlicher Sicht wäre es begrüßenswert, wenn eine Biodiversitätsförderung innerhalb der PV-Freiflächenanlage möglich wäre. Erfolgt eine gezielte Planung und Umsetzung von PV-Freiflächenanlagen, dann könnten die umgewidmeten Flächen nicht nur dem Klimaschutz, sondern auch dem Natur- und Umweltschutz dienen.

Literaturverzeichnis

- 50Hertz Transmission, Aprion, TenneT TSO, TransnetBW (2022) Szenariorahmen zum Netzentwicklungsplan Strom 2037 mit Ausblick 2045, Version 2023: Entwurf der Übertragungsnetzbetreiber, 125 p, zu finden in <https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/paragraphs-files/Szenariorahmenentwurf_NEP2037_2023.pdf> [zitiert am 18.1.2022]
- BBH [Becker Büttner Held], LBST [Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH], Fraunhofer ISE [Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE], IKEM [Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität e.V.] (2018) Integriertes Energiekonzept 2050: Rechtliche Rahmenbedingungen für ein integriertes Energiekonzept 2050 und die Einbindung von EE-Kraftstoffen, 43 p, zu finden in <<https://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/iek-integriertes-energiekonzept-strom-waerme-verkehr-industrie.html>> [zitiert am 19.10.2020]
- BMEL [Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft] (2021) Bund-Länder-Zielvereinbarung zum Klimaschutz durch Moorbodenschutz, 13 p, zu finden in <https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/_Landwirtschaft/Klimaschutz/moorbodenschutz-blzv.html> [zitiert am 4.10.2022]
- BMEL [Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft] (2022a) Bodennutzung und pflanzliche Erzeugung: Anbau nachwachsender Rohstoffe und Energiepflanzen, zu finden in <<https://www.bmel-statistik.de/landwirtschaft/ernte-und-qualitaet/bodennutzung>> [zitiert am 25.3.2022]
- BMEL [Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft] (2022b) Bodennutzung und pflanzliche Erzeugung: Landwirtschaftlich genutzte Fläche nach Kulturarten, zu finden in <<https://www.bmel-statistik.de/landwirtschaft/ernte-und-qualitaet/bodennutzung>> [zitiert am 25.3.2022]
- bne [Bundesverband Neue Energiewirtschaft e.V.] (2020) Gute Planung von PV-Freilandanlagen: Wie sich Energiewende, Umwelt- und Naturschutz vereinen lassen, 8 p, zu finden in <<https://www.bne-online.de/de/verband/gute-planung-pv/>> [zitiert am 22.6.2022]
- bne [Bundesverband Neue Energiewirtschaft e.V.] (2021) Biodiversität in Solarparks. GEO-Tag der Natur 2021, 6 p, zu finden in <https://www.bne-online.de/fileadmin/bne/Bildergalerien/Geo-Tag_der_Natur/21-10-18_bne_GEO_Tag_der_Natur_-_Solarparks_Auswertung.pdf> [zitiert am 27.10.2021]
- Böhm J (2022a) Die Konflikte entschärfen. DLG-Mitteilung 4:14-17
- Böhm J (2022b) Nach dem Mais nun die Solaranlagen? DLG-Mitteilung 2:80-81
- Böhm J, Witte T de, Michaud C (2022a) Land use Prior to Installation of Ground-mounted Photovoltaic in Germany—GIS-analysis Based on MaStR and Basis-DLM. Z Energiewirtsch 46(2):147-156. doi: 10.1007/s12398-022-00325-4
- Böhm J, Witte T de, Plaas E (2022b) PV-Freiflächenanlagen: Rahmenbedingungen und Wirtschaftlichkeit. Berichte über Landwirtschaft - Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft, Aktuelle Beiträge. doi: 10.12767/BUEL.V100I2.421
- Brandes J, Haun M, Wrede D, Jürgens P, Kost C, Henning H-M (2021) Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem: Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen. Update November 2021: Klimaneutralität 2045, hg. v. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (Fraunhofer ISE), 47 p, zu finden in <<https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Fraunhofer-ISE-Studie-Wege-zu-einem-klimaneutralen-Energiesystem-Update-Klimaneutralitaet-2045.pdf>> [zitiert am 16.11.2021]
- BSW [Bundesverband Solarwirtschaft] (2022) Vorschlag für Solarpark-Standorte ausbaufähig. Pressemitteilung, 2 p, zu finden in <https://www.solarwirtschaft.de/datawall/uploads/2022/02/bsw_pm_solarstandorte_ausbaufaehig.pdf> [zitiert am 14.3.2022]

