

Potenzialflächen für Agri- Photovoltaik

Eine GIS-basierte Potenzialanalyse für Deutschland

März 2024

Autorinnen und Autoren

Manuel Kohler
Öko-Institut e. V.

Dr. Marion Wingenbach
Öko-Institut e. V.

Kontakt

m.wingenbach@oeko.de
www.oeko.de

Geschäftsstelle Freiburg

Postfach 17 71
79017 Freiburg

Hausadresse

Merzhauser Straße 173
79100 Freiburg
Telefon +49 761 45295-0

Büro Berlin

Borkumstraße 2
13189 Berlin
Telefon +49 30 405085-0

Büro Darmstadt

Rheinstraße 95
64295 Darmstadt
Telefon +49 6151 8191-0

Diese Publikation wurde erstellt im Rahmen des vom BMWK finanzierten Forschungsprojekts „EmPowerPlan: Regionale Planung der Energiewende - Partizipation und Gerechtigkeit vor Ort und das große Ganze im Blick“.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| Abbildungsverzeichnis | 4 |
| Tabellenverzeichnis | 5 |
| Abkürzungsverzeichnis | 6 |
| 1 Einführung | 7 |
| 2 Agri-Photovoltaik in der Anwendung | 8 |
| 2.1 Agri-Photovoltaiksysteme | 8 |
| 2.2 Doppelnutzung von Agrarflächen | 9 |
| 2.2.1 Kulturauswahl anhand des Verschattungseinflusses | 10 |
| 2.2.2 Kulturauswahl anhand des Lichtsättigungspunktes | 10 |
| 2.2.3 Kulturauswahl anhand der Schutzbedürftigkeit | 11 |
| 2.3 Rechtliche Rahmenbedingungen | 11 |
| 2.3.1 Raumordnung und Bauleitplanung | 12 |
| 2.3.2 Das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) | 13 |
| 2.3.3 Gemeinsame Agrarpolitik der EU (GAP) | 13 |
| 3 Potenzialanalyse | 14 |
| 3.1 Realisierbareres Potenzial | 14 |
| 3.2 Erschließbares Potenzial | 18 |
| 3.2.1 Synergieeffekte | 18 |
| 3.2.2 Geringe Nutzungskonkurrenz | 20 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 3-1: Realisierbares Gesamtpotenzial für Agri-PV | 16 |
| Abbildung 3-2: Erschließbares Potenzial für Agri-PV mit Synergieeffekten | 19 |
| Abbildung 3-3: Ackerbauliches Ertragspotenzial der Böden in Deutschland | 21 |
| Abbildung 3-4: Erschließbares Potenzial für Agri-PV mit geringer Nutzungskonkurrenz | 22 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| Tabelle 2-1: Wachstumsveränderung von Nutzpflanzen unter Beschattung | 10 |
| Tabelle 2-2: Lichtsättigungspunkte ausgewählter Nutzpflanzen | 11 |
| Tabelle 3-1: Ausschlusskriterien | 17 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|--------|--------------------------------|
| APV | Agri-Photovoltaik |
| BauGB | Baugesetzbuch |
| GAP | Gemeinsame Agrarpolitik der EU |
| GIS | Geoinformationssysteme |
| klx | Kilolux |
| PV | Photovoltaik |
| PV-FFA | Photovoltaik-Freiflächenanlage |
| ROG | Raumordnungsgesetz |
| SQR | Soil Quality Rating |

1 Einführung

In der Umsetzung des Ausbaus von Windenergie und Freiflächen Photovoltaik (PV) kristallisieren sich mehrere Problemstellen heraus. Eine wesentliche Herausforderung stellt die begrenzte Verfügbarkeit von Flächen für die Installation von Photovoltaik-Freiflächenanlagen (PV-FFA) dar. Diese begrenzte Verfügbarkeit wird besonders relevant im Kontext des deutschen Ziels, bis zum Jahr 2050 eine Kreislaufwirtschaft der Flächennutzung zu erreichen, bei der „netto“ keine neuen Flächen versiegelt werden sollen (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) 2016). Die zunehmende Flächenkonkurrenz zeigt sich dabei vor allem im Bezug zur Landwirtschaft (Trommsdorff et al. 2022). Die Verfügbarkeit von fruchtbaren Ackerflächen ist zunehmend eingeschränkt durch Naturschutzmaßnahmen, zunehmende Verstädterung sowie den steigenden Bedarf an Infrastruktur und Industrieflächen. Erfolgt der Zubau von PV-FFA auf landwirtschaftlichen Flächen, kann dies die Verknappung weiter vorantreiben (Kroll und Haase 2010).

Um diesem Flächennutzungskonflikt entgegenzuwirken, wurde in den letzten Jahren verstärkt das Modell der Agri-Photovoltaik (APV) als vielversprechender Lösungsansatz diskutiert (vgl. (Dinesh und Perace 2016; Schindele 2021; Trommsdorff et al. 2022)). APV bezeichnet die gleichzeitige Nutzung einer Fläche für die Landwirtschaft und die Erzeugung von Strom mittels PV. Die PV-Paneele sind dabei entweder über den Anbauflächen oder dazwischen angeordnet. Das Hauptziel besteht darin, insgesamt höhere Erträge pro Fläche zu erzielen als bei getrennter Nutzung, um so die Konkurrenz zwischen landwirtschaftlicher Nutzung und Energieerzeugung zu verringern (vgl. (Götzberger und Zastrow 1981)). Die vermehrte Berücksichtigung von APV im gesellschaftlichen und politischen Diskurs zeigt sich auch darin, dass seit 2022 in den Ausschreibungen der Bundesnetzagentur APV in der Innovationsausschreibung erstmals getrennt von PV-FFA berücksichtigt wurde (Bundesnetzagentur (BNetzA) 2023).

In der vorliegenden Studie werden Ausbaupotenziale für APV mittels einer detaillierten Bottom-Up-Analyse¹ mit Hilfe von Geoinformationssystemen (GIS) für Deutschland ermittelt. Hierfür werden in einem ersten Schritt landwirtschaftliche Flächen identifiziert unter Berücksichtigung von Ausschlusskriterien wie Topographie, Naturschutz und Landnutzung. In einem weiteren Schritt werden Restriktionskriterien in die Analyse einbezogen. Dadurch werden Flächen mit Synergiepotenzialen und geringer Nutzungskonkurrenz zwischen landwirtschaftlichen Aktivitäten und PV-FFA identifiziert.

¹ Bottom-Up-Ansatz: Dieser Ansatz beginnt auf der niedrigsten Ebene einer Analyse, in diesem Fall den parzellenscharfen landwirtschaftlichen Flurstücken und arbeitet sich dann nach oben, indem er alle Daten aggregiert, um ein Gesamtpotenzial für ein größeres Gebiet zu ermitteln. Das Gegenstück wäre ein "Top-Down"-Ansatz, bei dem nationale Daten auf kleinere Einheiten heruntergebrochen werden (Bao et al. 2022, S. 1).

2 Agri-Photovoltaik in der Anwendung

Das folgende Kapitel analysiert den aktuellen Stand und die projizierte Expansion der PV in Deutschland sowie verschiedene Anwendungsmöglichkeiten. Die verschiedenen Systeme und Modulvarianten, welche in Deutschland gängig und für die festgelegten Untersuchungsräume potenziell geeignet sind, werden vorgestellt. Abschließend werden geeignete Anbaukulturen und die in Deutschland gültigen rechtlichen Rahmenbedingungen beleuchtet.

2.1 Agri-Photovoltaiksysteme

Photovoltaiksysteme werden zwischen integrierten und nicht-integrierten PV-Systemen unterschieden, wobei die nicht-integrierten oft als konventionelle PV bezeichnet werden. Der Hauptunterschied liegt hierbei in der Art der Fläche, für die die jeweiligen Systeme geeignet sind.

- **Nicht-integrierte PV-Systeme** beziehen sich auf solche, bei denen die PV-Technologie separat von den bestehenden Strukturen installiert wird. Eine gängige Form nicht-integrierter PV-Systeme sind PV-FFA, bei denen Solarmodule auf offenen Flächen wie beispielsweise Feldern installiert werden.
- **Integrierte PV-Systeme** sind Systeme, bei denen die Photovoltaiktechnologie in verschiedene (Infra-) Strukturen eingebettet wird, um eine effiziente und vielseitige Nutzung der Solarenergie zu ermöglichen. Durch diese Integration kann die PV in bestehende Gebäude, Verkehrsmittel, Straßen, Gewässer oder andere Infrastrukturbereiche integriert werden. Solche integrierten PV-Systeme bieten zahlreiche Vorteile, darunter eine verbesserte optische Integration, Platzersparnis, Energieeffizienz und die Möglichkeit, erneuerbare Energie direkt am Ort des Verbrauchs zu erzeugen. Dazu gehören folgende Technologien: Agri-PV, fahrzeugintegrierte PV, Photovoltaik in Verkehrswegen, schwimmende PV und urbane PV (Wirth 2019).

