



Fraunhofer
ISE

Fraunhofer-Institut für Solare
Energiesysteme ISE

Agri-Photovoltaik: Chance für Landwirtschaft und Energiewende

Ein Leitfaden für Deutschland | Stand Juni 2025

Impressum

Herausgeber

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Heidenhofstraße 2
79110 Freiburg
Telefon +49 761 4588-0
www.ise.fraunhofer.de

Autorinnen und Autoren

Dr. Max Trommsdorff (Fraunhofer ISE)
Simon Gruber (Fraunhofer ISE)
Tobias Keinath (Fraunhofer ISE)
Michaela Hopf (Fraunhofer ISE)
Charis Hermann (Fraunhofer ISE)
Frederik Schönberger (Fraunhofer ISE)
Charlotte Gudat (Fraunhofer ISE)
Alexa Torres Boggio (Fraunhofer ISE)
Moritz Gajewski (Fraunhofer ISE)
apl. Prof. Dr. Petra Högy (Universität Hohenheim)
Dr. Sabine Zikeli (Universität Hohenheim)
Andrea Ehmann (Universität Hohenheim)
Dr. Axel Weselek (Universität Hohenheim)
Prof. Dr. Ulrich Bodmer (Hochschule Weihenstephan-Triesdorf)
Dr. Christine Rösch (Karlsruher Institut für Technologie, KIT)
Dr. Daniel Ketzer (Karlsruher Institut für Technologie, KIT)
Nora Weinberger (Karlsruher Institut für Technologie, KIT)
Dr. Stephan Schindele (BayWa r.e.)
RA Dipl.-Forstw. (Univ.) Jens Vollprecht
(Becher Büttner Held PartGmbH)

Projektbeirat APV-RESOLA

Hans-Josef Fell (Energy-Watch-Group),
Vorsitzender Projektbeirat APV-RESOLA;
Sylvia Pilarsky-Grosch (Bund für Umwelt-
und Naturschutz, BUND);
Franz Pöter (Solar Cluster Baden-Württemberg e.V.);
Prof. Dr. Adolf Goetzberger (Fraunhofer ISE,
Institutsleitung a.D.);
Ralf Ries (GLS Gemeinschaftsbank eG);
Manfred Oetzel (Landesbauernverband BaWü);
Dr. Florian Brahms (Rechtsanwalt Energierecht);
Dr. Winfried Hoffmann (ASE – Applied Solar Expertise);
Prof. Daniel Buhr (Eberhard Karls Universität Tübingen);

Besonderer Dank geht an

Hofgemeinschaft Heggelbach
Solar Consulting GmbH
Forschungszentrum Jülich GmbH
inter 3 - Institute for Resource Management
Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e.V.
Hilber Solar GmbH
AMA FILM GmbH

Gestaltung und Satz

netsyn, Freiburg

Hinweis

Der vorliegende Leitfaden informiert über das Potenzial, den aktuellen Technologiestand sowie den Rechtsrahmen der Agri-Photovoltaik und präsentiert praktische Hinweise zu deren Nutzung für Landwirtinnen und Landwirte, Kommunen und Unternehmen. Der Leitfaden erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Alle vorgestellten Anwendungsverfahren sind als Beispiele zu betrachten. Der Leitfaden wurde mit großer Sorgfalt erarbeitet. Gleichwohl übernehmen die an dessen Erstellung Beteiligten für den Inhalt keine Haftung. Bei der Planung und Umsetzung von Projekten ist immer eine Prüfung des Einzelfalls – ggf. unter Hinzuziehung von technischem, betriebswirtschaftlichem und rechtlichem Rat – erforderlich.

© Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Freiburg, 2025



PDF-Version des
Agri-PV-Leitfadens



4. Auflage, Juni 2025

Vorwort (2022)



Liebe Leserinnen und Leser,

Pflanzen brauchen Sonne. Photovoltaik-Anlagen auch. Wir wissen alle: Um die Klimaziele zu erreichen, muss der Ausbau der erneuerbaren Energien noch schneller vorankommen. Wir brauchen sechs- bis achtmal so viel Solarenergie, wie wir heute produzieren: Auf Dächern und auch auf Freiflächen. In der Vergangenheit war hier oft eine Entweder-oder-Entscheidung zu treffen: Entweder Landwirtschaft oder erneuerbare Energien. Ein solches Dilemma lösen wir auch mit Innovation. Einen vielversprechenden Ansatz bietet die Agri-Photovoltaik. Solarzellen produzieren Strom über dem Feld, darunter wächst weiter Getreide, Gemüse oder Obst. Die Fläche wird doppelt genutzt. Kluges technisches Knowhow ist der Weg, um die Photovoltaik auszubauen, ohne der Landwirtschaft wertvolle Flächen zu entziehen. Mehr noch: Die speziellen Solaranlagen können den Betrieben neue Einkommensquellen bieten. Zum anderen erhöhen sie die Resilienz.

Die Folgen der Klimakrise beschäftigen die Bäuerinnen und Bauern seit Jahren. In kaum einem anderen Sektor wirken sich die zunehmenden Wetterextreme so massiv aus wie in der Landwirtschaft: Mal ist es zu trocken und zu heiß, mal bedroht plötzlicher Hagel die Ernte. Genau hier können die Photovoltaik-Anlagen helfen. Sie schützen durch ihren Schatten vor zu viel Sonne und Austrocknung oder bremsen Hagelkörner aus. Ein Forschungsprojekt hat diese positiven Effekte bereits nachgewiesen.

Dieser aktualisierte Leitfaden informiert Sie über die bisherigen Erkenntnisse aus Wissenschaft und Praxis. Er zeigt die Chancen der Agri-Photovoltaik auf und berücksichtigt aktuelle Entwicklungen. So sind zentrale Schritte hin zu einer Standardisierung für solche Anlagen erfolgt. Damit sichern wir Qualität.

Als Bundesregierung unterstützen wir den Ausbau der Agri-Photovoltaik zukünftig durch verbesserte Fördersysteme. Im April wird es eine Innovationsausschreibung geben, die erstmals in Deutschland eine Einspeisevergütung nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz speziell auch für Agri-Photovoltaik-Systeme ermöglicht. Auch die angepasste Verordnung zu den GAP-Direktzahlungen gehört dazu. So ermöglichen wir Betrieben, die Agri-Photovoltaik installieren, weiter 85 Prozent der Prämien für die landwirtschaftliche Nutzung der Fläche zu beziehen.

Doch auch wenn viele grundsätzliche Fragen hinsichtlich der neuen Technologie inzwischen geklärt sind, bleiben noch einige Punkte offen: Lassen sich Agri-Photovoltaik-Anlagen auch gut mit dem Anbau von Sonderkulturen wie Beerenobst kombinieren? Gibt es Lösungen für Gewächshäuser? Und wie schaffen wir eine breite Akzeptanz bei der Bevölkerung? Ein zentrales Forschungsvorhaben des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme ISE und seiner Partner startete dazu 2022.

Die Chancen der Agri-Photovoltaik haben auch andere Länder erkannt. Vor allem in einigen Ländern Asiens gehören Flächen, die zugleich der Landwirtschaft und der Solarstromerzeugung dienen, bereits fest zum Landschaftsbild. In Europa treibt vor allem Frankreich die Technologie voran. Und auch wir setzen auf das Potenzial von Innovationen wie der Agri-Photovoltaik. Denn das Prinzip ist so einfach wie überzeugend: Ein Acker bleibt ein Acker. Die Photovoltaik-Anlage kommt obendrauf und sichert unsere Lebensgrundlagen von morgen. Die Bundesregierung schafft so ein Win-Win-Win für Klima, Natur und für unsere Landwirtschaft. Lassen auch Sie sich dafür begeistern!

Bettina Stark-Watzinger
Mitglied des Deutschen Bundestages
Bundesministerin für Bildung und Forschung
Foto: © Bundesregierung/Guido Bergmann

Cem Özdemir
Mitglied des Deutschen Bundestages
Bundesminister für Ernährung und Landwirtschaft
Foto: © BMEL/Janine Schmitz/Phototek

Inhalt

1	Ressourceneffiziente Landnutzung mit Agri-Photovoltaik	4
2	Daten und Fakten zur Agri-Photovoltaik	8
2.1	Agri-Photovoltaik: Neuer Ansatz zur Entschärfung der Flächenkonkurrenz	9
2.2	Niederschläge und Globalstrahlung	9
2.3	Definition und Potenzial der Agri-Photovoltaik	10
2.4	Forschungsanlagen in Deutschland	13
2.5	Praxisanlagen in Deutschland	24
2.6	Forschungsprojekte in Deutschland	28
2.7	Internationale Entwicklung	32
3	Landwirtschaft	36
3.1	Forschungsergebnisse APV-RESOLA	37
3.2	Bewirtschaftung und Kulturauswahl	38
3.3	Landwirte berichten	43
4	Wirtschaftlichkeit und Geschäftsmodelle	44
4.1	Investitionskosten	45
4.2	Operative Kosten	46
4.3	Stromgestehungskosten	47
4.4	Eigenverbrauch und Stromerlöse	47
4.5	Geschäftsmodelle	48
5	Technik	50
5.1	Ansätze für Agri-PV-Anlagenkonstruktionen	51
5.2	Modultechnologien	52
5.3	Unterkonstruktion und Fundament	53
5.4	Lichtmanagement	55
5.5	Wassermanagement	56
5.6	Größe der Photovoltaikanlage	56
5.7	Genehmigung, Installation und Betrieb	57

6	Gesellschaft	60
6.1	Einbindung von Bürgerinnen und Bürgern sowie Interessensgruppen	61
6.2	Kontextspezifische Akzeptanz	61
6.3	Zwei Beispiele für Dialog und Beteiligung	62
6.4	Erfolgsfaktoren	64
7	Politik und Recht	66
7.1	EU-Direktzahlungen	66
7.2	Vorgaben des öffentlichen Baurechts	66
7.3	Erbschaft-, Schenkungs-, Grund- und Grunderwerbsteuer	68
7.4	Erneuerbare-Energien-Gesetz 2023	68
8	Agri-Photovoltaik voranbringen	73
9	Literatur und Quellen	75
9.1	Quellen	75
9.2	Abbildungsverzeichnis	77
9.3	Tabellenverzeichnis	79
9.4	Abkürzungen	79
9.5	Links zu weiterführenden Informationen	79

1 Ressourceneffiziente Landnutzung mit Agri-Photovoltaik

Die Weltbevölkerung wächst, und mit ihr der Bedarf an Nahrungsmitteln. Zugleich werden Flächen für den Ausbau von Photovoltaik-Freiflächenanlagen (PV-FFA) dringend benötigt^[1], um die Klimakrise zu bewältigen. Vor allem in dicht besiedelten Regionen ist eine wachsende Konkurrenz um verfügbare Flächen zu beobachten.

Die Flächennachfrage für den Bau von PV-FFA spielt auch deshalb eine immer größere Rolle, da diese aufgrund kontinuierlich sinkender Kosten inzwischen wirtschaftlich rentabel sind – selbst ohne staatliche Förderung. Darüber hinaus stellt die Klimakrise die Landwirtschaft zunehmend vor große Probleme: Wasserknappheit, Wetterextreme und der generelle Anstieg der Temperaturen fordern neue Maßnahmen, um Pflanzen und Böden vor negativen Umwelteinflüssen zu schützen. Durch rechtliche Rahmenbedingungen und wirtschaftliche Unsicherheiten stehen Landwirtschaftsbetriebe heute vielerorts unter Druck. Die Handlungsspielräume für den Arten- und Gewässerschutz einerseits und die Steigerung bzw. Stabilisierung der Ernteerträge andererseits werden dadurch spürbar enger.

Landwirtschaftliche Flächen doppelt nutzen

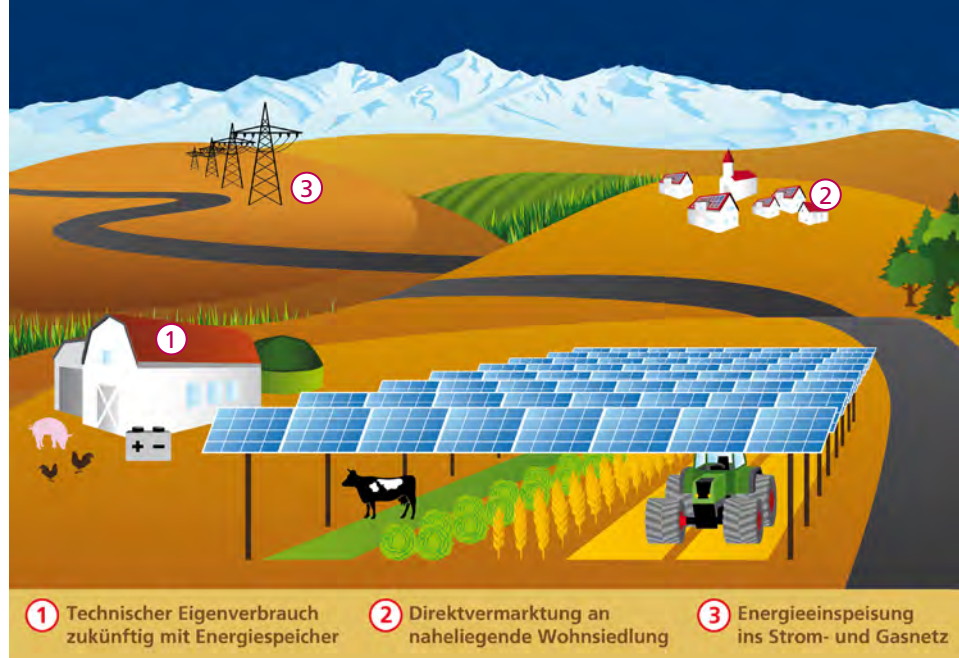
Künftig könnte die Agri-Photovoltaik, kurz Agri-PV, die Flächenkonkurrenz durch eine doppelte Nutzung der Flächen entschärfen: Sie bietet die Möglichkeit, große PV-Flächen im Freiland umzusetzen und gleichzeitig Böden für die Nahrungsmittelproduktion zu erhalten. Die Doppelnutzung von Flächen für Landwirtschaft und PV bietet besonders für solche Regionen Vorteile, die aufgrund fruchtbarer Böden und mildem Klima landwirtschaftlich attraktiv sind und sich wegen hoher Sonneneinstrahlung gleichzeitig gut als Standort für PV-FFA eignen.

