



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Sarah Weber

Potential und Wirtschaftlichkeit der Nutzung von Agri-Photovoltaik-Anlagen auf landwirtschaftlichen Flächen

Sarah Weber

**Potential und Wirtschaftlichkeit der
Nutzung von Agri-Photovoltaik-Anlagen
auf
landwirtschaftlichen Flächen**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Maschinenbau / Energie- und Anlagensysteme
am Department Maschinenbau und Produktion
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Erstprüferin: Prof. Dr.-Ing. Birgit Koeppen
Zweitprüfer: Prof. Dr.-Ing. Tankred Müller

Abgabedatum: 26.08.2025

Zusammenfassung

Sarah Weber

Thema der Bachelorthesis

Potential und Wirtschaftlichkeit der Nutzung von Agri-Photovoltaik-Anlagen auf landwirtschaftlichen Flächen

Stichworte

Agri-Photovoltaik, Agri-PV, Flächenkonflikt, Flächen-Doppelnutzung, Klimaresilienz, Landnutzungseffizienz, Stromgestehungskosten

Kurzzusammenfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, das Potential und die Wirtschaftlichkeit von Agri-Photovoltaik auf landwirtschaftlichen Flächen in Deutschland zu untersuchen. Die Untersuchung basiert auf vorhandenen Studien und ist eine qualitative Zusammenfassung und Analyse der Forschungsergebnisse. Es zeigte sich, dass eine Anpassung der Anlagen an die jeweilige Kultur nötig ist, sich dann aber die Resilienz gegenüber Klimawandelfolgen erhöht. Der Flächenbedarf ist größer als bei PV-Freiflächenanlagen, wobei die Landnutzungseffizienz aufgrund der Doppelnutzung steigt. Aus wirtschaftlicher Sicht ist die Technologie bereits konkurrenzfähig, obwohl mit hohen Investitionskosten gerechnet werden muss.

Sarah Weber

Title of the paper

Potential and economic efficiency of using agri-photovoltaic systems on agricultural land

Keywords

Agri-Photovoltaics, Agri-PV, Land Use Conflict, Dual Land Use, Climate Resilience, Land Equivalent Ratio (LER), Levelized Costs of Electricity (LCOE)

Abstract

The aim of this paper is to examine the potential and economic viability of agri-photovoltaics on agricultural land in Germany. The study is based on existing studies and is a qualitative summary and analysis of the research results. It was found that the systems need to be adapted to the respective crop, but that this increases resilience to the effects of climate change. The space requirement is greater than for ground-mounted PV systems, although land use efficiency increases due to dual use. From an economic perspective, the technology is already competitive, although high investment costs must be expected.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei meiner Betreuerin Prof. Dr. Birgit Koeppen bedanken, die mich während der gesamten Bearbeitungszeit freundlich unterstützt und mit wertvollen Anregungen zu Struktur und Inhalt meiner Arbeit begleitet hat.

Ich bedanke mich auch bei Prof. Dr. Tankred Müller für das Übernehmen der Rolle des Zweitprüfers und für das zur Verfügung stellen eines Arbeitsplatzes.

Mein besonderer Dank gilt meiner Familie und meinen Freunden und Freundinnen, die mir mit hilfreichem Austausch, Geduld und Ermutigungen zur Seite standen und mich während des ganzen Studiums unterstützt haben.

Vielen Dank!

Aufgabenstellung

für die Bachelorthesis

von Frau Sarah Weber

Matrikel-Nummer: XXXXXXXXXX

Thema: Potential und Wirtschaftlichkeit der Nutzung von Agri-Photovoltaik-Anlagen auf landwirtschaftlichen Flächen

Schwerpunkte:

Es werden in der heutigen Zeit nachhaltige Lösungen für Energie- und Nahrungsmittelproduktion gesucht. Agri-Photovoltaik stellt eine innovative Möglichkeit dar, landwirtschaftliche Flächen sowohl für die Energieerzeugung als auch für die Nahrungsmittelproduktion zu nutzen. Durch diese Doppelnutzung von Flächen können die Flächenkonflikte reduziert werden.

Ziel dieser Bachelorarbeit ist es, das Potential und die Wirtschaftlichkeit von Agri-Photovoltaik-Anlagen auf landwirtschaftlichen Flächen in Deutschland zu untersuchen.

Zunächst werden die Grundlagen der Agri-Photovoltaik erläutert, einschließlich der unterschiedlichen Anlagenarten, landwirtschaftlicher Nutzungsmöglichkeiten, aktueller Marktsituation sowie relevanter DIN-Normen und gesetzlicher Rahmenbedingungen.

Anschließend wird das ökologische Potential von Agri-Photovoltaik betrachtet, das sich je nach Anlagenart und landwirtschaftlicher Nutzung ergibt. Im nächsten Schritt soll die Leistung der Anlagentypen untersucht und die für Agri-Photovoltaik nutzbare Fläche in Deutschland abgeschätzt werden.

Die Wirtschaftlichkeitsanalyse beschäftigt sich zunächst mit den Stromgestehungskosten der Agri-Photovoltaik und deren Zusammensetzung. Im Bezug auf den wirtschaftlichen Aspekt soll Agri-Photovoltaik abschließend mit Freiflächenanlagen und rein landwirtschaftlicher Nutzung verglichen werden.

Datum

Erstprüfer/in

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	VII
Symbolverzeichnis	VIII
Abkürzungsverzeichnis.....	IX
Tabellenverzeichnis.....	X
Abbildungsverzeichnis.....	XI
1 Einleitung	1
2 Grundlagen	2
2.1 Definition und Historie von Agri-Photovoltaik	2
2.2 Unterschiedliche Arten von Agri-Photovoltaik-Anlagen	3
2.2.1 Hochaufgeständerte Anlagen (Kategorie 1).....	3
2.2.2 Bodennahe Anlagen (Kategorie 2).....	5
2.3 Landwirtschaftliche Nutzungsformen von Agri-Photovoltaik	7
3 Rahmenbedingungen	9
3.1 Technische Anforderungen und Definitionen gemäß der DIN-Spezifikationen	9
3.2 Gesetzliche Grundlagen in Deutschland	16
3.2.1 Förderungen und Vorteile	16
3.2.2 Genehmigungsverfahren	17
3.3 Marktanalyse	19
4 Potentiale von Agri-Photovoltaik-Anlagen.....	25
4.1 Ökologisches Potential	25
4.1.1 Auswahl der Kriterien	25
4.1.2 Bewertung anhand der Kriterien	25
4.1.3 Zusammenfassung	36
4.2 Leistungspotential.....	38
4.2.1 Leistung der Anlagentypen	38
4.2.2 Potential der verfügbaren Fläche in Deutschland.....	40
4.2.3 Landnutzungseffizienz	41
4.3 Wirtschaftliches Potential.....	43
4.3.1 Stromgestehungskosten	43
4.3.2 Wirtschaftlicher Vergleich mit Freiflächenanlagen und rein landwirtschaftlicher Nutzung.....	45
4.4 Kritische Bewertung der Untersuchung.....	47
5 Zusammenfassung und Ausblick.....	48
Literatur- und Quellenverzeichnis	49
Anhang	54

Symbolverzeichnis

A_t	Betriebsausgaben im jeweiligen Jahr
i	realer kalkulatorischer Zinssatz
I_0	Investitionsausgaben
$M_{t,el}$	Produzierte Strommenge im jeweiligen Jahr
n	kalkulatorische Nutzungsdauer in Jahren
t	jeweiliges Betriebsjahr

Abkürzungsverzeichnis

Agri-PV	Agri-Photovoltaik
APV-RESOLA	Agrophotovoltaik: Ressourceneffiziente Landnutzung
BOS-Komponenten	Balance of System-Komponenten
DIN SPEC	Deutsches Institut für Normung - Specification
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EPC	Engineering Procurement Construction
GAP	Gemeinsame Agrarpolitik
Fraunhofer ISE	Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme
LCOE	Levelized Cost of Electricity (Stromgestehungskosten)
NABU	Naturschutzbund Deutschland
PAR	Photosynthetisch aktive Strahlung
PV-Freiflächenanlage	Photovoltaik-Freiflächenanlage
TFZ	Technologie- und Förderzentrum

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Landwirtschaftliche Nutzungsformen von Agri-PV-Anlagen nach (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2021).....	8
Tabelle 2: Landwirtschaftliche Hauptnutzung und Nutzungskonzept.....	10
Tabelle 3: Flächenverlust.....	11
Tabelle 4: Landnutzungseffizienz.....	12
Tabelle 5: Installation	13
Tabelle 6: Lichtverfügbarkeit und Verteilung der Module.....	14
Tabelle 7: Wasserverfügbarkeit	15
Tabelle 8: Agri-PV-Forschungsanlagen in Deutschland nach (Fraunhofer ISE, 2024)	23
Tabelle 9: Fallunterscheidung mit Einordnung verschiedener Agri-PV-Standorte.....	26
Tabelle 10: Zusammenfassung der ökologischen Bewertung	37
Tabelle 11: Flächenbedarf von Agri-PV im Vergleich zu PV-Freiflächenanlagen (PV- FFA) nach (Fraunhofer ISE, 2024a)	39
Tabelle 12: Praxiswerte für den Flächenbedarf (Fraunhofer ISE, 2023).....	39
Tabelle 13: Landwirtschaftliche Flächennutzung 2023 (Statistisches Bundesamt, 2025b).....	40

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schema hochaufgeständerter Anlagen; nach (Sunaro, 2025)	4
Abbildung 2: Hochaufgeständerte Agri-PV-Anlage in Heggelbach (BayWa r.e. AG, 2025; Fraunhofer ISE, 2024a)	4
Abbildung 3: Schema bodennaher Anlagen mit festem Winkel (Sunaro, 2025).....	5
Abbildung 4: Installation der Agri-PV-Module in Lemwerder (Wenke, 2025)	6
Abbildung 5: Schema bodennaher Anlagen mit vertikalem oder verstellbarem Winkel; nach (Sunaro, 2025)	6
Abbildung 6: bodennahe vertikale Agri-PV in Donaueschingen (Leroy, n.d.).....	7
Abbildung 7: Globalstrahlung Deutschland – Mittlere Jahressumme 1991 bis 2020 (Deutscher Wetterdienst, n.d.)	20
Abbildung 8: Pilotanlagen der Modellregion Agri-PV BW (Fraunhofer ISE, n.d.)	21
Abbildung 9: Blühstreifen an senkrechter Agri-PV (Bundesinformationszentrum Landwirtschaft, n.d.).....	27
Abbildung 10: Simulierte jährliche Lichtverfügbarkeit verschiedener Agri-PV-Systeme nach (Lahr, 2022).....	29
Abbildung 11: Semitransparentes PV-Modul links (Fraunhofer ISE, n.d.) und Mock-Up eines organischen PV-Moduls rechts (Fraunhofer ISE, n.d.).....	31
Abbildung 12: Agri-PV-Anlage bei Jülich mit V-Form zur Regenwassersammlung (Meier-Grüll et al., 2024)	32
Abbildung 13: Äpfel im geschützten Anbau links und unter Agri-PV rechts (Fraunhofer ISE, n.d.).....	33
Abbildung 14: VitiCULT PV-mobil links (sbp sonne, 2024) und Legehennen unter PV in Schöntal rechts (Fraunhofer ISE, n.d.)	34
Abbildung 15: Landnutzungseffizienz mit Agri-PV im Kartoffelanbau in Heggelbach (Fraunhofer ISE, 2024a)	42
Abbildung 16: Stromgestehungskosten für Erneuerbare Energien und konventionelle Kraftwerke in Deutschland 2024 (Kost et al., 2024).....	44

1 Einleitung

Die Energiewende erfordert einen erheblichen Ausbau erneuerbarer Energien, insbesondere der Photovoltaik. Photovoltaik-Freiflächenanlagen (PV-Freiflächenanlagen) sind mittlerweile wirtschaftlich rentabel, benötigen aber große Flächen, die dann nicht mehr anderweitig zur Verfügung stehen. EEG-geförderte PV-Freiflächenanlagen dürfen zum Schutz hochwertiger landwirtschaftlicher Böden nur auf bestimmten minderwertigen Standorten errichtet werden. Durch die stark gesunkenen Kosten werden allerdings bereits PV-Freiflächenanlagen außerhalb der EEG-Förderung realisiert, womit die Lenkungswirkung nicht mehr greift. Daraus resultiert ein zunehmender Wettbewerb um Flächen zwischen Energieerzeugung und landwirtschaftlicher Nutzung (Fraunhofer ISE, 2024a). Als Schlüsseltechnologie zur Entschärfung dieses Nutzungskonflikts gilt Agri-Photovoltaik (Agri-PV). Bei dieser innovativen Technologie handelt es sich um Solaranlagen, die über landwirtschaftlichen Flächen aufgeständert sind. Durch die Doppelnutzung der Fläche sollen Flächenkonflikte zwischen landwirtschaftlicher Produktion und erneuerbarer Energieerzeugung reduziert werden.

Im Rahmen dieser Arbeit soll das Potential von Agri-PV auf landwirtschaftlichen Flächen in Deutschland untersucht werden. Es existieren derzeit zwei DIN Spezifikationen zu Agri-PV-Anlagen und es gibt bereits Forschungsergebnisse in verschiedenen Bereichen, die aus einigen Projektanlagen gewonnen werden konnten. Die vorliegende Arbeit stützt sich auf die vorhandenen Studien und hat das Ziel, die bisherigen Forschungsergebnisse qualitativ zusammenzutragen und das Potential von Agri-PV herauszuarbeiten.

Zu Beginn der Arbeit werden die Grundlagen inklusive der Unterteilung in verschiedene Anlagenkategorien vorgestellt. Anschließend werden die Rahmenbedingungen, zu denen die DIN Spezifikationen sowie gesetzliche Grundlagen gehören, aufgezeigt. Auf der Grundlage der zu Beginn vorgenommenen Anlagenkategorisierung wird dann das ökologische Potential betrachtet und anhand von ausgewählten Kriterien bewertet. Im Anschluss werden außerdem das Leistungspotential und das wirtschaftliche Potential untersucht.

2 Grundlagen

Die folgenden Grundlagenkapitel beschäftigen sich mit Basisinformationen, die wichtig für das Verständnis der Thematik sind. Dazu zählen die Definition und Historie von Agri-PV sowie die unterschiedlichen Anlagenarten und landwirtschaftlichen Nutzungsmöglichkeiten.

2.1 Definition und Historie von Agri-Photovoltaik

Bei den herkömmlichen PV-Freiflächenanlagen steht die Fläche nur für die Stromerzeugung zur Verfügung. Im Gegensatz dazu findet bei Agri-PV eine Doppelnutzung der Fläche statt, indem die gleichzeitige Produktion von Strom und landwirtschaftlichen Erzeugnissen auf derselben Fläche ermöglicht wird. Die Technologie wird daher als ein möglicher Lösungsansatz für die zunehmende Flächenkonkurrenz zwischen regenerativer Energieproduktion und Lebensmittelproduktion betrachtet und hilft, den wachsenden Bedarf an Solarstrom zu decken (Fraunhofer ISE, 2024a). Die DIN SPEC 91434 für landwirtschaftliche Hauptnutzung definiert Agri-PV als „kombinierte Nutzung ein und derselben Landfläche für landwirtschaftliche Produktion als Hauptnutzung und für Stromproduktion mittels einer PV-Anlage als Sekundärnutzung“ (Deutsches Institut für Normung e.V. (Hg.), 2021, p. 6). Die landwirtschaftliche Nutzung soll also überwiegen bzw. Priorität haben.

Das Konzept der Agri-PV wurde bereits 1981 von Goetzberger und Zastrow in ihrem Artikel „Kartoffeln unter dem Kollektor“ beschrieben. Es gab aber noch keinen Namen für das System. (Goetzberger and Tastrow, 1981, zitiert nach Scharf et al., 2021, p.15)

Im Jahr 2011 entstand mit dem Forschungsprojekt „Doppel Ernte“ des Fraunhofer ISE der Begriff „Agro-Photovoltaik“ (von griechisch Agrós ‚Acker‘). Er soll das System mit den Synergien zwischen Agrarsektor und PV-Freiflächentechnik verdeutlichen. Allerdings gab es die Befürchtung, dass dieser Begriff negative Assoziationen hervorrufen kann. Das Wort „agro“ klingt etwas sperrig und könnte im Sinne von aggressiv verstanden werden. Damit die Gesellschaft, Industrie und Politik erreicht werden können, ist ein guter Name aber nicht unwichtig. (Schindele, 2017)

Das Fraunhofer ISE hat daher 2020 in einer Umfrage 31 Expertinnen und Experten aus der Landwirtschaft und Solarbranche sowie aus der Wissenschaft und Politik zu der Namensgebung befragt. Der Begriff Agri-Photovoltaik in Anlehnung an den international etablierten Begriff agrivoltaics konnte sich dabei durchsetzen. Es wurde dazu aufgerufen, ab sofort einheitlich den Begriff Agri-Photovoltaik zu verwenden. (Trommsdorff, no date)

Lasta und Konrad definierten 2018 drei Hauptkategorien für Agri-PV-Anlagen. Sie unterschieden in Ackerflächen, Gewächshäuser und Gebäude. Es wurden demnach auch

Anlagen einbezogen, die an Gebäuden oder Gewächshäusern landwirtschaftlicher Betriebe installiert sind. (Lasta and Konrad, 2018)

Die 2021 veröffentlichte DIN SPEC 91434 (landwirtschaftliche Hauptnutzung) hingegen schließt Solarmodule in Kombination mit Gewächshäusern sowie das Konzept der vertikalen Landwirtschaft (vertical farming) aus. In der Spezifikation werden erstmals Anforderungen an die landwirtschaftliche Hauptnutzung definiert, wie in den folgenden Kapiteln beschrieben wird. (Deutsches Institut für Normung e.V. (Hg.), 2021, p. 7)

2.2 Unterschiedliche Arten von Agri-Photovoltaik-Anlagen

In der DIN SPEC 91434 (landwirtschaftliche Hauptnutzung) wird zwischen zwei Agri-PV-Systemen unterschieden. Zum einen die Aufständering mit lichter Höhe (Kategorie 1) und zum anderen die bodennahe Aufständering (Kategorie 2). Beide Systeme können sowohl mit starrer Unterkonstruktion als auch mit beweglicher Konstruktion realisiert werden. Dabei ermöglichen die beweglichen Systeme ein flexibles Lichtmanagement durch individuelles Ausrichten der PV-Module (Fraunhofer ISE, 2024a, p. 20). In den folgenden Kapiteln werden die beiden Kategorien beschrieben.

2.2.1 Hochaufgeständerte Anlagen (Kategorie 1)

Die Agri-PV-Anlagen der Kategorie 1 sind oberhalb der landwirtschaftlich genutzten Fläche aufgeständert, so dass diese teilweise oder komplett überdacht ist. Die Solarmodule können dabei in unterschiedlichen Winkeln und Positionen befestigt sein (Deutsches Institut für Normung e.V. (Hg.), 2021). Die Abbildung 1 zeigt das Prinzip der hochaufgeständerten Anlagen.

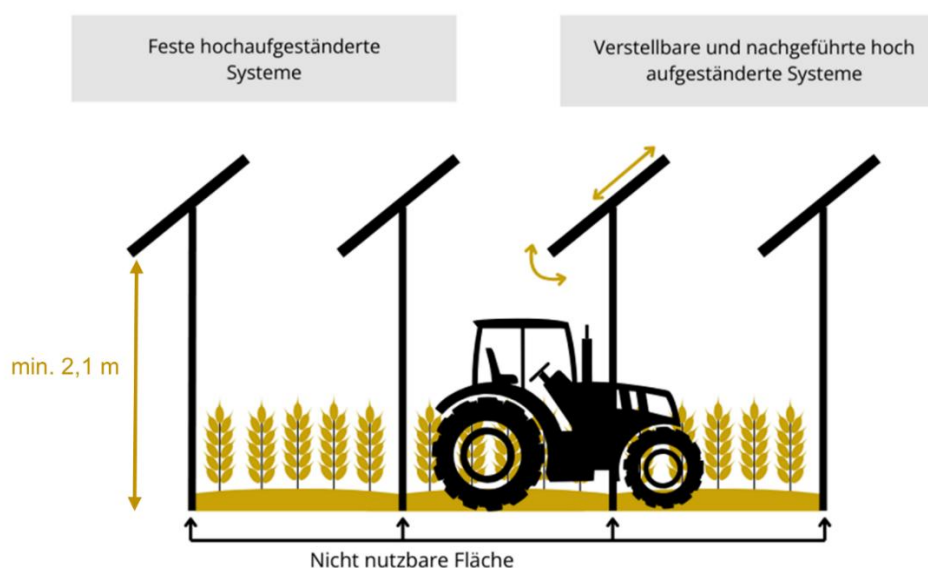


Abbildung 1: Schema hochaufgeständerter Anlagen; nach (Sunaro, 2025)

Durch die hohe Aufständigung entsteht eine lichte Höhe, die zwischen dem Grund der landwirtschaftlichen Fläche und der niedrigsten Stelle des Moduls gemessen wird. Die lichte Höhe der Aufständigung muss nach Arbeitsschutzgesetzgebung mindestens 2,1m betragen. Da bei den hochaufgeständerten Agri-PV-Anlagen die landwirtschaftliche Bewirtschaftung unter der Agri-PV-Anlage stattfindet (siehe Abbildung 2), muss die lichte Höhe zusätzlich hoch genug sein, so dass landwirtschaftliche Maschinen unter der Anlage genutzt werden können (Deutsches Institut für Normung e.V. (Hg.), 2021). In der Regel beträgt die lichte Höhe mindestens 4m. Der Reihenabstand der Aufständigung ist so zu wählen, dass die Bewirtschaftungsweise möglichst wenig beeinflusst wird. Je nach angebauter Kultur müssen entsprechende landwirtschaftliche Maschinen für die Feldbearbeitung und Ernte berücksichtigt werden. Der Abstand liegt in der Regel zwischen 6-14m. (Scharf, Grieb and Fritz, 2021, p. 18)



Abbildung 2: Hochaufgeständerte Agri-PV-Anlage in Heggelbach (Fraunhofer ISE, 2024a; BayWa r.e. AG, 2025)

Die landwirtschaftlich nicht nutzbare Fläche ergibt sich bei Anlagen der Kategorie 1 durch die Flächen, die von der Aufständigung besetzt sind (siehe Abbildung 1) (Deutsches Institut für Normung e.V. (Hg.), 2021). Die Anlagen sind für gewöhnlich Richtung Südosten, Süden oder Südwesten ausgerichtet. Es besteht bei diesem Anlagensystem nicht die Gefahr, dass die Module durch die Kulturen verschattet werden. Es können also auch hochwachsende Kulturen angebaut werden. Allerdings entsteht Verschattung durch die Module, weshalb es von Vorteil ist, Kulturen mit hoher Schattentoleranz zu verwenden. Diese Kulturen können an schattigeren Standorten einen ähnlichen Ertrag bringen, wie an sonnigen Standorten. Für höhere Sonneneinstrahlung bei den Kulturen kann der Abstand zwischen den Modulen erhöht werden oder Spezialmodule mit höherer Transparenz verwendet werden.