Das Anlagendesign der APV-Anlagen richtet sich in erster Linie nach der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung, die simultan zur Energieerzeugung auf der Fläche stattfinden soll. Relevant sind vor allem folgende drei Anlagendesigns: hochaufgeständerte Systeme, bodennahe Systeme mit Bewirtschaftung zwischen den Modulen sowie vertikal aufgestelltes Bifazialmodul, das auf beiden Seiten Solarzellen aufweist (Katsikogiannis et al. 2022). Die DIN SPEC 91434, die in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-ISE erstellt wurde, definiert die Bedingungen für APV-Anlagen und der dazugehörigen landwirtschaftlichen Fläche. Für alle Kategorien von APV ist es erforderlich, dass eine landwirtschaftliche Nutzung der Fläche weiterhin möglich ist. Damit soll sichergestellt werden, dass APV zur Entschärfung von Landnutzungskonflikten beiträgt. Die DIN SPEC stellt folgende Kernanforderungen und Kriterien an APV-Systeme (Deutsches Institut für Normung (DIN) 2021):

- Es muss gewährleistet sein, dass die gleichzeitige vorrangige landwirtschaftliche Produktion der Flächen während der Lebensdauer des APV-Systems möglich bleibt.
- Der landwirtschaftliche Flächenverlust durch eine APV-Anlage darf bei Kategorie I nicht mehr als 10 % und bei Kategorie II nicht mehr als 15 % betragen.
- Die Konzepte der Licht- und Wasserverfügbarkeit müssen bewertet werden und falls erforderlich, sollten geeignete Anpassungen vorgenommen werden.
- Bodenerosion und Schäden müssen durch die Wahl geeigneter Verankerungen (z. B. Spinnanker) und die Kontrolle des Wasserabflusses aus den Modulen verhindert werden.

- Der landwirtschaftliche Ertrag nach der Installation der APV-Anlage muss mindestens zwei Drittel des Referenzertrags betragen. Der Referenzertrag ist ein Drei-Jahres-Durchschnittswert der gleichen landwirtschaftlichen Fläche vor der Installation.

Grundsätzlich wird zwischen offenen und geschlossenen APV-Systemen unterschieden. Offene Systeme ermöglichen eine Koexistenz von großflächiger landwirtschaftlicher Nutzung und PV, da die Module auf Ständern montiert sind und genug Raum für Pflanzenwachstum lassen. Geschlossene Systeme nehmen oft die gesamte Nutzfläche ein, wodurch die Landwirtschaft unter den Modulen eingeschränkt ist.

Offene APV-Anlagen können wiederum in zwei Kategorien eingeteilt werden: die hochaufgeständerten Anlagen und die bodennah aufgeständerten Anlagen.

- Bei den hochaufgeständerten Anlagen (Kategorie I) werden die Solarmodule in drei bis sieben Metern Höhe über dem Feld installiert, um eine landwirtschaftliche Nutzung unter den Modulen und die Durchfahrt mit landwirtschaftlichen Fahrzeugen zu ermöglichen. Die Module können starr fixiert oder mit Nachführsystemen (auch als Tracker bezeichnet) ausgestattet werden, um den Ertrag zu maximieren. Es gibt auch Betriebsweisen, bei denen die Module nicht auf maximalen Stromertrag, sondern auf die Kombination von Modul und Anbau ausgerichtet werden.
- Kategorie II umfasst vertikale oder bodennahe Systeme, die eine landwirtschaftliche Bewirtschaftung zwischen den Modulen ermöglichen und bisher hauptsächlich im Grünland eingesetzt werden. Die Anlagen können ebenfalls mit Nachführsystemen ausgestattet werden, um den Stromertrag pro Hektar zu maximieren (Deutsches Institut für Normung (DIN) 2021). Ein Sonderfall dieses Konzeptes sind bifaziale Module, die vertikal montiert werden. Die Module können auf beiden Seiten Licht einfangen und somit sowohl die direkte Sonneneinstrahlung als auch die reflektierte Strahlung von der Umgebung nutzen. Dadurch können sie höhere Stromerträge als herkömmliche, einseitig ausgerichtete Module erzielen. Diese Art von Modulen eignet sich besonders für den Einsatz in landwirtschaftlichen Nutzflächen wie zum Beispiel Dauergrünland, da so die Durchfahrt mit Maschinen dauerhaft möglich ist (Reker et al. 2022).

2.2 Doppelnutzung von Agrarflächen

Derzeit besteht in Deutschland eine geringe Flächennutzungskonkurrenz zwischen Landwirtschaft und solarer Energieerzeugung. Im Jahr 2022 waren auf einer Fläche von 34.700 ha insgesamt 20 GWp an PV-FFA installiert (Kelm et al. 2023). Das entspricht einem Anteil von 0,1 % der gesamten Fläche des Bundesgebietes. Mehr als ein Drittel der für PV-FFA genutzten Flächen entfällt auf Konversionsflächen mit rund 11.700 ha (36 % der Gesamtfläche für PV-FFA). Mit 10.900 ha folgt an zweiter Stelle PV-FFA auf Ackerflächen. Diese stellen aktuell 31 % der Gesamtfläche, die für PV-FFA genutzt wird. PV-FFA auf Dauergrünland machen demgegenüber einen geringeren Anteil von ca. 4 % (1.300 ha) aus. Nimmt man diese Flächen (Ackerland, Dauergrünland) zusammen, entfallen rund 40 % der gesamten Fläche, auf denen aktuell PV-FFA installiert sind, auf landwirtschaftliche Flächen. Mit rund 12.200 ha nehmen diese Flächen einen theoretischen Anteil von lediglich 0,1 %² der gesamten landwirtschaftlich genutzten Fläche in Deutschland (16,6 Mio. ha) ein (destatis 2021). Im Vergleich dazu werden 14 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche zur Kultivierung von Energiepflanzen genutzt (destatis 2022).

² Dieser Anteil erweitert sich auf 0,2%, wenn man unterstellt, dass zu landwirtschaftlichen Flächen auch Anlagen im Randstreifen von Verkehrswegen zählen (Kelm et al. 2023).

Ein wesentlicher Vorteil von APV liegt in der Minimierung des Verlustes an landwirtschaftlichen Flächen: Sie kann den Ertrag pro Einheit der verlorenen landwirtschaftlichen Fläche signifikant erhöhen, da im Vergleich zur klassischen Freiflächen PV die Fläche weiterhin landwirtschaftlich genutzt wird (Böhm et al. 2022). Die Kombination von Landwirtschaft und PV durch APV kann zu einer Vervier- bis Verachtfachung der Flächenerträge pro verlorener landwirtschaftlicher Flächeneinheit im Vergleich zu konventioneller PV-FFA führen (Böhm et al. 2022). Darüber hinaus wird der vorhandene Raum optimal genutzt, indem er sowohl für die Nahrungsmittelproduktion als auch für die Energieerzeugung verwendet wird. Zusätzlich bieten die PV-Module Schutz vor Witterungseinflüssen wie starkem Sonnenlicht, Hagel oder starkem Regen. Einige Kulturen (wie beispielsweise Gemüse) benötigen einen expliziten Schattenanbau, der durch PV-Module in bestimmten Konfigurationen gewährleistet werden kann. Dies führt wiederum zu höheren Erträgen (Trommsdorff et al. 2022).

2.2.1 Kulturauswahl anhand des Verschattungseinflusses

Betrachtet man mögliche Kulturen unter dem Aspekt ihrer Ertragsveränderung durch die Beschattung eines APV-Systems, lassen sich drei Kategorien identifizieren: Kulturen, die von einer gewissen Beschattung profitieren, Kulturen, die kaum beeinflusst werden und Kulturen die maximale Bestrahlung benötigen. In der nachfolgenden Tabelle ist ersichtlich, welche Kulturen profitieren bzw. negativ beeinflusst werden:

Tabelle 2-1: Wachstumsveränderung von Nutzpflanzen unter Beschattung

| Positive Beeinflussung | Geringe Beeinflussung | Negative Beeinflussung |
|------------------------|-----------------------|------------------------|
| Kartoffeln | Raps | Mais |
| Salat (alle Arten) | Roggen | Weizen |
| Spinat | Hafer | Gartenzucht |

Source Beck et al. (2012)

Hierbei ist zu erwähnen, dass Schwankungen über die Jahre einen großen Einfluss haben können, wie die Untersuchungen von Weselek et al. (2021) belegen. Im Jahr 2017 waren alle Kulturen negativ von der APV-Anlage betroffen, mit Ertragsverlusten zwischen -5 % und -20 %. Demgegenüber profitierten Winterweizen und Kartoffeln im heißen und trockenen Sommer 2018 im Vergleich zur Referenzfläche außerhalb der APV-Anlage.