Eine effiziente und gesellschaftlich akzeptierte Integration der PV in verschiedene Lebensbereiche erscheint dabei dringend geboten, denn die Solarenergie wird mit der Windenergie langfristig zur wichtigsten Säule der Energieversorgung werden. Für ein klimaneutrales Energiesystem muss, nach Berechnungen des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme ISE, die in Deutschland installierte PV-Kapazität bis zum Jahr 2045 um den Faktor 6-8 erhöht werden^[2].

Abb. 1: Agri-PV-Forschungsanlage am Bodensee
© Fraunhofer ISE



Abb. 2: Illustration
eines Agri-PV-Systems
© Fraunhofer ISE



Prof. Dr. Adolf Goetzberger, Gründer des Fraunhofer ISE, und Dr. Armin Zastrow waren die ersten, die 1981 mit ihrem Artikel »Kartoffeln unter dem Kollektor« in der Zeitschrift »Sonnenenergie« auf diese Form der doppelten Landnutzung hinwiesen^[3]. Die Innovationsgruppe APV-RESOLA (»Agrophotovoltaik: Beitrag zur ressourceneffizienten Landnutzung«) hat das Konzept im Jahr 2014 aufgegriffen und um weitere Fragestellungen ergänzt. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung förderte das Projekt im Rahmen des Forschungsprogramms FONA »Forschung für nachhaltige Entwicklung«. So entstand eine Pilotanlage in Heggelbach am Bodensee, in der die Technologie der Agri-PV unter Realbedingungen hinsichtlich wirtschaftlicher, technischer, gesellschaftlicher und ökologischer Aspekte wissenschaftlich untersucht wurde. Ziel des Projekts war es, die grundsätzliche Machbarkeit der Technologie zu demonstrieren.

Am Projekt beteiligt waren das Fraunhofer ISE (Leitung und Koordination), die Universität Hohenheim, das Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS)^[4] des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), die BayWa r.e. Solar Projects GmbH, der Regionalverband Bodensee-Oberschwaben, die Elektrizitätswerke Schönau und die Hofgemeinschaft Heggelbach.

In der Anlage in Heggelbach befinden sich in fünf Meter Durchfahrthöhe 720 bifaziale PV-Module mit einer installierten Leistung von 194 Kilowatt Peak (kW_p) auf einer ein Drittel Hektar großen Ackerfläche. 2017 und 2018 konnten Steigerungen der Landnutzungseffizienz zwischen 60 und 86 Prozent sowie eine verbesserte Anpassungsfähigkeit bei Trockenperioden nachgewiesen werden. Aktuell wird die Anlage zu weiteren Forschungszwecken genutzt.

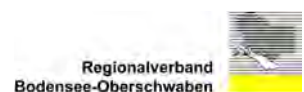
Ziel dieses Leitfadens

Dieser Leitfaden gründet auf den wichtigsten Forschungsergebnissen des Projekts APV-RESOLA und bindet in der vorliegenden dritten Ausgabe Ergebnisse weiterer Forschungsprojekte und Studien ein. Er informiert über die Möglichkeiten und Vorteile der Agri-PV, bietet einen Überblick über ihr Potenzial und den aktuellen Technologiestand und präsentiert praktische Hinweise zur Nutzung von Agri-PV für Landwirtschaftsbetriebe, Kommunen und Unternehmen.

Darüber hinaus zeigt der Leitfaden erfolgreiche Anwendungsbeispiele, weist auf Hürden und Herausforderungen der Nutzung von Agri-PV in Deutschland hin, und regt an, wie die Agri-PV in Deutschland zukünftig vorangebracht werden kann.



Abb. 3: Projektpartner
von APV-RESOLA



Historischer Abriss

Die Technologie der Agri-PV hat sich in den letzten Jahren sehr dynamisch entwickelt und in fast alle Regionen der Welt verbreitet. Die installierte Leistung stieg exponentiell von rund 5 Megawatt Peak (MW_p) im Jahr 2012 auf mindestens 14 Gigawatt Peak (GW_p) im Jahr 2021. Möglich wurde dies vor allem durch staatliche Förderprogramme in Japan (seit 2013), China (ca. seit 2014), Frankreich (seit 2017), den USA (seit 2018) und zuletzt Korea^[5].

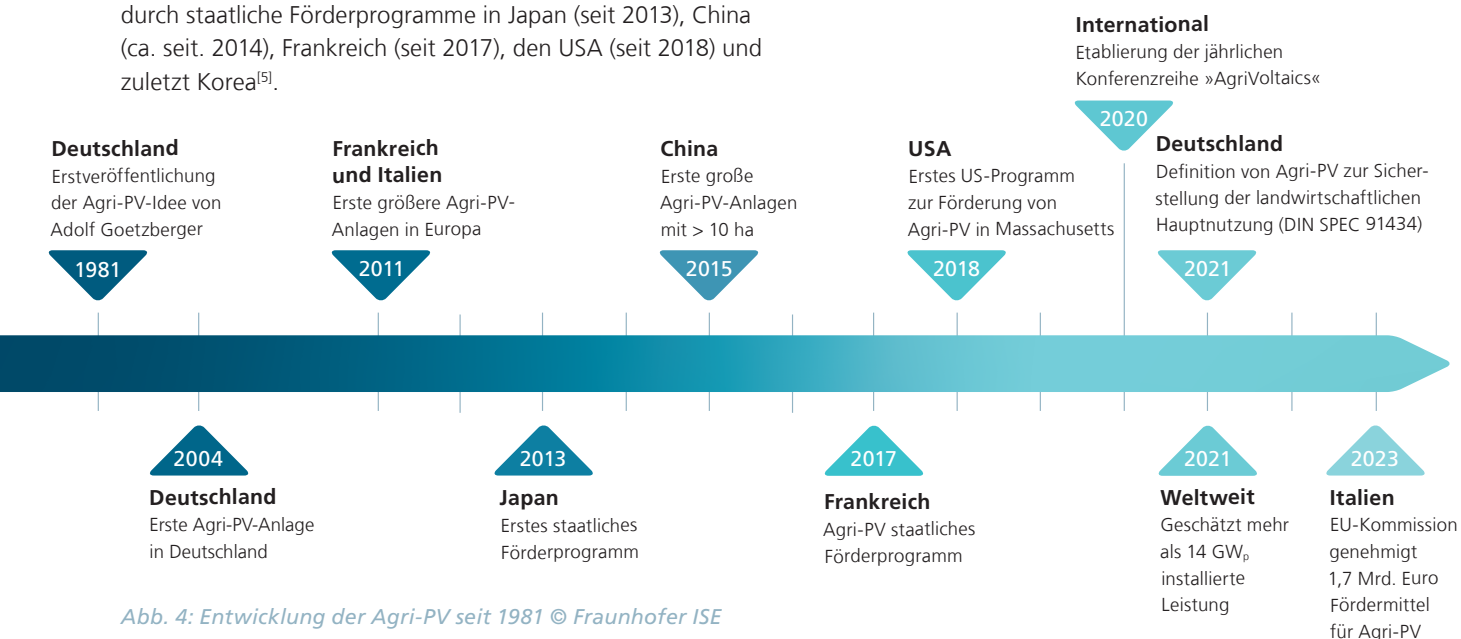


Abb. 4: Entwicklung der Agri-PV seit 1981 © Fraunhofer ISE

Chancen der Agri-PV

Über eine Steigerung der Landnutzungseffizienz hinaus kann Agri-PV bei geeignetem technischem Design zu einem Anstieg der Resilienz und der landwirtschaftlichen Erträge führen. Dies konnte unter anderem im Projekt APV-RESOLA gezeigt werden. Obst- und Sonderkulturen, die von zunehmenden Hagel-, Frost- und Dürreschäden betroffen sind, können zudem von einer Schutzfunktion durch die Teilüberdachung mit PV-Modulen profitieren^[6].

Weitere Synergiepotenziale zwischen PV und Landwirtschaft bestehen unter anderem durch:

- Die Reduktion des Bewässerungsbedarfs um bis zu 20 Prozent^[7]
- Die Möglichkeiten der Regenwassersammlung für Bewässerungszwecke
- Eine mögliche Verminderung der Winderosion
- Die Nutzung der PV-Unterkonstruktion zur Anbringung von Schutznetzen oder -folien
- Die Optimierung der Lichtverfügbarkeit für Kulturpflanzen z. B. durch nachgeführte PV-Systeme
- Eine höhere Effizienz der Module durch bessere konvektive Kühlung
- Eine höhere Effizienz bei bifazialen Modulen, die Licht von beiden Seiten nutzen und Strom erzeugen, aufgrund größerer Abstände zum Boden und zu den benachbarten Modulreihen

Zusätzlich kann die Nutzung der Agri-PV die Wertschöpfung in der Region steigern und der ländlichen Entwicklung zugutekommen. Agri-PV bietet außerdem die Chance, erneuerbaren Strom für den dezentralen Eigenverbrauch von Landwirtschaftsbetrieben zu erzeugen. Durch die Nutzung des Solarstroms direkt vor Ort werden der Bezug von teurem Netzstrom und damit die Gesamtausgaben für Strom reduziert. Werden die Stromerträge vermarktet, entsteht für Landwirtschaftsbetriebe die Möglichkeit für ein weiteres wirtschaftliches Standbein.

Herausforderungen: Hemmnisse in der Umsetzung

Um für die vielfältigen Ansätze der Agri-PV verlässlichere Aussagen über mögliche Synergieeffekte und Akzeptanzfragen treffen zu können, erscheint eine Förderung sowohl der Marktentwicklung als auch von weiteren Forschungsprojekten sinnvoll. Nur so können die ökologischen und ökonomischen Chancen und Risiken sowie die nicht-technischen und gesellschaftlichen Erfolgsfaktoren näher untersucht werden. Gleichzeitig wird dadurch die Investitionsbereitschaft und Kreativität von Akteurinnen und Akteuren, Bürgerinnen und Bürgern sowie Wirtschaftsunternehmen zur Entwicklung von Lösungsansätzen gefördert. Mögliche politische Handlungsfelder werden in Kapitel 7 dargelegt.

In den letzten Jahren wurde in Deutschland ein Rahmen geschaffen, der begünstigt, dass Agri-PV-Anlagen eine realistische Chance haben, umgesetzt zu werden. Für die Realisierung von Projekten ist jedoch nicht nur das bundesweite Baugesetzbuch (BauGB) relevant, sondern auch Einflüsse der Raumplanung und Raumordnung. Die verantwortlichen Behörden und Institutionen unterscheiden sich zwischen den Bundesländern deutlich. Um einen nachhaltigen Markthochlauf zu ermöglichen, müssen neben baurechtlichen Rahmenbedingungen auch umsetzbare Behördeninstruktionen, Regionalpläne und Landesentwicklungspläne vereinheitlicht und Lösungsansätze gefördert werden.

Agri-Photovoltaik auf einen Blick

- Installierte Leistung weltweit mindestens 14 GW_p
- Geschätztes Potenzial in Deutschland für hoch aufgeständerte Agri-PV rund 1700 GW_p

Vorteile

- Vereinbarung von Freiflächen-PV-Anlagen mit Landwirtschaft
- Möglicher Zusatznutzen für die Landwirtschaft u. a. durch Schutz vor Sturm-, Hagel-, Frost- und Dürreschäden
- Geringere Stromgestehungskosten im Vergleich zu kleinen PV-Dachanlagen
- Diversifizierung des landwirtschaftlichen Einkommens

Erforderliche Schritte

- Flächennutzungsplan: Agri-PV-Anlagen im Flächennutzungsplan als »Sondergebiet Agri-Photovoltaik« und nicht als »elektrische Betriebsstätte/Gewerbe« ausweisen, um eine unzutreffende Erfassung als versiegelte Fläche zu vermeiden
- Generelle Ausweitung der Flächenkulisse für Agri-PV auf alle landwirtschaftlichen Nutzflächen im Rahmen des EEG
- Umsetzung eines Forschungs- und Entwicklungsprogramms für Deutschland
- Frühzeitige und möglichst breite Einbindung von Interessensgruppen, Bürgerinnen und Bürgern zur Analyse der nicht-technischen Erfolgsfaktoren für die Errichtung einer Agri-PV-Anlage und Identifizierung geeigneter Standorte