Das Dach aus Solarmodulen sorgt aber nicht nur für Verschattung, sondern bietet auch Schutz vor negativen Umwelteinflüssen wie Hagel oder Starkregen (Scharf, Grieb and Fritz, 2021). Durch die erhöhte Anbringung kommt es außerdem weniger zu Verschmutzung oder

Beschädigung der Module durch die landwirtschaftliche Bewirtschaftung (Fraunhofer ISE, no date b).

2.2.2 Bodennahe Anlagen (Kategorie 2)

Die Agri-PV-Module der Kategorie 2 sind bodennah aufgeständert und die landwirtschaftliche Bewirtschaftung findet zwischen den Anlagenreihen statt. Die DIN SPEC 91434 (landwirtschaftliche Hauptnutzung) unterscheidet zwischen Agri-PV-Anlagen, bei denen die Module in einem bestimmten Winkel fest aufgeständert sind (Variante 1) und Anlagen, bei denen die Module senkrecht fixiert oder verstellbar mit Nachführung installiert sind (Variante 2). Da die Höhe unter 2,10 m beträgt, wird die gesamte Fläche unter den Modulen als landwirtschaftlich nicht nutzbare Fläche betrachtet. Es sei denn, die Bearbeitung ist trotzdem möglich und bestimmte Bedingungen und Anforderungen können erfüllt werden (Deutsches Institut für Normung e.V. (Hg.), 2021, p. 12). Die bodennahen Anlagen haben geringere Kosten als die hochaufgeständerten Anlagen und beeinträchtigen das Landschaftsbild weniger stark (Fraunhofer ISE, 2024a, p. 10).

Bodennahe Anlage mit festem Winkel (Variante 1)

Bei dieser Anlagenkategorie sind die Module ähnlich wie bei herkömmlichen PV-Freiflächenanlagen in einem festen Winkel installiert (siehe Abbildung 3). Damit sie nicht von den zwischen den Anlagenreihen angebauten Kulturen verschattet werden, sind sie allerdings etwas höher aufgeständert. In Lemwerder (siehe Abbildung 4) beträgt der Abstand zwischen Modulunterkante und Boden 1,5 m (Wenke, 2025). Dieser Anlagentyp wird in der Praxis eher selten verwendet.

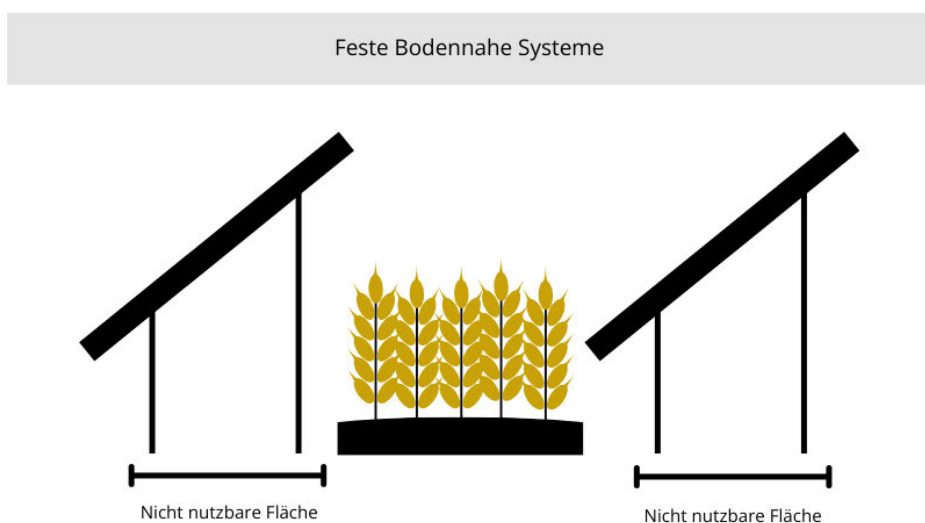


Abbildung 3: Schema bodennaher Anlagen mit festem Winkel (Sunaro, 2025)



Abbildung 4: Installation der Agri-PV-Module in Lemwerder (Wenke, 2025)

Bodennahe Anlagen mit senkrechtem oder verstellbarem Winkel (Variante 2)

Die Variante 2 umfasst bodennahe vertikale Agri-PV-Anlagen, bei denen die Module senkrecht fixiert oder verstellbar mit Nachführung installiert sind (Deutsches Institut für Normung e.V. (Hg.), 2021). Die Abbildung 5 zeigt den schematischen Aufbau dieser Anlagen.

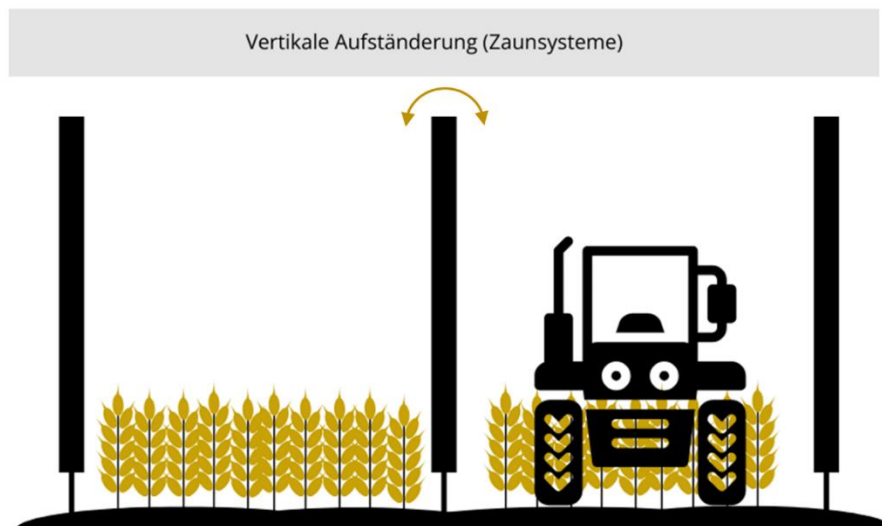


Abbildung 5: Schema bodennaher Anlagen mit vertikalem oder verstellbarem Winkel; nach (Sunaro, 2025)

In der Praxis kommen hauptsächlich die senkrecht fixierten Module zur Anwendung, wie zum Beispiel in Donaueschingen (Abbildung 6). Es sind 2 bifaziale Module übereinander

angebracht und dabei vertikal wie ein Zaun aufgestellt. Die bifazialen Module ermöglichen die Stromerzeugung auf beiden Seiten der Module. Es wird daher eine Ost-West Ausrichtung gewählt. Zwischen Modulunterkante und Boden ist ein Abstand von 20 bis 80 cm, während die Anlage bis zu 3 m hoch sein kann. Der Reihenabstand beträgt 8 bis 10 m, wobei darauf zu achten ist, dass die Module sich bei tiefstehender Sonne morgens und abends nicht gegenseitig verschatten. Für diese Anlagenkategorie sind nur niedrigwachsende Pflanzen geeignet, da die Module sonst verschattet werden. (Scharf, Grieb and Fritz, 2021, p. 19)



Abbildung 6: bodennahe vertikale Agri-PV in Donaueschingen (Leroy, no date)

2.3 Landwirtschaftliche Nutzungsformen von Agri-Photovoltaik

Es werden vier Nutzungsformen in der DIN SPEC 91434 (landwirtschaftliche Hauptnutzung) aufgeführt: (A) Dauerkulturen und mehrjährige Kulturen, (B) einjährige und überjährige Kulturen, (C) Dauergrünland mit Schnittnutzung und (D) Dauergrünland mit Weidenutzung (siehe Tabelle 1). Alle Nutzungsformen sind für beide Anlagenkategorien möglich.

Zu Dauerkulturen (A) gehören Kulturen, die mindestens fünf Jahre auf den Flächen bleiben und regelmäßig Erträge liefern. Dazu gehören zum Beispiel mehrjährige Beerenkulturen, Hopfen, Obstbau und Weinbau.

Einjährige und überjährige Kulturen (B) sind zum Beispiel typische Ackerkulturen wie Getreide, Kartoffeln oder Raps, die in die Fruchtfolge integriert sind.

Wenn auf einer Fläche fünf Jahre lang Gras oder andere Grünfütterpflanzen angebaut werden, handelt es sich dabei um Dauergrünland. Bei Dauergrünland mit Schnittnutzung (C) wird das Gras durch Mähen geerntet und daraus Heu oder Silage erzeugt. Die Fläche wird auch als Wiese bezeichnet. Wird die Fläche zwischen drei bis sechsmal im Jahr gemäht und häufig gedüngt, spricht man von intensiv bewirtschaftetem Grünland. Es wird viel Biomasse

produziert, allerdings leidet die Artenvielfalt unter der hohen Nährstoffzufuhr. Von extensiv bewirtschaftetem Grünland spricht man, wenn eine Wiese nur ein oder zweimal im Jahr gemäht wird und die Düngung reduziert ist. Dadurch wird zwar weniger Biomasse erzeugt als bei der intensiven Bewirtschaftung, aber die Artenvielfalt wird so gestärkt.

Wird die Grünfläche nicht gemäht, sondern von Nutztieren beweidet, handelt es sich um Dauergrünland mit Weidenutzung (D). Weiden können zum Beispiel für Rinder, Geflügel, Schafe, Schweine oder Ziegen genutzt werden. (Deutsche Wildtier Stiftung, 2019; Deutsches Institut für Normung e.V. (Hg.), 2021)

Tabelle 1: Landwirtschaftliche Nutzungsformen von Agri-PV-Anlagen nach (Deutsches Institut für Normung e.V. (Hg.), 2021)

	Nutzung	Beispiele
A	Dauerkulturen und mehrjährige Kulturen	Obstbau, Beerenobstbau, Weinbau, Hopfen
B	Einjährige und überjährige Kulturen	Ackerkulturen, Gemüsekulturen, Wechselgrünland, Ackerfutter
C	Dauergrünland mit Schnittnutzung	Intensives Wirtschaftsgrünland, Extensiv genutztes Grünland
D	Dauergrünland mit Weidenutzung	Dauerweide, Portionsweide (z.B. Rinder, Geflügel, Schafe, Schweine und Ziegen)

3 Rahmenbedingungen

Um die Thematik möglichst umfassend und unter Berücksichtigung der Gegebenheiten zu betrachten, beschäftigen sich die folgenden Kapitel mit den Rahmenbedingen rund um Agri-PV. Festgelegte Anforderungen aus Spezifikationen und rechtliche Aspekte gehören ebenso dazu wie ein Überblick über die aktuellen Projekte und bestehende Anlagen.

3.1 Technische Anforderungen und Definitionen gemäß der DIN-Spezifikationen

Es bestehen bisher zwei relevante DIN-Spezifikationen mit Anforderungen an die Errichtung von Agri-PV-Anlagen. Zuerst entstand die DIN SPEC 91434 (landwirtschaftliche Hauptnutzung), welche erstmals die Anforderungen an die landwirtschaftliche Hauptnutzung definiert. Sie wurde von dem Fraunhofer ISE und der Universität Hohenheim in Zusammenarbeit mit einem Gremium aus Wissenschaft, Praxis und dem Deutschen Institut für Normung entwickelt und im Mai 2021 veröffentlicht. Im Juni 2024 kam die DIN SPEC 91492 (Nutztierhaltung) als Ergänzung dazu, welche speziell die Anforderungen an die Nutztierhaltung mit Agri-PV-Anlagen thematisiert.

Die beiden Spezifikationen haben das Ziel, eine Grundlage für ein standardisiertes Prüfverfahren für Gesetz- und Fördermittelgeber und Genehmigungsbehörden zu bilden. Das technische Risiko soll dadurch für alle beteiligten reduziert werden, vor allem für die Landwirte, für die Errichter und Vermarkter der Agri-PV-Anlage sowie für die Kommunale Verwaltung als Genehmigungsbehörde. Zusätzlich soll die Definition von Anforderungen an die landwirtschaftliche Hauptnutzung von den herkömmlichen PV-Freiflächenanlagen abgrenzen. (Deutsches Institut für Normung e.V. (Hg.), 2021, 2024)

Neben der in Kapitel 2.2 und 2.3 erwähnten Kategorisierung der Agri-PV-Anlagentypen und Nutzungsformen, werden in beiden Spezifikationen jeweils Anforderungen an die landwirtschaftliche Hauptnutzung, an die Agri-PV-Anlagen selbst und an die Installation sowie den Betrieb und die Instandhaltung definiert (Deutsches Institut für Normung e.V. (Hg.), 2024, 2024). Relevante technische PV-Normen bestehen bereits und können für Agri-PV übernommen werden (Fraunhofer ISE, 2024a).

Grundsätzlich gilt, dass die bisherige Nutzbarkeit der landwirtschaftlichen Fläche erhalten bleiben muss. Viele der festgelegten Anforderungen bauen auf diesem Grundsatz auf bzw. entstehen aus dieser Bedingung. Um diese sicherzustellen, soll vor Errichtung der Agri-PV-Anlagen ein landwirtschaftliches Nutzungskonzept erstellt werden, welches von einem Zertifizierungsunternehmen zertifiziert werden muss (Grieb and Stöppler, 2023). Darin sollen

neben Angaben zum landwirtschaftlichen Betrieb und zur Agri-PV-Anlage vor allem Angaben zur Nutzung der landwirtschaftlichen Fläche gemacht werden. Außerdem sind der voraussichtliche Flächenverlust und eine Kalkulation der Wirtschaftlichkeit Teil des Konzeptes. Eine Vorlage für das Nutzungskonzept befindet sich jeweils im Anhang A der DIN-Spezifikationen (Deutsches Institut für Normung e.V. (Hg.), 2021).

Zur besseren Übersicht sind die Spezifikationen tabellarisch zusammengefasst (siehe Anhang A). Nach jedem Absatz ist der entsprechende Tabellenabschnitt abgebildet. In Tabelle 2 sind die Kapitel der Spezifikationen zur landwirtschaftlichen Hauptnutzung und dem Nutzungskonzept zusammengefasst.

Tabelle 2: Landwirtschaftliche Hauptnutzung und Nutzungskonzept

Kapitel der Spezifikation	Anforderungen generell an landwirtschaftliche Nutzung (DIN SPEC 91434)	Anforderungen speziell an Nutztierhaltung (DIN SPEC 91492)
5. Landwirtschaftliche Hauptnutzung		
5.1 Landwirtschaftliche Nutzbarkeit der Fläche	• Bisherige Nutzbarkeit muss erhalten bleiben (außer Flächenverlust)	
	• Landnutzungsform und Pflanzenproduktion in Konzept zur landwirtschaftlichen Nutzbarkeit darlegen • Nutzungsänderung mit Einschränkungen möglich	• Landnutzungs- und Tierhaltungsform in Konzept zur landwirtschaftlichen Nutzbarkeit darlegen • Nutzungsänderung mit Bau der Agri-PV-Anlage möglich • Dauerhafte landwirtschaftliche Tätigkeit zu Erwerbszwecken • Tierschutzverordnungen und Regularien einhalten • Regelmäßige Prüfung und Nachweis über die Nutzung
5.2 Konzept zur landwirtschaftlichen Nutzbarkeit		
5.2.1 Allgemeines	• Inhalte und Struktur nach Formatvorlage Anhang A • Von Landnutzer und Agri-PV-Errichter gemeinsam erstellt • Lichte Höhe Kategorie 1 mind. 2,1m (nach Arbeitsschutzgesetzgebung)	

Die Agri-PV-Fläche soll hauptsächlich landwirtschaftlich genutzt werden. Daher sind in den Spezifikationen Kennzahlen definiert. So soll der Verlust landwirtschaftlich nutzbarer Fläche durch die Agri-PV-Anlagen bei der Kategorie 1 einen Wert von 10% der Gesamtfläche nicht überschreiten. Bei der Kategorie 2 und im Fall von Nutztierhaltung für beide Kategorien darf der Flächenverlust maximal 15% der Gesamtfläche betragen (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Flächenverlust

Kapitel der Spezifikation	Anforderungen generell an landwirtschaftliche Nutzung (DIN SPEC 91434)	Anforderungen speziell an Nutztierhaltung (DIN SPEC 91492)
5.2.3 Flächenverlust	Verlust landwirtschaftlich nutzbarer Fläche (Aufbauten, Unterkonstruktionen) bei Kategorie 1 max. 10% und bei Kategorie 2 max. 15% der Gesamtprojektfäche	Max. 15%

Die Landnutzungseffizienz ist eine weitere Kennzahl. Es gilt, dass der Durchschnittsertrag der angebauten Kulturen mit Agri-PV noch bei mindestens 66% des Referenzertrages liegen soll. Als Referenzertrag gilt dabei der durchschnittliche Ertrag der betreffenden Kulturpflanze. Entweder die Kultur wurde bereits auf einer Fläche desselben Betriebs angebaut, dann werden hiervon die Ertragswerte aus den letzten drei Jahren oder ggf. den letzten drei Fruchtfolgezyklen für den Durchschnitt verwendet. Andernfalls werden Vergleichswerte aus entsprechenden Veröffentlichungen herangezogen. Die Ertragsreduktion wird sowohl durch Flächenverluste als auch durch sogenannte ertragswirksame Umweltwirkungen, wie Veränderungen im Mikroklima, ungleichmäßige Wasserverteilung oder Beschattungseffekte durch die PV-Module verursacht. (Deutsches Institut für Normung e.V. (Hg.), 2021)

Bei der Nutztierhaltung mit Agri-PV muss ein Flächenbesatz von 85% des Referenzwertes erreicht werden. Als Referenzwert wird der Flächenbesatz einer Fläche des Betriebes mit vergleichbarer Nutztierhaltung herangezogen. Gab es die Tierhaltungsform bisher nicht auf den Flächen des Betriebes, wird der Flächenbesatz einer vergleichbar bewirtschafteten Fläche, wie z.B. ähnliche Tierhaltungsformen in der Region, als Referenzwert verwendet. (Deutsches Institut für Normung e.V. (Hg.), 2024)

Die Zusammenfassung der Anforderungen aus den Spezifikationen bezüglich der Landnutzungseffizienz ist in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Landnutzungseffizienz

Kapitel der Spezifikation	Anforderungen generell an landwirtschaftliche Nutzung (DIN SPEC 91434)	Anforderungen speziell an Nutztierhaltung (DIN SPEC 91492)
5.2.10 Landnutzungseffizienz	• Ertrag soll min. 66% des Referenzertrages sein	• Flächenbesatz von 85% einer Referenzfläche ist zu erreichen • Unterschreitung unter bestimmten Bedingungen zulässig • Rotationsweide, Portions- oder Wechselweide zulässig
5.2.11 Ermittlung des Referenzertrags	• Bei vorherigen Dauerkulturen und Grünland: gemittelter Ertrag der letzten 3 Jahre • Bei vorherigen Ackerbaufruchtfolgen: gemittelter Ertrag der einzelnen Kulturen über 3 Fruchtfolgezyklen oder • Durchschnittserträge der letzten 3 Jahre aus einschlägigen Veröffentlichungen	• Vorheriger Flächenbesatz auf Gesamtprojektfläche oder • Flächenbesatz einer vergleichbar bewirtschafteten Fläche
5.2.12 Ermittlung der Ertragsreduktion der auf der Gesamtprojektfläche angebauten Kulturen	• Abschätzung der Ertragsreduktion durch qualifiziertes Fachpersonal möglich	/

Bei der Installation der Anlagen soll der Boden nicht durch Verdichtung verschlechtert werden. Es werden entsprechende Vorkehrungen empfohlen. Außerdem wird auf das Risiko von austretenden Betriebsstoffen hingewiesen. Kabel und Leitungen müssen in sicherer Tiefe (ca. 70cm (Stöppler *et al.*, 2025)) vor landwirtschaftlichen Maschinen und ggf. vor Nutztieren verlegt werden. Im Fall von Nutztierhaltung auf der Agri-PV-Fläche müssen geltende Tierschutzverordnungen eingehalten werden (Deutsches Institut für Normung e.V. (Hg.), 2021, 2024). Für die Zusammenfassung aus der Spezifikation siehe Tabelle 5.