Bei den Untersuchungen von Beck et al. (2012) zeigte sich zudem, dass die herkömmliche Installation nach Süden zu anhaltendem Schatten und ungleichmäßigem Reifen der Pflanzen führte. Eine Lösung besteht darin, die Module nach Südosten oder Südwesten auszurichten (ebd., S. 4048).

2.2.2 Kulturauswahl anhand des Lichtsättigungspunktes

Neben der Eignung von Kulturen unter Verschattung kann die Auswahl geeigneter Pflanzenarten auch auf Basis ihres jeweiligen Lichtsättigungspunktes erfolgen: Pflanzen nutzen Licht als Energiequelle für die Photosynthese. Beim Prozess der Photosynthese werden Kohlenstoffdioxid und Wasser unter Einwirkung von Licht in Kohlenhydrate umgewandelt und Sauerstoff abgespalten. Die Intensität der Photosynthese hängt unter anderem von der Lichtmenge ab, wobei die Photosynthese bei höherer Strahlungsmenge schneller vonstattengeht. Ab einem bestimmten Punkt erreicht die Photosyntheserate ihr Maximum, wodurch die Wachstumsrate nicht weiter ansteigt.

Diesen Punkt bezeichnet man als Lichtsättigungspunkt (Peters et al. 2017). Dieser Wert wird in der Einheit Kilolux (klx) angegeben, welche die Intensität des auf eine Fläche einfallenden Lichts misst.

Tabelle 2-2: Lichtsättigungspunkte ausgewählter Nutzpflanzen

| Nutzpflanzen | Lichtsättigungspunkt (klx) | Nutzpflanze | Lichtsättigungspunkt (klx) |
|--------------|----------------------------|------------------|----------------------------|
| Mais | 80 – 90 | Reis | 40 – 45 |
| Wassermelone | 80 – 90 | Karotte | 40 |
| Tomate | 80 | Rübe | 40 |
| Taro | 80 | Süßkartoffel | 30 |
| Gurke | 55 | Salat | 25 |
| Kürbis | 45 | Grüne Paprika | 20 – 30 |
| Blaubeere | 45 | Frühlingszwiebel | 25 |
| Kohl | 45 | Pilz | >20 |

Source: (Sekiyama und Nagshima 2019)

2.2.3 Kulturauswahl anhand der Schutzbedürftigkeit

Insbesondere bei Dauerkulturen kann hoch aufgeständerte APV durch die Überdachung einen entscheidenden Mehrwert bieten. Die Überdachung bedingt eine Schutzwirkung für die darunter wachsenden Kulturen. Sie bietet zuverlässigen Schutz vor Hagelschäden und Sonnenbrand, wodurch teure und wartungsintensive Schutzvorrichtungen wie Sonnen- und Hagelschutznetze überflüssig werden. Darüber hinaus erweisen sich APV-Systeme als synergetisch mit bestimmten Kulturen wie Trauben, Obstbäumen, Beeren und vielen Gemüsesorten. Die Vorteile beschränken sich nicht nur auf die veränderten Lichtverhältnisse. Vielmehr profitieren diese Kulturen von der erhöhten Wertschöpfung pro Flächeneinheit und ihrer natürlichen Schutzbedürftigkeit gegenüber Witterungseinflüssen. Beispielsweise liegt die Wertschöpfung von Himbeeren häufig über der Stromerzeugung der APV-Anlage selbst. Dies macht die Kombination von APV und Landwirtschaft ökologisch und wirtschaftlich attraktiv (Trommsdorff et al. 2022).

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der Anbau bestimmter Kulturen unter APV-Systemen sowohl ökonomische als auch ökologische Vorteile bieten kann. Die Kulturen müssen dabei sorgfältig ausgewählt werden. Die Ertragssteigerungen, insbesondere in heißen und trockenen Jahren, sind signifikant. Es ist jedoch zu beachten, dass in durchschnittlichen Jahren bei Kulturen wie Kartoffeln oder Weizen mit Ertragseinbußen von bis zu 20 % gerechnet werden muss. Für die Abschätzung des Potenzials von APV ist es jedoch nicht nur wichtig, abzugrenzen, welche Kulturen mit APV angebaut werden können. Auch allgemeine Determinanten wirken sich auf APV-Potenziale aus. Dazu gehören die rechtlichen Rahmenbedingungen, auf die im folgenden Abschnitt näher eingegangen wird.

2.3 Rechtliche Rahmenbedingungen

Die rechtlichen Rahmenbedingungen sind für die Potenzialanalyse von APV von entscheidender Bedeutung. Dabei spielen vor allem raumplanerische Aspekte, der baurechtliche Rahmen, das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) und die gemeinsame Agrarpolitik der EU (GAP) eine wichtige Rolle.

2.3.1 Raumordnung und Bauleitplanung

Für die Zulässigkeit der Errichtung einer APV-Anlage sind zum einen die bauplanungsrechtlichen Anforderungen des Bundes aus dem Raumordnungsgesetz (ROG) und zum anderen die landesspezifischen bauordnungsrechtlichen Vorgaben aus dem Baugesetzbuch (BauGB) relevant. Das ROG definiert die Rahmenbedingungen für die regionale Raumordnungsplanung, während das BauGB die Bauleitplanung vorgibt und somit die Anforderungen für die Errichtung von APV-Anlagen konkretisiert und den Spielraum auf Gemeindeebene festsetzt.

In den Regionalplänen kann festgelegt werden, wo und unter welchen Voraussetzungen PV-FFA, einschließlich APV-Anlagen, errichtet werden können. Regionalpläne dienen der Steuerung und Koordinierung von Ziel- und Nutzungskonflikten. Hierunter fällt das Spannungsfeld zwischen Landschaftsschutz und Nahrungsmittel- bzw. Energieproduktion. Somit regeln Regionalpläne Belange der Landwirtschaft, des Umwelt- und Naturschutzes sowie der weiteren Nutzungen. Um eine Positivplanung³ für APV auf Regionalplanebene umzusetzen, ist ein flächenhaftes und überzeugendes Planungskonzept erforderlich. Die Eignung von Standorten wird durch eine Bewertung der räumlichen Verträglichkeit ermittelt. Dies ermöglicht eine gezielte Lenkung hin zu einer Gebietskulisse, die vergleichsweise geringe Konflikte aufweist. Hierzu gehören bspw. Flächen entlang von Verkehrsinfrastrukturen oder in der Nähe von Windparks oder Industriegebieten (Einig et al. 2022).

Laut § 1 Abs. 4 BauGB hat die Gemeinde ihre Bauleitpläne den Zielen der Raumordnung anzupassen (BauGB 2023). Dies bedeutet, dass APV-Anlagen den Zielen und Vorgaben dieser regionalen Pläne entsprechen müssen. Zusätzlich unterliegen APV-Anlagen im Bauplanungsrecht bestimmten Regelungen und Genehmigungspflichten, die regional variieren können. Bspw. gelten Anlagen ab 3 m Höhe und einer Gesamtlänge von bis zu 9 m in Baden-Württemberg als genehmigungspflichtig (LBO BW 2023). APV-Anlagen können generell in Gebieten realisiert werden, für die ein Bebauungsplan aufgestellt wurde, wobei verschiedene Flächenkategorien im BauGB unterschieden werden. Bebauungspläne können hierbei auf die spezifischen Bedürfnisse von APV-Anlagen zugeschnitten werden – entweder durch einen vorhabenbezogenen Bebauungsplan oder durch die Änderung des Flächennutzungsplans. Hierfür kann es notwendig sein ein Zielabweichungsverfahren durchzuführen, um von den Zielen der Raumplanung abweichen zu können (Einig et al. 2022). Generell ist die Aufstellung eines vorhabenbezogenen Bebauungsplans für die Gemeinde eine sinnvolle Option für die Realisierung von APV-Anlagen.