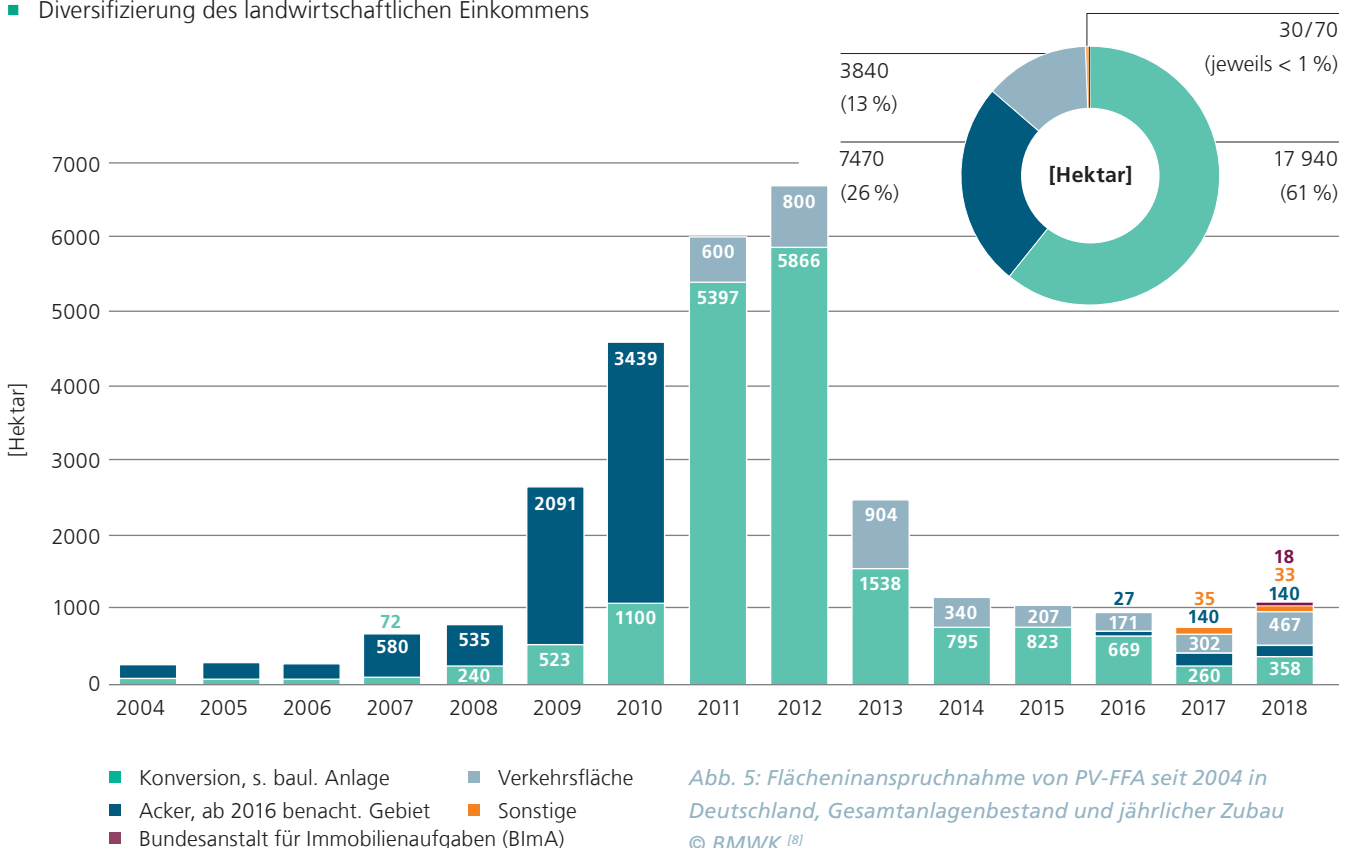


Abb. 5: Flächeninanspruchnahme von PV-FFA seit 2004 in Deutschland, Gesamtanlagenbestand und jährlicher Zubau
© BMWK [8]

2 Daten und Fakten zur Agri-Photovoltaik



Abb. 6: Anwendungen für die Integration von Photovoltaik © Fraunhofer ISE



Abb. 7: Typische PV-FFA © Fraunhofer ISE

Photovoltaik und Windkraft gelten als wichtigste Säulen der zukünftigen Energieversorgung. Die PV ist inzwischen die günstigste Technologie unter den Erneuerbaren. Die Preise für PV-Module sind von 2009 bis 2019 um rund 90 Prozent gesunken. Je nach Größe der Anlage liegen die Stromgestehungskosten aktuell zwischen rund 4 und 11 Eurocent pro Kilowattstunde.

Solarstrom genießt außerdem eine hohe Akzeptanz in der Bevölkerung. Im Vergleich zu der Windenergie oder fossilen Energiequellen ist die PV jedoch auf relativ viel Fläche angewiesen. Gerade für die Errichtung großer PV-Kraftwerke ist es daher oft schwierig geeignete Flächen zu finden. Eine Lösung ist die Integration der PV in unterschiedliche Bereiche der Umwelt des Menschen, z. B. an und auf Gebäuden, auf Seen oder versiegelten Flächen wie Verkehrsflächen. So können Flächen doppelt genutzt werden. Im Fall der Agri-PV reduziert dies den Landverbrauch deutlich. Statt miteinander in Konkurrenz zu stehen, können sich PV und Photosynthese sehr gut ergänzen.

Ende 2021 waren in Deutschland rund 59 GW_p PV installiert, davon etwa 75 Prozent auf Dächern, der Rest in PV-FFA^[9]. Es wird jedoch deutlich mehr benötigt: Das Fraunhofer ISE hat einen Bedarf von 300 bis 450 GW_p installierter Leistung bis 2045 berechnet. Die Integration der PV-Technologie in Gebäude, Fahrzeuge und Fahrwege und ihr Einsatz auf Agrar- und Wasserflächen sowie im urbanen Raum könnte riesige Ertragsflächen erschließen.

Welcher Teil des technischen Potenzials wirtschaftlich und praktisch nutzbar ist, hängt unter anderem von ökonomischen und regulativen Rahmenbedingungen ab. Einerseits sind bei integrierter PV höhere Stromgestehungskosten zu erwarten als bei einfachen, großen Freiflächen-Kraftwerken. Andererseits wirkt integrierte PV der Nutzungskonkurrenz entgegen und kann Synergien schaffen, indem sie beispielsweise eine Gebäudefassade ersetzt, die Unterkonstruktion einer Lärmschutzwand nutzt, die Reichweite von E-Fahrzeugen erhöht oder die Doppelnutzung landwirtschaftlicher Flächen ermöglicht. Dabei gilt das Prinzip: Je größer der Zusatznutzen durch die PV-Ebene, desto erfolgreicher kann die Integration umgesetzt werden.

2.1 Agri-Photovoltaik: Neuer Ansatz zur Entschärfung der Flächenkonkurrenz

Bei PV-FFA kann es zu Flächennutzungskonkurrenz mit der Landwirtschaft kommen. Zwar können EEG-geförderte PV-FFA im Rahmen der Ausschreibung nur auf versiegelten Flächen, auf Konversionsflächen, auf Streifen längs von Autobahnen oder Schienenwegen und auf Flächen in (landwirtschaftlich) benachteiligten Gebieten errichtet werden, wegen der enormen Reduktion der Stromgestehungskosten für Solarstrom werden große PV-Kraftwerke jedoch auch außerhalb von Ausschreibungen nach dem EEG errichtet. Damit entfällt die Lenkungswirkung des EEG zum Schutz hochwertiger landwirtschaftlicher Böden.

In Anbetracht der eingeschränkten Verfügbarkeit fruchtbarer Böden ist es möglich, dass die steigende Flächennachfrage lokal zu neuen Dimensionen der Flächennutzungskonkurrenz und zu ökonomischen, ökologischen, politischen und gesellschaftlichen Konfliktsituationen führt. Vor diesem Hintergrund erscheinen Diskussionen um die zukünftige Bedeutung des ländlichen Raums als Standort für neue Technologien zur Entschärfung von drohenden Zielkonflikten und Wertungswidersprüchen angebracht. Auch im Hinblick auf die Forderungen der Hightech-Strategie 2025 des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) ist Forschung und Entwicklung im Bereich der Agri-Photovoltaik ein wichtiges Unterfangen.

2.2 Niederschläge und Globalstrahlung

Deutschlandweite Langzeitmessungen seit 1880 ergeben eine mittlere jährliche Zunahme des Niederschlags von 8 Prozent. Die Niederschlagsentwicklung der vergangenen 30 Jahre zeigt jedoch einen eindeutigen Abwärtstrend auf. Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD)^[10] belegen einen jährlichen Niederschlagsrückgang von 0,39 Prozent seit 1991. Die durchschnittliche Niederschlagsmenge hat dadurch seitdem um knapp 12 Prozent abgenommen (siehe Abbildung 8, blaue Trendlinie). Besonders die klimatischen Bedingungen im Frühjahr, die für das Wachstum vieler Pflanzen entscheidend sind, haben sich grundlegend verändert. Die April-Niederschlagsmengen der letzten 12 Jahre lagen teilweise bis zu 70 Prozent unter dem langjährigen Mittel für diesen Monat. Durch die Wärme im Frühjahr kommt es zunehmend bereits früh im Jahr zu einem Feuchtedefizit im Boden, welches später im Sommer nicht mehr ausgeglichen werden kann^[11]. Die Auswertung der Daten verdeutlicht außerdem, dass die Globalstrahlung, die Summe aus direkter Sonneneinstrahlung und Diffusstrahlung, im selben Zeitrahmen jährlich um 0,28 Prozent zugenommen hat (rote Trendlinie) – eine vorteilhafte Entwicklung für PV-Erträge. Die Kombination aus abnehmenden Niederschlagsmengen und zunehmender globaler Sonneneinstrahlung legt nahe, dass die Eignung der Agri-PV, die Resilienz landwirtschaftlicher Systeme gegen die Klimakrise zu stärken und gleichzeitig von dessen Auswirkungen zu profitieren, auch zukünftig weiter steigen wird.

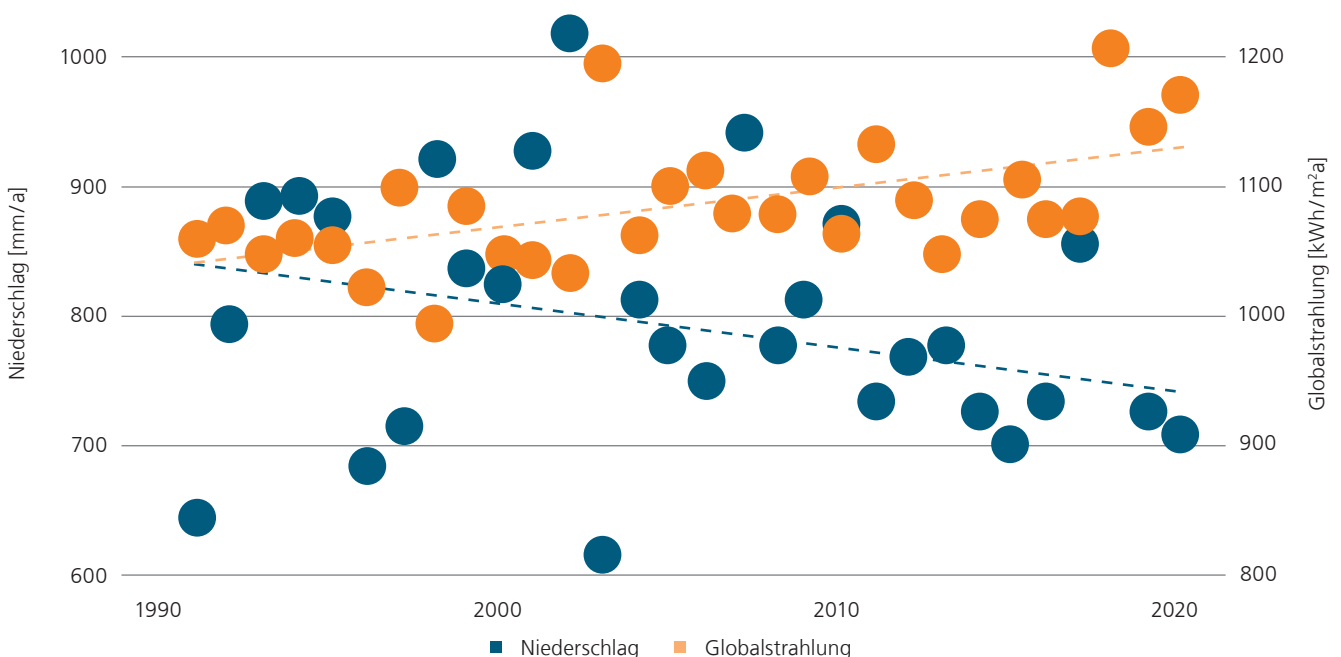


Abb. 8: Entwicklung der Niederschläge und der Globalstrahlung in Deutschland seit 1991
Daten: Deutscher Wetterdienst. © Fraunhofer ISE

2.3 Definition und Potenzial der Agri-Photovoltaik

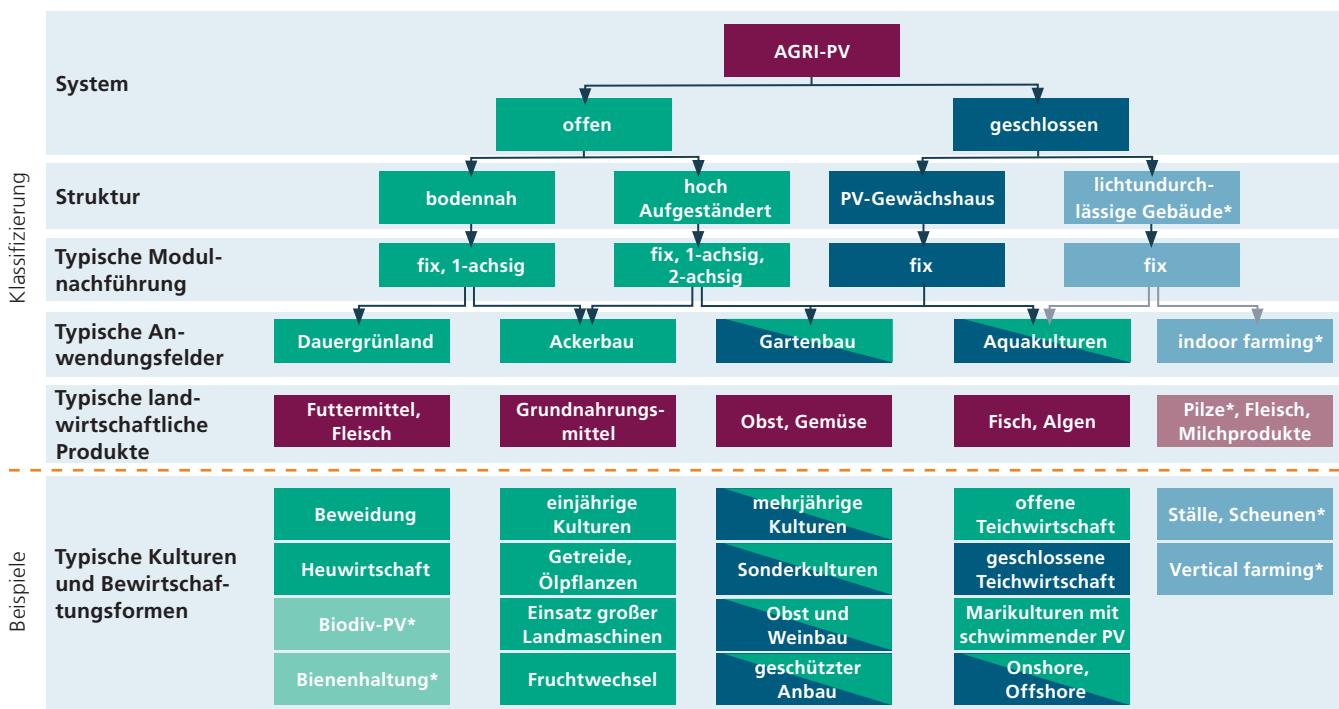
Agri-PV bezeichnet eine Technologie zur gleichzeitigen Nutzung von Flächen für die Landwirtschaft und die Stromerzeugung mit PV^[12]. So kann eine Fläche gleichzeitig sowohl für die landwirtschaftliche Pflanzenproduktion (Photosynthese) als auch für die Solarstromerzeugung (PV) genutzt werden. Teilweise werden auch Tierunterstände mit PV-Modulen zur Agri-PV gezählt, dort fehlen jedoch differenzierende Merkmale zum gewöhnlichen PV-Dach.