Tabelle 5: Installation

Kapitel der Spezifikation	Anforderungen generell an landwirtschaftliche Nutzung (DIN SPEC 91434)	Anforderungen speziell an Nutztierhaltung (DIN SPEC 91492)
6.5 Anforderungen an weitere BOS-Komponenten	• BOS-Komponenten dürfen landwirtschaftliche Nutzung nicht beeinträchtigen (insbesondere Generatoranschlusskästen und Wechselrichter) • Erdverlegung von Kabeln in Mindestdtiefe nach DIN VDE 0100-520 (sicher vor Pflug/Tieren und anderen Maschinen)	
7. Installation, Betrieb und Instandhaltung		
7.1 Agri-PV spezifische Anforderungen bei der Installation	• keine Verschlechterung des Bodens durch Verdichtung • keine Einschränkung der Nutzung durch Rückstände des Agri-PV-Systems • Schutz vor auslaufenden Betriebsstoffen • Spezielle Reifen/Maschinen und/oder mobile Fahrstraßen empfohlen, die Bodenverdichtung vermindern • Zeitpunkt so wählen, dass Bodenschäden vermieden werden (z.B. bei trockenem Boden)	
7.2 Abnahme und Inbetriebnahme des Agri-PV-Systems	• Es gelten bestehende elektrotechnische und statische Regularien sowie entsprechende Prüfanforderungen aus Bereich PV-Anlagen • Besonders beachten: Einhaltung des landwirtschaftlichen Nutzungskonzeptes, Verlegung der Kabel und Leitungen in sicherer Tiefe, Einhaltung des maximalen Flächenverlustes, Montagehöhe ggf. mit lichter Höhe, Sicherheit des Tragwerks	

Die PV-Module müssen gleichmäßig auf der Fläche verteilt sein, um die bisherige landwirtschaftliche Nutzung der Fläche weiterhin zu ermöglichen und dem Schutzbedürfnis der Nutztiere gerecht zu werden. Der Abstand zwischen den Modulen muss dabei so gewählt werden, dass eine Bewirtschaftung und Befahrbarkeit der Fläche gewährleistet bleibt. Außerdem soll eine gleichmäßige Verteilung der Module für eine möglichst homogene Verteilung des Lichts sorgen. Dies ist essenziell für ein gutes Pflanzenwachstum und zeitlich abgestimmte Ernteprozesse. Auch die Lichtverfügbarkeit ist hierfür ein wichtiger Faktor, der maßgeblich durch die Beschattung der Module beeinflusst wird und an die spezifischen Anforderungen der jeweiligen Kulturpflanzen, Futtermittelpflanzen oder Nutztiere angepasst werden muss. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, sind die Modultechnik, die Zwischenräume zwischen den Solarzellen, die Lichtdurchlässigkeit der Module sowie die Ausrichtung der Module gezielt an die Lichtverhältnisse anzupassen. So soll der angestrebte

„techno-ökologische Synergieeffekt“, also der positive gegenseitige Einfluss zwischen landwirtschaftlicher Produktion und Energiegewinnung, möglichst hoch sein. Negative Auswirkungen auf Pflanzenwachstum und Nutztierhaltung sollen vermieden werden (Deutsches Institut für Normung e.V. (Hg.), 2021, 2024). In Tabelle 6 sind die Anforderungen aus der Spezifikation zur Lichtverfügbarkeit und der Verteilung der Module nochmal zusammengefasst.

Tabelle 6: Lichtverfügbarkeit und Verteilung der Module

Kapitel der Spezifikation	Anforderungen generell an landwirtschaftliche Nutzung (DIN SPEC 91434)	Anforderungen speziell an Nutztierhaltung (DIN SPEC 91492)
5.2.2 Aufständigung	• Abstand so groß, dass bisherige Nutzbarkeit erhalten bleibt • Bearbeitbarkeit der Fläche muss sichergestellt sein	
	• Anlagen gleichmäßig verteilen • Bei Kategorie 2 keine lichte Höhe nötig	• Tierschutzrechtliche Aspekte • Schutzbedürfnisse der Nutztiere und Sicherheit der technischen Anlagenkomponenten sicherstellen • Lichte Höhe an Nutztiere (aufrecht darunter bewegen) und relevante Maschinen anpassen • Bei minimaler lichten Höhe von 1,5 m sind Stallungen gefordert • Bei Kategorie 2 keine lichte Höhe nötig, aber z.B. TierschNutzTV und ArbStättV einhalten
5.2.4 Bearbeitbarkeit	• Gesamte landwirtschaftlich nutzbare Fläche muss bewirtschaftet und ggf. befahren werden können	
5.2.5 Lichtverfügbarkeit und -homogenität	Sicherstellen von • Pflanzenwachstum • Gleiche Erntezeitpunkte • Gute landwirtschaftliche Praxis durch • Möglichst hohe Lichthomogenität • Adäquate Lichtverfügbarkeit	• Muss an pflanzliche Erzeugung (Futtermittelaufwuchs) und Bedürfnisse der Nutztiere angepasst werden

6.4.4 Modulreihen	• Ausrichtung und Abstände nicht festgelegt • Entsprechend Lichthomogenität und -verfügbarkeit planen und ausrichten • Abstände so wählen, dass techno-ökologische Synergieeffekte durch Beschattung und Lichthomogenität möglichst hoch sind	
	• ...und negative Auswirkungen auf Pflanzenwachstum vermieden werden	• ...und negative Auswirkungen auf Nutztierhaltung und weitere geplante Nutzungsarten vermieden werden

Neben genügend Licht, benötigen die Pflanzen auch ausreichend Wasser. Je nach Kultur und klimatischen Bedingungen der Region, kann der Wasserbedarf variieren. Wenn es aufgrund der Abschirmung des Regens durch die Module nötig ist, muss eine künstliche Bewässerung für ausreichend Wasserverfügbarkeit sorgen. Bei Nutztierhaltung muss der Wasserbedarf sowohl an die Pflanzen (Futtermittelaufwuchs) als auch an die Bedürfnisse der Nutztiere angepasst werden. Wenn der Regen auf die Anlagen trifft, läuft er an den schräg montierten Solarmodulen herunter und tropft von der unteren Kante auf den Boden. Um den Boden vor zu hoher Erosion und Verschlammung durch die Abtropfkanten zu schützen, ist außerdem auf eine gleichmäßige Regenwasserverteilung zu achten. Dabei können Auffangeinrichtungen helfen. Die folgende Tabelle (Tabelle 7) fasst die Anforderungen bezüglich Wasserverfügbarkeit zusammen.

Tabelle 7: Wasserverfügbarkeit

Kapitel der Spezifikation	Anforderungen generell an landwirtschaftliche Nutzung (DIN SPEC 91434)	Anforderungen speziell an Nutztierhaltung (DIN SPEC 91492)
5.2.6 Wasserverfügbarkeit und Regenwasserverteilung	• An Wachstumsbedingungen der Kultur anpassen • Homogene Regenwasserverteilung • evtl. technische Bewässerungseinrichtung • Wasserbedarf der Kultur unter üblichen klimatischen Bedingungen des Standortes betrachten	• Muss an pflanzliche Erzeugung (Futtermittelaufwuchs) und Bedürfnisse der Nutztiere angepasst werden

5.2.7 Bodenerosion und Verschlammung des Oberbodens

- Grund: Abtropfkant
- Durch Konstruktion der Anlage minimieren (z.B. Auffangeinrichtungen, Regenwasserverteiler)

3.2 Gesetzliche Grundlagen in Deutschland

Die folgenden Kapitel beschäftigen sich mit den gesetzlichen Grundlagen für Agri-PV-Anlagen in Deutschland. Es werden die Förderungsprogramme und das Genehmigungsverfahren beschrieben.

3.2.1 Förderungen und Vorteile

Die im vorherigen Kapitel beschriebene DIN SPEC 91434 (landwirtschaftliche Hauptnutzung) ist Grundlage für gesetzliche Bestimmungen. So spielt diese bei GAP-Direktzahlungen, bei der EEG-Förderung und bei steuerrechtlichen Regelungen eine Rolle. Um hier Vorteile gegenüber einer PV-Freiflächenanlage zu haben, müssen die Agri-PV-Anlagen nach den in der Spezifikation festgelegten Anforderungen geplant und errichtet sein. Das dafür zu erstellende landwirtschaftliche Nutzungskonzept muss vor Inbetriebnahme gutachterlich bestätigt und alle drei Jahre überprüft werden. Außerdem sollen die Werte für Flächenverlust und Ertragsreduktion eingehalten werden (Stöppler *et al.*, 2025). Auf der DIN SPEC 91492 (Nutztierhaltung) basieren bislang noch keine gesetzlichen Regelungen. Zwar werden beispielsweise häufig Schafe unter PV-Freiflächenanlagen gehalten, jedoch steht in diesen Fällen die Energieerzeugung im Vordergrund und nicht die landwirtschaftliche Nutzung (Fraunhofer ISE, n.d.).

Die Gemeinsame Agrarpolitik (GAP) ist eine EU-Reform, die die Landwirtschaft ökologischer und nachhaltiger machen soll. Es stehen dafür EU-Mittel im Zeitraum 2023 bis 2027 für die Agrarförderung zur Verfügung. Damit werden zum Beispiel GAP-Direktzahlungen an Landwirtschaftsbetriebe finanziert (BMEL, 2024). Damit eine Fläche für diese Zahlungen beihilfefähig ist, muss diese unter anderem eine ganzjährige landwirtschaftliche Nutzbarkeit aufweisen. Flächen mit PV-Freiflächenanlagen sind nicht beihilfefähig. Bei der Nutzung von Agri-PV sind hingegen mindestens 85% der Fläche beihilfefähig, je nachdem wie groß die landwirtschaftliche Nutzung beeinträchtigt ist. Es ist allerdings nachzuweisen, dass die Vorgaben der DIN SPEC 91434 (landwirtschaftliche Hauptnutzung) erfüllt sind. Außerdem muss die landwirtschaftliche Bewirtschaftung der Fläche mit Maschinen und üblichen Methoden weiterhin möglich sein. Die Höhe der Direktzahlungen beläuft sich 2024 auf 157

€/ha, das sind mindestens 133,45 €/ha für Agri-PV-Flächen. (Bundesministerium der Ernährung und Landwirtschaft, 2024; Michalczyk, 2024)

Agri-PV-Anlagen gelten als besondere Solaranlagen mit Doppelnutzung und können über das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) gefördert werden, sofern sie entsprechend den Anforderungen der DIN SPEC geplant und errichtet sind. Für eine Laufzeit von 20 Jahren wird pro eingespeiste Kilowattstunde ein fester Betrag vergütet, der sogenannte „anzulegende Wert“. Für Agri-PV-Anlagen sowie herkömmliche PV-Freiflächenanlagen bis zu einer Leistung von 1 MWp beträgt dieser Wert ab dem 1. Februar 2025 6,79 ct/kWh und sinkt halbjährlich um 1 %, sodass er ab dem 1. August 2025 bei 6,72 ct/kWh liegt. Agri-PV-Anlagen, die entweder vertikal mit mindestens 80 cm Abstand zum Boden oder mit einer lichten Höhe von mindestens 2,10 m aufgeständert sind, erhalten einen erhöhten anzulegenden Wert. Dieser wird jährlich angepasst und lag im Jahr 2024 um 2,5 ct/kWh über dem Standardwert. Für Anlagen mit einer Leistung über 1 MWp wird der anzulegende Wert hingegen nicht pauschal festgelegt, sondern im Rahmen eines dreimal jährlich stattfindenden Ausschreibungsverfahrens der Bundesnetzagentur ermittelt. (Stöppler *et al.*, 2025)

Ein weiterer Vorteil von Agri-PV-Anlagen gegenüber klassischen PV-Freiflächenanlagen liegt im Steuerrecht. Da die Agri-PV-Flächen weiterhin dem landwirtschaftlichen Betrieb zugeordnet werden und nicht als Grundvermögen gelten, bleibt der steuerrechtliche Status unverändert, sodass sie in der Grundsteuerklasse A verbleiben. Dies bringt Vorteile bei der Grundsteuer sowie bei der Erbschafts-, Schenkungs- und Grunderwerbsteuer mit sich. Die Agri-PV-Anlage muss dafür den Anforderungen der DIN SPEC 91434 (landwirtschaftliche Hauptnutzung) entsprechen. (Fraunhofer ISE, 2024a; Stöppler *et al.*, 2025)

3.2.2 Genehmigungsverfahren

Für die Genehmigung einer Agri-PV-Anlage ist in der Regel ein Bauleitplanverfahren erforderlich, sofern es sich nicht um ein privilegiertes Vorhaben handelt. Unter welchen Bedingungen es sich um ein privilegiertes Vorhaben handelt, wird im späteren Verlauf des Kapitels beschrieben. Die Bauleitplanung setzt sich aus dem Flächennutzungsplan und dem Bebauungsplan zusammen. Der Flächennutzungsplan stellt die grobe Planung für das gesamte Gemeindegebiet dar. Er dient der räumlichen Ordnung und weist unter anderem Flächen für Wohngebiete, Industrie- und Kurgebiete sowie für die Land- und Forstwirtschaft aus. Für die Genehmigung einer Agri-PV-Anlage muss der Flächennutzungsplan ggf. angepasst werden. (Stöppler *et al.*, 2025)

Auf Basis des Flächennutzungsplans wird der Bebauungsplan entwickelt, der die Feinplanung einzelner Grundstücke konkretisiert. Er legt verbindlich fest, welche Bauvorhaben zulässig

sind und welche Kriterien dabei einzuhalten sind (Stöppler *et al.*, 2025). Dazu gehören unter anderem Baugrenzen, Bauhöhe und Geschlosszahl. Der Bebauungsplan dient auch der Abwägung verschiedener Interessen an der Bodennutzung, wie Umweltschutz, Verkehr, Wohnen oder Industrie, die miteinander in Einklang gebracht werden müssen. Ein Bauvorhaben darf dem Bebauungsplan nicht widersprechen, da es sonst keine Baugenehmigung erhält. Agri-PV-Anlagen befinden sich meist im Außenbereich (außerhalb bebauter Ortschaften), wo es in der Regel keinen Bebauungsplan gibt. Dieser muss erst erstellt werden. (Alexy *et al.*, 2023a, 2023b; Stöppler *et al.*, 2025)

Da ein Bauleitplanungsverfahren bis zu zwölf Monate dauern kann, empfiehlt es sich, möglichst frühzeitig eine Projektskizze beim Gemeinderat einzureichen. Diese Skizze enthält grundlegende Informationen zur geplanten Agri-PV-Anlage, etwa zur Größe, Lage, Anlagenleistung und zum technischen Aufbau. Stimmt der Gemeinderat dem Vorhaben zu, wird die Erstellung eines Bebauungsplans eingeleitet. Es wird zunächst ein Planentwurf erarbeitet, der veröffentlicht und zur Einsicht freigegeben wird. Neben der Öffentlichkeit erhalten auch verschiedene Behörden als sogenannte Träger öffentlicher Belange (wie etwa Landwirtschafts-, Naturschutz-, Bodenschutz- oder Altlastenbehörden) Gelegenheit, Stellung zu nehmen und Anpassungsvorschläge einzubringen. Diese Rückmeldungen werden in den Planentwurf eingearbeitet, der anschließend erneut veröffentlicht wird. Innerhalb einer Frist von 30 Tagen können weitere Kommentare und Änderungswünsche eingebracht werden, die wiederum berücksichtigt werden müssen. Abschließend werden der Flächennutzungsplan und der Bebauungsplan der zuständigen höheren Verwaltungsbehörde zur Genehmigung vorgelegt. Dies ist entweder der Landkreis oder – im Fall kreisfreier Städte und Großer Kreisstädte – der jeweilige Regierungsbezirk. (Stöppler *et al.*, 2025)

Im Rahmen des Genehmigungsverfahrens können verschiedene Gutachten erforderlich werden. Zwingend notwendig ist in jedem Fall ein Bodengutachten, das von der Baufirma zur Auswahl eines geeigneten Fundaments benötigt wird. Darüber hinaus können je nach Standort und Ausgestaltung der Anlage weitere Prüfungen verlangt werden. Dazu zählen beispielsweise artenschutzrechtliche Untersuchungen, bei denen ein Ingenieurbüro prüft, ob auf der Fläche besonders schützenswerte Tier- oder Pflanzenarten vorkommen. Ebenso kann ein landschaftspflegerischer Begleitplan erforderlich sein, wenn das Landschaftsbild beeinträchtigt wird. Auch Blendgutachten können eingefordert werden, um mögliche Beeinträchtigungen durch Reflexionen für Menschen oder Tiere auszuschließen. Je nach Lage der Fläche können weitere Gutachten hinzukommen. Abhängig davon, in welchem Maße die Agri-PV-Anlage in die Umwelt eingreift, sind zudem Ausgleichs- oder Kompensationsmaßnahmen umzusetzen. Diese können etwa in der Anlage von Blühstreifen, Hecken, Bäumen oder in der Bereitstellung von Totholz-, Stein- oder Sandhaufen bestehen,

um die Biodiversität zu fördern. Solche Maßnahmen werden im Verfahren von verschiedenen beteiligten Stellen eingefordert. (Stöppler *et al.*, 2025)

Unter bestimmten Bedingungen können Agri-PV-Anlagen als sogenannte „privilegierte Vorhaben im Außenbereich“ auch ohne die Änderung bzw. die Erstellung des Flächennutzungs- und des Bebauungsplans errichtet werden. Der Außenbereich soll eigentlich nicht bebaut werden, wobei die privilegierten Vorhaben eine festgelegte Ausnahmen darstellen. Es wurden neun mögliche privilegierte Vorhaben definiert, von denen nur fünf überhaupt für Agri-PV in Frage kommen. Das Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ) stuft davon zwei als sehr wahrscheinlich zutreffend für Agri-PV-Anlagen ein. Eines dieser privilegierten Vorhaben beschreibt den Fall, dass die Anlage neben Autobahnen oder Schienenwegen mit zwei Hauptgleisen gebaut werden soll. Die Agri-PV-Fläche muss dafür innerhalb eines 200-Meter-Korridors entlang der Fahrbahn liegen. Der andere mögliche Fall definiert hofnahe Agri-PV-Anlagen als privilegiert. Diese müssen eng mit dem landwirtschaftlichen Betrieb in Zusammenhang stehen und dürfen eine Fläche von 2,5 Hektar nicht überschreiten. Pro Betrieb darf nur eine Agri-PV-Anlage betrieben werden. Es ist möglich, dass sich die rechtliche Einschätzung zu den Privilegierungen in Zukunft noch ändert und es daher noch gesetzliche Änderungen oder detailliertere Definitionen geben wird. (Stöppler *et al.*, 2025)

Zusammenfassend betrachtet ist die Genehmigung von Agri-PV-Anlagen ein ressourcenintensiver Prozess. In der Regel liegt kein Bebauungsplan für die Fläche vor, weshalb eine aufwendige Planung und Rechtfertigung gegenüber den Behörden notwendig ist. Insgesamt ist die Planung und Genehmigung einer Agri-PV-Anlage daher mit einem erheblichen Aufwand verbunden, sowohl organisatorisch als auch zeitlich und finanziell.

3.3 Marktanalyse

Die Entwicklung und Erprobung von Agri-PV-Anlagen in Deutschland begann mit mehreren Forschungsprojekten und Pilotanlagen. In Tabelle 8 sind einige davon aufgeführt. Ein Großteil dieser Anlagen befindet sich im Süden Deutschlands, da in dieser Region aufgrund höherer Globalstrahlungswerte (direkte Sonneneinstrahlung plus Diffusstrahlung) besonders günstige Bedingungen für die Stromerzeugung mit Photovoltaik herrschen. Die Regionalen Unterschiede sind auf Globalstrahlungskarten des Deutschen Wetterdienstes wie in Abbildung 7 zu erkennen. Hier wird die Globalstrahlung in kWh/m^2 als Jahressumme gemittelt über den Zeitraum von 1991 bis 2020 dargestellt.