APV-Anlagen müssen im unbeplanten Außenbereich⁴ spezielle Vorschriften gemäß § 35 Abs. 1 BauGB erfüllen. Die Anlagen sind grundsätzlich zulässig, wenn sie innerhalb von landwirtschaftlichen Betrieben gebaut werden und dort nur einen untergeordneten Teil der Betriebsfläche einnehmen. Somit zählen APV-Anlagen in bestimmten Fällen zu privilegierten Vorhaben im Außenbereich (BauGB 2023). Der Gesetzgeber hat dafür folgende vorbelastete Gebiete vorgesehen: Auf einer Fläche längs von Autobahnen oder Schienenwegen in einer Entfernung von bis zu 200 m, gemessen vom äußeren Rand der Fahrbahn. Zudem können APV-Projekte seit Juli 2023 als privilegierte Vorhaben abseits der genannten Kulisse realisiert werden, sofern bestimmte Kriterien erfüllt sind. Dazu gehört, dass die Fläche des Projekts höchstens 2,5 ha beträgt und dass die Anlage in einem räumlich-funktionalen Zusammenhang zu einem landwirtschaftlichen Betrieb steht (BauGB 2023). Mit diesen Kriterien soll sichergestellt werden, dass

³ Die planerische Ausweisung von für die Nutzung solarer Strahlungsenergie vorgesehenen Positivflächen

⁴ Der Außenbereich soll nach § 35 BauGB grundsätzlich von einer Bebauung freigehalten werden

APV-Projekte in die landwirtschaftliche Nutzung der Flächen integriert werden und gleichzeitig die landwirtschaftlichen Betriebe unterstützen.

2.3.2 Das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)

APV-Anlagen können gemäß dem EEG förderfähig sein. Hierfür werden zwei Hauptinstrumente vorrangig berücksichtigt: Erstens müssen Netzbetreiber Strom aus erneuerbaren Energien bevorzugt abnehmen und zweitens erhalten Anlagenbetreiber eine garantierte Einspeisevergütung. Seit 2023 können auch besondere Solaranlagen wie APV in Ausschreibungen für Solaranlagen des ersten Segments (PV-FFA) gefördert werden. Die Bundesnetzagentur legt die förderfähige Flächenkulisse für APV wie folgt fest:

- Ackerflächen, die kein Moorboden sind, mit gleichzeitigem Nutzpflanzenanbau auf derselben Fläche,
- Flächen, die kein Moorboden sind, bei gleichzeitiger landwirtschaftlicher Nutzung in Form eines Anbaus von Dauerkulturen oder mehrjährigen Kulturen auf derselben Fläche,
- Grünland, das kein Moorboden ist, bei gleichzeitiger landwirtschaftlicher Nutzung als Dauergrünland (ausgeschlossen sind Natura-2000 Flächen und geschützte Lebensraumtypen nach FFH-Richtlinie).

Die Solaranlagen und der Nutzpflanzenanbau auf diesen Flächen müssen den Anforderungen gemäß der DIN SPEC 91434 (siehe Kapitel 2.1) entsprechen. Das bedeutet, dass die landwirtschaftliche Tätigkeit mindestens 66 % des Ertrags einer Referenzfläche ohne PV erreichen muss. Darüber hinaus muss alle drei Jahre die Weiterführung der landwirtschaftlichen Tätigkeit nachgewiesen werden (Bundesnetzagentur (BNetzA) 2021).

Für Anlagen mit einer geplanten Leistung von weniger als 1.000 kWp können Einspeisevergütungen leichter erzielt werden als für größere Anlagen. Anlagenbetreiber von APV-Anlagen unterhalb dieser Grenze müssen nicht an der Ausschreibung teilnehmen und erhalten eine feste Einspeisevergütung. Anlagen über 1.000 kWp hingegen konkurrieren in der Ausschreibung um die Vergütung mit anderen Betreiber:innen, wobei der niedrigste Preis die höchste Zuschlagswahrscheinlichkeit hat. Die Gesamtmenge des zu fördernden Zubaus ist festgelegt und die Betreiber:innen bieten in den Ausschreibungen den Erzeugungspreis an, den sie mit ihrer geplanten Anlage finanzieren können (Bundesregierung 2023). Werden APV-Anlagen horizontal mit einer lichten Höhe von mindestens 2,1 m aufgeständert, erhöht sich die Vergütung um einen Technologie-Bonus von 1,2 Ct/kWh (Bundesregierung 2023).

2.3.3 Gemeinsame Agrarpolitik der EU (GAP)

Bis kürzlich spielte die GAP ebenfalls eine zentrale Rolle im rechtlichen Rahmen bei der Errichtung von APV. Ursprünglich konnten EU-Direktzahlungen nur in Anspruch genommen werden, wenn Flächen hauptsächlich landwirtschaftlich genutzt wurden, wodurch die Installation von APV-Anlagen auf diesen Flächen diese Zahlungen gefährdete (Schindele 2021). Nach neuester Rechtsprechung verlieren landwirtschaftliche Flächen ihre Beihilfefähigkeit nur, wenn PV-Anlagen die landwirtschaftliche Nutzung stark einschränken. Landwirtschaftliche Flächen mit APV-Anlagen behalten ihre Förderfähigkeit für 85 % ihrer Fläche, wenn folgende Voraussetzungen erfüllt sind: a) die landwirtschaftliche Nutzung der Flächen erhalten unter Anwendung konventioneller landwirtschaftlicher Praktiken; b) die nutzbare Fläche reduziert sich nur um bis zu 15 % nach DIN SPEC 91434 (Gerhards et al. 2022).

3 Potenzialanalyse

In den folgenden Unterkapiteln wird die durchgeführte Potenzialanalyse für APV beschrieben. Die Analyse folgt einem mehrstufigen Ansatz, der auf einer Bottom-Up GIS⁵-Potenzialanalyse basiert und Ausschlusskriterien näher definiert und berücksichtigt. Die Analyse hat das Ziel, Synergien und Nutzungskonflikte innerhalb Deutschlands zu identifizieren. In der Analyse wird zwischen verschiedenen Potenzialarten unterschieden, deren Definitionen sich an den Arbeiten von Kaltschmitt et al. (2020) und zwei Studien zu erneuerbaren Energiepotenzialen orientieren (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) 2015; Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 2022). Die nachfolgenden Potenzialarten werden von oben nach unten eingeschränkter.

- **Geographisches Potenzial:** Das geographische Potenzial beschreibt das theoretisch maximal nutzbare Ausmaß einer Ressource. Im vorliegenden Fall umfasst dies die gesamte landwirtschaftliche Nutzfläche in Deutschland. Dieses Potenzial wird ohne Berücksichtigung von Restriktionen oder Limitationen betrachtet.
- **Technisches Potenzial:** Das technische Potenzial berücksichtigt die technologischen und physikalischen Begrenzungen, die sich aus Faktoren der Topographie der Landschaft und den technischen Eigenschaften der APV ergeben. Technische Barrieren, die die Installation oder den Betrieb der Anlagen beeinträchtigen, sind beispielsweise Hangneigung oder Verschattung.
- **Realisierbares Potenzial:** Das realisierbare Potenzial stellt die effektive Fläche dar, die unter Berücksichtigung aller Restriktionen für APV zur Verfügung steht. Hier werden von der gesamten landwirtschaftlichen Grundfläche alle Flächen abgezogen, die aufgrund gesetzlicher Vorgaben oder naturschutzrechtlicher Belange nicht bebaubar sind. Das realisierbare Potenzial berücksichtigt auf Basis des technischen Potenzials alle gesetzlichen und naturschutzrechtlichen Aspekte.
- **Erschließbares Potenzial:** Das erschließbare Potenzial repräsentiert die endgültige, realisierbare Fläche, die am besten für APV genutzt werden könnte. Bei der Bewertung werden weitere ökologische und soziale Kriterien berücksichtigt, die die Eignung einer Fläche für APV beeinflussen können. Das erschließbare Potenzial berücksichtigt also alle Ausschlusskriterien und weist zusätzlich die Gebiete mit besonderem Synergiepotenzial oder geringer Nutzungskonkurrenz aus.

3.1 Realisierbareres Potenzial

Geographisches Potenzial: Die vorliegende Untersuchung nutzt als geographisches Potenzial die landwirtschaftlichen Schläge (Ackerland, Grünland und Dauerkulturen). Diese Schläge bieten die Möglichkeit, sowohl für die Landwirtschaftsproduktion als auch für die Energieproduktion genutzt zu werden und stellen somit die Grundkulisse für APV dar. Konversionsflächen wurden aufgrund ihres sehr geringen Potenzials und ihrer besseren Eignung für PV-FFA nicht berücksichtigt.