- Cossu S, Baccoli R, Ghiani E (2021) Utility Scale Ground Mounted Photovoltaic Plants with Gable Structure and Inverter Oversizing for Land-Use Optimization. *Energies* 14(11):3084. doi: 10.3390/en14113084
- dena [Deutsche Energie-Agentur] (2021) dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität: Eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe. Abschlussbericht, 306 p, zu finden in <https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/Abschlussbericht_dena-Leitstudie_Aufbruch_Klimaneutralitaet.pdf> [zitiert am 8.11.2021]
- dena [Deutsche Energie-Agentur], ewi Energy Research & Scenarios (2018) dena-Leitstudie Integrierte Energiewende: Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050, 510 p, zu finden in <https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9261_dena-Leitstudie_Integrierte_Energiewende_lang.pdf>
- Deutscher Bundestag (2022) EEG 2023: Entwurf eines Gesetzes zu Sofortmaßnahmen für einen beschleunigten Ausbau der erneuerbaren Energien und weiteren Maßnahmen im Stromsektor. Beschlossen und Veröffentlicht am 02.05.2022, 322 p, zu finden in <<https://dserver.bundestag.de/btd/20/016/2001630.pdf>>
- Fraunhofer ISI [Fraunhofer-Institut für System und Innovationsforschung ISI], Consentec GmbH, ifeu (2017) Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland: Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 379 p. Projekte „Langfrist- und Klimaszenarien“: Übergreifende Einordnung, zu finden in <<https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/langfrist-und-klimaszenarien.html>> [zitiert am 9.8.2021]
- Fraunhofer ISI [Fraunhofer-Institut für System und Innovationsforschung ISI], Consentec GmbH, ifeu, TU Berlin (2021) Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland: Treibhausgasneutrale Hauptszenarien, hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 48 p, zu finden in <<https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/dokumente/>> [zitiert am 21.1.2022]
- Fraunhofer IWES [Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme IWES], Fraunhofer IBP [Fraunhofer-Institut für Bauphysik], IFEU [Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg], Stiftung Umweltenergierecht (2015) Interaktion EE-Strom, Wärme und Verkehr: Analyse der Interaktion zwischen den Sektoren Strom, Wärme/Kälte und Verkehr in Deutschland in Hinblick auf steigende Anteile fluktuierender Erneuerbarer Energien im Strombereich unter Berücksichtigung der europäischen Entwicklung, 219 p, zu finden in <https://www.iee.fraunhofer.de/content/dam/iee/energiesystemtechnik/de/Dokumente/Veroeffentlichungen/2015/Interaktion_EEStrom_Waerme_Verkehr_Endbericht.pdf> [zitiert am 23.10.2020]
- Gerbert P, Herhold P, Burchardt J, Schönberger S, Rechenmacher F, Kirchner A, Kemmler A, Wünsch M (2018) Klimapfade für Deutschland, hg. v. BCG, Prognos, 290 p, zu finden in <https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2018/Januar/Klimapfade_fuer_Deutschland_BDI-Studie_/Klimapfade-fuer-Deutschland-BDI-Studie-12-01-2018.pdf> [zitiert am 23.10.2020]
- Günnewig D Dr., Johannwerner E, Kelm T, Metzger J, Wegner N (2022) Anpassung der Flächenkulisse für PV-Freiflächenanlagen im EEG vor dem Hintergrund erhöhter Zubauziele: Notwendigkeit und mögliche Umsetzungsoptionen, hg. v. Umweltbundesamt (UBA), 54 p, zu finden in <<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/anpassung-der-flaechenkulisse-fuer-pv>>
- Günnewig D Dr., Sieben A, Püschel M, Bohl J, Mack M (2007) Leitfaden zur Berücksichtigung von Umweltbelangen bei der Planung von PV-Freiflächenanlagen: ARGE Monitoring PV-Anlagen, hg. v. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 126 p
- Hansen H, Forstner B, de Witte T, Neuenfeldt S, Tergast H, Tietz A (2021) Steigende Bodenpreise und ökonomische Nachhaltigkeit landwirtschaftlicher Betriebe: Bericht im Auftrag des BMEL, hg. v. Thünen-Institut, 61 p