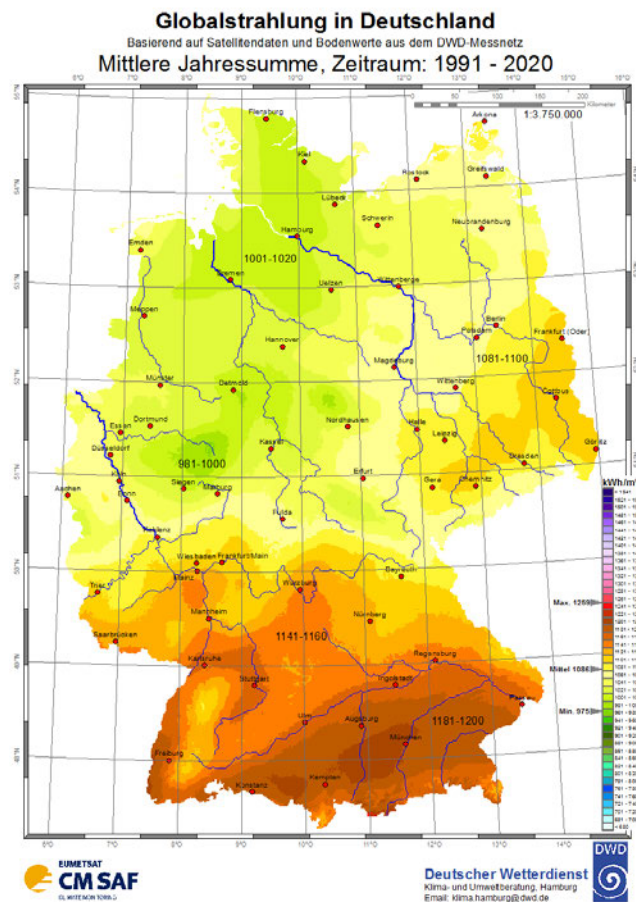


Abbildung 7: Globalstrahlung Deutschland – Mittlere Jahressumme 1991 bis 2020 (Deutscher Wetterdienst, no date)

Auch das Fraunhofer ISE konzentriert seine Agri-PV-Aktivitäten bevorzugt in den südlichen Bundesländern und ernannte Baden-Württemberg zur Modellregion für Agri-PV. Auch die Landesregierung förderte das Vorhaben vor allem mit Blick auf das Potential für Sonderkulturen, wie den Obstanbau. Im Rahmen der ersten Umsetzungsphase wurden bereits fünf Agri-PV-Anlagen zu Forschungszwecken mit Schwerpunkt auf Kern- und Beerenobst realisiert. Anfang des Jahres 2025 begann die zweite Umsetzungsphase, mit dem Ziel weitere Agri-PV-Anlagen zu errichten. Bei diesen Anlagen geht es um die Kombination mit Grünland, Ackerbau oder Tierhaltung. Die Abbildung 8 zeigt einen Überblick über alle Pilotanlagen des Projektes „Modellregion Agri-PV Baden-Württemberg“. (Baden-Württemberg, 2022; Fraunhofer ISE, 2023c)

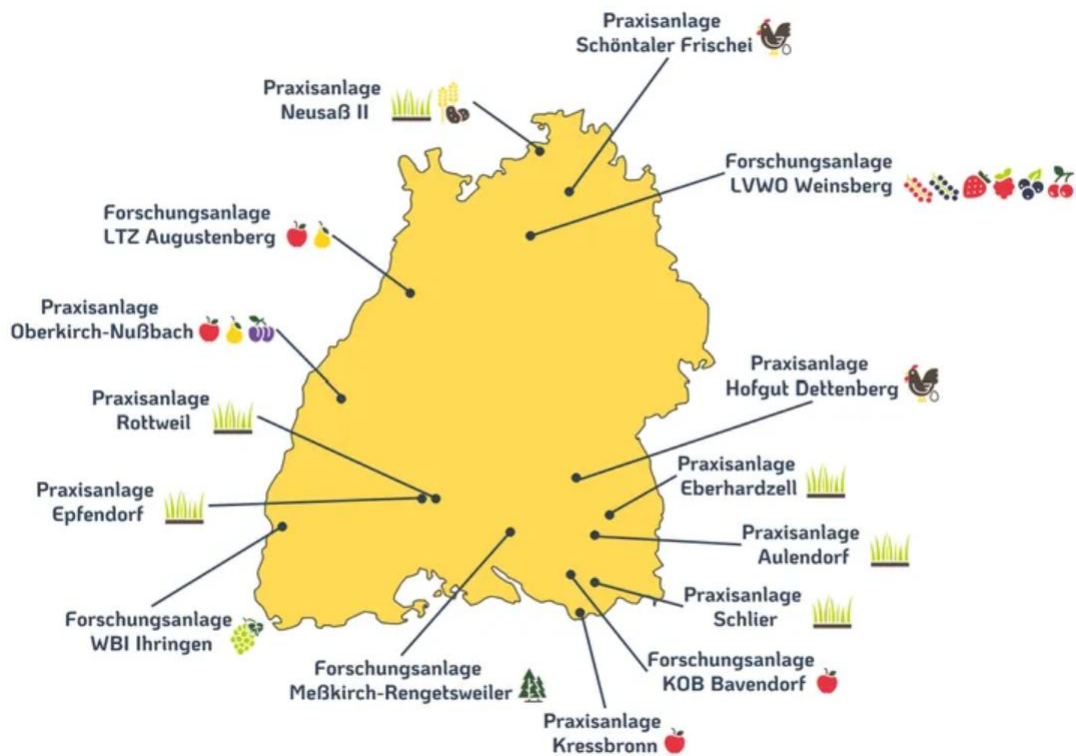


Abbildung 8: Pilotanlagen der Modellregion Agri-PV BW (Fraunhofer ISE, 2023f)

Bei den meisten Projekten handelt es sich um Agri-PV-Anlagen der Kategorie 1, also hochaufgeständerte Anlagen mit Bewirtschaftung unter den Modulen. Diese Anlagentypen bieten den Kulturen mehr Schutz vor der erhöhten Sonneneinstrahlung in der südlichen Region Deutschlands und auch vor anderen Wetterereignissen.

Der Einsatz von Agri-PV beschränkt sich bereits nicht mehr ausschließlich auf Forschungsvorhaben, sondern findet zunehmend auch in der landwirtschaftlichen Praxis Anwendung. Zum Beispiel errichtete das Unternehmen Next2Sun im Jahr 2020 bodennahe vertikale Agri-PV-Anlagen in Donaueschingen. Die Module sind mit einem Reihenabstand von 10m auf einer Gesamtfläche von 14ha installiert. Zwischen den Reihen wird Gras angebaut und als Heu an Landwirte aus der Umgebung verkauft. (Leroy, no date)

Verschiedene weitere Bauvorhaben befinden sich bereits in der Planungs- oder Umsetzungsphase, was auf ein wachsendes Interesse und eine zunehmende Akzeptanz dieser Technologie im landwirtschaftlichen Sektor hinweist. So ist auch in Lemwerder, Niedersachsen, eine Agri-PV-Anlage im Entstehen. In das Projekt investierte ein Landwirt mit finanzieller Unterstützung einer regionalen Bank rund 10 Millionen Euro, um auf seiner landwirtschaftlichen Fläche von über 17,8 ha Agri-PV-Anlagen mit einer installierten Leistung von 15 MW zu errichten. (LAND & FORST, 2025)

Insgesamt gab es bis Ende 2023 fast 30 Betriebe mit Agri-PV-Anlagen in Deutschland. Daraus ergibt sich eine installierte Leistung von 65 MW (Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE), 2025). Das ist ein geringer Anteil an der installierten Leistung aller PV-Anlagen in Deutschland, die im Jahr 2023 bei über 80 GWp liegt (Fraunhofer ISE, 2025d). Die Technologie befindet sich erst am Anfang der Entwicklung.

Das Fraunhofer ISE befragte im Februar 2023 214 Landwirtinnen und Landwirte dazu, ob sie sich Agri-PV auf ihrem eigenen Betrieb installieren würden. Über 70% der Befragten sind der Technologie gegenüber offen und können sich vorstellen diese zu nutzen (Fraunhofer ISE, 2024b). Es ist also damit zu rechnen, dass die installierte Leistung weiter steigen wird.

Tabelle 8: Agri-PV-Forschungsanlagen in Deutschland nach (Fraunhofer ISE, 2024a)

Nr.	Standort	Nutzungsform	Technologie	Kategorie	Ausrichtung	Installierte Leistung	Inbetriebnahme
1	Weihenstephan/ Freising, Bayern	Gemüseanbau B	Nachgeführte PV-Modultische	1	Ost-West	22 kWp	2013
2	Weihenstephan/ Freising, Bayern	Gemüseanbau B	PV-Röhren	1		14 kWp	2015
3	Heggelbach Landkreis Sigmaringen, Baden-Württemberg	Ackerbau B	fix installierte PV-Module	1	Nach Südwesten	194 kWp	2016
4	Gelsdorf, Landkreis Ahrweiler, Rheinland-Pfalz	Obstanbau A	Nachgeführt und fix ausgerichtet, teiltransparente PV-Module	1		258 kWp	2021
5	Alt-Morschenich, Kreis Düren, Nordrhein-Westfalen	Ackerbau/ Gemüsebau B	Nachgeführt und fix ausgerichtete, inkl. Wassermanagement	1	Verschieden (Süden und Ost-West)	300 kWp	2021
6	Bavendorf, Baden- Württemberg	Obstanbau A	Nachgeführt und fix ausgerichtete PV-Module	1	Ost-West	227 kWp	2022
7	Dresden-Pillnitz, Sachsen	Ackerbau B	Vertikale PV-Module	2		134 kWp	2022
8	Heuchlingen, Landkreis Heilbronn, Baden-Württemberg	Obstanbau A	Fix ausgerichtete PV-Module	1		113 kWp	2023

9	Tuniberg, Munzingen, Baden-Württemberg	Weinbau A	fix installierte PV-Module	1	Nach Ost- West	300 kWp	2023
10	Blankenhornsberg, Ihringen, Baden-Württemberg	Weinbau A	Einachsrig nachgeführte und fix ausgerichtete PV-Module	1	Reihenverlau f Ost-West	200 kWp	2023
11	Geisenheim, Rheingau- Taunus- Kreis, Hessen	Weinbau A	Einachsrig nachgeführte PV-Module	1	Ost-West	94 kWp	2023
					Summe:	1856 kWp	

4 Potentiale von Agri-Photovoltaik-Anlagen

Für die Betrachtung des Potentials von Agri-PV werden nachfolgend das ökologische Potential, das Leistungspotential und das wirtschaftliche Potential untersucht.

4.1 Ökologisches Potential

Um das ökologische Potential zu untersuchen, werden zunächst Kriterien definiert. Anhand der Kriterien wird anschließend das Potential betrachtet.

4.1.1 Auswahl der Kriterien

Durch die Bebauung von Flächen mit Solarmodulen verändern sich die klimatischen Bedingungen auf diesen Flächen. Das wurde bereits 2016 bei PV-Freiflächenanlagen festgestellt (Bensch, 2016). Das Pflanzenwachstum wird sehr durch das Mikroklima beeinflusst und ist daher Gegenstand verschiedener Forschungsprojekte zu Agri-PV. Unter anderem befasste sich das Projekt APV-RESOLA (Agrophotovoltaik: Ressourceneffiziente Landnutzung) mit den mikroklimatischen Bedingungen und stellte fest, dass vor allem die Sonneneinstrahlung, die Niederschlagsverteilung und die Bodentemperatur von Agri-PV-Anlagen beeinflusst werden. Das **Mikroklima** mit den drei Kategorien **Lichtverfügbarkeit**, **Wasserverfügbarkeit** und **Bodentemperatur** sollte also als Kriterium für die Bewertung des ökologischen Potentials betrachtet werden. (Fraunhofer ISE, 2024a, p. 31)

Aufgrund des Klimawandels werden Starkwetterereignisse immer häufiger auftreten. Pflanzen und Tiere sind dem ausgesetzt und unterschiedlich stark davon beeinträchtigt. PV-Module können die Beeinträchtigung beeinflussen und daher spielt auch die **Schutzfunktion** der Agri-PV-Anlage gegenüber den Kulturen und Nutztieren eine wichtige Rolle und ist hier als Kriterium für das ökologische Potential betrachtet worden. (Fraunhofer ISE, no date c)

In dem Forschungsprojekt „VAckerBio“ des Fraunhofer ISE soll zur Bewertung der ökologischen Auswirkungen von vertikalen Anlagen die Bodenqualität, Schädlings- und Nützlingspopulationen und das Kulturwachstum als relevanter Untersuchungsgegenstand dokumentiert werden (Fraunhofer ISE, 2025e). Daher werden diese Kriterien hier als **Biodiversität**, **Bodenqualität** und **Kulturwachstum** mit aufgenommen.

4.1.2 Bewertung anhand der Kriterien

Um den verschiedenen Kombinationsmöglichkeiten gerecht zu werden, ist in Tabelle 9 eine Fallunterscheidung vorgenommen. Dabei wird nach der Anlagenkategorie (siehe Kapitel 2.2) und

der Nutzungsform (siehe Kapitel 2.3) unterschieden. Entsprechende Praxisanlagen sind in der Tabelle dem Fall zugeordnet.

Nachfolgend werden alle definierten Kriterien bezüglich der möglichen Kombinationen betrachtet.

Tabelle 9: Fallunterscheidung mit Einordnung verschiedener Agri-PV-Standorte

Anlagenkategorie	Nutzungsform	Standorte
Kategorie 1 (hochaufgeständert)	Dauerkulturen	Gelsdorf, Hof Nachtwey Bavendorf Heuchlingen Tuniberg (Wein) Ihringen-Blankenhornsberg Geisenheim (VitiVoltaic) Augustenberg Oberkirch-Nußbach Kressbronn
	Einjährige/ überjährige Kulturen	Weihenstephan 2013+2015 Heggelbach Alt-Morschenich (Agri-FEe) Renningen (Ihinger Hof) Grub (PilotAgriPV)
	Dauergrünland (Schnittnutzung)	
	Dauergrünland (Weidnutzung)	Löfflingen (ab 2025)
Kategorie 2 Variante 1 (bodennah, fester Winkel)	Dauerkulturen	
	Einjährige/ überjährige Kulturen	Weihenstephan (Dummy)
	Dauergrünland (Schnittnutzung)	Lemwerder
	Dauergrünland (Weidnutzung)	Schöntal (Legehennen) Uttenweiler (Legehennen)
Kategorie 2 Variante 2 (bodennah, senkrecht oder verstellbar/ nachführbar)	Dauerkulturen	
	Einjährige/ überjährige Kulturen	Dresden-Pillnitz Walldürn-Neusaß Schlier (nachgeführt) Epfendorf Grub (PilotAgriPV, tracking+senkrecht) Tützpatz Merzig-Wellingen
	Dauergrünland (Schnittnutzung)	Walldürn-Neusaß Rottweil Donaueschingen
	Dauergrünland (Weidnutzung)	Eberhardzell (Kühe)

Biodiversität

Indirekt profitieren Lebensräume und Arten davon, dass durch die Doppelnutzung landwirtschaftlicher Flächen mit Agri-PV der Nutzungsdruck auf andere ökologisch wertvolle Flächen reduziert wird. Ein direkter ökologischer Mehrwert entsteht, wenn Agri-PV mit einer extensiveren (siehe Kapitel 2.3) landwirtschaftlichen Bewirtschaftung einhergeht. Hoch aufgeständerte Module bieten aufgrund der Beschattung nur begrenzte Möglichkeiten zur Förderung der Artenvielfalt. Deutlich größere Potentiale ergeben sich hingegen bei den bodennahen vertikal ausgerichteten Anlagen. Diese ermöglichen die Anlage von linearen Blühstreifen (siehe Abbildung 9), Altgrasstreifen und Brachen mit geringer Nutzung rund um die Modulreihen, wodurch zusätzliche Lebensräume entstehen und gleichzeitig eine ökologische Vernetzung gefördert werden könnte (Blesseohl, 2023). Biodiversitätsuntersuchungen im Rahmen des VACKerBio Projektes (vertikale Agri-PV im Ackerbau) ergaben, dass es weiterer Analysen bedarf, um die Biodiversität mit der Anlage von Blühstreifen zu verbessern (Deutsche Bundesstiftung Umwelt, 2024).



Abbildung 9: Blühstreifen an senkrechter Agri-PV (Bundesinformationszentrum Landwirtschaft, no date)

Für landwirtschaftliche Betriebe, die bereits extensiv wirtschaften, kann die Nutzung von Agri-PV eine wirtschaftlich sinnvolle Ergänzung darstellen. Die daraus resultierenden Einnahmen ermöglichen es, ökologisch wertvolle Flächen – wie etwa extensiv genutztes Grünland – weiterhin naturschonend zu bewirtschaften (Blesseohl, 2023). Auf diese Weise kann einer Intensivierung aus ökonomischen Gründen entgegengewirkt werden, was indirekt dem Erhalt der biologischen Vielfalt zugutekommt.

Veränderung der Bodenfeuchte durch Beschattung und veränderter Niederschlagsverteilung beeinflusst die Artenzusammensetzung. Zu konkreten Auswirkungen auf Ökosysteme gibt es bisher aber wenig Forschungsergebnisse. Der Naturschutzbund Deutschland (NABU) befürchtet,

dass einzelne Vogelarten, die in offenem Land brüten, durch die aufgeständerten Anlagen ihr Bruthabitat verlieren (Blesseohl, 2023). Zu den Vogelarten, die sich in offenen und weiten Landschaften abseits von Wäldern wohl fühlen, zählt auch die Lerche. Auf einer PV-Freiflächenanlage in Brandenburg, auf der auch Schafe weiden, zeigt sich, dass trotz der PV-Anlagen viele Lerchen und 16 andere Vogelarten dort einen Lebensraum finden. Der Schafdung und blühende Kräuter lockt Insekten an, die wiederum den Vögeln als Nahrungsquelle dienen (Lichner, 2025). Ob Agri-PV-Flächen mit den vielfältigen Bewirtschaftungsmöglichkeiten ebenfalls als solcher Lebensraum für Vögel dienen können, muss noch weiter untersucht werden.

Lichtverfügbarkeit

Die Lichtverfügbarkeit unter den PV-Modulen ist für den Anbau von Kulturen sehr bedeutend, da sie großen Einfluss auf das Pflanzenwachstum hat.

Die Abbildung 10 zeigt die Lichtintensität und -verteilung für die verschiedenen Modultypen. Die Visualisierung stammt aus einer von Simon Lahr erstellten Simulation der auf der Agrarfläche auftreffenden solaren Strahlung. Dabei sind folgende statische Modultypen berücksichtigt:

- a) bodennahes vertikales System (Kategorie 2 Variante 2) mit Ost-West Ausrichtung
- b) bodennah mit festem Winkel (Kategorie 2 Variante 1) und Süd-Ausrichtung
- c) hochaufgeständerte Anlage (Kategorie 1) mit einem Modulabstand von 12,2 m
- d) hochaufgeständerte Anlage (Kategorie 1) mit einem Modulabstand von 6,1 m

Es wurde der Zeitraum von einem Jahr am Standort Kassel mit einem Wetterdatensatz von 2010 des Deutschen Wetterdienstes simuliert. Die Lichtintensität ist mit der Photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) angegeben. (Lahr, 2022)

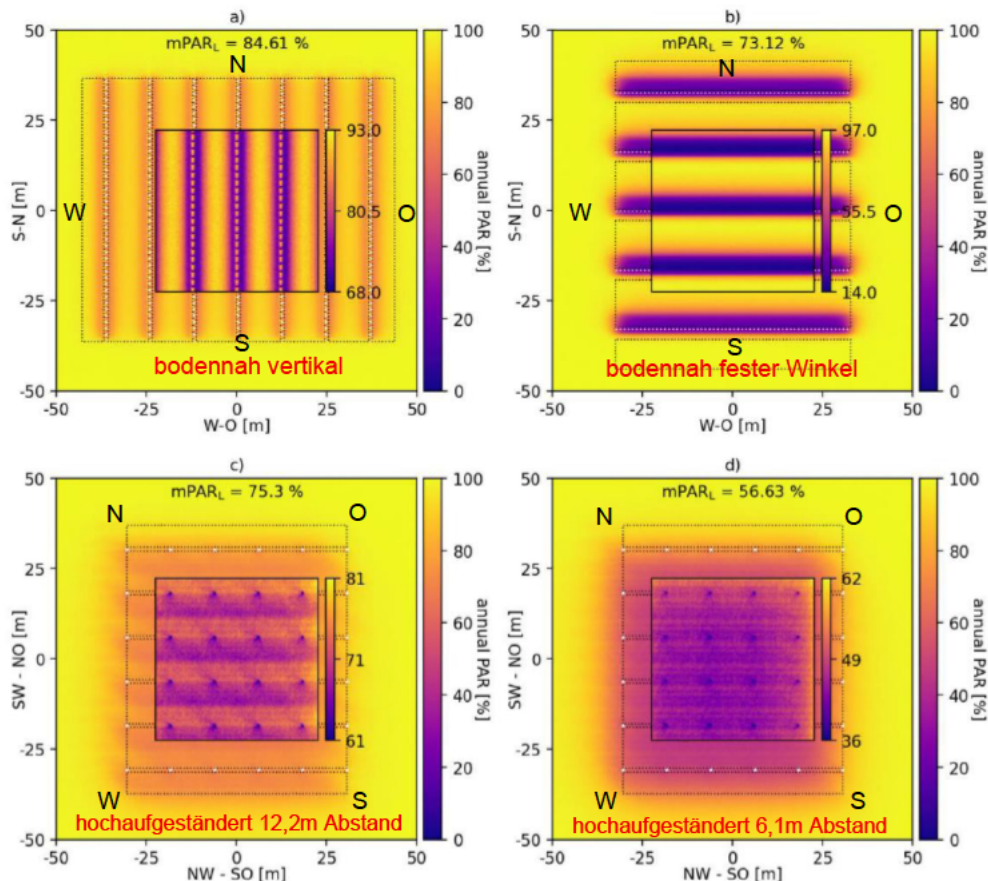


Abbildung 10: Simulierte jährliche Lichtverfügbarkeit verschiedener Agri-PV-Systeme nach (Lahr, 2022)

Die Simulationsergebnisse für das bodennahe vertikale Agri-PV-System (Abbildung 10 a) ergeben eine jährliche Verfügbarkeit der PAR auf der landwirtschaftlich nutzbaren Fläche von 84,61%. Demnach hat dieses System die höchste Lichtverfügbarkeit, verglichen mit den anderen simulierten Varianten. Auch in der Praxis bestätigt sich dieser Wert, denn durch die vertikale Agri-PV-Anlage in Donaueschingen hat sich das verfügbare Licht um nur 15% verringert (Leroy, no date). Durch die Ost-West Ausrichtung der Module bekommen die Pflanzen zur Mittagszeit fast die gesamte Sonnenstrahlung ab. Verschattung gibt es vermehrt morgens und abends (Fraunhofer ISE, 2023e). Der Schattenwurf und eine Reduzierung der Windgeschwindigkeit sorgen für weniger Verdunstung und dadurch für eine höhere Bodenfeuchtigkeit (Fraunhofer ISE, no date b). Erbsen kamen mit diesen Bedingungen weniger zurecht, doch Weizen keimte im Herbst sogar besser als auf der Kontrollfläche. Beim Anbau von Gras zwischen den Modulreihen ergab sich ein Ertrag von 88% im Vergleich zur Kontrollfläche. Dabei sind 10% auf den Flächenverlust durch die Anlagen zurückzuführen. Das Gras kommt also mit den vorliegenden Bedingungen recht gut zurecht (Leroy, no date). Lahr untersuchte zusätzlich die Lichthomogenität, indem er die Standardabweichung der solaren Einstrahlung berechnete. Die Standardabweichung liegt bei dem vertikalen System bei 7%. Je geringer die

Standardabweichung, desto höher ist die Lichthomogenität, was vorteilhaft für ein gleichmäßiges Pflanzenwachstum auf der Fläche ist.