Die technischen Ansätze zur Integration der PV in die Landwirtschaft sind so vielfältig wie die Landwirtschaft selbst. Eine grobe Einteilung kann in offene und geschlossene Systeme vorgenommen werden (siehe Abbildung 9). Geschlossene Systeme umfassen im Wesentlichen PV-Gewächshäuser. Offene Agri-PV-Systeme lassen sich in bodennahe und hoch aufgeständerte Anlagen untergliedern. Bei hoch aufgeständerten Anlagen befinden sich die PV-Module in einer Höhe von mindestens 2,1 Metern über dem Boden (siehe nächste Seite im Abschnitt zur DIN SPEC 91434). Die landwirtschaftliche Nutzung findet in diesem Fall unter den PV-Modulen statt, während in bodennahen Anlagen typischerweise die Flächen zwischen den PV-Modulen bewirtschaftet werden.

Die Vorteile bodennaher Anlagen liegen vor allem in deren geringeren Kosten sowie in einer tendenziell weniger starken Beeinträchtigung des Landschaftsbilds. Hoch aufgeständerte Anlagen nutzen die Landfläche hingegen effizienter und können den landwirtschaftlichen Kulturen einen größeren Schutz vor negativen Umwelteinflüssen bieten. Auch einige bodennahe Systemkonzepte können vor Sturmschäden und überhöhter Verdunstung schützen.

Ähnlich wie im Fall von PV-FFA kann eine Agri-PV-Anlage sowohl mit einer starren Unterkonstruktion als auch mit ein- oder zweiachsig beweglichen Konstruktionen (sogenannte Tracker) realisiert werden. Bewegliche Systeme ermöglichen durch individuelles Ausrichten der PV-Module ein flexibleres Lichtmanagement.

Dieser Leitfaden betrachtet im Wesentlichen hoch aufgeständerte Anlagen im Ackerbau (> 2 Meter) und im Gartenbau (ca. 2,5 Meter), darunter auch Anwendungen mit Sonderkulturen wie im Wein-, Gemüse- und Obstanbau. In geringerem Umfang wird auch auf bodennahe Anlagen mit Anwendungen im Dauergrünland und Ackerbau eingegangen. Die hier für die jeweiligen Anwendungen angegebenen Höhen sind nur als Trend zu verstehen und dienen der Abgrenzung der Anwendungsfälle aus techno-ökonomischer Sicht. Geschlossene Systeme wie PV-Gewächshäuser bleiben in diesem Leitfaden unberücksichtigt. Nähere Informationen zu den verschiedenen technischen Ansätzen sind in Kapitel 5 zu finden.



*Keine Agri-PV-Anwendung im engeren Sinne

Abb. 9: Klassifizierung von Agri-PV-Systemen

© Fraunhofer ISE

Zusammenfassung der DIN SPEC 91434 »Agri-Photovoltaik-Anlagen – Anforderungen an die landwirtschaftliche Hauptnutzung«

Das Fraunhofer ISE und die Universität Hohenheim haben zusammen mit einem Konsortium von 15 Wissenschafts- und Praxispartnern sowie dem Deutschen Institut für Normung die DIN-Spezifikation DIN SPEC 91434 entwickelt. Durch die Festlegung von Anforderungen an die landwirtschaftliche Hauptnutzung von Agri-PV-Flächen soll die DIN SPEC 91434 helfen, Agri-PV-Anlagen klar von herkömmlichen PV-FFA abzugrenzen. Dies erscheint für eine erfolgreiche Markteinführung als notwendige Voraussetzung. Die DIN SPEC bietet dem Gesetz- und Fördermittelgeber sowie den Genehmigungsbehörden eine Grundlage zur Prüfung und legt Qualitätskriterien für den Bau und den Betrieb von Agri-PV-Anlagen fest. Weitergehend wird auf Basis der DIN SPEC 91434 auch ein Prüfverfahren für eine Zertifizierung für Agri-PV-Anlagen entwickelt. Das Konsortium zur Entwicklung der DIN SPEC stimmte im Oktober 2024 für die Überführung der DIN SPEC 91434 in eine Norm. Während des Normierungsprozess gilt die aktuelle Version der DIN SPEC 91434 unverändert.

Die DIN SPEC formuliert Anforderungen an landwirtschaftliche Aspekte mit besonderem Fokus auf die Pflanzenproduktion. In Tabelle 1 sind die wichtigsten Inhalte der DIN SPEC 91434 und deren Kategorisierung von Agri-PV-Anlagen dargestellt. Obgleich die Weidehaltung Erwähnung findet, formuliert die DIN SPEC 91434 keine tierhaltungsspezifischen Anforderungen. Diese ergänzt die im Jahr 2024 veröffentlichte DIN SPEC 91492: »Agri-Photovoltaik-Anlagen – Anforderungen an die Nutztierhaltung2B«, welche im deutschen Rechtsrahmen bislang jedoch keine Relevanz erlangt hat.

Grundsätzlich gilt für alle Kategorien in der DIN SPEC 91434, dass die Fläche der Agri-PV-Anlagen weiterhin landwirtschaftlich genutzt werden muss. Eine genauere Beschreibung, wie

diese landwirtschaftliche Nutzung im Einzelfall aussieht, muss in einem landwirtschaftlichen Nutzungskonzept festgehalten werden. Für das Nutzungskonzept gelten folgende Kernanforderungen und Kriterien:

- Die bisherige landwirtschaftliche Nutzbarkeit der Fläche muss weiterhin gewährleistet und die geplante Landnutzungsform muss im landwirtschaftlichen Nutzungskonzept dargelegt werden.
- Der Flächenverlust durch die Installation der Anlage darf in Kategorie I maximal 10 Prozent der Gesamtprojektfäche und in Kategorie II maximal 15 Prozent betragen.
- Die Lichtverfügbarkeit- und -homogenität sowie die Wasserverfügbarkeit müssen geprüft und an die Bedürfnisse der landwirtschaftlichen Erzeugnisse angepasst werden. Außerdem müssen Bodenerosion und -schäden durch den Aufbau der Anlage, durch die Verankerung im Boden oder durch von den Modulen abfließendes Wasser vermieden werden.
- Auch muss sichergestellt werden, dass der landwirtschaftliche Ertrag nach dem Bau der Agri-PV-Anlage mindestens 66 Prozent des Referenzertrags beträgt. Als Referenzertrag dienen beispielsweise ein dreijähriger Durchschnittswert derselben landwirtschaftlichen Fläche oder vergleichbare Daten aus Veröffentlichungen.

Neben diesen zentralen Kenngrößen und Anforderungen enthält die DIN SPEC 91434 weitere Empfehlungen für eine erfolgreiche Planung und Installation von Agri-PV-Anlagen. Die zwei Vornormen stehen kostenlos als Downloads zur Verfügung:

- DIN SPEC 91434
<https://www.din.de/de/din-und-seine-partner/presse/mitteilungen/oben-strom-unten-gemuese-797786>
- DIN SPEC 91492 - 2024-06
<https://www.dinmedia.de/de/technische-regel/din-spec-91492/379601163>

Tab. 01: Überblick über Kategorien und Nutzungsformen der DIN SPEC 91434

Agri-PV-Systeme	Nutzung	Beispiele
Kategorie I: Hohe Aufständering > 2,1 m Bewirtschaftung unter der Agri-PV-Anlage	1A: Dauerkulturen und mehrjährige Kulturen	Obstbau, Beerenobstbau, Weinbau, Hopfen
	1B: Einjährige und überjährige Kulturen	Ackerkulturen, Gemüsekulturen, Wechselgrünland, Ackerfutter
	1C: Dauergrünland mit Schnittnutzung	Intensives Wirtschaftsgrünland, extensiv genutztes Grünland
	1D: Dauergrünland mit Weidenutzung	Dauerweide, Portionsweide (z. B. Rinder, Geflügel, Schafe, Schweine und Ziegen)
Kategorie II: Bodennahe Aufständering < 2,1 m Bewirtschaftung zwischen den Agri-PV-Anlagenreihen	2A: Dauerkulturen und mehrjährige Kulturen	Obstbau, Beerenobstbau, Weinbau, Hopfen
	2B: Einjährige und überjährige Kulturen	Ackerkulturen, Gemüsekulturen, Wechselgrünland, Ackerfutter
	2C: Dauergrünland mit Schnittnutzung	Intensives Wirtschaftsgrünland, extensiv genutztes Grünland
	2D: Dauergrünland mit Weidenutzung	Dauerweide, Portionsweide (z. B. Rinder, Geflügel, Schafe, Schweine und Ziegen)

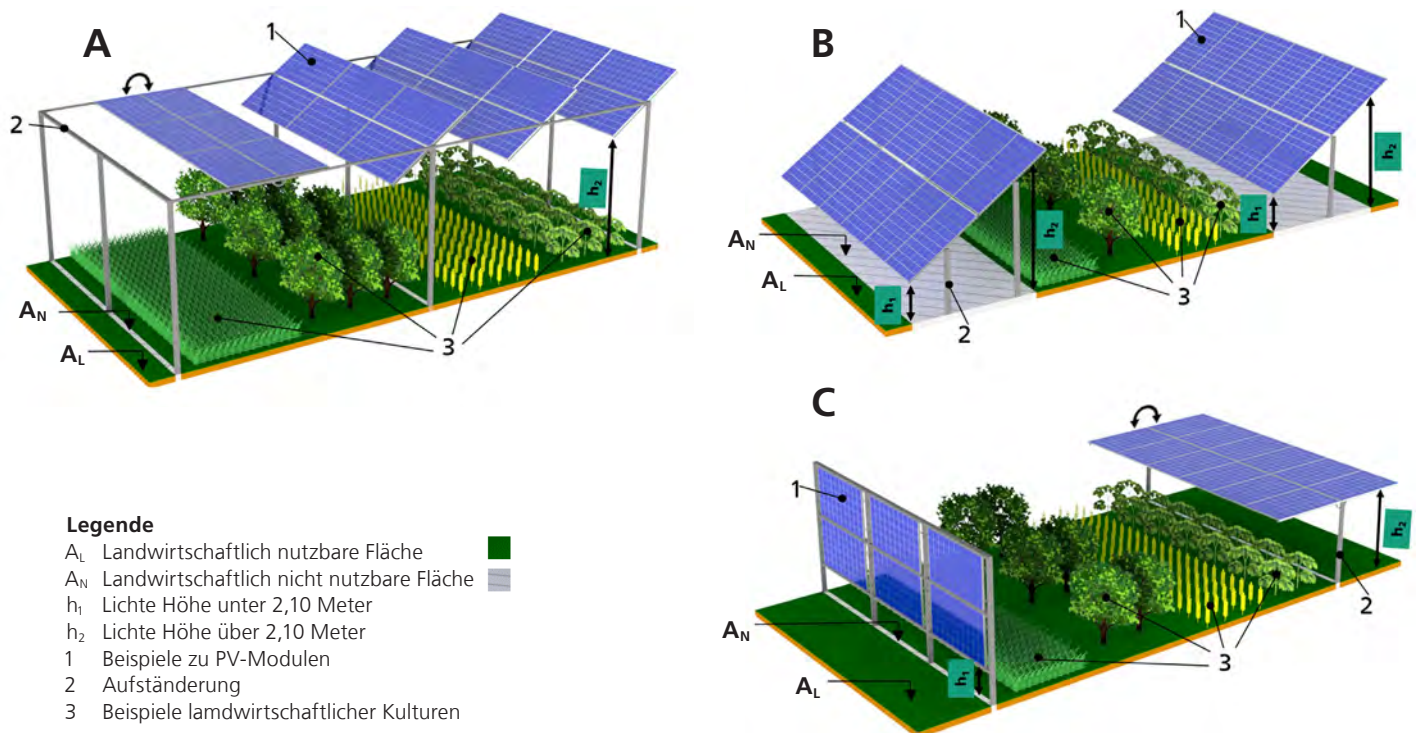


Abb. 10: Illustration der Kategorien und Nutzungsformen der DIN SPEC 91434 © Fraunhofer ISE

Bild A: Darstellung zu Kategorie I; Bild B: Darstellung zu Kategorie II, Variante 1;

Bild C: Darstellung zu Kategorie II, Varianten 1 und 2.