- Henning H-M, Palzer A (2015) Was kostet die Energiewende?: Wege zur Transformation des deutschen Energiesystems bis 2050, hg. v. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (Fraunhofer ISE), 90 p, zu finden in <<https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Fraunhofer-ISE-Studie-Was-kostet-die-Energiewende.pdf>> [zitiert am 23.10.2020]
- Kelm T, Metzger J, Jachmann H, Günnewig D Dr., Püschel M, Schicketanz S, Kinast P, Thylmann M, Nazerian V (2019) Vorbereitung und Begleitung bei der Erstellung eines Erfahrungsberichtes gemäß § 97 Erneuerbare-Energien-Gesetz: Teilvorhaben II c: Solare Strahlungsenergie. Abschlussbericht, zu finden in <https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/bmwi_de/zsv-boschundpartner-vorbereitung-begleitung-eeg.pdf> [zitiert am 11.10.2021]
- Kendzioriski M, Göke L, Kemfert C, Hirschhausen C von, Zozmann E (2021) 100% erneuerbare Energie für Deutschland unter besonderer Berücksichtigung von Dezentralität und räumlicher Verbrauchsnähe – Potenziale, Szenarien und Auswirkungen auf Netzinfrastrukturen, hg. v. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW), 63 p. Politikberatung Kompakt, zu finden in <https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.816979.de/diwkompakt_2021-167.pdf> [zitiert am 29.4.2021]
- KNE [Kompetenzzentrum Naturschutz und Energiewende] (2022) Wie Sie den Artenschutz in Solarparks optimieren: Hinweise zum Vorgehen für kommunale Akteure, 13 p, zu finden in <https://www.naturschutz-energie-wende.de/wp-content/uploads/KNE_Wie_Sie_den-Artenschutz_in_Solarparks_optimieren.pdf> [zitiert am 23.3.2022]
- Kost C, Shammugam S, Fluri V, Peper D, Memar AD, Thomas S (2021) Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien: Juni 2021, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (Fraunhofer ISE), 49 p, zu finden in <<https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/cost-of-electricity.html>> [zitiert am 1.7.2021]
- Lotze J, Salzinger M, Gaillardon B, Mogel M, Troitskiy K (2020) Stromnetz 2050 - Eine Studie der TransnetBW. TransnetBW, zu finden in <<https://www.transnetbw.de/de/stromnetz2050/>> [zitiert am 16.11.2020]
- Luderer G, Kost C, Sörgel D, Eds. (2021) Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045: Szenarien und Pfade im Modellvergleich. Ariadne-Report
- Matthes FC, Flachsbarth F, Loreck C, Hermann H, Falkenberg H, Cook V (2018) Zukunft Stromsystem II - Regionalisierung der erneuerbaren Stromerzeugung: Vom Ziel her denken, Stand Oktober 2018. Berlin: WWF Deutschland, 160 p. WWF Studie, zu finden in <<https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Stromsystem-II-Regionalisierung-der-erneuerbaren-Stromerzeugung.pdf>> [zitiert am 13.10.2020]
- Öko-Institut, Fraunhofer ISI [Fraunhofer-Institut für System und Innovationsforschung ISI] (2015) Klimaschutzszenario 2050: 2. Endbericht. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 467 p, zu finden in <<https://www.oeko.de/oekodoc/2451/2015-608-de.pdf>> [zitiert am 19.1.2022]
- Prognos, Fraunhofer ISE [Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE], GWS, iinas (2020a) Energiewirtschaftliche Projektionen und Folgeabschätzungen 2030/2050: Dokumentation von Referenzszenario und Szenario mit Klimaschutzprogramm 2030, hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 104 p, zu finden in <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Wirtschaft/klimagutachten.pdf?__blob=publicationFile&v=8> [zitiert am 20.10.2020]
- Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut [Wuppertal-Institut für Klima, Umwelt und Energie] (2020b) Klimaneutrales Deutschland: In drei Schritten zu null Treibhausgasen bis 2050 über ein Zwischenziel von -65% im Jahr 2030 als Teil des EU-Green-Deals. Zusammenfassung, hg. v. Agora Energiewende, Agora Verkehrswende, Stiftung Klimaneutralität, 34 p, zu finden in <<https://static.agora->

energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2020/2020_10_KNDE/A-
EW_192_KNDE_Zusammenfassung_DE_WEB.pdf> [zitiert am 23.10.2020]

Purr K, Günther J, Lehmann H, Nuss P (2019) Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität: RESCUE - Studie, hg. v. Umweltbundesamt (UBA), 444 p, zu finden in <<https://www.umweltbundesamt.de/rescue>> [zitiert am 3.11.2020]

statista (2022) Installierte Leistung (kumuliert) der Photovoltaikanlagen in Deutschland in den Jahren 2000 bis 2021, zu finden in <<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/13547/umfrage/leistung-durch-solarstrom-in-deutschland-seit-1990/>> [zitiert am 20.4.2022]

Tietz A (2019) Inanspruchnahme von Landwirtschaftsfläche durch Photovoltaik-Freiflächenanlagen 2015 bis 2018. Thünen Working Paper 123. doi: 10.3220/WP1558420425000

Tietz A, Bathke M, Osterburg B (2012) Art und Ausmaß der Inanspruchnahme landwirtschaftlicher Flächen für außerlandwirtschaftliche Zwecke und Ausgleichsmaßnahmen, hg. v. Johann Heinrich von Thünen-Institut, Arbeitsberichte aus der vTI-Agrarökonomie, 59 p, zu finden in <https://literatur.thuenen.de/digbib_external/bitv/dn050574.pdf> [zitiert am 16.9.2021]

UBA [Umweltbundesamt] (2021) Siedlungs- und Verkehrsfläche, zu finden in <<https://www.umweltbundesamt.de/daten/flaeche-boden-land-oekosysteme/flaeche/siedlungs-verkehrsflaeche#anhaltender-flaechenverbrauch-fur-siedlungs-und-verkehrszwecke->>> [zitiert am 1.7.2021]

UM-BW [Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg] (2018) Hinweise zum Ausbau von Photovoltaik-Freiflächenanlagen, 18 p, zu finden in <https://www.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/5_Energie/Erneuerbare_Energien/Sonnenenergie/Hinweise-zum-Ausbau-von-Photovoltaik-Freiflaechenanlagen.pdf> [zitiert am 7.8.2020]

Wirth H (2020) Integrierte Photovoltaik – Flächen für die Energiewende: Positionspapier, hg. v. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (Fraunhofer ISE), 2 p, zu finden in <<https://www.ise.fraunhofer.de/de/leitthemen/integrierte-photovoltaik.html>> [zitiert am 28.9.2020]

Wissenschaftlicher Beirat Agrarpolitik (2007) Nutzung von Biomasse zur Energiegewinnung: - Empfehlungen an die Politik -, hg. v. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), 255 p, zu finden in <<https://www.bmel.de/DE/ministerium/organisation/beiraete/nutzung-biomasse-energiegewinnung-vorwort.html>>