Die PAR-Verfügbarkeit ist bei der bodennahen Anlage mit festem Winkel und Südausrichtung (Abbildung 10 b) mit 73,12% ähnlich wie die der hochaufgeständerten Anlage mit doppeltem Modulabstand c). Die Standardabweichung liegt bei 28,5%, was eine wesentlich niedrigere Lichthomogenität als bei der vertikalen Aufständering bedeutet. Ursache ist die Ausrichtung nach Süden und die bodennahe Aufständering. Die sehr geringe Lichthomogenität sorgt für ungleiches Pflanzenwachstum durch unterschiedliche Verschattung und Bodenfeuchte. Das ergab ein Projekt des Fraunhofer ISE mit Dummy-Anlagen aus Dachpappe, um die Verschattung zu simulieren (Fraunhofer ISE, 2024a). Ungleiches Pflanzenwachstum bedeutet unterschiedliche Reife- und damit Erntezeitpunkte, was in der Praxis nicht umsetzbar ist. Daher ist diese Anlagenkategorie aus ökologischer und landwirtschaftlicher Sicht nicht besonders gut für die Kombination mit Pflanzenproduktion geeignet und dementsprechend wenig Projekte gibt es in dieser Kategorie (siehe Tabelle 9). Für die Haltung von Legehennen ist dieser Anlagentyp trotz der geringen Lichthomogenität geeignet. Bei dieser Kombination gibt es zwar die Vorschrift, dass nur 49% der Auslauffläche mit PV-Modulen bedeckt sein darf, damit die restliche Fläche noch bewachsen bleibt. Die Lichtverfügbarkeit und -homogenität spielt dabei aber nur eine untergeordnete Rolle, da es primär um das Wohlbefinden der Hennen geht und nicht um das Pflanzenwachstum (Fraunhofer ISE, 2023a).

Die jährliche Verfügbarkeit der PAR bei dem hochaufgeständerten System mit geringerem Modulabstand (Abbildung 10 d) liegt bei 56,63%. Damit ist die Verschattung hier im Vergleich zu den anderen simulierten Systemarten am größten. Mit doppeltem Modulabstand (Abbildung 10 c) erhöht sich die PAR-Verfügbarkeit auf 75,3%. In der Praxis lässt sich ein ähnlicher Wert feststellen. Die Agri-PV-Anlagen in Alt-Morschenich (Projekt Agri-FEE) weisen eine Verschattung von 35% auf (Knoke, 2022) und unter der hochaufgeständerten Agri-PV-Anlage in Heggelbach am Bodensee (Projekt APV-RESOLA) wurde ein um 30% niedrigerer PAR-Wert gemessen als auf der Referenzfläche. Dort beträgt der Abstand zwischen den Modulen 9,5 m und liegt damit zwischen den beiden simulierten Konstellationen. (Fraunhofer ISE, 2019)

Es ist auch zu erkennen, dass durch den größeren Abstand streifenförmige Verschattungsmuster entstehen und damit die Lichthomogenität sinkt. Durch eine Ausrichtung der Module nach Südwesten, statt nach Süden, wird anhaltendem Schatten und ungleicher Lichtverteilung (siehe b) bereits entgegengewirkt (Beck *et al.*, 2012). Zusätzlich können semitransparente PV-Module (siehe Abbildung 11 links), bei denen ein lichtdurchlässiger Bereich zwischen den Solarzellen gelassen wird, zu einer gleichmäßigeren Lichtverteilung beitragen. Außerdem werden hochtransparente organische Solarzellen entwickelt (siehe Abbildung 11 rechts), die sichtbares Licht durchlassen. Die organische Agri-PV würde es ermöglichen, dass die für das

Pflanzenwachstum nötigen Lichtspektren durchgelassen werden und die Verschattung reduzieren. (Fraunhofer ISE, 2025a)



Abbildung 11: Semitransparentes PV-Modul links (Fraunhofer ISE, 2023d) und Mock-Up eines organischen PV-Moduls rechts (Fraunhofer ISE, 2025a)

Je nach Pflanzenart, wirkt sich die Verschattung unterschiedlich stark auf den Ertrag aus. Es wird unterteilt in Sonnen- und Schattenpflanzen. Unter hochaufgeständerten Modulen eignen sich durch die teilweise Verschattung besonders die Schattenpflanzen, welche nicht so viel Licht für ihr optimales Wachstum benötigen wie Sonnenpflanzen (Fraunhofer ISE, no date a). Beerenarten zum Beispiel wachsen auch in der Natur überwiegend im schattigen Waldgebiet. Um die tatsächliche Eignung verschiedener Nutzpflanzen festzustellen, ist man auf Feldversuche angewiesen. Bei Kartoffeln, allen Salatarten und Spinat konnte bereits festgestellt werden, dass diese Kulturen durch Verschattung positiv beeinflusst werden. Raps, Roggen und Hafer werden kaum davon beeinflusst und Mais, Weizen und Gartenzucht reagieren mit verringertem Ertrag auf Schatten (Beck *et al.*, 2012). Es gilt also, das Agri-PV-System auf die jeweils angebaute Kultur anzupassen. Für hitzeempfindliche Pflanzen kann auch ein nachgeführtes System von Vorteil sein. Der Winkel der Module wird bei der Nachführung an den Verlauf der Sonne angepasst, um mehr Sonnenstrahlung einzufangen und damit die Stromproduktion zu maximieren. Gleichzeitig werden die Pflanzen vor zu intensiver Sonnenstrahlung geschützt. Zudem kann das Nachführen der Module zu einer gleichmäßigeren Lichtverteilung beitragen, was wiederum zu dem gewünschten gleichmäßigen Pflanzenwachstum führt (Fraunhofer ISE, no date b). Es ist auch möglich, eine Nachführung einzurichten, bei der sich die Module je nach Lichtbedürfnis der Pflanzen positionieren. Ausschlaggebend für die Position können z.B. das Entwicklungsstadium der Pflanze oder die Intensität der aktuellen Sonnenstrahlung sein (Lahr, 2022). Ob sich der Energieaufwand für die Nachführung lohnt, wäre zu betrachten.

Wasserverfügbarkeit

Bei der Untersuchung an PV-Freiflächenanlagen hat man herausgefunden, dass die Bodenfeuchte unter den PV-Anlagen gehalten wird, da die Verdunstung geringer ist. Das

wiederum liegt an der niedrigeren Temperatur unter den Schatten spendenden Modulen (Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, 2021). Da sich die Wasserknappheit weiter verschärft, ist es vorteilhaft den zusätzlichen Wasserbedarf der Pflanzen durch die Verschattung zu reduzieren (Fraunhofer ISE, no date a).

Hochaufgeständerte Agri-PV-Module beeinflussen die Niederschlagsverteilung erheblich. Manche Bereiche sind durch die Module vom Regen abgeschirmt, andere werden verstärkt mit Regenwasser versorgt. Zudem entsteht an den Anlagen eine Wasserabtropfkante, die den Boden darunter verschlämmt, für Bodenerosion sorgt und ggf. darunter befindliche empfindliche Pflanzen beschädigt. Die Anlagenkonstruktion muss das berücksichtigen und zum Beispiel Regenrinnen für die Regenwassersammlung vorsehen. Das gesammelte Wasser kann dann z.B. für ein künstliches Bewässerungssystem verwendet werden, mit dem eine gleichmäßige Wasserverfügbarkeit sichergestellt wird (Fraunhofer ISE, 2025b).

Auch das Nachführen der Module kann für eine gleichmäßigere Niederschlagsverteilung sorgen. Durch Analysieren der räumlichen Regenverteilung und des Einflusses von z.B. Neigungswinkel und Windbedingungen zeigt die Arbeit von Elamri et al. (Elamri *et al.*, 2018), dass die Modulausrichtung kurzfristig so gesteuert werden kann, dass Regenwasser gleichmäßiger verteilt wird. Das ist wichtig für die Bodenfeuchte und den Ertrag der Pflanzen.

Auch an der Forschungsanlage in Alt-Morschenich bei Jülich wird ein Nachführungssystem entwickelt. Die Module mit Ost-West Ausrichtung können in verschiedenen Betriebsmodi bewegt werden. Dabei liegt der Fokus entweder auf der Energiegewinnung, auf dem Pflanzenertrag, der Regenwassersammlung oder es ist ein kombinierter Modus. Die Regenwassersammlung ist hier durch eine V-Form der Modulinstallation möglich (siehe Abbildung 12). Bei Regen positionieren sich die Module so, dass das „V“ nach oben geöffnet ist. Das gesammelte Wasser kann für eine künstliche Bewässerung verwendet werden. (Meier-Grüll *et al.*, 2024)



Abbildung 12: Agri-PV-Anlage bei Jülich mit V-Form zur Regenwassersammlung (Meier-Grüll *et al.*, 2024)

Bei den vertikalen Anlagen ist das Problem der Abtropfkannte durch die senkrechte Aufstellung der Module reduziert (Deutsche Bundesstiftung Umwelt, 2024). An den Modulen läuft das Wasser senkrecht herunter und landet außerhalb der landwirtschaftlich nutzbaren Fläche, die daher nicht wesentlich davon beeinflusst wird. Der Regen zwischen den Anlagenreihen wird nicht durch die Module abgeschirmt und fällt gleichmäßig auf die Fläche. Dadurch bleibt die Bodenfeuchtigkeit gleichmäßig verteilt (Fraunhofer ISE, 2023e). Die Feuchtigkeit im Boden bleibt durch Schatten und Windschutzeffekt länger erhalten als auf freiem Feld, obwohl die Module kein „Dach“ bilden wie bei den anderen Systemen (Leroy, no date).

Bodentemperatur

Die Messwerte unter der hochaufgeständerten Agri-PV-Anlage in Heggelbach zeigen, dass dort mit generell geringeren Bodentemperaturen unter den Anlagen als auf der Kontrollfläche gerechnet werden kann. Im Frühjahr und im Sommer waren die Unterschiede besonders deutlich (Weselek *et al.*, 2021). Das deutet darauf hin, dass besonders an warmen Tagen die Agri-PV für eine Kühlung des Bodens sorgt und vor Austrocknung schützt.

Schutzfunktion

Sonderkulturen wie Obst, Gemüse und Wein sind besonders anfällig für Umwelteinflüsse wie Hagel, Starkregen, Frost und direkte Sonneneinstrahlung bzw. Dürre. (Fraunhofer ISE, 2025b). Momentan werden Hagelschutznetze oder Folienüberdachungen aus Kunststoff standardmäßig zur Überdachung der schutzbedürftigen Kulturen verwendet (Fraunhofer ISE, no date c). Diese können durch hochaufgeständerte Agri-PV-Anlagen ersetzt werden (siehe Abbildung 13). Durch die teilweise Überdachung der Module sind die Pflanzen vor Witterungsschäden geschützt und der Nutzen und Synergie-Effekt ist bei diesen Kulturen besonders hoch (Fraunhofer ISE, 2025b).



Abbildung 13: Äpfel im geschützten Anbau links und unter Agri-PV rechts (Fraunhofer ISE, 2023b)

Durch Hagelschlag wird der Ertrag gemindert und Krankheitserreger können die beschädigten Stellen der Pflanze angreifen. Bei entsprechendem Schutz kann ggf. sogar Pflanzenschutzmittel

eingespart werden. Die PV-Module sollen Hagelschlag aushalten und müssen entsprechende Tests durchlaufen (Knoke, 2022). Zu hohe Sonneneinstrahlung kann zum Beispiel beim Apfelanbau und beim Weinbau die Qualität der Ernte erheblich mindern. Durch Verdunstung kann es bei ausbleibenden Niederschlägen außerdem zu Trockenheit kommen. Agri-PV-Anlagen über den Pflanzen können vor diesen Schäden schützen. Auch in Spätfrostnächten kann die Überdachung durch Halten der Wärme Frostschäden an den Blüten vermeiden. Bei starkem Regen können die Früchte von empfindlichen Kulturen wie Kirschen aufplatzen und den Ertrag somit mindern. Außerdem bedeutet die Nässe ein höheres Risiko für Pilzbefall. Daher kann die Agri-PV nicht nur den Ertrag steigern, sondern auch den Einsatz von Fungiziden minimieren und Maschineneinsatz sowie Arbeitsstunden für Pflanzenschutzmaßnahmen reduzieren. Durch den dauerhaften und langlebigen Schutz entfällt bei der Agri-PV die regelmäßige Montage neuer Schutznetze oder Folien sowie die Entsorgungskosten. Zudem gibt es keine Geräusentwicklung mehr durch Schutznetze und Folien. (Fraunhofer ISE, 2025c, no date c)

Der Schutz vor hoher Sonneneinstrahlung zeigte sich in Heggelbach im heißen Sommer 2018. Die Teilverschattung steigerte die Erträge im Vergleich zur Referenzfläche und der fehlende Regen konnte durch die Überdachung kompensiert werden. (Fraunhofer ISE, 2024a)

Das Projekt „VitiCULT-PVmobil“ (siehe Abbildung 14) forscht an einer einfahrbaren Agri-PV-Anlage im Weinbau. Sie soll nach Neupflanzung von jungen Rebenbeständen über diesen aufgebaut werden, um die noch empfindlichen Pflanzen vor Umwelteinflüssen zu schützen. Bei Bedarf lassen sich die Module zur Seite fahren. (sbp sonne, 2024)



Abbildung 14: VitiCULT PV-mobil links (sbp sonne, 2024) und Legehennen unter PV in Schöntal rechts (Fraunhofer ISE, 2023a)

Auch die Module der Kategorie 2 Variante 1 haben eine Schutzfunktion. Diese bezieht sich auf Legehennen oder auch andere Nutztiere und bietet Schutz vor Regen, Wind, Hagel und starker Sonneneinstrahlung. Bei hohen Temperaturen kann die Produktivität und die Gesundheit der Hennen unter dem Hitzestress leiden, weshalb die Abschirmung einen bedeutenden Vorteil darstellt. Außerdem erhöht es die Sicherheit der Tiere gegenüber Raubvögeln, da sie unter den

Modulen Schutz suchen können. Im Praxisbetrieb in Schöntal zeigte sich, dass die Hennen sich vor der Aufstellung der Module ausschließlich in Stallnähe aufhielten, weil Deckungsmöglichkeiten vor Raubvögeln fehlten. (Fraunhofer ISE, 2023a)

Die vertikalen Anlagen haben auch eine gewisse Schutzfunktion. Durch ihre Ost-West Ausrichtung bieten sie vor allem in den Tagesrandzeiten Schatten, während zur Mittagszeit die hohe Intensität der Sonne auf die Pflanzen trifft. Schutz vor hohen Windgeschwindigkeiten und hoher Verdunstung können diese Anlagen bieten (Leroy, no date), während Starkregen und Hagel nicht abgefangen werden können.

Bodenqualität

Die bereits beschriebene Abtropfkante bei hochaufgeständerten Anlagen verringert die Qualität des darunterliegenden Bodens. Es sind verschiedene mögliche Maßnahmen zu ergreifen - wie unter dem Kriterium Wasserverfügbarkeit beschrieben -, um die Auswirkungen zu reduzieren. Bei den vertikalen Anlagen ist das Problem der Abtropfkante nicht so ausgeprägt, da der darunter liegende Boden nicht zur landwirtschaftlich nutzbaren Fläche gehört. Die Erosionsgefährdung des Bodens ist dadurch reduziert. Es kann passieren, dass der Boden bei der Installation oder dem Rückbau der Anlage durch Fahrzeuge verdichtet wird. Dies kann durch spezielle Reifen oder mobile Fahrstraßen vermindert werden. Außerdem ist Vegetation und trockener Boden vorteilhaft. Auch auf auslaufende Betriebsstoffe sollte besonders geachtet werden. Beim Rückbau der Anlage muss zudem berücksichtigt werden, dass keine Rückstände des Agri-PV-Systems verbleiben, die die Bodenqualität mindern könnten. (Deutsches Institut für Normung e.V. (Hg.), 2021)

Kulturwachstum

Die Untersuchung von Vélez Martín et al. beschäftigte sich mit der Reifung von Äpfeln unter hochaufgeständerter Agri-PV am Bodensee. Die Module sind semitransparent mit einer Lichtdurchlässigkeit von 40%, wobei der Boden zu 70% bedeckt ist. Die Vermessung der Äpfel zeigte, dass die Früchte unter der Agri-PV etwa 5mm kleiner im Durchmesser waren. Das Gewicht und Volumen waren etwa 16% geringer. Zur vollen Reife bräuchten die Äpfel unter den Modulen noch ungefähr 12 Tage länger als auf der Referenzfläche. Als Grund dafür ist anzunehmen, dass sie weniger Sonnenlicht bekommen. Die spätere Reifung kann schwierig sein, wenn bei dem lokalen Klima die Apfelsorte nicht rechtzeitig vor der kälteren Jahreszeit reift und daher den vermarktbaren Reifegrad nicht erhält. Die Auswirkung ist abhängig von den lokalen Klimabedingungen, der Sorte, der Marktnachfrage und dem gewünschten Erntezeitpunkt. Als Anpassung an steigende Temperaturen durch den Klimawandel ergibt sich ein Nutzen, da durch höhere Sonneneinstrahlung die Reifeverzögerung ggf. nicht mehr so ausgeprägt ist. (Vélez *et al.*, 2024)

Beim Weinbau entsteht durch den Klimawandel bereits das Problem, dass die Trauben bis zu einem Monat früher reif sind. Das mindert die Qualität des Weins und bedeutet für die Winzer und Winzerinnen, dass die Ernte bereits im wesentlich wärmeren September statt Mitte bis Ende Oktober passieren muss. Schaderreger-Infektionen verlaufen bei den wärmeren Temperaturen sehr viel schneller, weshalb die Ernte schneller von statten gehen muss und viele Winzer und Winzerinnen bei der maschinellen Ernte aufrüsten müssen. Durch die Verschattung durch Agri-PV-Anlagen kann die Reife verzögert und so den Auswirkungen des Klimawandels entgegengewirkt werden. (Fraunhofer ISE, 2025f)

Unter der hochaufgeständerten Agri-PV-Anlage in Heggelbach wurden Winterweizen, Kartoffeln, Sellerie und Klee gras angebaut. Es konnte festgestellt werden, dass das Pflanzenwachstum unter der Agri-PV höher war, was als Strategie zur Anpassung an die Schattenbedingungen gesehen wird. Die Trockenmasse war jedoch dadurch nicht immer höher. Im Jahr 2017 haben sich bei allen Pflanzen Ertragsverluste von -5% bis -20% ergeben, während im heißen und trockenen Sommer 2018 der Winterweizen, Sellerie und die Kartoffeln einen um 3% bis 12% höheren Ertrag hatten als auf der Referenzfläche (Weselek *et al.*, 2021). Daraus lässt sich schließen, dass Agri-PV bei heißem und trockenem Klima ertragssteigernd wirkt, was vorteilhaft sein kann, um das Risiko von Dürreschäden, die durch den Klimawandel auch in gemäßigten Klimazonen häufiger zu erwarten sind, zu senken.

Bei den vertikalen Agri-PV-Anlagen lässt sich ebenfalls ein Höhenwachstum der Pflanzen durch die Verschattung feststellen. Auswirkungen auf die Pflanzenentwicklung sind laut dem Projekt VAckerBIO möglich, aber es bedarf hier noch weiterer Validierung (Deutsche Bundesstiftung Umwelt, 2024). Die Erträge von zwischen den Modulen angebautem Gras in Donaueschingen belaufen sich auf 88% in den Jahren 2022 und 2023. Dabei kommt der Großteil des Ertragsverlusts durch den Flächenverlust von 10% zustande. Erbsen hatten hier einen Ertragsverlust, während Weizen im Herbst sogar besser keimte als auf der Kontrollfläche (Leroy, no date). Als besonders gut geeignet stellte sich Gerste heraus, da die Pflanze mit der Teilverschattung kein Problem hat (Fraunhofer ISE, 2023e). Während Gras und Gerste gut für den Anbau zwischen den vertikalen Anlagen geeignet scheint, bedarf es bezüglich anderer Kulturen noch weiterer Ergebnisse, um die Eignung besser einschätzen zu können.

4.1.3 Zusammenfassung

In der Tabelle 10 sind die Ergebnisse der Ökologischen Betrachtung zusammengefasst. Nicht für alle Fälle gibt es Informationen und öffentliche Forschungsergebnisse, wodurch nicht alle Kombinationen bewertet werden können. Es besteht an vielen Stellen noch Forschungsbedarf. Es muss weiterhin durch Feldversuche untersucht werden, wie sich die zahlreichen Faktoren untereinander beeinflussen, um konkretere Anwendungsempfehlungen geben zu können.

Die bisherigen Forschungsergebnisse zeigen, dass Agri-PV – vor allem das hochaufgeständerte System - großes Potential für aride Klimazonen hat, da dort vom Schatten profitiert wird. Es laufen bereits Projekte für die Anwendung der Technologie in Schwellen und Entwicklungsländern wie z.B. in Indien und Algerien (Fraunhofer ISE, 2019). Auch das vertikale System hat Potential, besonders für die Nutzung in der Kombination mit Grünland. Für das System gibt es bisher aber weniger Forschungsergebnisse. Das schräge bodennahe Agri-PV-System findet aufgrund der sehr ungleichmäßigen Verschattung selten Anwendung in der Praxis.

Tabelle 10: Zusammenfassung der ökologischen Bewertung

		Mikroklima						
Fallunterscheidung		Licht	Wasser	Boden-temp.	Schutz	Bio-diversität	Boden-qualität	Wachstum
hochaufgeständert	Dauerkulturen	o	o	+	+	o	o	+
	Einjährig/Überjährig	o			+			+
	Dauergrünland Schnittnutzung	o			/			/
	Dauergrünland Weidenutzung	/			/			/
Bodennah, fester Winkel	Dauerkulturen	-	/	/	/	/	o	/
	Einjährig/Überjährig				/			
	Dauergrünland Schnittnutzung				/			
	Dauergrünland Weidenutzung	+			+			
Bodennah, vertikal/verstellbar	Dauerkulturen	/	+	/	o	+	o	/
	Einjährig/Überjährig	o						o
	Dauergrünland Schnittnutzung	+						+
	Dauergrünland Weidenutzung	/						/

Legende:

- + positiver Effekt
- o keine oder sowohl negative als auch positive Beeinflussung gleicher Gewichtung
- negativer Effekt
- / keine Infos

4.2 Leistungspotential

Mit dem EEG von 2023 wurde festgelegt, dass in Deutschland bis zum Jahr 2030 insgesamt 215 GW Photovoltaik installiert sein sollen (Umweltbundesamt, 2023). Ende 2024 betrug die installierte Netto-Leistung von Photovoltaik in Deutschland 100,4 GWp (Fraunhofer ISE, 2025d). Um das Ausbauziel für Photovoltaik zu erreichen, muss die installierte Leistung also innerhalb von 5 Jahren mehr als verdoppelt werden.