Technisches Potenzial: Technische Begrenzung erfolgt aufgrund der Hangneigung eines Gebietes. APV-Anlagen können ab einer gewissen Hangneigung nicht effektiv genutzt werden: Hohe Hangneigungen bedingen eine suboptimale Ausrichtung der PV-Module gegenüber der

⁵ Geoinformationssysteme (GIS) sind Informationssysteme zur Erfassung, Bearbeitung, Verwaltung, Organisation, Analyse und Präsentation räumlicher Daten (Back et al. 2019, S. 337).

Sonne, wodurch eine effektive Energieproduktion behindert wird. Darüber hinaus vermindert sich die spezifische Ertragsdichte der Anlage pro überbauter Flächeneinheit (Holst und Kertscher, P., Grenzdörfer, G. 2012). Probleme zeigen sich jedoch nicht nur hinsichtlich der Effizienz, sondern werden auch durch technische Grenzen der Aufständigung deutlich: Das vertikale APV-System des Herstellers Next2Sun kann nur auf Flächen mit einer Hangneigung von maximal 20 % errichtet werden (Lahr 2022). In dieser Untersuchung werden alle Flächen mit einer gemittelten Hangneigung, die größer als 20 % ist, aus der Kulisse ausgeschlossen.

Realisierbares Potenzial: Auf Basis des technischen Potenzials werden zur Ermittlung des realisierbaren Potenzials Ausschlussflächen aus der Gebietskulisse entfernt und die landwirtschaftlichen Schläge bei Teilüberlappung zugeschnitten. Die Ausschlusskriterien beruhen auf verbindlichen gesetzlichen Vorschriften oder technischen Restriktionen und sind daher unumgänglich. Durch die konsequente Beachtung dieser Ausschlusskriterien wird sichergestellt, dass die potenziellen APV-Projekte den gesetzlichen Bestimmungen entsprechen, die technischen Anforderungen erfüllen und den Umweltschutz berücksichtigen.

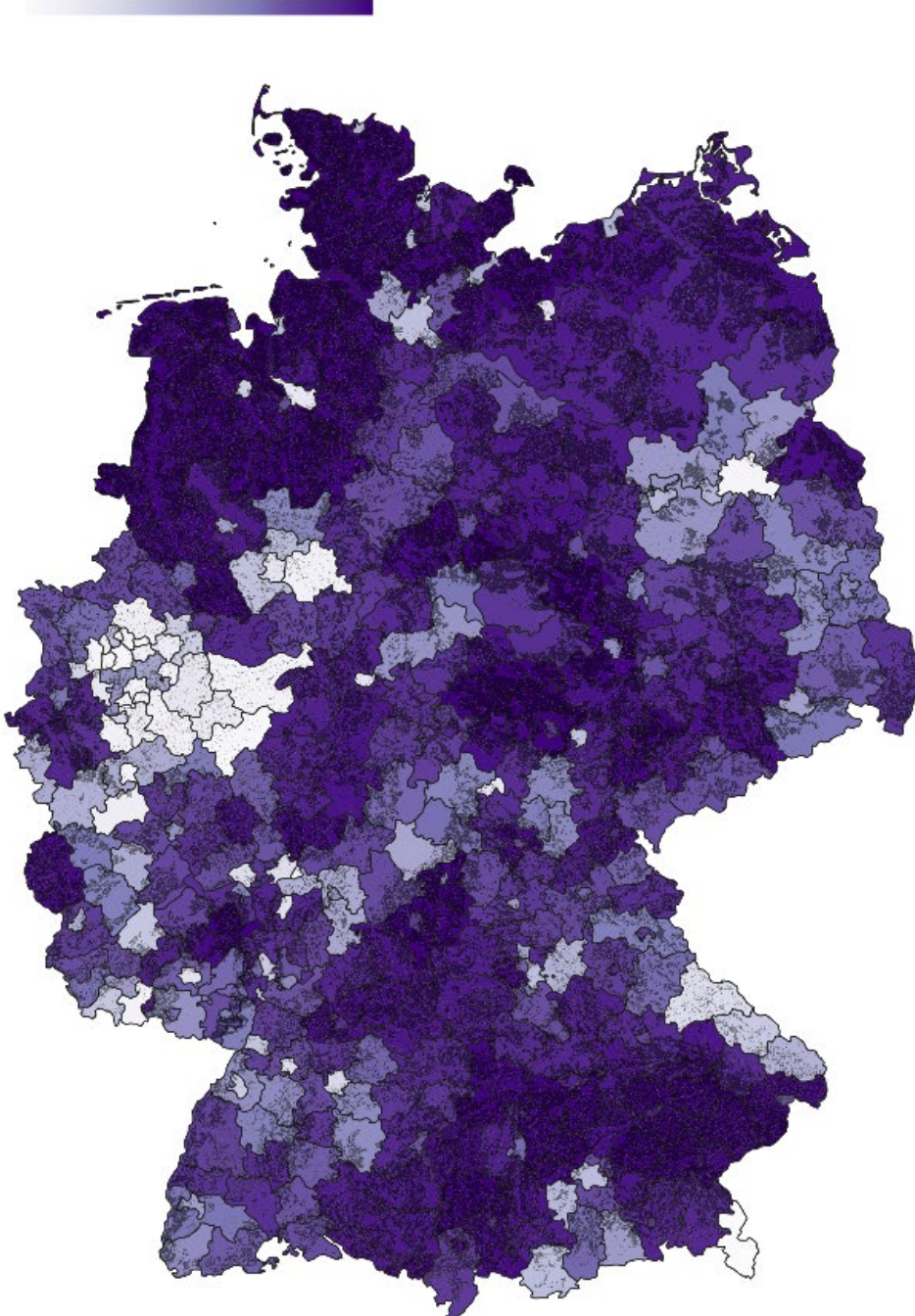
Alle Ausschlusskriterien, die bei der Identifizierung des technischen und realisierbaren Potenzials berücksichtigt werden, sind inklusive der Datenquelle und der gesetzlichen Vorschriften in Tabelle 3-1 aufgeführt.

Abbildung 3-1 zeigt die Flächen innerhalb Deutschlands, die im Rahmen des realisierbaren Potenzials grundsätzlich für eine Bebauung durch Agri- bzw. Freiflächen-PV möglich wären. Die Landkreise sind eingefärbt anhand des Anteils der Potenzialflächen zur Landkreisfläche. Insgesamt handelt es sich um 13.124.535 ha an Fläche, die theoretisch für Photovoltaikprojekte genutzt werden könnte. Dies entspricht 37 % der deutschen Landesfläche.

Abbildung 3-1: Realisierbares Gesamtpotenzial für Agri-PV

Agri-PV Potenziale Gesamt

(Anteil an Fläche in Region)



Source: Öko-Institut e. V.

Tabelle 3-1: Ausschlusskriterien

| Kategorie | Bezeichnung | Datenquelle | Begründung |
|--------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|--|
| Biosphärengebiet | Kernzonen | BfN | BNatSchG § 25: Nur Maßnahmen, die dem Schutz der Pflege oder der Entwicklung dienen, sind erlaubt. |
| Biotope | Geschützte Biotope | BfN | BNatSchG § 30: Eingriffe, die die Funktion beeinträchtigen, sind verboten. |
| Flughäfen und Flugplätze | Flächen für Flugverkehr | DLM250 | Luftverkehrsgesetz (LuftVG) § 8: Anlagen dürfen den Flugverkehr nicht gefährden. |
| Geländeneigung | Hangneigung größer 20 % | EU-DGM | Keine spezifischen gesetzlichen Beschränkungen, jedoch erhöhte technische Anforderungen und Risiken. |
| Gewässer | Fließgewässer und stehende Gewässer | DLM250 | Wasserhaushaltsgesetz (WHG) § 35: Anlagen dürfen Gewässer und deren Nutzung nicht beeinträchtigen. |
| Landschaftsschutzgebiete | | BfN | BNatSchG § 26: Anlagen dürfen den besonderen Schutzzweck nicht beeinträchtigen. Aber prinzipiell möglich. |
| Nationale Naturmonumente | | BfN | BNatSchG § 22: Anlagen könnten verboten sein, wenn sie den Schutzzweck des Naturmonuments beeinträchtigen. |
| Nationalpark | | BfN | BNatSchG § 24: Eingriffe, die die Ziele gefährden, sind verboten. |
| Natura 2000-Gebiete | FFH & Vogelschutzgebiete | BfN | Errichtung nach Baurecht im Einzelfall möglich, allerdings nach EEG § 37 Abs. 3. aus der Förderkulisse ausgeschlossen. |
| Naturdenkmale | Flächenhafte Naturdenkmale | BfN | BNatSchG § 28: Eingriffe, die die Schutzzwecke beeinträchtigen, sind verboten. |
| Naturschutzgebiete | | BfN | Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG) § 23: Anlagen dürfen Erhaltungsziele oder den Schutzzweck nicht gefährden. |
| Schienenstrecken | Bahnstrecken und Bahnverkehrsanlagen | DLM250 | Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO) § 4: Anlagen dürfen den Bahnbetrieb nicht gefährden oder behindern. |
| Siedlungsflächen | Wohngebäude | DLM250 | Laut Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) § 3 sind Schutzabstände zu Wohngebieten notwendig, um die Immissionen zu minimieren. |
| | Industrie und Gewerbegebiete | DLM250 | Keine spezifischen gesetzlichen Beschränkungen, jedoch nicht vorrangige Gebietskulisse für APV. Außerdem nicht in Flächenkulisse enthalten. |
| Straßen | Bundesautobahnen | DLM250 | Beibehaltung des 15m-Korridors nach EEG 2021 § 37 Abs. 1 |
| | Weitere Straßen | DLM250 | Beibehaltung des 15m-Korridors nach EEG 2021 § 37 Abs. 1 |
| | Wege | DLM250 | Nicht in Gebietskulisse enthalten |
| Überschwemmungsgebiete | Überflutungsflächen HQ100 | Bundesanstalt für Gewässerkunde | WHG § 76: Anlagen dürfen das Hochwasserrisiko nicht erhöhen. |
| Wald- und Forstflächen | Wald | DLM250 | Bundeswaldgesetz (BWaldG) § 9: Umwandlung von Wald in andere Nutzungsarten ist für Photovoltaikanlagen verboten. Abstandspuffer von Pauschal 71 m aufgrund der Verschattungswirkung (66 m westlich, 53 m östlich, 71 m südlich und 28 m nördlich). |
| | Gehölz | DLM250 | |
| Wasserschutzgebietszonen | Zone I und II | BfN | WHG § 51: Anlagen dürfen die Wasserqualität nicht gefährden. |