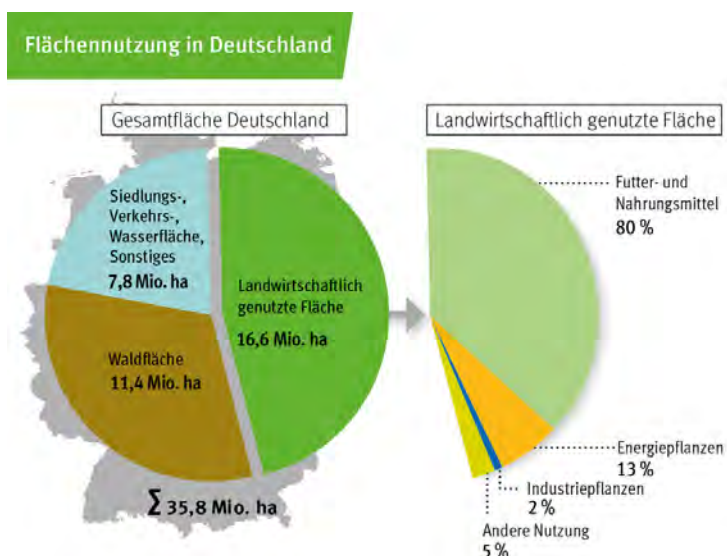


Abb. 11: Flächennutzung in Deutschland

© Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (2023)^[13]

Das Potenzial ist hoch

Unter allen integrierten Photovoltaikanwendungen birgt die Agri-PV besonders große Chancen. Nur rund vier Prozent der deutschen Agrarflächen würden ausreichen, um mit hoch aufgeständerter Agri-PV bilanziell den gesamten aktuellen Strombedarf in Deutschland zu decken. In einer ersten Potenzialabschätzung des Fraunhofer ISE der Agri-PV beträgt dieses in Deutschland rund 1700 GW_p. Dabei wurden vorwiegend schattentolerante Kulturen und Kulturen typischer Fruchtfolgen berücksichtigt. Würden von diesen 1700 GW_p nur zehn Prozent genutzt werden, entspräche dies bereits fast einer Verdreifachung der aktuellen PV-Kapazität in Deutschland. Bodennah montierte Module mit weitem Reihenabstand ermöglichen einen Anbau zwischen den Reihen. Bei einer Belegungsichte von 0,35 MW_p pro Hektar eröffnet der Anbau von Futterpflanzen auf Dauergrünland ein Potenzial von weiteren 1200 GW_p. Aus Sicht der Stromproduktion ist die Doppelnutzung der landwirtschaftlichen Fläche mit Agri-PV deutlich effizienter als der Anbau von Energiepflanzen (beispielsweise Faktor 32 mehr Strom pro Hektar als bei Energiemais). Der Energiepflanzenanbau beansprucht in Deutschland immerhin 13 Prozent der landwirtschaftlichen Flächen (siehe Abbildung 11).

2.4 Forschungsanlagen in Deutschland

In Deutschland wurden bereits mindestens elf Agri-PV-Anlagen zu Forschungszwecken in Betrieb genommen, die in Tabelle 2 gelistet sind. Im Folgenden werden die wichtigsten Daten und Forschungsfragen dieser Standorte aufgeführt und Informationen zu weiteren Forschungsprojekten zusammengefasst.

Tab. 02: Überblick über bisherige Agri-PV-Forschungsanlagen in Deutschland

Standort	Art der landwirtschaftlichen Nutzung	Technologie	Installierte Leistung	Jahr der Inbetriebnahme
Weihenstephan/ Freising, Bayern	Gemüseanbau	Nachgeführte PV-Modultische	22 kW _p	2013
Weihenstephan/ Freising, Bayern	Gemüseanbau	PV-Röhren	14 kW _p	2015
Heggelbach Landkreis Sigmaringen, Baden-Württemberg	Ackerbau	Nach Südwesten ausgerichtete fix installierte PV-Module	194 kW _p	2016
Gelsdorf, Landkreis Ahrweiler, Rheinland-Pfalz	Obstanbau	Nachgeführt und fix ausgerich- tet, teiltransparente PV-Module	258 kW _p	2021
Alt-Morschenich, Kreis Düren, Nordrhein-Westfalen	Ackerbau/ Gemüseanbau	Nachgeführt und fix ausgerich- tet, inkl. Wassermanagement	300 kW _p	2021
Bavendorf, Baden-Württemberg	Obstanbau	Nachgeführt und fix ausgerichtete PV-Module	227 kW _p	2022
Dresden-Pillnitz, Sachsen	Ackerbau	Vertikale PV-Module	134 kW _p	2022
Heuchlingen, Landkreis Heilbronn, Baden-Württemberg	Obstanbau	Fix ausgerichtete PV-Module	113 kW _p	2023
Tuniberg, Munzingen, Baden-Württemberg	Weinbau	Nach Ost-West ausgerichtete fix installierte PV-Module	300 kW _p	2023
Blankenhornsberg, Ihringen, Baden-Württemberg	Weinbau	Einachsigt nachgeführte und fix ausgerichtete PV-Module	200 kW _p	2023
Geisenheim, Rheingau-Taunus- Kreis, Hessen	Weinbau	Einachsigt nachgeführte PV-Module	94 kW _p	2023

Weihenstephan 2013

2011 erfolgten erste Vorversuche am Institut für Gartenbau der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf mit einer kleinen (nach Süden ausgerichteten) Dummy-Freiflächenanlage. Dachpappe simulierte die Verschattung der PV-Module, angebaut wurde unter anderem Salat. Es stellte sich heraus, dass die unterschiedliche Beschattung und Bodenfeuchte in den stärker bzw. schwächer beschatteten Bereichen direkt unter bzw. nördlich der Dummy-Modulreihe bei den Pflanzen zu erheblichen, für die Praxis ungeeigneten, Wachstumsunterschieden führten. Um unter anderem diese Probleme einer zu starken Verschattung auf Teilflächen innerhalb einer Agri-PV-Anlage zu vermeiden, entstand 2013 die erste Agri-PV-Anlage (siehe Abbildung 12) mit Ost-West-nachgeführten PV-Modulreihen.

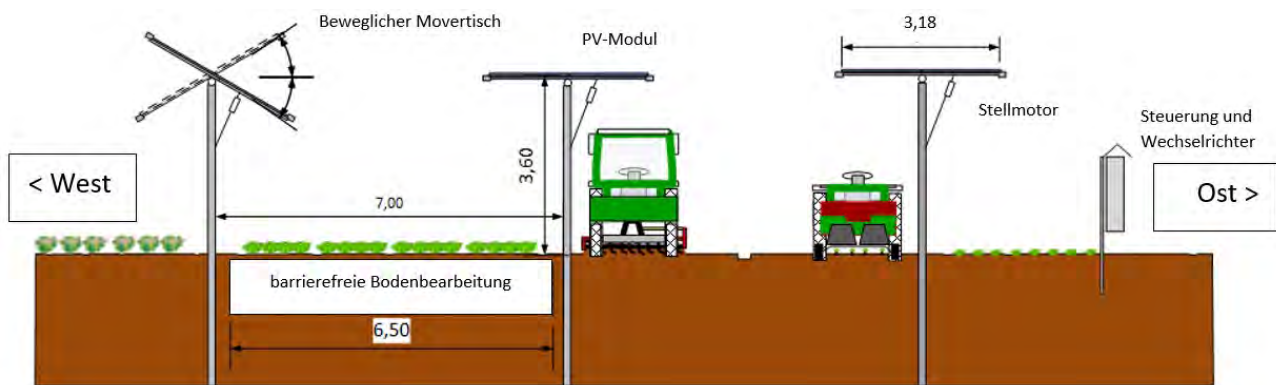


Abb. 12: Querschnitt der Agri-PV-Anlage in Weihenstephan

© 2020 B. Ehrmaier, M. Beck, U. Bodmer

Tab. 03: Schaden an Kohlpflanzen © 2020 B. Ehrmaier, M. Beck, U. Bodmer

	Dicht belegter Teil Modulreihen: 0 cm Abstand zwischen den Modulen	25 cm Abstand zwischen den Modulen	66 cm Abstand zwischen den Modulen	Anbau außerhalb der Anlage zum Vergleich
	1348 g	1559 g	1970 g	2762 g
Mittleres Kopfgewicht von Chinakohl unter Agri-PV (2014)	Rund 50 Prozent des Ertrags außerhalb der Agri-PV-Anlage	Rund 56 Prozent des Ertrags außerhalb der Agri-PV-Anlage	Rund 71 Prozent des Ertrags außerhalb der Agri-PV-Anlage	

Unterschiedliche Abstände der PV-Module innerhalb der Modulreihen sollen dazu beitragen, die Einflüsse unterschiedlich starker Verschattung auf den Ertrag der Pflanzen zu ermitteln und die beste Belegdichte zu identifizieren. Versuche mit Chinakohl zeigten Ertragsrückgänge zwischen 29 und 50 Prozent. Die Ergebnisse, abhängig von verschiedenen Verschattungsgraden, sind in Tabelle 3 dargestellt.

Mögliche Ursachen für die Mindererträge der Pflanzen in dem Agri-PV-System waren unter anderem Bodenverdichtungen, die bei der Errichtung der Anlage entstanden sind, sowie Beschädigungen von Pflanzen unter der Abtropfkante der PV-Module.

Technische Daten:

- Grundfläche: 483 m²
- Nachführung: Ost-West, kalendergesteuert
- PV-Module: CSG 245 W_p (90 PV-Module)
- Installierte Leistung: 22 kW_p
- Nutzung: Eigenverbrauch

Weihenstephan 2015

Die Anbringung von Regenrinnen an den Abtropfkanten der PV-Module bei der Agri-PV-Anlage verursachte vor allem im Winter neue Probleme, sodass alternativ die Auswirkungen horizontal angeordneter, fest aufgeständerter tubularer PV-Module auf den Pflanzenertrag untersucht wurden.

2015 errichtete die Hochschule Weihenstephan die zweite deutsche Forschungsanlage mit der Firma TubeSolar. An ihr testeten die Forschenden die Praxistauglichkeit von röhrenförmigen PV-Modulen. Die Kapazität der Anlage beträgt 14 kW_p; angebaut wurden Kartoffeln und Salatsorten. In einem Versuch mit der Salatsorte »Lollo Rosso« fiel der Ertrag unter PV-Röhren höchstens 15 Prozent geringer aus als der von Pflanzen ohne Verschattung durch Agri-PV. Daher können sich zumindest für empfindliche Pflanzen im Bereich Gartenbau durch solche PV-Module neue Perspektiven für den Einsatz von Agri-PV ergeben. Für eine umfassende Bewertung müssen allerdings die Stromgestehungskosten unter Berücksichtigung der Deckungsbeiträge aus der Pflanzenproduktion betrachtet werden.

Heggelbach 2016

Die dritte Forschungsanlage zu Agri-PV wurde in Deutschland 2016 in Heggelbach am Bodensee im Rahmen des Projekts »APV-RESOLA« errichtet. Die Hofgemeinschaft Heggelbach bewirtschaftet seit mehr als 30 Jahren den 165 Hektar großen landwirtschaftlichen Gemischtbetrieb biologisch-dynamisch. Als Testkulturen wurden Winterweizen, Kartoffeln, Sellerie und Klee gras angebaut. Ein größerer Reihenabstand zwischen den bifazialen Doppelglas-PV-Modulen in über 5 Meter Höhe und die Ausrichtung nach Südwesten stellen sicher, dass die Nutzpflanzen gleichmäßig Sonnenlicht erhalten. Die Durchfahrtshöhe und der Abstand der Aufständering lässt die Bewirtschaftung auch mit großen Landmaschinen, wie Mäh-dreschern, ohne größere Einschränkungen zu. Der Abstand der PV-Modulreihen beträgt 9,5 Meter bei einer Modulreihenbreite von 3,4 Meter. Die installierte Leistung der Forschungsanlage kann bilanziell jährlich 62 Vier-Personen-Haushalte versorgen. Pro Hektar liegt die installierte Leistung der Anlage aufgrund der höheren Reihenabstände ca. 25 Prozent unter der von herkömmlichen PV-FFA.

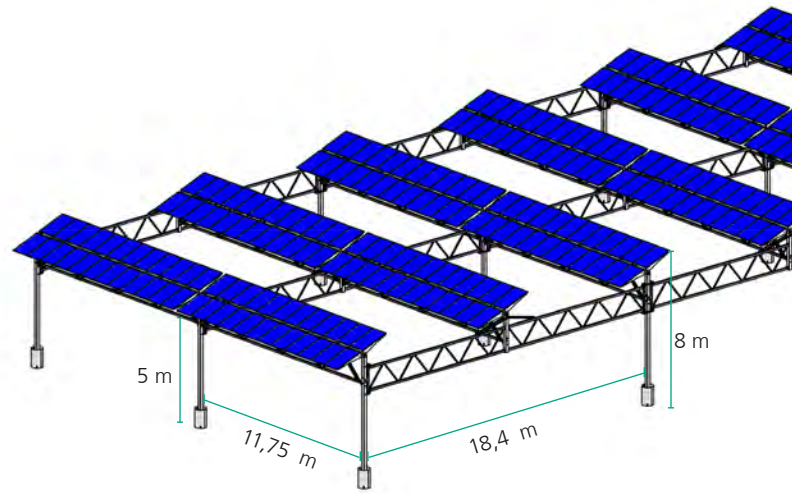


Abb. 13: Skizze der Agri-PV-Anlage in Heggelbach
© AGRISOLAR Europe GmbH

Bereits im ersten Projektjahr 2017 konnte eine Steigerung der Landnutzungsrate auf ca. 160 Prozent nachgewiesen werden. Die Agri-PV-Anlage hat sich somit als praxistauglich erwiesen. Die Ernteerträge unter den Modulen blieben über der kritischen Marke von 80 Prozent im Vergleich zur Referenzfläche ohne PV-Module und konnten wirtschaftlich rentabel vermarktet werden.