Die folgenden Unterkapitel beschäftigen sich mit der Leistung von Agri-PV-Anlagen und der Fläche in Deutschland, die dafür genutzt werden könnte.

4.2.1 Leistung der Anlagentypen

Bei Agri-PV muss der Abstand zwischen den Anlagenreihen größer sein als bei PV-Freiflächenanlagen, damit der Anbau von Kulturen zwischen oder unter den Modulen möglich ist. Der Abstand variiert dabei je nach Anlagentyp und landwirtschaftlicher Nutzungsform. Je nach Bewirtschaftung müssen die Flächen zwischen den Anlagen von unterschiedlich breiten Maschinen befahrbar sein. Bei vertikalen Anlagen (Ost-West Ausrichtung) sollte der Abstand außerdem nicht kleiner als 8 m gewählt werden, da die Module sich bei tiefstehender Sonne sonst gegenseitig verschatten können (Scharf, Grieb and Fritz, 2021; Fraunhofer ISE, 2023e). Der Abstand wird sehr individuell je nach Anwendungsfall gewählt und reicht von 4 m beim Anbau von zum Beispiel Beeren, Äpfeln oder Salat (Meier-Grüll *et al.*, 2024) bis zu über 18 m beim Ackerbau (Zwosta, 2023).

Der Abstand zwischen den Modulen beeinflusst wesentlich den Flächenbedarf der Stromerzeugung. Die Tabelle 11 gibt die Einschätzung des Fraunhofer ISE zu der Leistung der beiden Anlagentypen pro Fläche wieder. Während PV-Freiflächenanlagen für eine installierte Leistung von 900 kWp im Schnitt 1 ha benötigen, brauchen Agri-PV-Anlagen der Kategorie 1 dafür 1,4 ha. Agri-PV-Anlagen der Kategorie 2 benötigen sogar 2,65 ha, um die gleiche Leistung bereitstellen zu können. Der Flächenbedarf für die bodennahen Systeme ist demnach um einiges höher als der von hochaufgeständerten Systemen. Das liegt an den größeren Abständen zwischen den Modulen. Während bei den vertikalen Anlagen nur links und rechts der Fahrspur bzw. der landwirtschaftlich genutzten Fläche Module stehen, können bei den hochaufgeständerten Anlagen zusätzlich Module wie ein Dach über den Fahrgassen montiert sein, was die Moduldichte erhöht. Die installierbare Leistung pro Fläche reduziert sich dadurch bei dem vertikalen System um etwa 50% im Vergleich zum hochaufgeständerten System, da jede zweite Modulreihe wegfällt. Die Wertebereiche in Tabelle 11 für die Leistung pro Fläche der Kategorien 1 und 2 passen zu dieser Herleitung.

Tabelle 11: Flächenbedarf von Agri-PV im Vergleich zu PV-Freiflächenanlagen (PV-FFA) nach (Fraunhofer ISE, 2024a)

Anlagentyp	Leistung pro Fläche	Flächenbedarf
PV-Freiflächenanlage	700 - 1100 kWp/ha	
Kategorie 1 (hochaufgest.)	500 – 800 kWp/ha	1,2 bis 1,4-mal so viel wie PV-FFA
Kategorie 2 (bodennah)	250 – 430 kWp/ha	fast 3-mal so viel wie PV-FFA

In der Tabelle 12 ist für einige der Praxisanlagen die Leistung pro Fläche angegeben. Die Größenordnung stimmt mit den Wertebereichen aus Tabelle 11 überein. Die bodennahen vertikalen Anlagen haben auch nach diesen Werten einen höheren Flächenbedarf.

Tabelle 12: Praxiswerte für den Flächenbedarf (Fraunhofer ISE, 2023g)

Fall	Standort	Modulabstand	Leistung pro Fläche
1A (hochaufgest. mit Dauerkulturen)	Gelsdorf, Hof Nachtwey		737 kWp/ha
	Bavendorf		454 kWp/ha
	Heuchlingen		565 kWp/ha
	Tuniberg (Wein)		600 kWp/ha
	Ihringen-Blankenhornsberg		496 kWp/ha
	Geisenheim (VitiVoltaic)		587 kWp/ha
	Kressbronn		597 kWp/ha
1B (hochaufgest. mit einjährigen Kulturen)	Weihenstephan 2013	7 m	458 kWp/ha
	Heggelbach	9,5 m	646 kWp/ha
	Alt-Morschenich (Agri-FEE)		810 kWp/ha
22B (senkrecht mit einjährigen Kulturen)	Dresden-Pillnitz		297 kWp/ha
	Merzig-Wellingen		371 kWp/ha
22C (senkrecht mit Dauergrünland Schnitt)	Walldürn-Neusaß	9m	338 kWp/ha
	Donaueschingen	10 m	292 kWp/ha

Der Tagesverlaufs der Stromproduktion ist bei dem vertikalen System untypisch im Vergleich zu herkömmlichen Solaranlagen. Diese sind meist nach Süden ausgerichtet und haben daher ihre Produktionsspitzen am Mittag. Die nach Ost-West ausgerichteten bifazialen Module hingegen produzieren vor allem morgens und abends Strom. So können sie die geringere Stromproduktion

anderer PV-Anlagentypen ausgleichen und den Bedarf decken. (Scharf, Grieb and Fritz, 2021; Zwosta, 2023)

Wie viel Energie mit der installierten PV-Leistung letztendlich produziert wird, hängt davon ab, wie viel Solarstrahlung auf die Module trifft. Mit dem spezifischen Ertrag lässt sich die Energie in kWh pro installierte Leistung in kWp ausdrücken. In Deutschland liegt der durchschnittliche spezifische Ertrag von Solaranlagen bei 950 kWh/kWp. Die Anlage in Heggelbach produzierte im ersten Betriebsjahr (2016/2017) bereits 1266 kWh/kWp und konnte dies im heißen Sommer 2018 auf 1285,3 kWh/kWp steigern. Der überdurchschnittliche Ertrag lässt sich durch die hohe solare Strahlung in dem Gebiet und durch die bifazialen Module erklären, die bei der Agri-PV-Anlage der Kategorie 1 installiert sind. Vom Boden und den Pflanzen reflektiertes Licht, das auf die Modulunterseite trifft, kann so zur Stromerzeugung genutzt werden. Je nach Strahlung kann das die Stromerträge um bis zu 25% steigern. Durch die hohe Aufständigung bei Agri-PV der Kategorie 1 gelangt mehr Sonnenstrahlung auf die Unterseiten der Module als das bei herkömmlichen PV-Freiflächenanlagen der Fall ist. Daher sind bifaziale Module nicht nur für die vertikalen Agri-PV-Anlagen gut geeignet. (Fraunhofer ISE, 2024a)

4.2.2 Potential der verfügbaren Fläche in Deutschland

Die Landwirtschaft hat einen Anteil von 50,3% an der Fläche Deutschlands, das sind 16.585.500 ha (Statistisches Bundesamt, 2025a). Um abschätzen zu können, wie viel Fläche davon für Agri-PV genutzt werden könnte, werden die Anbauflächen für die verschiedenen Nutzungsformen betrachtet (siehe Tabelle 13).

Tabelle 13: Landwirtschaftliche Flächennutzung 2023 (Statistisches Bundesamt, 2025b)

Nutzungsform	Fläche in Deutschland
Dauerkulturen	199.900 ha
Ackerland	11.681.400 ha
Dauergrünland mit Schnittnutzung	1.981.200 ha
Dauergrünland mit Weidenutzung	2.475.700 ha

Dauergrünland mit Schnitt- oder Weidenutzung ist nach den bisherigen Praxiserfahrungen gut geeignet, um mit bodennahen Agri-PV-Systemen kombiniert zu werden. In Deutschland gibt es über 4 Mio. Hektar Dauergrünland mit Schnitt- oder Weidenutzung (siehe Tabelle 13). Würden auf diesen Flächen bodennahe Agri-PV-Anlagen installiert werden, ergibt sich mit einer Leistung pro Fläche von 250 kWp/ha (siehe Tabelle 11) ein Leistungspotential von 1.100 GWp.

$$(1.981.200 \text{ ha} + 2.475.700 \text{ ha}) \cdot 250 \text{ kWp/ha} \approx 1.100 \text{ GWp} \quad (1)$$

Die hochaufgeständerten Agri-PV-Anlagen zeigen einen hohen Synergie-Effekt bei der Kombination mit Dauerkulturen. Diese haben mit knapp 0,2 Mio. Hektar (siehe Tabelle 13) nur einen Flächenanteil von 1,2% an der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Deutschland. Mit einer Flächenbelegung von 500 kWp/ha (siehe Tabelle 11) ergibt sich ein Potential von etwa 99 GWp, womit das Ausbauziel für 2030 fast erreicht wäre.

$$199.900 \text{ ha} \cdot 500 \text{ kWp/ha} \approx 99 \text{ GWp} \quad (2)$$

Auch Ackerland mit einjährigen Kulturen kann mit hochaufgeständerter Agri-PV kombiniert werden. Da hier viele verschiedene Kulturen angebaut werden, die unterschiedlich gut für Agri-PV geeignet sind (oder noch keine Erfahrungen vorliegen), ist es schwieriger abzuschätzen, wie viel Fläche dafür zur Verfügung steht. Der in Deutschland häufig angebaute Mais (fast 15% der landwirtschaftlichen Fläche) ist aufgrund des hohen Lichtbedürfnisses und des hohen Wachstums nicht für Agri-PV geeignet (Fraunhofer ISE, 2024a; Statistisches Bundesamt, 2025b). Werden als Abschätzung nur die Hälfte der Ackerflächen ohne Maisanbau betrachtet und eine Flächenbelegung von 500 kWp/ha angenommen, ergibt sich ein Potential von weiteren 2.300 GWp.

$$0,5 \cdot (11.681.400 \text{ ha} - 2.466.400 \text{ ha}) \cdot 500 \text{ kWp/ha} \approx 2.300 \text{ GWp} \quad (3)$$

Insgesamt ergibt sich somit ein Potential von 3.499 GWp auf einer Fläche von 13.871.800 ha. Das übertrifft die Photovoltaik-Ausbauziele Deutschlands für 2030 deutlich. Die Berechnungen stellen allerdings nur eine grobe Abschätzung dar. Für eine genauere Betrachtung müssten zusätzlich zum Beispiel die Lichtbedingungen, die maximal technisch mögliche Hangneigung, gesetzliche Vorgaben, naturschutzrechtliche Aspekte, die Bodenqualität und nur tatsächlich geeignete Ackerkulturen berücksichtigt werden. Trotzdem ist deutlich ein grundlegendes technisches Leistungspotential der Agri-PV-Systeme erkennbar. Würden nur 3% des berechneten Potentials umgesetzt werden, würde dies bereits das Photovoltaik-Ausbauziel erfüllen. Das Fraunhofer ISE gibt als Schätzung ein Potential für hochaufgeständerte Agri-PV von 1700 GWp an (Fraunhofer ISE, 2024a). Es wurden dafür vermutlich andere Annahmen bezüglich der geeigneten Ackerflächen oder der Leistung pro Fläche getroffen.

4.2.3 Landnutzungseffizienz

In Deutschland wird 13% der landwirtschaftlichen Fläche für den Energiepflanzenanbau genutzt. 13% der landwirtschaftlichen Fläche entsprechen etwa 2 Mio. Hektar. Bei der Doppelnutzung dieser Fläche mit Agri-PV, lässt sich eine Leistung von ungefähr 1.000 GWp berechnen. Die Flächeneffizienz bezüglich der Stromproduktion ist dabei deutlich besser als beim

Energiepflanzenanbau. So kann Agri-PV 32-mal mehr Strom pro Hektar erzeugen als Energiemais (Fraunhofer ISE, 2024a).

Auch wenn Agri-PV mehr Fläche für die Stromerzeugung benötigt als herkömmliche PV-Freiflächenanlagen (siehe Kapitel 4.2.1), kann die Doppelnutzung der Fläche die Landnutzungseffizienz erheblich steigern. Um die Landnutzungseffizienz zu bestimmen, wird die Doppelnutzung durch Agri-PV verglichen mit der getrennten Flächennutzung von Landwirtschaft und Stromproduktion. In Abbildung 15 ist die Landnutzungseffizienz anhand der Erträge der Forschungsanlage in Heggelbach 2018 dargestellt. Die getrennte Flächennutzung mit einem Hektar Kartoffelanbau und einem Hektar für die Solarstromproduktion ergeben jeweils 100% Ertrag. Der Kartoffelertrag auf der ebenfalls einen Hektar großen Agri-PV-Fläche ist um 3% größer gewesen als bei der getrennten Nutzung. Der Stromertrag hingegen ist auf 83% gesunken. Zusammen ergibt sich dennoch ein Ertrag von 186% auf der Agri-PV-Fläche und damit eine höhere Landnutzungseffizienz (Fraunhofer ISE, 2024a). Bei getrennter Flächennutzung müsste die Fläche 1,86-mal so groß sein wie die Agri-PV-Fläche, um den gleichen landwirtschaftlichen Ertrag und gleichen Stromertrag zu erzeugen.

Selbst wenn auf der Agri-PV-Fläche jeweils nur 80% des Ertrages der Referenzflächen erbracht wird, ergibt sich noch eine Landnutzungseffizienz von 160%.

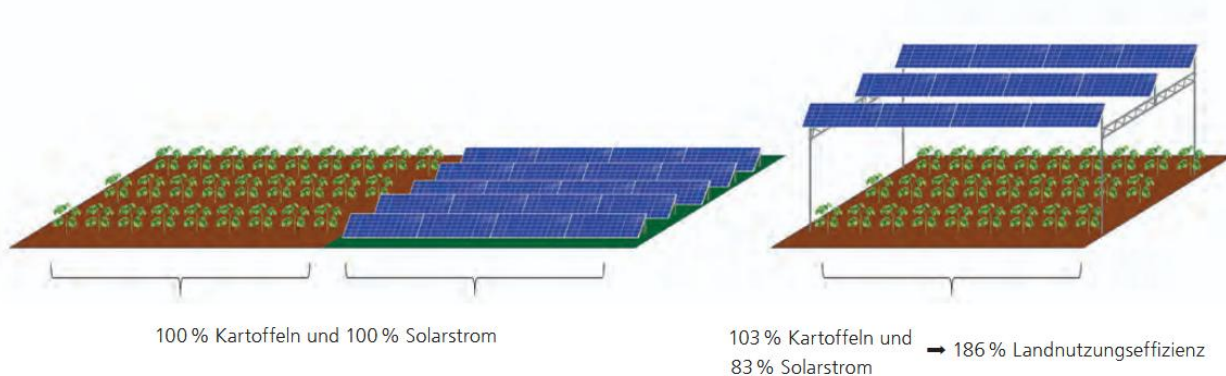


Abbildung 15: Landnutzungseffizienz mit Agri-PV im Kartoffelanbau in Heggelbach (Fraunhofer ISE, 2024a)

4.3 Wirtschaftliches Potential

Die wirtschaftliche Betrachtung von Agri-PV ist wichtig für ihre Einordnung als zukunftsfähige Landnutzungsform. Während klassische PV-Freiflächenanlagen meist auf die Minimierung von Kosten und die Maximierung des Stromertrags optimiert sind, verfolgt Agri-PV das Ziel, Energieerzeugung und landwirtschaftliche Produktion auf derselben Fläche zu kombinieren. Die folgenden Kapitel gehen auf die anfallenden Investitions- und Betriebskosten beider Bereiche ein.

4.3.1 Stromgestehungskosten

Die Stromgestehungskosten (engl. Levelized Cost of Electricity = LCOE) ermöglichen es unterschiedliche Energieerzeuger hinsichtlich ihrer Kosten miteinander zu vergleichen. Zur Berechnung werden alle Kosten herangezogen, die bei Errichtung und während des Betriebs anfallen. Den Kosten wird die während des gesamten Nutzungszeitraums erzeugte Energie gegenübergestellt (Kost *et al.*, 2024). Es gilt (Konstantin and Konstantin, 2023):

$$LCOE = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{A_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{M_{t,el}}{(1+i)^t}} \quad (4)$$

LCOE	Stromgestehungskosten in €/kWh
I_0	Investitionsausgaben in €
A_t	Betriebsausgaben im jeweiligen Jahr in €
$M_{t,el}$	Produzierte Strommenge im jeweiligen Jahr in kWh
i	realer kalkulatorischer Zinssatz
n	kalkulatorische Nutzungsdauer in Jahren
t	jeweiliges Betriebsjahr (1,2, ...n)

In einer Studie des Fraunhofer ISE zu Stromgestehungskosten Erneuerbarer Energien (Kost *et al.*, 2024) wurden die Stromgestehungskosten verschiedener Energieerzeuger analysiert. Neben verschiedenen PV-Anlagentypen wurde auch Agri-PV in dieser Studie berücksichtigt. Dabei wurde von einer Lebensdauer der Agri-PV-Anlagen von 30 Jahren ausgegangen. Die Investitionskosten I_0 für Agri-PV-Anlagen (0,5-2 MWp) liegen zwischen 900 und 1700 € pro kW und sind damit vergleichbar mit denen größerer PV-Dachanlagen (>30kWp), aber wesentlich höher als die von PV-Freiflächenanlagen (>1 MWp). Für die produzierte Strommenge $M_{t,el}$ wurden für die Berechnung der Stromgestehungskosten verschiedene Standorte und damit unterschiedlich starke Sonneneinstrahlung betrachtet. Die Ergebnisse der Studie sind in Abbildung 16 zu sehen.

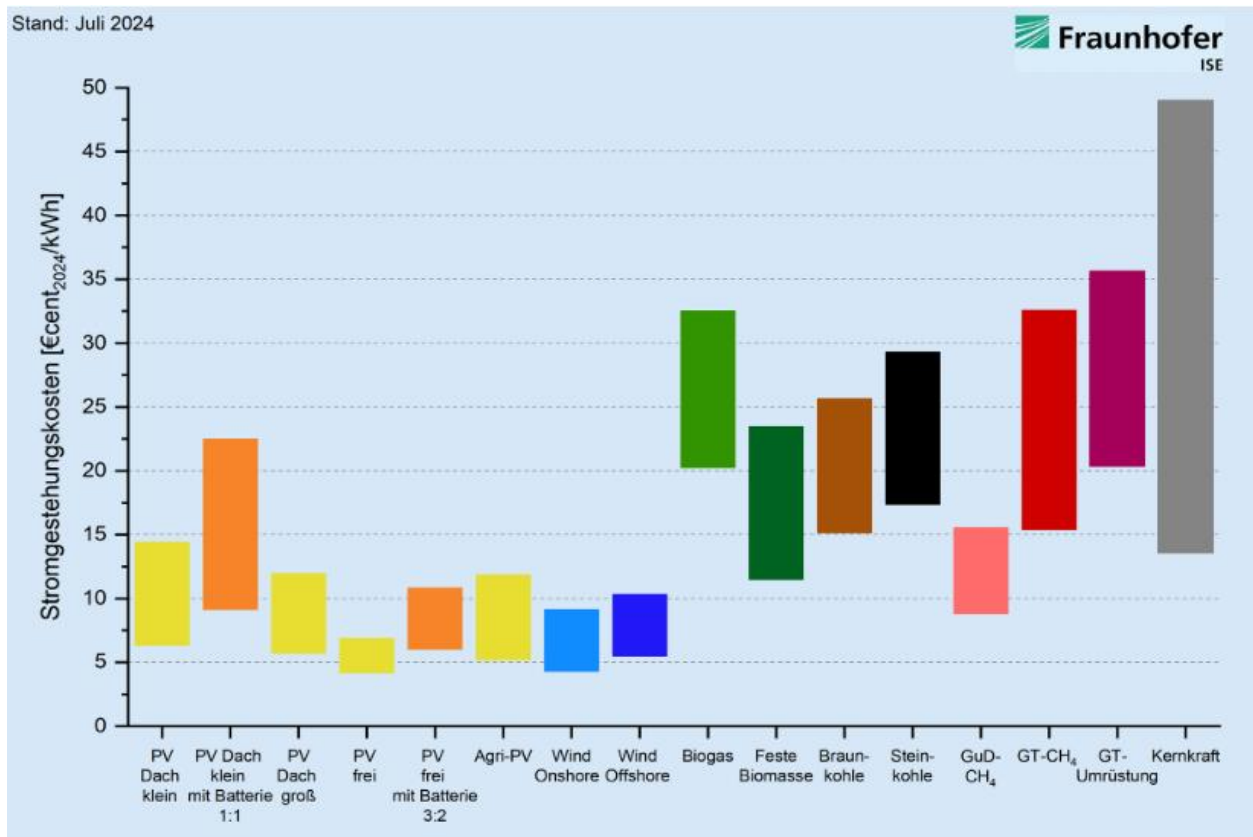


Abbildung 16: Stromgestehungskosten für Erneuerbare Energien und konventionelle Kraftwerke in Deutschland 2024 (Kost *et al.*, 2024)

Die berechneten Stromgestehungskosten von Agri-PV-Anlagen liegen zwischen 5,2 und 11,9 ct/kWh. Die Bandbreite ergibt sich hauptsächlich durch die variierende Sonneneinstrahlung und die Kostenunterschiede. In Süddeutschland ist durch die höhere Sonneneinstrahlung mit Stromgestehungskosten im niedrigeren Bereich nämlich von 5,2 bis 8,7 ct/kWh zu rechnen. In Norddeutschland hingegen liegen diese im Bereich von 7,1 bis 11,9 ct/kWh. (Kost *et al.*, 2024)

Im Vergleich zu den anderen PV-Anlagentypen zeigt sich Agri-PV als durchaus konkurrenzfähig. Die Stromgestehungskosten von Agri-PV-Anlagen liegen zwar über denen von PV-Freiflächenanlagen (4,2 bis 7,0 ct/kWh). Sie liegen jedoch etwas niedriger als die von großen PV-Dachanlagen (5,7 bis 12,0 ct/kWh) und im Mittel deutlich günstiger als die kleinen PV-Dachanlagen (6,3 bis 14,4 ct/kWh). Das obere Kostenniveau kleiner PV-Dachanlagen wird nicht erreicht. (Kost *et al.*, 2024)

In Bezug auf den Standort lässt sich zusammenfassen, dass Agri-PV-Anlagen im süddeutschen Raum wettbewerbsfähiger sind und noch näher an den Kosten konventioneller PV-Anlagentypen liegen, während sie im Norden aufgrund geringerer Sonneneinstrahlung tendenziell teurer produzieren.