3.2 Erschließbares Potenzial

Das erschließbare Potenzial dient als finale Darstellung der realisierbaren Fläche, die für APV optimal genutzt werden könnte. Es beinhaltet die Berücksichtigung weiterer Restriktionskriterien wie die Art der Anbaukultur und Bodengüte. Somit berücksichtigt das erschließbare Potenzial sowohl Restriktions- als auch Ausschlusskriterien und weist zudem Gebiete mit besonderem Synergiepotenzial und niedriger Nutzungskonkurrenz aus.

Zwei wichtige Säulen zur Identifizierung von Synergien und Nutzungskonkurrenz sind die detaillierte Betrachtung der Landnutzung und die der Bodengüte. Hoch aufgeständerte APV-Anlagen beeinflussen unmittelbar die darunterliegende Landwirtschaft. Daher können speziell durch die Analyse der Landnutzung Synergien identifiziert werden. Im Gegensatz dazu sind bei vertikalen bifazialen Anlagen und Interspace-APV die direkten Wechselwirkungen mit der Landwirtschaft weniger relevant. In diesem Fall spielen die Bodengüte und damit verbundene Nutzungskonkurrenz eine bedeutendere Rolle bei der Bestimmung der Eignungsflächen. Daher werden im Folgenden zwei getrennte Analysen durchgeführt.

3.2.1 Synergieeffekte

Einige Kulturen erweisen sich als besonders vorteilhaft für die Implementierung von hoch aufgeständerten APV-Anlagen, wie bereits in Kapitel 2.2 beschrieben wurde. Besonders Sonderkulturen wie Wein-, Obst- und Gemüseanbau bieten ein hohes Wertpotenzial pro Fläche und sind empfindlich gegenüber Umweltfaktoren, wodurch sie vom Schutz durch PV-Überdachung profitieren können. Durch eine solche Überdachung kann auf weitere Schutzstrukturen wie Hagelnetze verzichtet werden. Positive Wachstumsergebnisse konnten zum Beispiel im Anbau von Gemüse erzielt werden (Beck et al. 2012). In Weinanbaugebieten können APV-Anlagen dazu beitragen, negative Auswirkungen des Klimawandels wie übermäßige Sonneneinstrahlung und Temperaturschwankungen zu mindern. Kernobst wie Äpfel können ebenfalls von APV profitieren, indem teure Schutzsysteme gegen extreme Witterungseinflüsse durch die PV-Module ersetzt werden können (Trommsdorff et al. 2022). Für die Analyse des erschließbaren Potenzials anhand von Synergieeffekten wird der Fokus auf die Dauerkulturen Wein und Kernobst sowie die Sonderkulturen Gemüse und Erdbeeren gelegt.

Die Identifikation dieser besonders geeigneten Flächen mit hohem Synergiepotenzial erfolgt über eine satellitengestützte Landnutzungsklassifikation. Preidl et al. (2020) haben einen datenbasierten Ansatz zur Landnutzungsklassifikation in Deutschland entwickelt, der auf Fernerkundungsdaten aus dem Sentinel-2A-Satellitenprogramm basiert und eine Einteilung in 23 Bewirtschaftungsarten ermöglicht. Die Klassifikation nutzt Fernerkundungsdaten aus dem Jahr 2016 mit einer räumlichen Auflösung von 20 m. Fruchtwechselfolgen werden nicht berücksichtigt. Für das erschließbare Potenzial werden die satellitengestützten Daten zu Dauerkulturen mit den realisierbaren Potenzialflächen verschnitten. Synergieeffekte werden für die Flächen identifiziert, die a) als landwirtschaftliche Nutzungsart Dauerkulturen vorweisen und b) im vorherigen Schritt als realisierbares Potenzial identifiziert wurden. Die satellitengestützte Landnutzungsklassifikation hat den Vorteil, dass die Kategorisierung der Flächen für ganz Deutschland verfügbar ist. Allerdings führt dies zu regionalen Ungenauigkeiten, da die Nutzung auf Grundlage von Fernerkundungsdaten nicht immer der tatsächlichen Flächennutzung entspricht. Zusätzlich ist zu erwähnen, dass die Klassifikation aus dem Jahr 2016 stammt. Die Landnutzung unterscheidet sich damit teilweise von der aktuellen Nutzung der Flächen.

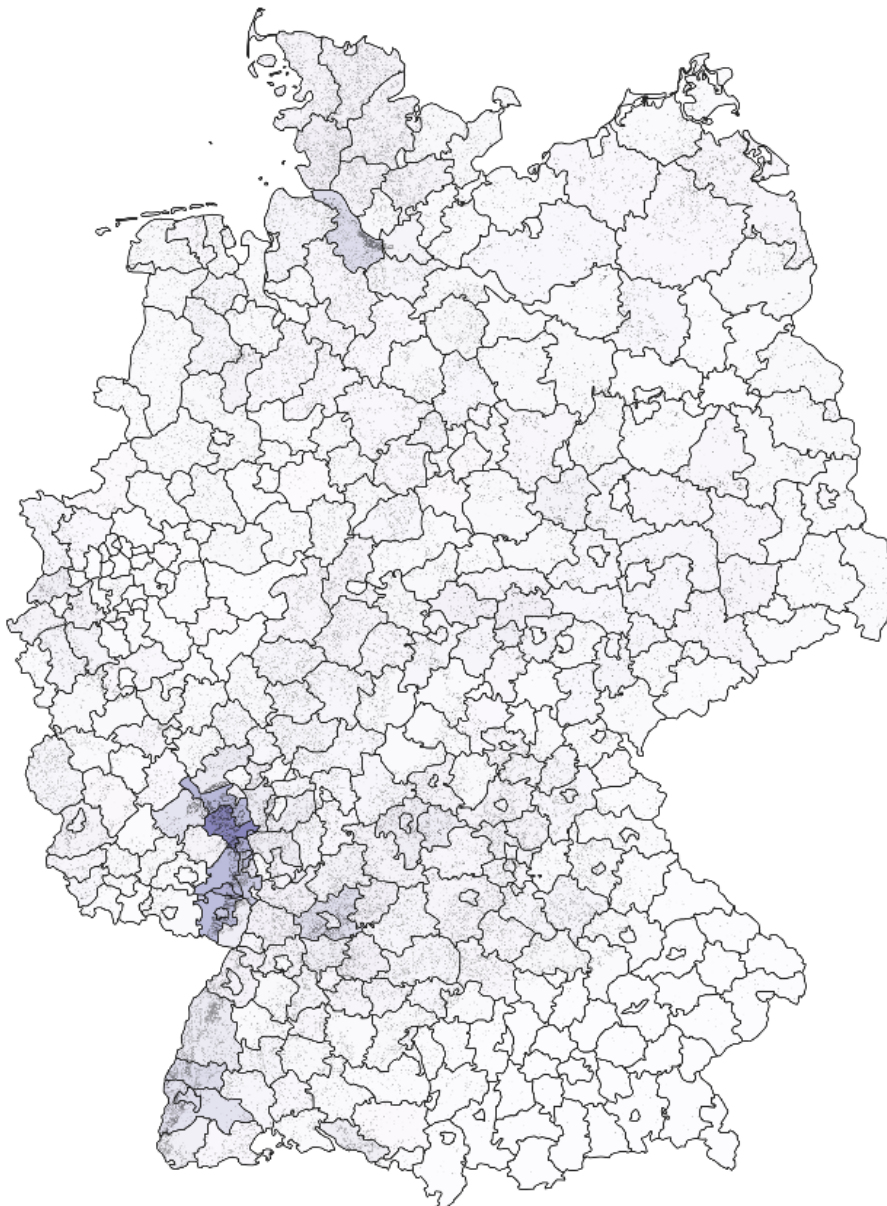
Abbildung 3-2 zeigt die Flächen innerhalb Deutschlands, die Aufgrund des Anbaus von Dauer- und Sonderkulturen Synergieeffekte zwischen landwirtschaftlicher und energetischer Nutzung