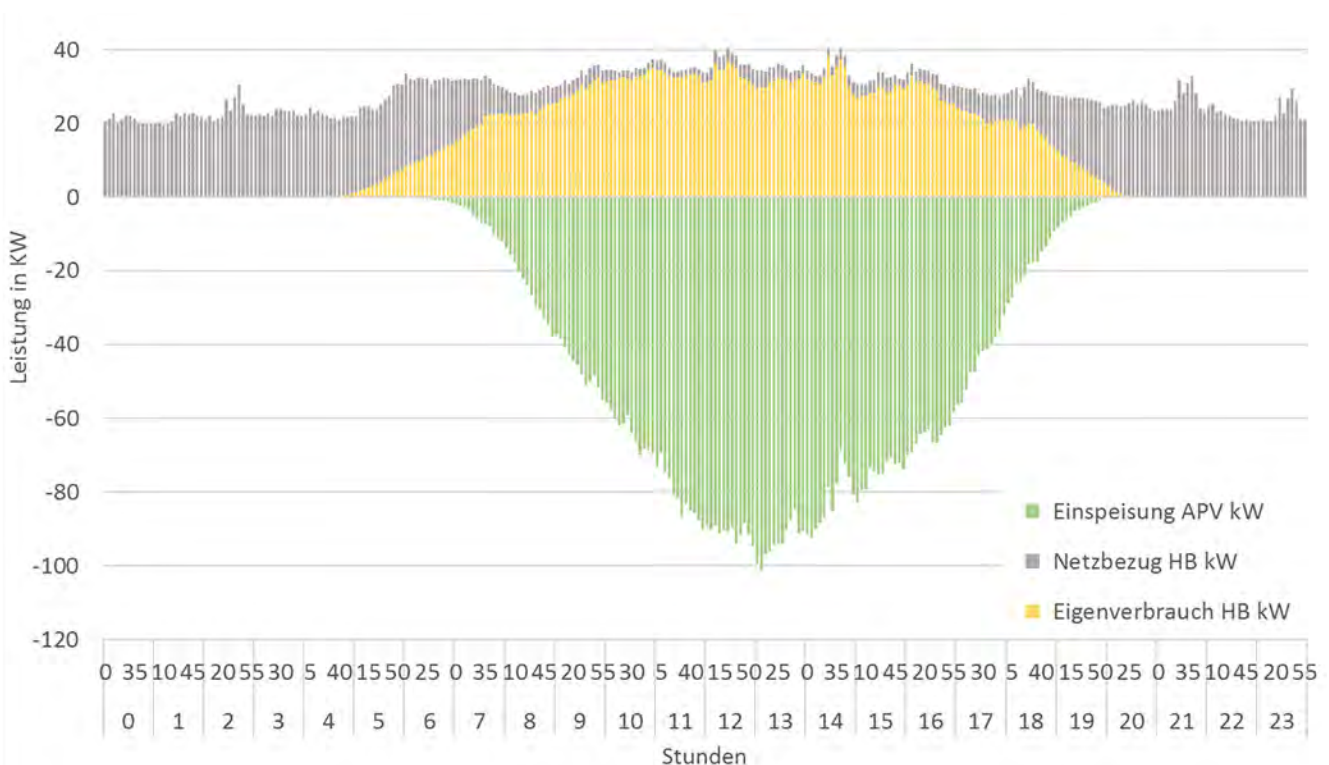


Abb. 14: Die Hofgemeinschaft Heggelbach konnte im Sommer 2017 ihren Strombedarf fast vollständig durch den auf der Agri-PV-Anlage erzeugten Strom decken

© BayWa r.e.

In den ersten zwölf Monaten (September 2016 bis September 2017) hat die Agri-PV-Anlage 1266 kWh Strom pro installiertem kW_p erzeugt. Dieses Ergebnis liegt ein Drittel über dem deutschlandweiten Durchschnitt von 950 kWh pro kW_p. Dies ist zum einen auf die hohe Sonneneinstrahlung in der Region, zum anderen auf die Mehrerträge durch die bifazialen PV-Module zurückzuführen. Der erzeugte Stromertrag passt in seinem täglichen Verlauf gut zu den Lastverläufen auf dem Hof. So wurden etwa 40 Prozent des erzeugten Solarstroms in der Hofgemeinschaft direkt genutzt, unter anderem für das Betanken eines Elektrofahrzeugs und die Verarbeitung der landwirtschaftlichen Produkte. Im Sommer deckte die Agri-PV-Anlage fast die gesamte Tageslast. Durch die Installation eines Stromspeichers mit 150 kWh Kapazität konnte der Grad der Eigennutzung auf circa 70 Prozent gesteigert werden. Den überschüssigen Strom nimmt der Projektpartner Elektrizitätswerke Schönau ab.

Im Hitzesommer 2018 wurde das Ergebnis aus dem Vorjahr deutlich übertroffen. Die Teilverschattung unter den PV-Modulen steigerte die landwirtschaftlichen Ernteerträge, die hohe Sonneneinstrahlung erhöhte die Solarstromproduktion. Im Falle der Kartoffelversuche ergab sich so eine Steigerung der Landnutzungseffizienz um 86 Prozent. Die Pflanzen waren in der Lage, den fehlenden Regen im Sommer zu kompensieren,

das könnte auf die zusätzliche Verschattung durch die PV-Module zurückzuführen sein. Diese Beobachtung verdeutlicht das Potenzial der Agri-PV für aride Regionen. Weitere Versuche in entsprechenden Klimaregionen mit zusätzlichen Kulturen werden notwendig sein. Die solare Einstrahlung lag 2018 mit 1 319,7 kWh pro Quadratmeter um 8,4 Prozent über dem Vorjahreswert. Dies steigerte die Solarstromerzeugung im Erntejahr 2018 um zwei Prozent auf 249 857 kWh, was einem außergewöhnlich hohen spezifischen Ertrag von 1 285,3 kWh pro kW_p entsprach. Die Ergebnisse aus dem Pilotprojekt in Heggelbach deuten auf eine ertragsstabilisierende Wirkung von Agri-PV hin, da Kulturpflanzen insbesondere in Dürreperioden von der zusätzlichen Beschattung profitieren^[5]. In Kapitel 3.1 werden die landwirtschaftlichen Versuchsergebnisse näher erläutert. Das Projekt »APV-RESOLA« wurde im Jahr 2021 erfolgreich abgeschlossen.

Technische Daten:

- Grundfläche: 3400 m²
- PV-Module: bifaziale Doppelglas-PV-Module, 270 W_p (720 PV-Module)
- Installierte Leistung: 194,4 kW_p
- Nutzung: Eigenverbrauch, Netzeinspeisung

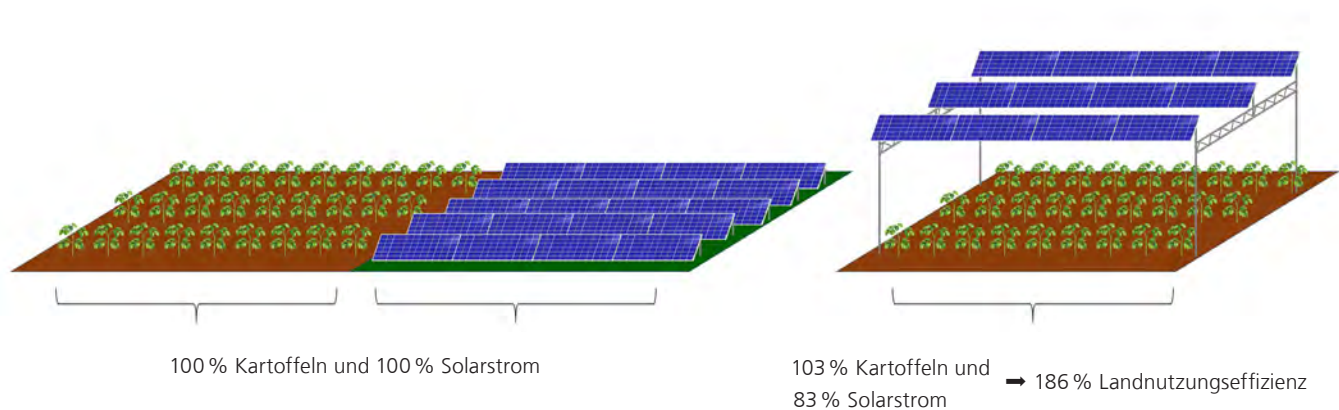


Abb. 15: Durch die kombinierte Flächennutzung betrug die Flächennutzungseffizienz mit Agri-PV im Kartoffelanbau auf dem Testgelände in Heggelbach bis zu 186 Prozent

© Fraunhofer ISE

Gelsdorf 2021

Im Rahmen des Projekts »APV-Obstbau« wurde am Bio-Obst-hof Nachtwey in Gelsdorf im rheinland-pfälzischen Land-kreis Ahrweiler im Frühjahr 2021 eine Forschungsanlage mit 258 kW_p Leistung installiert. Die Agri-PV-Obstbauanlage wird insbesondere hinsichtlich des Lichtmanagements, des Anla-gendesigns, der Landschaftsästhetik, ihrer Wirtschaftlichkeit, ihrer Sozialverträglichkeit und pflanzenbaulicher Parameter untersucht.

Dabei werden vier Versuchsvarianten herangezogen: (1) Kontrollvariante mit betriebsüblichen Hagelschutznetzen, (2) Agri-PV-Anlage, (3) Agri-PV-Anlage mit reduziertem Pflanzen-schutzmitteleinsatz und (4) Folienüberdachung. Der Projekt-teil zur gesellschaftlichen Akzeptanz und Sozialverträglichkeit beschäftigt sich mit verschiedenen möglichen Konflikten (Landnutzung, Verteilung, Prozessgerechtigkeit) innerhalb verschiedener Akteurskonstellationen.

Technische Daten:

- Grundfläche: 3552 m²
- Nachführung: 3 Reihen, einachsrig
- PV-Module: semitransparente Doppelglas-PV-Module, 225 W_p (1148 PV-Module)
- Installierte Leistung: 258 kW_p
- Nutzung: Eigenverbrauch, Netzeinspeisung



Abb. 16: Agri-PV-Anlage auf dem Bio-Obst-hof Nachtwey (2021, 2023) © Fraunhofer ISE

Alt-Morschenich 2021

Die Agri-PV-Anlage wurde im Rahmen des Projekts »Agri-FEe« (ehemalig »APV 2.0«) installiert. Innerhalb dieser Anlage werden verschiedene Ansätze realisiert, wie bifaziale Tracking- und Non-Tracking-Module und verschiedene Aus-richtungen (nach Süden bzw. Ost-Westen). Dadurch können die verschiedenen Auswirkungen auf Wachstum und Ertrag der angebauten Nutzpflanzen untersucht werden. Angebaut werden insbesondere Wertstoffpflanzen, Obst und Gemüse. Zudem werden neuartige Nachführungsalgorithmen mit einer kombinierten Lichtsimulation für PV und Pflanzenentwicklung und ein intelligentes Bewässerungssystem erforscht. Neben den agrarwissenschaftlichen, technischen und techno-ökono-mischen Überlegungen werden auch Fragen zur gesellschaft-lichen Akzeptanz untersucht.

Technische Daten:

- Grundfläche: 3766 m²
- Ost-West Nachführung bei Teilanlagen, Forschungs-algorithmen; statisch bei zwei Teilanlagen
- PV-Module: bifaziale PV-Module, 370 W_p (810 PV-Module)
- Installierte Leistung: 300 kW_p
- Nutzung: Phänotypisierungsroboter, Bewässerungsanlage, Zwischenspeicherung in Batterien

Bavendorf 2022

In der Anlage in Bavendorf untersucht das Kompetenzzentrum Obstbau Bodensee zusammen mit dem Fraunhofer ISE anhand vier verschiedener Apfelsorten den Einfluss einer Agri-PV-Anlage im biologischen Anbau. Die Anlage besteht aus einem statischen und einem nachgeführten Teil, sowie einer Referenzfläche. Untersucht wird, inwieweit die Veränderung des Mikroklimas unter den PV-Modulen den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln verringern könnte.

Technische Daten:

- Grundfläche: 5000 m²
- Einachsige Nachführung mit Ost-West-Ausrichtung (Teilanlage Mitte), fixe Aufständerung (Teilanlage Nord)
- PV-Module: semitransparente Doppelglas-PV-Module, 300 W_p (756 PV-Module)
- Installierte Leistung: 227 kW_p
- Nutzung: 100 Prozent Netzeinspeisung

Dresden-Pillnitz 2022

Die Hochschule für Technik und Wirtschaft hat im Jahr 2022 am Standort Dresden-Pillnitz eine Agri-PV-Anlage mit senkrecht stehenden Modulen mit Hilfe von Fördergeldern des Freistaates Sachsen errichtet. Die Anlage dient der Forschung und der Ausbildung von Studierenden. Dabei stehen Untersuchungen aus dem Bereich der landwirtschaftlichen Erzeugung und des Umweltbereiches im Vordergrund. Behandelte Themen sind z. B. Einflussgrößen auf die Pflanzenenerträge, Mikroklima in der Anlage, Bodenwasser und Verdunstung, Insektenschutz oder die Weiterentwicklung der Landtechnik für den Einsatz in Agri-PV-Anlagen.