4.3.2 Wirtschaftlicher Vergleich mit Freiflächenanlagen und rein landwirtschaftlicher Nutzung

Im Folgenden wird Agri-PV in Bezug auf den wirtschaftlichen Aspekt mit Freiflächenanlagen und rein landwirtschaftlicher Nutzung verglichen. Dabei werden vor allem die Investitions- und Betriebskosten betrachtet.

Vergleich mit PV-Freiflächenanlagen

Die Investitionskosten von Agri-PV-Anlagen liegen im Bereich von etwa 900 bis 1700 €/kW und damit höher als bei PV-Freiflächenanlagen, deren Kosten mit 700 bis 900 €/kW deutlich niedriger ausfallen (Kost *et al.*, 2024). Der Hauptgrund hierfür sind bei den hochaufgeständerten Agri-PV-Anlagen die aufwendigen Unterkonstruktionen (ggf. mit Regenwasserauffang-Systemen und Modulnachführung), die eine höhere Durchfahrtshöhe und größere Pfostenabstände ermöglichen müssen. Die Materialkosten sind daher hier höher als bei den vertikalen Agri-PV-Anlagen. Hinzu kommt, dass häufig angepasste Sondermodule (z. B. semitransparente oder bifaziale Module) eingesetzt werden, um den Lichtbedarf der Pflanzen zu berücksichtigen. Aufgrund von meist größeren Flächen und dadurch größeren Agri-PV-Anlagen im Ackerbau und Grünland könnten hier Skaleneffekte die hohen Investitionskosten senken. Auch die Fixkosten wie z.B. der Netzanschluss werden bei größeren Anlagen relativiert und können einen wirtschaftlichen Vorteil bringen. Ein weiterer Kostenpunkt ist die Flächenvorbereitung. Sie ist bei Agri-PV kostenintensiver, da Bodenschutzmaßnahmen wie Baustraßen notwendig sind, um die Bodenverdichtung zu reduzieren. Es entfallen hingegen die Kosten für Umzäunungen, die bei PV-Freiflächenanlagen notwendig sind, bei hochaufgeständerten Agri-PV-Anlagen jedoch nicht (Fraunhofer ISE, 2024a).

Insgesamt zeigt sich, dass die Investitionskosten bei Agri-PV im Regelfall deutlich über denen von PV-Freiflächenanlagen liegen, während die jährlichen Betriebskosten tendenziell vergleichbar oder leicht günstiger ausfallen können. Die Pflege der Fläche wird von der landwirtschaftlichen Nutzung abgedeckt, was PV-seitig Kostenvorteile bringen kann. Außerdem sind die Pachtpreise von landwirtschaftlichen Flächen niedriger, vor allem bei Ackerland und Grünland. Ein Unsicherheitsfaktor besteht allerdings bei zusätzlichen Kosten durch Modulreinigungen oder Reparaturen in größerer Höhe mit Hebebühne. Durch regelmäßigen Regen ist eine Reinigung wahrscheinlich nur selten nötig, es gibt jedoch kaum Langzeiterfahrungen mit den Auswirkungen von Dünger und Pflanzenschutzmittel auf die Konstruktion (Fraunhofer ISE, 2024a).

Im Apfelanbau wurde die Wirtschaftlichkeit von Agri-PV detaillierter untersucht (Trommsdorff *et al.*, 2023). Hier lagen die Investitionskosten der Agri-PV-Anlage um 79 % höher als bei einer

Referenz PV-Freiflächenanlage, hauptsächlich bedingt durch die aufgeständerte Konstruktion und teure Sondermodule. Die Betriebskosten unterschieden sich hingegen kaum (+1 %).

Auch ist die Wirtschaftlichkeit stark abhängig von der Vergütung. Die Studie stellt fest, dass Agri-PV im Obstbau nur wirtschaftlich rentabel ist, wenn ausreichend hohe Einspeisevergütungen oder Förderzahlungen vorliegen (Trommsdorff *et al.*, 2023).

Vergleich mit rein landwirtschaftlicher Nutzung

Im Vergleich zur reinen landwirtschaftlichen Nutzung bietet Agri-PV sowohl zusätzliche Einnahmequellen als auch potenzielle Einsparungen. Besonders im Obst- und Weinbau können Agri-PV-Anlagen eine doppelte Funktion erfüllen: Zum einen als Stromproduzenten, zum anderen als Ersatz für Schutzsysteme wie Hagelschutznetze oder Folientunnel. Das senkt die Investitions- und Betriebskosten, da keine regelmäßige Installation und Wartung von Netzen mehr notwendig ist. In dem von Trommsdorff *et al.* untersuchten Apfelanbau sinken die Investitionskosten im Vergleich zur reinen Landwirtschaft um 26% und die Betriebskosten um 8%. Allerdings können sich unter bestimmten Bedingungen auch Ertragseinbußen ergeben. Es wurde in der Untersuchung eine geringere Apfelqualität berücksichtigt, die die landwirtschaftlichen Einnahmen um 8% zurückgehen lässt. Trotzdem werden die Kosten für die Apfelproduktion insgesamt um 5% gesenkt. (BDEW, 2022; Trommsdorff *et al.*, 2023)

Eine durchgeführte Sensitivitätsanalyse zeigte, dass der landwirtschaftliche Ertrag ein sehr wichtiger Parameter ist, da geringe Änderungen im Ernteertrag die Gesamtrechnung stark beeinflussen. Das rechtfertigt die kostspielige Anpassung der Module an die Kulturen (z.B. Lichtdurchlässigkeit), so dass Ernteertrag und -qualität verbessert werden und die landwirtschaftlichen Einnahmen steigen (Trommsdorff *et al.*, 2023).

Gesamtbewertung

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Agri-PV gegenüber PV-Freiflächenanlagen mit höheren Investitionskosten, aber potenziell geringeren Betriebskosten verbunden ist. Im Vergleich zur reinen Landwirtschaft entstehen durch Agri-PV Einsparungen bei Schutzmaßnahmen, die jedoch durch Ertragsrisiken in der Landwirtschaft relativiert werden können.

Wirtschaftliche Vorteile hat es, wenn Landwirtschaftsbetriebe den produzierten Strom direkt für den Eigenverbrauch nutzen und damit ihren Stromverbrauch von extern reduzieren (Fraunhofer ISE, 2024a). Dafür sollte das Erzeugungsprofil mit dem Verbrauchsprofil gut zusammenpassen. Viel Stromerzeugung in der Tagesmitte und in den Sommermonaten wäre gut geeignet, was eine Ausrichtung gegen Süden bedeutet. Bei einer Ost-West-Ausrichtung können wiederum durch die

untypischen Produktionsspitzen beim Verkauf bis zu 10% höhere Strompreise erzielt werden, als bei der Südausrichtung (BDEW, no date).

4.4 Kritische Bewertung der Untersuchung

Die vorliegende Arbeit verfolgt das Ziel, durch zusammentragen bestehender Studien den aktuellen Forschungsstand zum Potential von Agri-PV qualitativ zusammenzufassen. Dabei besteht eine Abhängigkeit von bereits publizierten Studien. Für die vorliegende Arbeit konnte nur auf Untersuchungen zurückgegriffen werden, die veröffentlicht und frei zugänglich sind. Für manche Agri-PV-Standorte stehen bereits erste Ertragsdaten zur Verfügung, jedoch nicht für alle Regionen, Kulturen und Forschungsfelder. Es gibt viele verschiedene Kulturen, die mit verschiedenen Agri-PV-Systemen und verschiedenster technischer Umsetzung (z.B. mit oder ohne Nachführung, Lichtdurchlässigkeit, Wasserverteilung/-sammlung) kombiniert werden könnten. Nicht jede Kombination erscheint sinnvoll, aber die Vielzahl an Faktoren weist auf viel Forschungsbedarf hin.

Die Schlussfolgerungen der Untersuchung beruhen auf einzelnen Studienergebnissen. Die Rahmenbedingungen sind dabei oft unterschiedlich und angepasst, weshalb die Ergebnisse spezifisch sind. Es ließen sich daher lediglich Tendenzen und übergreifende Muster erkennen und Einblicke in verschiedene Ansätze der Umsetzung der Technologie geben. Auf dieser Grundlage konnte eine Abschätzung des Flächenpotentials erfolgen, die als grobe Orientierung zu verstehen ist und keineswegs den Anspruch erhebt, eine exakte oder abschließende Berechnung darzustellen.

Die Arbeit liefert einen statischen Überblick über den aktuellen Stand der Forschung. Neue Studien, die nach Abschluss der Datenerhebung publiziert werden, können die Ergebnisse relativieren oder ergänzen. Somit bleibt die Arbeit an eine bestimmte zeitliche Perspektive gebunden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Das Potential von Agri-PV wurde anhand der Unterscheidung in hochaufgeständerte und bodennahe Systeme betrachtet. Die DIN SPEC 91434 legt hierzu Vorgaben zu Flächenverlust und Erträgen fest und bildet inzwischen die Grundlage gesetzlicher Förderprogramme. Das Genehmigungsverfahren gestaltet sich derzeit jedoch oftmals als langwierig und aufwendig.

Das ökologische Potential von Agri-PV zeigte sich in einer verbesserten Wasserspeicherung im Boden, einer Abkühlung der Bodentemperatur im Sommer sowie in Schutzfunktionen gegenüber Extremwetter. Je nach Kultur können Verschattung und Mikroklimaveränderungen zu Ertragssteigerungen oder -einbußen sowie zu veränderter Reifezeit führen (Weselek *et al.*, 2021), was eine kulturspezifische Anpassung der Anlagen erfordert. Insgesamt deuten die Ergebnisse auf eine erhöhte Resilienz gegenüber Klimawandelfolgen hin, während insbesondere vertikale Systeme auf Dauergrünland Potential für eine Förderung der Biodiversität bieten.

Die Betrachtung der Leistungsfähigkeit von Agri-PV zeigte einen um den Faktor 1,2 bis 3 höheren Flächenbedarf gegenüber PV-Freiflächenanlagen (Fraunhofer ISE, 2024a), bedingt durch größere Reihenabstände für die landwirtschaftliche Nutzung. Dennoch ergibt sich ein Leistungspotential von rund 3.499 GWp, wobei bereits eine Realisierung von etwa 3 % ausreichen würde, um das PV-Ausbauziel für 2030 zu erreichen. Zudem erweist sich Agri-PV als effizienter als der Anbau von Energiepflanzen und steigert durch Doppelnutzung der Fläche die Landnutzungseffizienz (Fraunhofer ISE, 2024a).

Mit Stromgestehungskosten von 5,2 bis 11,9 ct/kWh stellte sich Agri-PV bereits als konkurrenzfähig heraus, wenngleich die Investitionskosten höher ausfallen als bei PV-Freiflächenanlagen (Kost *et al.*, 2024). Einsparungen durch reduzierte Schutzmaßnahmen und Vorteile beim Eigenverbrauch stehen potenziellen Ertragsrisiken gegenüber. Studienergebnisse verdeutlichen, dass die landwirtschaftlichen Einnahmen maßgeblich die Gesamtwirtschaftlichkeit beeinflussen und daher die Investitionen in eine kulturgerechte Anpassung der Anlagen rechtfertigen (Trommsdorff *et al.*, 2023).

Während PV-Freiflächenanlagen in der Regel kostengünstiger Strom produzieren können, hat Agri-PV durch die Doppelnutzung der Fläche ein Alleinstellungsmerkmal, das insbesondere unter Berücksichtigung von Flächenkonkurrenz und Klimaanpassungspotentialen von hoher Bedeutung ist.

Zukünftige Untersuchungen könnten sich unter anderem darauf konzentrieren, welches Potential eine komplexe Nachführung der Module bietet, um sowohl die Stromproduktion zu optimieren als auch den Bedürfnissen der Pflanzen gerecht zu werden. Darüber hinaus laufen derzeit mehrere Forschungsprojekte zu vertikalen Agri-PV-Anlagen, deren Ergebnisse nach Abschluss wertvolle Erkenntnisse für eine weiterführende Einordnung liefern können.

Literatur- und Quellenverzeichnis

Alexy, L. et al. (2023a) *Das Rechtslexikon. Begriffe, Grundlagen, Zusammenhänge - Bebauungsplan*. 2nd edn. Bonn: J.H.W. Dietz Nachf. Available at: <https://www.bpb.de/kurzknapp/lexika/recht-a-z/323098/bebauungsplan/> (Accessed: 19 June 2025).

Alexy, L. et al. (2023b) *Das Rechtslexikon. Begriffe, Grundlagen, Zusammenhänge - Flächennutzungsplan*. 2nd edn. Bonn: J.H.W. Dietz Nachf. Available at: <https://www.bpb.de/kurzknapp/lexika/recht-a-z/323392/flaechennutzungsplan/> (Accessed: 19 June 2025).

Baden-Württemberg (2022) *Land fördert fünf Modellanlagen zur Agri-Photovoltaik*. Available at: <https://www.baden-wuerttemberg.de/de/service/presse/pressemitteilung/pid/land-foerdert-fuenf-modellanlagen-zur-agri-photovoltaik> (Accessed: 17 July 2025).

BayWa r.e. AG (2025) *Heggelbach*. Available at: <https://www.baywa-re.de/de/projekte-in-deutschland/heggelbach> (Accessed: 24 August 2025).

BDEW (2022) 'Agri-Photovoltaik: Ein System - doppelter Nutzen', 20 January. Available at: <https://www.bdew.de/online-magazin-zweitausend50/schwerpunkt-stadt-land-fluss/agri-photovoltaik-ein-system-doppelter-nutzen/> (Accessed: 27 June 2025).

BDEW (no date) *Stadtwerke planen gemeinsame Agri-PV-Anlage*. Available at: <https://www.bdew.de/energie/stadtwerke-planen-gemeinsame-agri-pv-anlage/> (Accessed: 26 May 2025).

Beck, M. et al. (2012) 'Combining PV and Food Crops to Agrophotovoltaic - Optimization of Orientation and Harvest', Fraunhofer ISE.

Bensch, H. (2016) 'Studie: Solaranlagen beeinflussen Mikroklima', 8 August. Available at: <https://www.wiwo.de/technologie/studie-solaranlagen-beeinflussen-mikroklima/13983106.html> (Accessed: 1 August 2025).

Blesseohl, R. (2023) 'Mehrfachnutzung durch Agri-Photovoltaik', in *Hintergrundpapier Agri-PV*. Naturschutzbund Deutschland e.V. Available at: https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/energie/solarenergie/230725-nabu-hintergrundpapier_agri-photovoltaik.pdf (Accessed: 2 June 2025).

BMEL (2024) *Grundzüge der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) und ihrer Umsetzung in Deutschland*, Bundesministerium für Landwirtschaft, Ernährung und Heimat. Available at: <https://www.bmel.de/DE/themen/landwirtschaft/eu-agrarpolitik-und-foerderung/gap/gap-nationale-umsetzung.html> (Accessed: 19 June 2025).

Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) (2025) *Bürgerbeteiligung bei Agri-PV-Anlagen*, Ökolandbau.de. Available at: <https://www.oekolandbau.de/bio-in-der-praxis/oekologische-landwirtschaft/betriebsfuehrung/energiemanagement/buergerbeteiligung-bei-agri-pv-anlagen/> (Accessed: 27 June 2025).

Bundesinformationszentrum Landwirtschaft (no date) *Agri-Photovoltaik-Systeme zur Förderung der Biodiversität*, Praxis-Agrar. Available at: <https://www.praxis-agrar.de/umwelt/biologische-vielfalt/agri-photovoltaik-systeme-zur-foerderung-der-biodiversitaet> (Accessed: 5 August 2025).

Bundesministerium der Ernährung und Landwirtschaft (2024) *Anpassungen der Direktzahlungen ab 2025*, BMEL. Available at:

https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/_Landwirtschaft/EU-Agrarpolitik-Foerderung/anpassungen-dz-2025.pdf?__blob=publicationFile&v=4 (Accessed: 10 July 2025).

Deutsche Bundesstiftung Umwelt (2024) 'Vertikale Agri-Photovoltaik im Ackerbau: Voruntersuchungen zu agrarwissenschaftlichen Einschätzungen und Auswirkungen auf die Biodiversität im Vergleich zu hoch aufgeständerten Systemen (VAckerBio)', DBU, 27 November. Available at: <https://www.dbu.de/projektdatenbank/38354-01/> (Accessed: 21 July 2025).

Deutsche Wildtier Stiftung (2019) *Grünland, Deutsche Wildtier Stiftung*. Available at: <https://www.deutschewildtierstiftung.de/aktuelles/artikel/gruenland> (Accessed: 13 June 2025).

Deutscher Wetterdienst (no date) *Globalstrahlung (mittlere 30-jährige Monats- und Jahressummen)*. Available at: https://www.dwd.de/DE/leistungen/solarenergie/strahlungskarten_mvs.html?nn=16102 (Accessed: 4 July 2025).

Deutsches Institut für Normung e.V. (Hg.) (2021) 'DIN SPEC 91434:2021-05 Agri-Photovoltaik-Anlagen - Anforderungen an die landwirtschaftliche Hauptnutzung'. Berlin: Beuth Verlag GmbH. Available at: <https://doi.org/10.31030/3257526>.

Deutsches Institut für Normung e.V. (Hg.) (2024) 'DIN SPEC 91492:2024-06 Agri-Photovoltaik-Anlagen - Anforderungen an die Nutztierhaltung'. Berlin: Beuth Verlag GmbH. Available at: <https://doi.org/10.31030/3538234>.

Elamri, Y. et al. (2018) 'Rain concentration and sheltering effect of solar panels on cultivated plots', *Hydrology and Earth System Sciences*, Band 22(2), pp. 1285–1298. Available at: <https://doi.org/10.5194/hess-22-1285-2018>.

Fraunhofer ISE (2019) *Agrophotovoltaik: hohe Ernteerträge im Hitzesommer - Fraunhofer ISE, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE*. Available at: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2019/agrophotovoltaik-hohe-ernteertraege-im-hitzesommer.html> (Accessed: 28 July 2025).

Fraunhofer ISE (2023a) *Kombination Photovoltaik und Freiland-Legehennenhaltung, Modellregion Agri-PV BW*. Available at: <https://agripv-bw.de/teilprojekte/kombination-photovoltaik-und-freiland-legehennenhaltung/> (Accessed: 1 August 2025).

Fraunhofer ISE (2023b) *Kompetenzzentrum Obstbau Bavendorf, Modellregion Agri-PV BW*. Available at: <https://agripv-bw.de/teilprojekte/kompetenzzentrum-obstbau-bodensee/> (Accessed: 5 August 2025).

Fraunhofer ISE (2023c) *Konzept - Auf einen Blick, Modellregion Agri-PV BW*. Available at: <https://agripv-bw.de/konzept/> (Accessed: 17 July 2025).

Fraunhofer ISE (2023d) *LVWO Weinsberg, Agri-PV Standort Heuchlingen, Staatliche Lehr- und Versuchsanstalt für Wein- und Obstbau Weinsberg*. Available at: <https://www.agripv-bw.de/teilprojekte/lvwo-weinsberg/> (Accessed: 18 July 2025).

Fraunhofer ISE (2023e) *Neusaß II (vertikale Agri-PV), Modellregion Agri-PV BW*. Available at: <https://agripv-bw.de/teilprojekte/neusass-ii/> (Accessed: 18 July 2025).

Fraunhofer ISE (2023f) *Pilotanlagen der zweiten Umsetzungsphase, Modellregion Agri-PV BW*. Available at: https://agripv-bw.de/media/images/Anlagen_neu.width-750.webp (Accessed: 17 July 2025).

Fraunhofer ISE (2023g) *Teilprojekte, Modellregion Agri-PV BW*. Available at: <https://agripv-bw.de/teilprojekte/> (Accessed: 11 August 2025).

Fraunhofer ISE (2024a) *Leitfaden Agri-Photovoltaik: Chance für Landwirtschaft und Energiewende - Fraunhofer ISE, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE*. Available at: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/agri-photovoltaik-chance-fuer-landwirtschaft-und-energiewende.html> (Accessed: 16 May 2025).

Fraunhofer ISE (2024b) *Mehrheit der Landwirtinnen und Landwirte sieht Agri-Photovoltaik positiv - Fraunhofer ISE, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE*. Available at: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/news/2024/mehrheit-der-landwirtinnen-und-landwirte-sieht-agri-photovoltaik-positiv.html> (Accessed: 7 July 2025).

Fraunhofer ISE (2025a) *ADAPT – Klimaanpassung durch organische Agri-Photovoltaik, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE*. Available at: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/adapt.html> (Accessed: 14 July 2025).

Fraunhofer ISE (2025b) *Agri-Photovoltaik: Chance für Landwirtschaft und Energiewende*. Available at: <https://agri-pv.org/de/> (Accessed: 11 July 2025).