aufweisen. Insgesamt handelt es sich deutschlandweit um eine Gesamtfläche von 402.632 ha. Dies entspricht rund 3 % der gesamten realisierbaren Potenzialfläche für Freiflächen-PV.

Abbildung 3-2: Erschließbares Potenzial für Agri-PV mit Synergieeffekten

Agri-PV Potenziale Dauerkulturen

(Anteil an Fläche in Region)



3.2.2 Geringe Nutzungskonkurrenz

Zur Identifikation von Potenzialflächen mit geringer Nutzungskonkurrenz ist die Analyse der Bodengüte sinnvoll. Insbesondere bei vertikal aufgeständerten Anlagen und Interspace-APV ist das ackerbauliche Ertragspotenzial entscheidend, da diese Technologien vor allem auf Acker- und Grünlandflächen effektiv eingesetzt werden können.

Um das ackerbauliche Ertragspotenzial räumlich zu quantifizieren, kann das sogenannte Müncheberger „Soil Quality Rating“ (SQR) herangezogen werden (Müller et al. 2008). Die Bewertungsmethodik wurde vom Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung entwickelt. Die Eignung von Böden für die landwirtschaftliche Nutzung wird dabei von 0 bis 102 Punkten bewertet, wobei 102 den besten Wert darstellt. Auf Böden mit sehr geringer Qualität (SQR < 50) steht Agri-PV in Konkurrenz mit Freiflächen-PV-Anlagen⁶. Auf Böden mit sehr hoher Qualität (SQR > 70) steht die Errichtung von APV-Anlagen in erster Linie in Konkurrenz zur landwirtschaftlichen Nutzung. Diese Böden sind für die Nahrungsmittelproduktion von großer Bedeutung, da sie hohe Erträge ermöglichen. Auch wenn durch die Doppelnutzung mit einer APV-Anlage nach DIN SPEC 91434 nur maximal 15 % der Anbaufläche und 33 % des Ertrags verloren gehen dürfen, sollte der Schwerpunkt in diesen Bereichen auf der Aufrechterhaltung der Nahrungsmittelproduktion liegen (Deutsches Institut für Normung (DIN) 2021, S. 17). Um Nutzungskonflikte zu vermeiden, werden in dieser Analyse daher Flächen mit geringer Bodengüte (SQR 50 – 60) und mittlerer Bodengüte (SQR 60 – 70) als besonders geeignete Potenzialflächen identifiziert.

Daten zum SQR liegen als Rasterdatei (GeoTIFF) mit einer Pixelgröße von ca. 250 x 250 m vor (siehe Abbildung 3-3). Für die Analyse der Flächen des erschließbaren Potenzials mit geringer Nutzungskonkurrenz wurden aus dem realisierbaren Potenzial die Gebiete mit SQR Werten der beiden Kategorien geringe und mittlere Bodengüte genutzt.

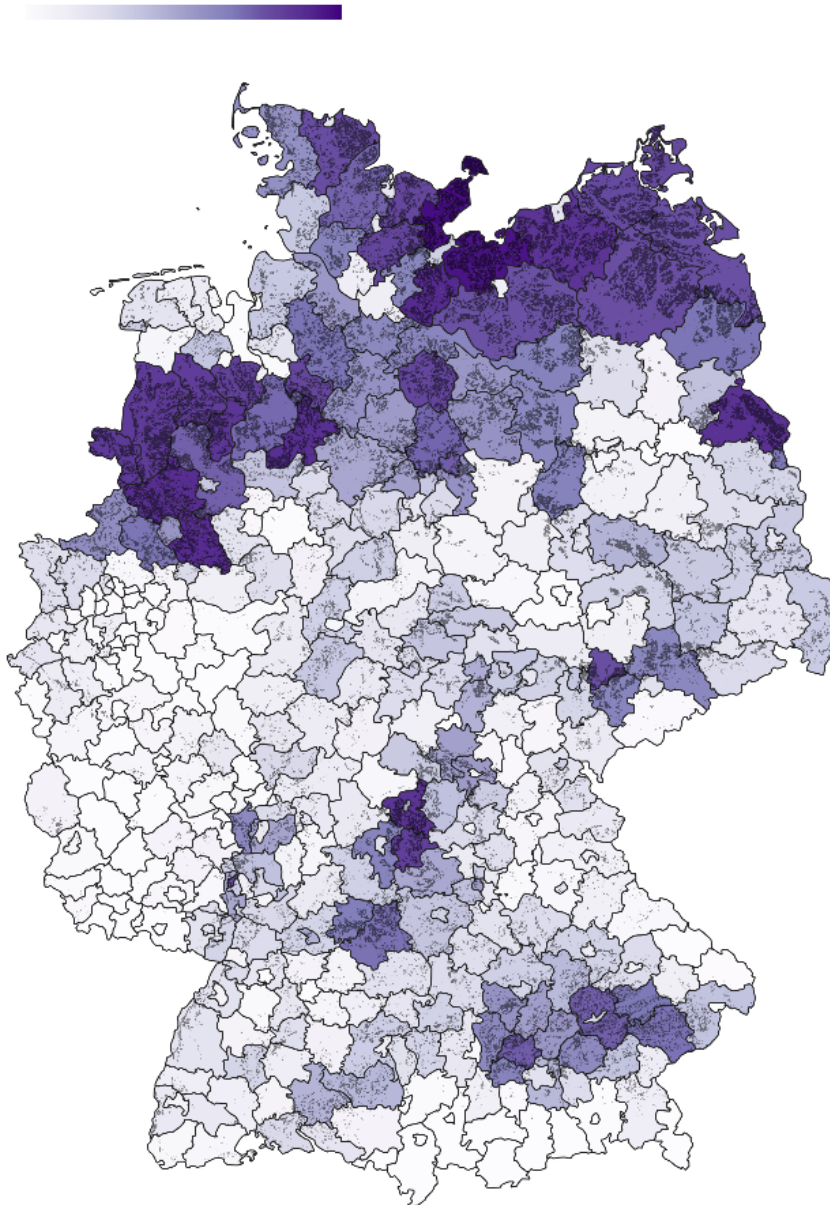
⁶ In Baden-Württemberg wird bspw. von der Öffnungsklausel Gebrauch gemacht, wodurch PV-FFA in sogenannten „landwirtschaftlich benachteiligten Gebieten“ (Flächen mit geringem SQR-Wert) EEG-förderfähig sind Freiflächenöffnungsverordnung des Landes Baden-Württemberg (FFÖ-VO BW) 2017.

Abbildung 3-4 zeigt die erschließbaren Potenzialflächen für Agri-PV Projekte mit geringer Nutzungskonkurrenz mit einer geringen bis mittleren Bodengüte zwischen 50 und 70. Die Flächen mit Synergieeffekten (Dauer- und Sonderkulturen) sind hier nicht enthalten. Deutschlandweit handelt es sich um eine Fläche von 3.937.654 ha und damit um 30 % der gesamten PV-Freiflächen Potenzialfläche.

Abbildung 3-4: Erschließbares Potenzial für Agri-PV mit geringer Nutzungskonkurrenz

Agri-PV Potenziale SQR 50-70 ohne Dauerkulturen

(Anteil an Fläche in Region)



Source: Öko-Institut e. V.

4 Literaturverzeichnis

Back, Y.; Zischg, J.; Bremer, M.; Rutzinger, M., Kleidorfer, M. (2019): Einsatzmöglichkeiten von Geoinformationssystemen in der Siedlungswasserwirtschaft am Beispiel Einbindung dezentraler Entwässerungssysteme zur Entlastung des städtischen Abwassernetzes (Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 71).