Tabelle A1: Vergleich von Energieszenarien

Quelle	Name der Studie	Beteiligte Organisationen	Jahr der Studie	Zieljahr	Bruttostromverbrauch [TWh/Jahr] Zieljahr *Nettostromerzeugung [TWh/Jahr] **geschätzt			Photovoltaik-Leistungsbedarf [GWp] Zieljahr bzw. Klimaneutralität **geschätzt		
					Min	Max	Mittelwert	Min	Max	Mittelwert aller Szenarien
50Hertz Transmission et al. (2022)	Szenariorahmen zum Netzentwicklungsplan Strom 2037 mit Ausblick 2045, Version 2023 - Entwurf der Übertragungsnetzbetreiber	50Hertz Transmission; Amprion; TenneT TSO; TransnetBW	2022	2045	954	1.128	1.041	325	395	372
BBH et al. (2018)	Integriertes Energiekonzept 2050 - Rechtliche Rahmenbedingungen für ein integriertes Energiekonzept 2050 und die Einbindung von EE-Kraftstoffen	BBH (Becker Büttner Held); LBST (Ludwig-Bölkow-Systemtechnik); Fraunhofer ISE; IKEM	2018	2050	1.000*	1.100*	1050	-	250**	250
Brandes et al. (2021)	Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem - Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen - Update November 2021: Klimaneutralität 2045	Fraunhofer ISE	2021	2045	1.165	1.407	1286	332	660	442,25
dena und ewi Energy Research & Scenarios (2018)	dena-Leitstudie Integrierte Energiewende - Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050	Deutsche Energie-Agentur (dena); ewi Energy Research & Scenarios	2018	2050	612	1.156	884	67	165	125
dena (2021)	dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität - Eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe	Deutsche Energie-Agentur (dena); EWI; FIW; ITG; Jacobs University Bremen Stiftung Umweltenergie-recht; Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie	2021	2045	-	910	910	-	259	259
Fraunhofer ISI et al. (2017)	Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland - Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie	Fraunhofer ISI; Consente; ifeu	2017	2050	611	686	649	49	87,5	55,02

Quelle	Name der Studie	Beteiligte Organisationen	Jahr der Studie	Zieljahr	Bruttostromverbrauch [TWh/Jahr] Zieljahr *Nettostromerzeugung [TWh/Jahr] **geschätzt			Photovoltaik-Leistungsbedarf [GWp] Zieljahr bzw. Klimaneutralität **geschätzt		
					Min	Max	Mittelwert	Min	Max	Mittelwert aller Szenarien
Fraunhofer ISI et al. (2021)	Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland - Treibhausgasneutrale Hauptszenarien	Fraunhofer ISI; Consentec; ifeu; TU Berlin	2021	2050	809	1.074	942	155,5	289,5	241,3
Fraunhofer IWES et al. (2015)	Interaktion EE-Strom, Wärme und Verkehr - Analyse der Interaktion zwischen den Sektoren Strom, Wärme/Kälte und Verkehr in Deutschland in Hinblick aufsteigende Anteile fluktuierender Erneuerbarer Energien im Strombereich unter Berücksichtigung der europäischen Entwicklung	Fraunhofer IWES; Fraunhofer IBP; IFEU; Stiftung Umweltenergie-recht	2015	2050	-	793	793	-	200	200
Gerbert et al. (2018)	Klimapfade für Deutschland	BCG (The Boston Consulting Group) Prognos	2018	2050	620*	715*	668	95	130	110
Henning und Palzer (2015)	Was kostet die Energiewende? - Wege zur Transformation des deutschen Energiesystems bis 2050	Fraunhofer ISE	2015	2050	-	800	800	-	166	166
Kendziorski et al. (2021)	100% erneuerbare Energie für Deutschland unter besonderer Berücksichtigung von Dezentralität und räumlicher Verbrauchsnähe – Potenziale, Szenarien und Auswirkungen auf Netzinfrastrukturen	DIW Berlin: TU Berlin	2021	-	580**	1.070	825	128	300	214
Lotze et al. (2020)	Stromnetz 2050 - Eine Studie der TransnetBW	TransnetBW	2020	2050	-	842	842	-	173	173
Luderer et al. (2021)	Ariadne-Report: Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 - Szenarien und Pfade im Modellvergleich	DLR-FK; DLR-VE; DLR-VF; Fraunhofer IEE; Fraunhofer IEG; Fraunhofer ISE; Fraunhofer ISI; Hereon; IER; MCC; PIK; PSI; RWI;	2021	2045	780	1.580	1.180	200	550	383