Fraunhofer ISE (2025c) *APV-Obstbau – Agri-Photovoltaik als Resilienzkonzept zur Anpassung an den Klimawandel im Obstbau - Fraunhofer ISE, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE*. Available at: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/apv-obstbau.html> (Accessed: 28 July 2025).

Fraunhofer ISE (2025d) *Installierte Leistung Netto-Leistung, Energy-Charts*. Available at: https://www.energy-charts.info/charts/installed_power/chart.htm?l=de&c=DE&year=2023&expansion=installed_power&legendItems=1x8vt (Accessed: 7 July 2025).

Fraunhofer ISE (2025e) *VACkerBio: Vertikale Agri-Photovoltaik im Ackerbau, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE*. Available at: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/vackerbio.html> (Accessed: 21 July 2025).

Fraunhofer ISE (2025f) *VitiCULT-PVmobil – Eine integrierte Lösung für Klimaresilienz, Energiewende und Pflanzenschutz für nachhaltige Weinbau-Kulturlandschaften, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE*. Available at: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/viticult-pvmobil.html> (Accessed: 5 August 2025).

Fraunhofer ISE (no date a) *Das Konzept und die Synergien von Agri-PV*. Available at: <https://agri-pv.org/de/forschung-informationen/konzept-und-synergien/> (Accessed: 28 July 2025).

Fraunhofer ISE (no date b) *So findet die Technologie Agri-PV Anwendung*. Available at: <https://agri-pv.org/de/markthochlauf/anwendungsbereiche-technologie/> (Accessed: 28 July 2025).

Fraunhofer ISE (no date c) *Stellungnahme zur Schutzfunktion der Agri-PV*. Available at: https://agripv-bw.de/dokumente/3/Agri-PV_als_Schutzvorrichtung.pdf (Accessed: 14 July 2025).

Goetzberger, A. and Tastrow, A. (1981) 'Kartoffeln unter dem Kollektor. Neuer Vorschlag der Fraunhofer-Gesellschaft', *Sonnenenergie*, 6(3), pp. 19–22.

Grieb, M. and Stöppler, M. (2023) 'Stromerzeugung auf landwirtschaftlichen Flächen'. Available at: <https://www.vdi.de/news/detail/stromerzeugung-auf-landwirtschaftlichen-flaechen> (Accessed: 28 April 2025).

Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (2021) *Doppelte Bodennutzung: Wie Solarmodule gegen Austrocknung schützen*. Available at: <https://www.htw-dresden.de/news/doppelte-bodennutzung-wie-solarmodule-gegen-austrocknung-schuetzen> (Accessed: 4 August 2025).

Knoke, M. (2022) *Agri-Photovoltaik: Sauberer Strom vom Bauernhof*, HELMHOLTZ KLIMA Dialog-Plattform. Available at: <https://www.helmholtz-klima.de/klimawissen/agri-photovoltaik-sauberer-strom-vom-bauernhof> (Accessed: 18 July 2025).

Konstantin, P. and Konstantin, M. (2023) 'Grundlagen zu Investitionsrechnungen', in *Praxisbuch Energiewirtschaft - Energieumwandlung, -transport und -beschaffung, Übertragungsnetzausbau und Kernenergieausstieg*. 5th edn. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, p. 35. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-662-67335-5_1.

Kost, C. et al. (2024) 'Studie: Stromgestehungskosten erneuerbare Energien', Fraunhofer ISE.

Lahr, S. (2022) 'Bottom-Up GIS-Potenzialanalyse, Auswirkungen der Netzintegration sowie Bewertung der Nachhaltigkeit von vertikaler bifazialer Agri-Photovoltaik', Masterarbeit, Fraunhofer ISE.

LAND & FORST (2025) *Agri-Photovoltaik: 15-Megawatt-Anlage entsteht in Niedersachsen*. Available at: <https://www.landundforst.de/energie/photovoltaik/agri-photovoltaik-15-megawatt-anlage-entsteht-niedersachsen-572823> (Accessed: 27 June 2025).

Lasta, C. and Konrad, G. (2018) 'Agrophotovoltaik: Doppelnutzung von Böden bei Flächenfraß als Gebot der Stunde', *Technische Universität Graz* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/DOI.10.3217/978-3-85125-586-7>.

Leroy, A. (no date) 'Welchen Einfluss hat Agri-PV auf Erträge?', *Flur & Furche | Das John Deere Magazin*. Available at: <https://flurundfurche.de/welchen-einfluss-hat-agri-pv-auf-ertrag/> (Accessed: 2 June 2025).

Lichner, C. (2025) 'Dicht an dicht brüten die Lerchen', *pV magazine Deutschland*, 30 May. Available at: <https://www.pv-magazine.de/2025/05/30/dicht-an-dicht-brueten-die-lerchen/> (Accessed: 14 July 2025).

Meier-Grüll, M. et al. (2024) 'Agri-Horti-PV Research System in North Rhine-Westphalia Including PV Trackers and Integrated Rainwater Harvesting', *AgriVoltaics Conference Proceedings*, 1. Available at: <https://doi.org/10.52825/agripv.v1i.632>.

Michalczyk, R. (2024) *Das müssen Landwirte zum GAP-Antrag wissen*. Bericht der EU-Zahlstelle der Landwirtschaftskammer NRW. Münster: Redaktion top agrar. Available at: <https://www.topagrar.com/betriebsleitung/news/agrarfoerderung-2024-die-grundlagen-des-antragsverfahrens-c-20001411.html> (Accessed: 19 June 2025).

sbp sonne (2024) 'Agrivoltaik Anlage in Geisenheim in Betrieb genommen', *sbp sonne*, 19 June. Available at: <https://www.sbp.solar/news/agrivoltaik-anlage-in-geisenheim-in-betrieb-genommen/> (Accessed: 18 July 2025).

Scharf, J., Grieb, M. and Fritz, M. (2021) *Agri-Photovoltaik – Stand und offene Fragen, Technologie- und Förderzentrum (TFZ)*. Available at: <https://www.tfz.bayern.de/publikationen/berichte/277749/index.php> (Accessed: 1 June 2025).

Schindele, S. (2017) 'Agro-Photovoltaik: Ein falscher Name kann viel kaputt machen'. Available at: <https://www.pv-magazine.de/2017/10/23/agro-photovoltaik-ein-falscher-name-kann-viel-kaputt-machen/> (Accessed: 12 June 2025).

Statistisches Bundesamt (2025a) *Flächennutzung, DESTATIS - Statistisches Bundesamt*. Available at: https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Flaechennutzung/_inhalt.html (Accessed: 15 August 2025).

Statistisches Bundesamt (2025b) *Landwirtschaftliche Betriebe, Fläche: Deutschland, Jahre, Bodennutzungsarten, DESTATIS - Statistisches Bundesamt*. Available at: <https://www-genesis.destatis.de/datenbank/online/statistic/41141/table/41141-0001/table-toolbar> (Accessed: 13 August 2025).

Stöppler, M. et al. (2025) *TFZ-Leitfaden 1 - Agri-Photovoltaik - Planung und Genehmigung*. Straubing: Technologie- und Förderzentrum (TFZ). Available at: https://www.tfz.bayern.de/mam/cms08/rohstoffpflanzen/dateien/231005_p_tfz_leitfaden_agri-pv.pdf (Accessed: 20 June 2025).

Sunaro (2025) *Agri-PV-Modultypen: Welche Varianten und Technologien gibt es?*, sunaro-shop. Available at: <https://sunaro.de/blogs/news/agri-pv-modultypen> (Accessed: 16 May 2025).

Trommsdorff, M. et al. (2023) 'Can synergies in agriculture through an integration of solar energy reduce the cost of agrivoltaics? An economic analysis in apple farming', *Applied Energy*, 350. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121619>.

Trommsdorff, M. (no date) *Newsletter Agri-Photovoltaik - Namensänderung, Fraunhofer ISE*. Available at: <https://newsletter.fraunhofer.de/viewonline2/17114/921/317/HysPtsWr/Tw6OJ66xiR/1> (Accessed: 12 June 2025).

Umweltbundesamt (2023) *Erneuerbare-Energien-Gesetz*. Umweltbundesamt. Available at: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-gesetz> (Accessed: 31 July 2025).

Vélez, S. et al. (2024) 'Overhead Agrivoltaic Systems Delay Apple Ripening and Influence Maturation Patterns'. Available at: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5527009/v1>.

Wenke, B. (2025) *In Lemwerder entsteht Deutschlands größter privater Agri-PV-Park*, *weser-kurier.de*. Available at: <https://www.weser-kurier.de/landkreis-wesermarsch/gemeinde-lemwerder/in-lemwerder-entsteht-deutschlands-groesster-privater-agri-pv-park-doc7z3u6ds8q93527mx38t> (Accessed: 24 August 2025).

Weselek, A. et al. (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(5). Available at: <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00714-y>.

Zwosta, N. (2023) 'Einachsig nachgeführte Agrar-PV: Vergleich mit anderen Systemen'. *Agri-Photovoltaik Forum Sachsen*, 28 June. Available at: https://www.landwirtschaft.sachsen.de/download/Nicolai_Zwosta_20230626_einachsig_nachgefuehrte_Agri-PV_Vergleich_mit_anderen_Systemen.pdf.

Anhang

Anhang A: Zusammenfassung der beiden DIN Spezifikationen

Kapitel der Spezifikation	Anforderungen generell an landwirtschaftliche Nutzung (DIN SPEC 91434)	Anforderungen speziell an Nutztierhaltung (DIN SPEC 91492)
5. Landwirtschaftliche Hauptnutzung		
5.1 Landwirtschaftliche Nutzbarkeit der Fläche	• Bisherige Nutzbarkeit muss erhalten bleiben (außer Flächenverlust)	
	• Landnutzungsform und Pflanzenproduktion in Konzept zur landwirtschaftlichen Nutzbarkeit darlegen • Nutzungsänderung mit Einschränkungen möglich	• Landnutzungs- und Tierhaltungsform in Konzept zur landwirtschaftlichen Nutzbarkeit darlegen • Nutzungsänderung mit Bau der Agri-PV-Anlage möglich • Dauerhafte landwirtschaftliche Tätigkeit zu Erwerbszwecken • Tierschutzverordnungen und Regularien einhalten • Regelmäßige Prüfung und Nachweis über die Nutzung
5.2 Konzept zur landwirtschaftlichen Nutzbarkeit		
5.2.1 Allgemeines	• Inhalte und Struktur nach Formatvorlage Anhang A • Von Landnutzer und Agri-PV-Errichter gemeinsam erstellt • Lichte Höhe Kategorie 1 mind. 2,1m (nach Arbeitsschutzgesetzgebung)	
5.2.2 Aufständigung	• Abstand so groß, dass bisherige Nutzbarkeit erhalten bleibt • Muss Bearbeitbarkeit der Fläche sicherstellen	
	• Anlagen gleichmäßig verteilen • Bei Kategorie 2 keine lichte Höhe nötig	• Tierschutzrechtliche Aspekte • Schutzbedürfnisse der Nutztiere und Sicherheit der technischen Anlagenkomponenten sicherstellen

		• Lichte Höhe an Nutztiere (aufrecht darunter bewegen) und relevante Maschinen anpassen • Bei minimaler lichten Höhe von 1,5 m sind Stallungen gefordert • Bei Kategorie 2 keine lichte Höhe nötig, aber z.B. TierschNutzTV und ArbStättV einhalten
5.2.3 Flächenverlust	• Verlust landwirtschaftlich nutzbarer Fläche (Aufbauten, Unterkonstruktionen) bei Kategorie 1 max. 10% und bei Kategorie 2 max. 15% der Gesamtprojektfäche	• Max. 15%
5.2.4 Bearbeitbarkeit	• Gesamte landwirtschaftlich nutzbare Fläche muss bewirtschaftet und ggf. befahren werden können	
5.2.5 Lichtverfügbarkeit und -homogenität	Sicherstellen von • Pflanzenwachstum • Gleiche Erntezeitpunkte • Gute landwirtschaftliche Praxis durch • Möglichst hohe Lichthomogenität • Adäquate Lichtverfügbarkeit	• Muss an pflanzliche Erzeugung (Futtermittelaufwuchs) und Bedürfnisse der Nutztiere angepasst werden
5.2.6 Wasserverfügbarkeit und Regenwasser- verteilung	• An Wachstumsbedingungen der Kultur anpassen • Homogene Regenwasserverteilung • evtl. technische Bewässerungseinrichtung • Wasserbedarf der Kultur unter üblichen klimatischen Bedingungen des Standortes betrachten	• Muss an pflanzliche Erzeugung (Futtermittelaufwuchs) und Bedürfnisse der Nutztiere angepasst werden
5.2.7 Bodenerosion und Verschlämmung des Oberbodens	• Grund: Abtropfkant • Durch Konstruktion der Anlage minimieren (z.B. Auffangeinrichtungen, Regenwasserverteiler)	

5.2.8 Rückstandslose Auf- und Rückbaubarkeit	• Fundamentierung und Verankerung muss rückbaubar sein • Landwirtschaftliche Nutzungsmöglichkeit muss im ursprünglichen Zustand erhalten bleiben • Bei Verschlechterung der Bodenstruktur durch Auf- oder Abbau, sollten geeignete Maßnahmen zur Wiederherstellung ergriffen werden	
5.2.9 Kalkulation der Wirtschaftlichkeit	• Wirtschaftlich tragfähiges Konzept zur landwirtschaftlichen Nutzung muss vorgelegt werden	/
5.2.9 Konzeption und Nachweis des landwirtschaftlichen Erwerbszweckes	/	• Landwirtschaftlicher Erwerbszweck ist darzulegen und bei Überprüfung nachzuweisen
5.2.10 Landnutzungseffizienz	• Ertrag soll min. 66% des Referenzertrages sein	• Flächenbesatz von 85% einer Referenzfläche ist zu erreichen • Unterschreitung unter bestimmten Bedingungen zulässig • Rotationsweide, Portions- oder Wechselweide zulässig
5.2.11 Ermittlung des Referenzertrags	• Bei vorherigen Dauerkulturen und Grünland: gemittelter Ertrag der letzten 3 Jahre • Bei vorherigen Ackerbaufruchtfolgen: gemittelter Ertrag der einzelnen Kulturen über 3 Fruchtfolgezyklen oder • Durchschnittserträge der letzten 3 Jahre aus einschlägigen Veröffentlichungen	• Vorheriger Flächenbesatz auf Gesamtprojektfäche oder • Flächenbesatz einer vergleichbar bewirtschafteten Fläche
5.2.12 Ermittlung der Ertragsreduktion der auf der Gesamtprojektfäche angebauten Kulturen	• Abschätzung der Ertragsreduktion durch qualifiziertes Fachpersonal möglich	/
5.2.12 Tierwohl und Schutz der Nutztiere	/	• Verletzungen der Nutztiere an Agri-PV-Systeme und BoS-Komponenten muss vorgebeugt

		werden (insbesondere elektronische und spannungsführende Bauteile) • Siehe TierSchNutzV §3, Absatz 2, Nummer 1
5.2.13 Schutz vor Beschädigung der Anlage durch Nutztiere	• Kritische Beschädigungen der Anlage durch Nutztiere muss vorgebeugt werden (insbesondere Verkabelung und weitere BoS-Komponenten)	/
6. Agri-PV-Anlage (planerisch und technisch)		
6.1 Lichtverfügbarkeit und -homogenität	• Müssen beachtet und entsprechend dem Nutzungskonzept geprüft werden • Alle Teile berücksichtigen, die Lichtverfügbarkeit erheblich beeinflussen • Verglasung zw. PV-Zellen kann mit Transmissionsgrad 100% angenommen werden	
6.2 Anforderungen an das Tragwerk und die Standsicherheit der Aufständering	• Nach semiprobabilistischem Sicherheitskonzept des Eurocodes auszulegen • Dabei kann Anpassung der Nutzungskategorie und -dauer erfolgen	• Potenzieller Kontakt der Nutztiere mit Aufständering beachten
6.3 Anforderungen an die PV-Modultechnik	• Verschiedene Modultechniken und Bauformen möglich • Anpassung an Lichtverfügbarkeit und landwirtschaftliche Nutzung (Modultechnik, Zellzwischenräume, Verkapselungsmaterial, Ausrichtung der Module) • Gleichmäßige Verteilung der Module für möglichst hohe Lichthomogenität	• Anpassung zusätzlich an Tierwohl • Gleichmäßige Verteilung auch, um Futtermittelaufwuchs sicherzustellen
6.4 Aufständering		
	• Verschiedene Bautechniken, Bauformen und Werkstoffe möglich	

6.4.1 Allgemeines	•	• Bei Tracking-Systemen oder beweglichen Teilen ist unterster Punkt der Drehachse maßgeblich für lichte Höhe • Lichtraumprofil beachten, sodass Bewirtschaftung (Mensch, Machine) und Nutzung durch Tiere gefahrenlos möglich • Vorgewende beachten
6.4.2 Anlagendimension bei hoch aufgeständerten Anlagen	• Kategorie 1 • Größe und Höhe an Art der Bewirtschaftung anpassen • aber min. 2,10 m lichte Höhe • Lichte Höhe: Abstand zw. Grund der Fläche und Unterkante des niedrigsten Konstruktionselements unter Eigengewichtsverformung (wenn beweglich im Zustand maximaler lichter Höhe) • Landwirtschaftlich nicht mehr nutzbare Fläche muss nach Installation < 10% der Gesamtfläche sein • Lichtraumprofil beachten, sodass Bewirtschaftung (Mensch, Machine) gefahrenlos möglich • Vorgewende beachten	• Kategorie 1 • Größe und Höhe an Nutztiere, Tierhaltungsform und etwaige andere Nutzungsarten anpassen • Aber min. 2,10 m lichte Höhe • Landwirtschaftlich nicht mehr nutzbare Fläche muss nach Installation $\leq 15\%$ der Gesamtfläche sein •
6.4.3 Anlagendimension bei bodennahen Anlagen	• Kategorie 2 • Größe und Höhe an Art der Bewirtschaftung anpassen • Landwirtschaftlich nicht mehr nutzbare Fläche muss nach Installation < 15% der Gesamtfläche sein	• Kategorie 2 • Größe und Höhe an Nutztiere, Tierhaltungsform und etwaige andere Nutzungsarten anpassen • Landwirtschaftlich nicht mehr nutzbare Fläche muss nach Installation $\leq 15\%$ der Gesamtfläche sein
6.4.4 Modulreihen	• Ausrichtung und Abstände nicht festgelegt • Entsprechend Lichthomogenität und -verfügbarkeit planen und ausrichten	

	• Abstände so wählen, dass techno-ökologische Synergieeffekte durch Beschattung und Lichthomogenität möglichst hoch sind	
	• ...und negative Auswirkungen auf Pflanzenwachstum vermieden werden	• ...und negative Auswirkungen auf Nutztierhaltung und weitere geplante Nutzungsarten vermieden werden
6.4.5 Schutz der Haupttragstruktur der Agri-PV-Anlagen vor mechanischer Beschädigung	• Mechanischer Beschädigung durch Landmaschinen vorbeugen • Z.B. unabhängig im Boden befestigter Rammschutz um Pfosten	• Mechanischer Beschädigung durch Landmaschinen und Tieren vorbeugen • Z.B. unabhängig im Boden befestigter Ramm- oder Wetzschutz um Pfosten
6.5 Anforderungen an weitere BOS-Komponenten	• BOS-Komponenten dürfen landwirtschaftliche Nutzung nicht beeinträchtigen (insbesondere Generatoranschlusskästen und Wechselrichter) • Erdverlegung von Kabeln in Mindestdtiefe nach DIN VDE 0100-520 (sicher vor Pflug/Tieren und anderen Maschinen)	
7. Installation, Betrieb und Instandhaltung		
7.1 Agri-PV spezifische Anforderungen bei der Installation	• keine Verschlechterung des Bodens durch Verdichtung • keine Einschränkung der Nutzung durch Rückstände des Agri-PV-Systems • Schutz vor auslaufenden Betriebsstoffen • Spezielle Reifen/Maschinen und/oder mobile Fahrstraßen empfohlen, die Bodenverdichtung vermindern • Zeitpunkt so wählen, dass Bodenschäden vermieden werden (z.B. bei trockenem Boden)	
7.2 Abnahme und Inbetriebnahme des Agri-PV-Systems	• Es gelten bestehende elektrotechnische und statische Regularien sowie entsprechende Prüfanforderungen aus Bereich PV-Anlagen • Besonders beachten: Einhaltung des landwirtschaftlichen Nutzungskonzeptes, Verlegung der Kabel und Leitungen in sicherer Tiefe, Einhaltung des maximalen Flächenverlustes, Montagehöhe ggf. mit lichter Höhe, Sicherheit des Tragwerks	
7.3 Betrieb und Wartung von Agri-PV-Anlagen		
7.3.1 Allgemeines	• Wartungsarbeiten im Betriebshandbuch festhalten, vom Betreiber beachtet werden	

	• Besondere Sorgfalt bei Wartung, da hohes Risiko für Beschädigungen und Verschmutzung • Festhalten der überprüften Kenngrößen in anlagenspezifischem Betriebsprotokoll wird empfohlen	
	• Bei Extremwetterereignissen (Vereisung, Eiszapfenbildung,...) und extremen Wind- und Schneelasten sollte nicht unter Anlagen gearbeitet werden	•
7.3.2 Reinigung	• Bei starker Verschmutzung, um Ertragsverluste zu minimieren • Regelmäßige Überprüfung der Sauberkeit empfohlen • Nur Reinigen, wenn notwendig (unnötige Belastung oder versehentliche Beschädigung der Anlage vermeiden)	
	• Bei Reinigungsmitteln müssen lebensmittel-, futtermittel- und arzneimittelrechtlichen Bestimmungen beachtet werden	• Bei Reinigungsmitteln müssen wasser- und naturschutz-, tierschutz- und tiergesundheits- sowie futtermittel- und arzneimittelrechtlichen Bestimmungen beachtet werden