Bao, K.; Kalisch, L.; Santhanavanich, T.; Thrän, D.; Schröter, B. (2022): A bottom-up GIS-based method for simulation of ground-mounted PV potentials at regional scale (Energy Reports, 8).

BauGB (2023): Baugesetzbuch in der Fassung der Bekanntmachung vom 3. November 2017. (BGBl. I S. 3634), das zuletzt durch Artikel 1 Des Gesetzes BGBl. I, S. 3634, das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 3. Juli 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 176) geändert worden ist.

Beck, M.; Bopp, G., Goetzberger, A.; Obergfell, T.; Reise, C., Schindele, S. (2012): Combining PV and Food Crops to Agrophotovoltaic – Optimization of Orientation and Harvest (27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition).

Böhm, Jonas; Witte, Thomas de; Michaud, Coline (2022): Land use Prior to Installation of Ground-mounted Photovoltaic in Germany—GIS-analysis Based on MaStR and Basis-DLM. In: *Z Energiewirtschaft* 46 (2), S. 147–156. DOI: 10.1007/s12398-022-00325-4.

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (Hg.) (2023): Nutzungsdifferenzierte Bodenübersichtskarte von Deutschland 1:1.000.000. Online verfügbar unter <https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Boden/>, zuletzt geprüft am 08.08.2023.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (2016): Klimaschutzplan 2050. Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. Berlin. Online verfügbar unter https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan_2050_bf.pdf, zuletzt geprüft am 22.08.2023.

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (2015): Räumlich differenzierte Flächenpotentiale für erneuerbare Energien in Deutschland. Berlin (BMVI-Online-Publikation 08/2015.). Online verfügbar unter https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BMVI/BMVIOnline/2015/DL_BMVI_Online_08_15.pdf;jsessionid=6873CED15BC8B59BD7B65DAD65A92A13.live11294?__blob=publicationFile&v=2, zuletzt geprüft am 22.08.2023.

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (Hg.) (2022): Analyse der Flächenverfügbarkeit für Windenergie an Land post-2030. Online verfügbar unter https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/analyse-der-flaechenverfuegbarkeit-fur-windenergie-an-land-post-2030.pdf?__blob=publicationFile&v=1, zuletzt geprüft am 22.02.2024.

Bundesnetzagentur (BNetzA) (2021): Verwaltungsverfahren. Az: 8175-07-00-21/1. Online verfügbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/Ausschreibungen/Statistiken/Statistik_InnAusV.xlsx?__blob=publication-File&v=3, zuletzt geprüft am 22.08.2023.

- Bundesnetzagentur (BNetzA) (2023): Statistiken: Innovationsausschreibungen. Online verfügbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_, zuletzt geprüft am 22.08.2023.
- Bundesregierung (2023): Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 21. Juli 2014, das zuletzt durch Artikel 4 des Gesetzes vom 3. Juli 2023 geändert worden ist.
- destatis (2021): Strukturwandel in der Landwirtschaft hält an. destatis. Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2021/01/PD21_028_412.htm, zuletzt aktualisiert am 21.01.2021, zuletzt geprüft am 26.03.2024.
- destatis (2022): Bodenfläche nach Art der tatsächlichen Nutzung. Fachserie 3, Reihe 5.1. Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft->, zuletzt geprüft am 18.06.2023.
- Deutsches Institut für Normung (DIN) (2021): Agri-Photovoltaik-Anlagen – Anforderungen an die Landwirtschaftliche Hauptnutzung. DIN SPEC 91434:2021-05. Berlin.
- Dinesh, H.; Perace, J. (2016): The potential of agrivoltaic systems (Renewable and Sustainable Reviews 54).
- Einig, K.; Knieling, J.; Mattern, S.; Panebianco, S.; Schmidt-Kaden, P. I.; Trinemeier, C. et al. (2022): Regionalplanung für einen raumverträglichen Ausbau von Freiflächen- Photovoltaikanlagen (FPV). Hannover.
- Freiflächenöffnungsverordnung des Landes Baden-Württemberg (FFÖ-VO BW) (Hg.) (2017): Verordnung der Landesregierung zur Öffnung der Ausschreibung für Photovoltaik-Freiflächenanlagen für Gebote auf Acker- und Grünlandflächen in Benachteiligten Gebieten, zuletzt geändert durch Verordnung vom 21. Juni 2022.
- Gerhards, D.; Schubert, L.; Lenz, C.; Wittmann, F.; Richter, F.; Volz, B. (2022): Agri-PV – Kombination von Landwirtschaft und Photovoltaik. Hg. v. Sächsische Landesanstalt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG). Dresden. Online verfügbar unter <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/39194/documents/60292>, zuletzt geprüft am 22.08.2023.
- Götzberger, A.; Zastrow, A. (1981): Kartoffeln unter dem Kollektor (Sonnenenergie, 3).
- Holst, A.; Kertscher, P., Grenzdörfer, G. (2012): GIS-basierte Ermittlung von Freiflächen-PV-Potenzialen in Mecklenburg-Vorpommern. Hg. v. GITO mbH Verlag. Berlin (GeoForum 2012 - GIS schafft Energie).
- Kaltschmitt, M.; Streicher, W.; Wiese, A. (2020): Erneuerbare Energien. Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. Berlin, Heidelberg.
- Katsikogiannis, O. A.; Ziar, H.; Isabella, O. (2022): Integration of Bifacial Photovoltaics in Agrivoltaic Systems: A Synergistic Design Approach (Applied Energy, 309).

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

Kroll, F.; Haase, D. (2010): Does demographic change affect land use patterns? (Land Use Policy, Heft 3).

Lahr, S. (2022): Bottom-up GIS Potential Analysis, Grid Integration Impacts, and Sustainability Assessment of Vertical Bifacial Agri-Photovoltaics. Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik (Fraunhofer IEE). Online verfügbar unter <https://doi.org/10.24406/publica-213>, zuletzt geprüft am 22.03.2023.

LBO BW (2023): Landesbauordnung für Baden-Württemberg. Anhang zu § 50 Abs. 1 Nr. 3 c. Online verfügbar unter <https://www.landesrecht-bw.de/jportal/?quelle=jlink&query=BauO+BW+Anhang&psml=bsbawueprod.>, zuletzt geprüft am 07.06.2023.

Müller, L.; Schindler, U.; Berendt, A.; Smolentseva, E.; Smolentsev, B., Eulenstein, F. (2008): Das Müncheberger Soil Quality Rating (SQR) - ein praktikables Verfahren zur Bodenbewertung/Bodenschätzung im globalen Maßstab? (Berichte der DBG).

Peters, A.; Bruckermann, T.; Schlüter, K. (2017): Lichtabhängigkeit der Photosyntheserate (Forschendes Lernen im Experimentalpraktikum Biologie).

Preidl, S.; Lange, M.; Doktor, D. (2020): Land cover classification map of Germany's agricultural area based on sentinel-2A data from 2016 (Remote Sensing of Environment, 240).

Reker, S.; Schneider, J.; Gerhards, C. (2022): Integration of Vertical Solar Power Plants into a Future German Energy System (Smart Energy, 7).

Schindele, S. (2021): Nachhaltige Landnutzung mit Agri-Photovoltaik: Photovoltaikausbau im Einklang mit der Lebensmittelproduktion: Szenarioanalyse zur Inanspruchnahme landwirtschaftlicher Nutzflächen durch Photovoltaik in Deutschland bis 2050 (GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society, 2).

Sekiyama, T.; Nagshima, A. (2019): Solar Sharing for Both Food and Clean Energy Production: Performance of Agrivoltaic Systems for Corn, a Typical Shade-Intolerant Crop (Environments, 6).

Trommsdorff, M.; Gruber, S.; Keinath, T.; Hopf, M.; Hermann, C.; Schönberger, F. et al. (2022): Agri-Photovoltaik: Chance für Landwirtschaft und Energiewende. Ein Leitfaden für Deutschland. Stand April 2022. Hg. v. Fraunhofer ISE. Freiburg.

Weselek, A.; Baeuerle, A.; Hartung, J.; Zikeli, S.; Lewandowski, I.; Högy, P. (2021): Agrivoltaic System Impacts on Microclimate and Yield of Different Crops Within an Organic Crop Rotation in a Temperate Climate (Agronomy for Sustainable Development, 41, Issue No. 5).

Wirth, H. (2019): Integrierte Photovoltaik - Flächen für die Energiewende. Positionspapier. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE), zuletzt geprüft am 22.08.2023.