Quelle	Name der Studie	Beteiligte Organisationen	Jahr der Studie	Zieljahr	Bruttostromverbrauch [TWh/Jahr] Zieljahr *Nettostromerzeugung [TWh/Jahr] **geschätzt			Photovoltaik-Leistungsbedarf [GWp] Zieljahr bzw. Klimaneutralität **geschätzt		
					Min	Max	Mittelwert	Min	Max	Mittelwert aller Szenarien
Matthes et al. (2018)	Zukunft Stromsystem II - Regionalisierung der erneuerbaren Stromerzeugung - Vom Ziel her denken	Öko-Institut; Prognos; WWF Deutschland	2018	2050		700	700	154	313	233,5
Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015)	Klimaschutzszenario 2050 - Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit	Öko-Institut; Fraunhofer ISI	2015	2050	651	778	715	62,2	130	96,1
Prognos et al. (2020a)	Energiewirtschaftliche Projektionen und Folgeabschätzungen 2030/2050	Prognos; Fraunhofer ISI; GWS; iinas	2020	2050	-	574	574	-	119	119
Prognos et al. (2020b)	Klimaneutrales Deutschland - In drei Schritten zu null Treibhausgasen bis 2050 über ein Zwischenziel von -65 % im Jahr 2030 als Teil des EU-Green-Deals	Prognos; Öko-Institut; Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie; Agora Energiewende; Agora Verkehrswende; Stiftung Klimaneutralität	2020	2050	-	962	962	-	355	355
Purr et al. (2019)	Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität - RESCUE - Studie	Umweltbundesamt	2019	2050	580	796	688	131	218	174,5

Quelle: Eigene Darstellung nach 50Hertz Transmission et al. (2022), BBH et al. (2018), Brandes et al. (2021), dena und ewi Energy Research & Scenarios (2018), dena (2021), Fraunhofer ISI et al. (2017), Fraunhofer ISI et al. (2021), Fraunhofer IWES et al. (2015), Gerbert et al. (2018), Henning und Palzer (2015), Kendziorski et al. (2021), Lotze et al. (2020), Luderer et al. (2021), Matthes et al. (2018), Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015), Prognos et al. (2020a), Prognos et al. (2020b), Purr et al. (2019).

Bibliografische Information:
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikationen in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter www.dnb.de abrufbar.

Bibliographic information:
The Deutsche Nationalbibliothek (German National Library) lists this publication in the German National Bibliography; detailed bibliographic data is available on the Internet at www.dnb.de

Bereits in dieser Reihe erschienene Bände finden Sie im Internet unter www.thuenen.de

Volumes already published in this series are available on the Internet at www.thuenen.de

Zitationsvorschlag – Suggested source citation:
Böhm J, Tietz A (2022) Abschätzung des zukünftigen Flächenbedarfs von Photovoltaik-Freiflächenanlagen. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 22 p, Thünen Working Paper 204, DOI:10.3220/WP1669630417000

Die Verantwortung für die Inhalte liegt bei den jeweiligen Verfassern bzw. Verfasserinnen.

The respective authors are responsible for the content of their publications.



Thünen Working Paper 204

Herausgeber/Redaktionsanschrift – *Editor/address*

Johann Heinrich von Thünen-Institut
Bundesallee 50
38116 Braunschweig
Germany

thuenen-working-paper@thuenen.de
www.thuenen.de

DOI:10.3220/WP1669630417000
urn:nbn:de:gbv:253-202211-dn065640-6