Technische Daten:

- Grundfläche: 4500 m²
- PV-Module: bifaziale Doppelglas-PV-Module, 430 W_p (320 PV-Module)
- Installierte Leistung: 134,4 kW_p
- Nutzung: elektrisch angetriebene (autonome) Fahrzeuge, Maschinen und Geräte, Netzeinspeisung

Tuniberg 2023, Blankenhornsberg 2023 und Geisenheim 2023

Der Klimawandel macht sich auch in der Sonderkultur Wein bemerkbar und sorgt für Ernteverluste durch z. B. Hitzeschäden, Starkregen, Hagel und Spätfrost. Die direkt über den Weinreben installierten PV-Anlagen (auch bekannt als Viti-PV) an den Standorten Tuniberg, Blankenhornsberg und Geisenheim sollen die Reben schützen, die Traubenreife verzögern und allgemein für ein gleichmäßigeres Klima sorgen, so dass Ernteverluste verhindert werden. Nicht nur die Pflanzen, sondern auch die einzelnen PV-Module profitieren von der Synergie, da diese durch die hohe Aufstellung und Wasserverdunstung (Transpiration) der Pflanzen gekühlt werden. Die Kombination aus gleichmäßigeren Traubenerträgen und zusätzlichem Einkommen durch den Stromverkauf bietet dem Landwirt eine größere finanzielle Sicherheit auch in Zeiten von zunehmenden Extremwetterereignissen.

Technische Daten Tuniberg:

- Grundfläche: 5000 m²
- PV-Module: semitransparente PV-Module, 220 W_p (1577 PV-Module)
- Installierte Leistung: 300 kW_p
- Nutzung: 100 Prozent Netzeinspeisung

Technische Daten Blankenhornsberg 2023:

- Grundfläche: 1400 m²
- Einachsige Nachführung (Reihenverlauf Ost-West) einer Teilanlage
- PV-Module: semitransparente Doppelglas-PV-Module, 550 W_p (78 PV-Module), 415 W_p (200 PV-Module), 300 W_p (474 PV-Module)
- Installierte Leistung: 268 kW_p
- Nutzung: 100 Prozent Netzeinspeisung

Technische Daten Geisenheim 2023:

- Grundfläche: 1650 m²
- Einachsige Nachführung mit Ost-West-Ausrichtung
- PV-Module: semitransparente Doppelglas-PV-Module, 170 W_p (550 PV-Module)
- Installierte Leistung: 94 kW_p
- Nutzung: vorwiegend Eigenverbrauch, Netzeinspeisung



Abb. 17: Agri-PV-Anlage in Blankenhornsberg 2023
© Jona Pillatzke, WBI



Abb. 18: Agri-PV-Anlage in Geisenheim
© HS Geisenheim

Heuchlingen 2023

Die Agri-PV-Anlage wurde im Obstversuchsgut der Staatlichen Lehr- und Versuchsanstalt für Wein- und Obstbau in Heuchlingen errichtet. Sie soll Strauch- und Erdbeeren überdachen und durch ihr geschlossenes Design das Mikroklima positiv beeinflussen. Mithilfe der Dachstruktur mit Drainagesystem kann ganzjährig Regenwasser gesammelt, gespeichert und zur Bewässerung verwendet werden. Ein zirkulierendes Wassermanagement soll zudem die Versickerung von Nitraten verhindern.

Technische Daten:

- Grundfläche: 2000 m²
- PV-Module: semitransparente Doppelglas-PV-Module, 200 W_p (384 PV-Module)
- Installierte Leistung: 113 kW_p
- Nutzung: teilweiser Eigenverbrauch



Abb. 19: Erste Agri-PV-Anlage im Obstversuchsgut
© Tobias Gabler, LVWO Weinsberg

Heuchlingen 2024

Ziel der zweiten Agri-PV-Anlage im Obstbauversuchsgut der LVWO Weinsberg war es, ein Konzept zu entwickeln, das den Herausforderungen des Süßkirschenanbaus gerecht wird. Daher wurde bei der Planung dieser Anlage besonderes Augenmerk auf die regendichte Dachfläche über den Bäumen gelegt, um Ertragsseinbußen durch Regenereignisse zu vermeiden. Das System ist außerdem mit einem dauerhaft installierten feinmaschigem Netz zur Bekämpfung der Kirschessigfliege ausgestattet. Da Vogelfraß ebenfalls ein großes Risiko für die Qualität der Früchte darstellt, besteht die Möglichkeit, die Anlage temporär einzunetzen. Nach der Ernte kann das Netz entfernt werden, wie es auch in konventionellen Anbausystemen üblich ist.

Im Projekt untersucht die LVWO Weinsberg, wie sich die Beschattung durch die PV-Module auf die Fruchtqualität, das Mikroklima sowie den Befall mit Krankheiten und Schädlingen auswirkt. Zusätzlich sollen die Vor- und Nachteile von Agri-PV-Systemen im Vergleich zu Folienüberdachungssystemen aus pflanzenbaulicher und arbeitswirtschaftlicher Sicht beleuchtet werden. Darüber hinaus werden pflanzenbauliche Maßnahmen, wie die Erziehung der Sträucher am Spalier, auf ihre Eignung für den Anbau unter PV-Modulen überprüft

Technische Daten:

- Grundfläche: 2000 m²
- PV-Module: Typ 1: bifaziale, Doppelglas-PV-Module, 455 W_p (112 PV-Module), Typ 2: bifaziale, semitransparente Doppelglas-PV-Module, 250 W_p (476 PV-Module), Typ 3: bifaziale, semitransparente Doppelglas-PV-Module, 115 W_p (476 PV-Module)
- Installierte Leistung: 225 kW_p
- Nutzung: Netzeinspeisung



Abb. 20: Zweite Agri-PV-Forschungsanlage des LVWO
© Thorsten Espey, LVWO Weinsberg

Augustenberg 2024

Am LTZ Augustenberg werden sechs verschiedene schorfr robuste Apfelsorten (»Natyra«, »Bonita«, »Freya«, »Swing«, »Topaz« und »Rubelit«) sowie zwei Birnensorten (»Conference« und »Novembra«) unter zwei unterschiedlichen hoch aufgeständerten PV-Anlagen ökologisch bewirtschaftet. Ziel des Teilprojekts ist es, die Auswirkungen der verschiedenen PV-Modultypen (semitransparent und bifazial) sowie der PV-Systeme (statisch und nachgeführt) im Vergleich zu Anbauflächen mit herkömmlichen Hagelschutznetzen (Referenzflächen) zu untersuchen. Eine Besonderheit dieser Systeme ist die vollständige Einnetzung, die Schutz vor einfliegenden Schadinsekten bietet. Die im Oberrheingraben vorkommenden wärmeliebenden Arten und invasiven Schaderreger (insbesondere die marmorierte Baumwanze) können zu erheblichen Ertragseinbußen führen. Für diese Einnetzung wurden Materialien mit möglichst großem Albedo gewählt. So können die Rückseitenzugewinne der PV-Anlagen optimiert werden, während der Pflanze genügend Licht zur Verfügung gestellt wird.

Technische Daten:

- Grundfläche: 10 000 m²
- Einachsige Nachführung mit Ost-West-Ausrichtung (Typ 1) und fixe Ost-West-Festinstallation (Typ 2)
- PV-Module: Typ 1: nachgeführte, bifaziale PV-Module (274 W_p), Typ 2: statische, semitransparenten PV-Module (216 W_p), insgesamt 1400 PV-Module
- Installierte Leistung: 490 kW_p
- Nutzung: überwiegend Eigenverbrauch



Abb. 21: Agri-PV Forschungsanlage in Augustenberg
© Constanze Mesca, LTZ Augustenberg

Meßkirch-Rengetsweiler 2023

Trockenheit und sandige Böden erschweren die Wiederaufforstung, besonders für junge Bäume. Um diese Bedingungen zu verbessern, hat die Emil Steidle GmbH & Co. KG bei Meßkirch eine demontierbare PV-Anlage über einer Aufforstungsfläche installiert – mit konzeptioneller Unterstützung des Fraunhofer ISE. Die Anlage verschattet den Boden um ca. 40 % und schafft so ähnliche Bedingungen wie unter einem geschlossenen Waldschirm. Der erzeugte Strom wird direkt vor Ort genutzt. Sobald die Bäume stabil genug sind, kann die Konstruktion versetzt werden.

Die Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg begleitet das Projekt wissenschaftlich. Es ist Teil der »Modellregion Agri-PV BW« und wird vom Ministerium für Ernährung, Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg gefördert.

Technische Daten:

- Grundfläche: 3500 m²
- PV-Module: Typ 1: opake PV-Module, 405 W_p (180 PV-Module), Typ 2: bifaziale Doppelglas-PV-Module, 405 W_p (180 PV-Module)
- Installierte Leistung: 146 kW_p
- Nutzung: Eigenverbrauch an Wochentagen, Netzeinspeisung am Wochenende



Abb. 22: Hochaufgeständerte Agri-PV-Anlage über einer Wiederaufforstungsfläche

© Emil Steidle GmbH & Co. KG

Neuhub – Hofgut Wimmer 2023

Im Rahmen des Projekts »HoPVen« ging im April 2023 in Neuhub in der Hallertau auf dem Hofgut Wimmer eine der ersten Agri-PV-Anlagen im Hopfenbau ans Netz. An dem Projekt beteiligt sind das Fraunhofer ISE, das u.a. für ökonomische Analysen und das Monitoring verantwortlich ist, das Hofgut Wimmer, auf dem die Anlage errichtet wurde, die AgrarEnergie GmbH & Co. KG, die die Anlage betreibt sowie die Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, die die pflanzenbaulichen Analysen vornimmt.

Die veränderten klimatischen Bedingungen, wie Hitzestress und Wasserknappheit, führten in den vergangenen Jahren teilweise zu erheblichen Ertragseinbußen im Hopfenbau. Ziel des Projekts ist es daher, zu erforschen, inwiefern die Agri-PV zur Steigerung der Resilienz des Hopfenbau gegenüber den Folgen der Klimakrise beitragen kann. Darüber hinaus wird eine potentielle Einkommensdiversifizierung für die Hopfenbetriebe mit Agri-PV und eine mögliche Reduktion des Pflanzenschutzmitteleinsatzes erforscht.

Auf der 1,3 ha großen Fläche wurden nach Süden ausgerichtete Module mit zwei verschiedenen Größen angebracht, die einen Verschattungsgrad von 28 Prozent bzw. 37 Prozent nach sich ziehen. Parameter der pflanzenbaulichen Untersuchung sind dabei der Hopfenertrag, die Hopfenqualität, die sich maßgeblich nach dem Gehalt der Alpha-Säure richtet, Schädlinge sowie Krankheitsbefall. In der Forschungsanlage wachsen die Hopfensorten Herkules sowie Hallertauer Tradition.



Die Module sind 7 m über dem Hopfengarten angebracht. Da der Hopfen eine Kletterpflanze ist und an Drähten hochwächst, sind im Hopfenbau Gerüstanlagen notwendig, die für die Befestigung der Module ebenfalls verwendet werden können. Aufgrund von statischen Erfordernissen wird dennoch die Errichtung einer neuen Gerüstanlage erforderlich, für die knapp die doppelte Anzahl an Eisenmasten im Vergleich zu herkömmlichen Anlagen verbaut wurde. Da der Hopfen eine Reihenkultur ist, die typischerweise einen Reihenabstand von 3,2 m hat, ist die maschinelle Bewirtschaftung der Fläche durch die Anlage kaum beeinträchtigt. Inwiefern die Module durch die Ausbringung von Pflanzenschutzmitteln verschmutzt werden (woraus Einbußen im Stromertrag resultieren können) und Anpassungen in der Bewirtschaftung notwendig werden, ist Bestandteil der Untersuchung.

Die pflanzenbauliche Untersuchung ergab in den ersten beiden Ertragsjahren Ertragsverluste von 15–20 Prozent. Zudem deuten die Ergebnisse an, dass vom höheren Verschattungsgrad in Zukunft abgesehen werden sollte, um die Anforderung der DIN SPEC 91434 des maximal erlaubten Ertragsverlusts von 34 Prozent sicherzustellen. Aus ökonomischer Perspektive zeigen erste Forschungsergebnisse, dass der Betrieb der Anlage rentabel ist.

Aus dem Betrieb der Anlage leiten sich Erkenntnisse ab, die für das Systemdesign der sich gerade im Bau befindlichen Anlage bereits genutzt werden: Die Neigung der Module wird auf 45° anstatt 20° wie bislang betragen, was zu einer Optimierung des Stromertragsprofils führen wird und eine verbesserte Lichtverteilung für den Hopfen ermöglichen soll. Zudem wird die Ausrichtung der PV-Module bei der geplanten Anlage parallel zu den Hopfenreihen sein, anstatt wie bislang orthogonal.

Technische Daten:

- Grundfläche: 12 600 m²
- PV-Module: Monofaziale PV-Module, 410 W_p und 550 W_p
- Installierte Leistung: 978 kW_p
- Nutzung: 100 Prozent Netzeinspeisung

Abb. 23: Agri-PV-Anlage mit den Hopfensorten Herkules und Hallertauer Tradition.

© Deutscher Werkbund Bayern e.V.

2.5 Praxisanlagen in Deutschland

Neben den folgenden Praxisanlagenbeschreibungen gibt es weitere realisierte oder sich aktuell in Planung befindende Agri-PV-Anlagen in Deutschland.

Tab. 04: Überblick über aufgeführte und einige weitere Praxisanlagen in Deutschland

Standort	Art der landwirtschaftlichen Nutzung	Technologie	Installierte Leistung	Jahr der Inbetriebnahme
Warmfried, Bayern	Ackerbau, Gemüseanbau, Nutztierhaltung	Fix ausgerichtete PV-Modultische	70 kW _p	2008
Eppelborn-Dirmingen, Saarland	Futtermittel	Vertikale PV-Module	2000 kW _p	2018
Büren-Steinbach, Nordrhein-Westfalen	Beerensträucher, Obstbau	Nachgeführte PV-Module	740 kW _p	2020
Aasen, Donaueschingen, Baden-Württemberg	Futtermittel, Ackerbau	Vertikale PV-Mode	4100 kW _p	2020
Althegnenberg, Bayern	Mais, Hafer, Dinkel, Klee	Einachsig, nachgeführte PV-Module	1890 kW _p	2020
Lüptitz, Sachsen	Nutztierhaltung, Gemüseanbau	Einachsig, nachgeführte PV-Module	1045 kW _p	2021
Kressbronn am Bodensee, Baden-Württemberg	Obstbau	Fix ausgerichtete PV-Module	239 kW _p	2022
Merzig-Wellingen, Saarland	Ackerbau	Vertikale PV-Module	5200 kW _p	2023
Oberkirch-Nußbach	Obstbau	Fix ausgerichtete und nachgeführte PV-Module	100 und 780 kW _p	2022 und 2023
Walldürn-Neusaß	Grünland und niedrig wachsende Feldfrüchte	Vertikale PV-Module	2974 kW _p	2024
Schöntal	Hühnerhaltung	Fix ausgerichtete PV-Module	1220 kW _p	2023
Uttenweiler	Hühnerhaltung	Fix ausgerichtete PV-Module	1060 kW _p	2024

Abb. 24: Modulreihe mit bifazialen Modulen der Agri-PV-Anlage in Heggelbach
© Fraunhofer ISE



Büren-Steinbach 2020

In Büren (Nordrhein-Westfalen) haben die beiden Landwirte Fabian Karthaus und Josef Kneer im Jahr 2019 mit dem Bau einer Agri-PV-Praxisanlage auf Ihrem Bio-Beerenobstbetrieb begonnen. Für die Anlage wurde ein Bauantrag als Gewächshaus für Sonderkulturen gestellt, welcher als privilegiertes Vorhaben nach §35 BauGB genehmigt wurde.

Die Unterkonstruktion wurde in der sogenannten »Venlo«-Bauweise ausgeführt und besteht aus insgesamt zwanzig Satteldächern. Die Konstruktion besteht aus Stahl- und Aluminiumprofilen. Die Unterkonstruktion ist mit einer Rammfundamentierung im Boden verankert. Das Rastermaß der Anlage (3,5 m x 4,2 m) und die lichte Durchfahrthöhe von 3,2 Meter ermöglichen eine Bewirtschaftung mit standardisierten landwirtschaftlichen Gerätschaften. Das eigentliche Dach der Anlage bilden bifaziale PV-Module, die einerseits Strom produzieren und andererseits die Wetter- und Sonnenschutzfunktion für die darunter angebauten Sonderkulturen übernehmen. Die Verkabelung verläuft ausschließlich in der Dachkonstruktion, um die reibungslose Bearbeitung des Bodens unter den PV-Modulen zu gewährleisten.

Unter der Anlage werden Heidelbeeren, Himbeeren und Äpfel als Dammkultur am Ständerwerk angelegt. Dabei überdeckt jedes Dachschiff der Konstruktion einen Pflanzdamm. Die Wasserversorgung der Dämme wird über eine sensorgestützte Tröpfchenbewässerung geregelt. Die Bewässerung berücksichtigt die tagesaktuelle Temperatur, Wind, Sonnenintensität sowie vorhergesagte Regenmengen. Zwischen den jeweiligen Dämmen befindet sich die Abtropfkante eines jeweiligen Dachschiffes. Das Regenwasser versickert in der Anlage, wird mit Drainagen aufgefangen und aufbereitet.

Hinsichtlich der Ernteerträge haben die Heidelbeeren nach Aussage der Landwirte in den ersten Jahren mit starken Erträgen überzeugt. Bei der Erdbeerernte wurden leichte Ertragseinbußen im ersten Jahr festgestellt. Für die Apfel- und Weinkulturen liegen noch keine Ernteergebnisse vor.

Technische Daten:

- Grundfläche: 4200 m²
- PV-Module: bifaziale PV-Module, Sonderfabrikation, 320 W_p (2320 PV-Module)
- Installierte Leistung: 740 kW_p
- Nutzung: 50 Prozent Eigenverbrauch / 50 Prozent Netzeinspeisung

Bürgersolarpark Aasen, Donaueschingen 2020

Bei Aasen, nördlich von Donaueschingen, baute die Firma Next2Sun, in Zusammenarbeit mit der Solverde Bürgerkraftwerke Energiegenossenschaft eG als Betreiber, eine vertikale Agri-PV-Anlage mit einer Leistung von circa 4,1 MW_p. Die Anlage kann bilanziell 1400 Haushalte mit Strom versorgen ^[15]. Das ehemalige Ackerland wurde im Zuge des Projekts in extensiv bewirtschaftetes Grünland umgewandelt. Die Modulreihen haben einen minimalen Gesamtanteil der Grundfläche bei einem Reihenabstand von zehn Metern, sodass eine landwirtschaftliche Nutzung zwischen den Modulreihen möglich ist.

Technische Daten:

- Grundfläche: 140 000 m²
- PV-Module: bifaziale Doppelglas-PV-Module, 370–380 W_p (10 960 PV-Module)
- Installierte Leistung: 4100 kW_p
- Nutzung: 100 Prozent Netzeinspeisung



Abb. 25: Vertikale Agri-PV in Aasen, Donaueschingen
© Solverde Bürgerkraftwerke

Bürgersolarpark Lüptitz 2021

Die Solverde Bürgerkraftwerke Energiegenossenschaft eG betreibt in Lüptitz bei Leipzig ein weiteres Agri-PV-System. Hierfür wurde eine bestehende PV-FFA rückgebaut und durch eine leistungsstärkere und modernere bodennahe Agri-PV-Anlage ersetzt. Trotz der Kosten für den Abriss der ersten PV-Anlage ist laut Angaben der Betreiber das »Repowering-Lüptitz« Projekt wirtschaftlich profitabel. Die Anlage wurde auf einem Gewerbegebiet gebaut und im Juni 2021 in Betrieb genommen.

Technische Daten:

- Grundfläche: 16 500 m²
- PV-Module: bifaziale PV-Module, 415 W_p (2520 PV-Module)
- Installierte Leistung: 1045,80 kW_p
- Nutzung: 100 Prozent Netzeinspeisung

Kressbronn 2022

Die Agri-PV-Anlage in Kressbronn am Bodensee ist die erste Agri-PV-Anlage, die im Rahmen des Projekts »Modellregion Agri-PV BW« errichtet, eingeweiht und ans Netz angeschlossen wurde. Sie ist zugleich deutschlandweit die erste stromproduzierende Anlage im Apfelbau, die in eine Vollertragsplantage (Obsthof Bernhard) integriert wurde. Die Anlage verfügt über eine variierende Beschattung von Modulen mit zwei Transparenzgraden (51 und 40 Prozent), deren Effekte auf die Ökophysiologie der Äpfel ebenso untersucht werden soll, wie mögliche Auswirkungen von Pflanzenschutzmitteln auf die PV-Module.

Technische Daten:

- Grundfläche: 4000 m²
- PV-Module: Typ 1: semitransparente Doppelglas-PV-Module, 170 W_p (552 PV-Module); Typ 2: semitransparente Doppelglas-PV-Module, 260 W_p (469 PV-Module)
- Installierte Leistung: 239 kW_p
- Nutzung: 100 Prozent Netzeinspeisung

Merzig-Wellingen 2023

Die vertikale Agri-PV-Anlage in Merzig-Wellingen besteht neben einer Praxisanlage auch aus einer Forschungsfläche, die im Fokus der beiden Forschungsprojekte »VAckerPower« und »VAckerBio« liegt. Die gesamte Fläche wird ackerbaulich genutzt. Ziel der Untersuchungen ist eine umfassende Analyse technischer und agrarwissenschaftlicher Aspekte. So wird die ackerbauliche Nutzung der Forschungsfläche durch die Nutzung der Pflegestreifen unter den PV-Modulen für Biodiversitäts-Maßnahmen ergänzt und die Leistungsfähigkeit analysiert.

Technische Daten:

- Grundfläche: 140 000 m², davon 17 000 m² Forschungsfläche
- PV-Module: bifaziale PV-Module 420–460 W_p
- Installierte Leistung: 5200 kW_p, davon 500 kW_p auf der Forschungsfläche
- Nutzung: 100 Prozent Netzeinspeisung

Oberkirch-Nußbach 2022 und 2023

Am Obsthof Vollmer im Ortenaukreis wurden im Rahmen des Projekts »Modellregion Agri-PV BW« zwei Praxisanlagen installiert, um die Auswirkungen von Agri-PV bei Spalier- und Beerenobst zu untersuchen. Landwirt und Ingenieur Hansjörg Vollmer, überzeugt von den Synergieeffekten der Agri-PV seit über 30 Jahren, musste viele rechtliche und technische Hürden überwinden, bevor die ersten Pfosten eingerammt werden konnten. Gemeinsam mit seinem Sohn Christoph, Geschäftsführer der EPC Intech, errichtete er drei Systeme: ein hydraulisch angetriebenes Nachführsystem und eine Festinstallation mit opaken PV-Modulen sowie ein 0,2 ha großes aufgeständertes System mit semitransparenten PV-Modulen. Diese innovativen Anlagen wurden überwiegend mit Eigen- aber auch Fördermitteln des Umweltministeriums Baden-Württemberg finanziert.



Abb. 26: Agri-PV-Anlage auf dem Obsthof Vollmer
©Emil Steidle GmbH & Co. KG

Derzeit arbeitet das Fraunhofer ISE an einem Nachführungsalgorithmus. Dieser soll es ermöglichen, dass sich ein Teil der nachgeführten Anlage automatisch an den Licht- und Schutzbedarf der Pflanzen anpasst. Ein anderer Teil wird auf eine höhere Stromproduktion optimiert. Die Effekte dieser variablen Verschattung untersucht das Landwirtschaftliche Technologiezentrum Augustenberg die Eignung verschiedener Obstkulturen (Apfel, Zwetschge, Birne, Kiwi und Brombeere) und -sorten für Agri-PV, indem Parameter wie Fruchtqualität, Fruchttertrag und Pflanzenwachstum ausgewertet werden. Einen besonderen Fokus legen die WissenschaftlerInnen auf Ausfärbung, Größe und Inhaltsstoffe der Früchte sowie auf Schattenvermeidungsstrategien der Pflanzen als Reaktion auf veränderte Lichtverhältnisse.

Technische Daten:

- Grundfläche: 10 500 m²
- In Anlagentyp 1 eine Festinstallation, in Anlagentyp 2 Festinstallation und ein nachgeführtes System für Spalierobst.
- PV-Module: Typ 1: statische, semitransparente PV-Module, Typ 2: opake PV-Module
- Installierte Leistung: 880 kW_p
(Typ 1: 100 kW_p, Typ 2: 780 kW_p)
- Nutzung: 100 Prozent Netzeinspeisung (PPA)

Walldürn-Neusaß 2024

Im Januar 2023 gründeten die Stadtwerke Buchen und die Stadtwerke Walldürn zusammen mit zwei Landwirtschaftsfamilien im baden-württembergischen Neckar-Odenwald-Kreis das Gemeinschaftsunternehmen Energiepark Neusaß II GmbH. Gemeinsam pflanzen sie den Bau einer vertikalen Agri-PV-Anlage (Neusaß II) in Ost-West-Ausrichtung, in der Nähe eines bestehenden Solarparks (Neusaß I). Mitte 2023 wurde die endgültige Baugenehmigung erteilt, Anfang 2025 ging die Anlage in Betrieb. Es wird erwartet, dass ca. 3 Mio. kWh über einen Zeitraum von zunächst 10 Jahren lokal über ein Green Power Purchase Agreement (PPA) ohne EEG-Vergütung abgenommen werden. Zwischen den neun Meter breiten Reihen erfolgt der Anbau niedrigwüchsiger Feldfrüchte, während die Wiesenflächen nach wie vor zur Futterproduktion durch Mahd genutzt werden. Das Vorhaben ist Teil des Forschungsprojekts »Modellregion Agri-PV BW«.

Technische Daten:

- Grundfläche: 88 000 m²
- PV-Module: vertikale, bifaziale PV-Module, 465 W_p (6396 PV-Module)
- Installierte Leistung: 2974 kW_p
- Nutzung: 100 Prozent Netzeinspeisung

Schöntal 2023 und Uttenweiler 2024

Seit November 2023 erlaubt die EU die Kombination von Freiland-Legehennenhaltung und Solarstromerzeugung, sofern die Tierschutzbestimmungen der Richtlinie 1999/74/EG eingehalten werden und die Bewegungsfreiheit der Tiere nicht eingeschränkt wird (Anhang II der Delegierten Verordnung (EU) 2023/2465). Diese Doppelnutzung bietet Hühnerhaltern mehrere Vorteile: Die PV-Module schützen die Tiere vor Witterungseinflüssen und Greifvögeln, während gleichzeitig zusätzliche Einnahmen durch Stromerzeugung generiert werden.

Allerdings bestehen noch offene Fragen bezüglich des Auslaufverhaltens der Hühner, ihrer Verteilung unter der PV-Anlage und den Auswirkungen auf die Grasnarbe. Im Rahmen des Projekts »Modellregion Agri-PV BW« (Teilprojekt »Kombination PV + Freilandhaltung Legehennen«) untersucht die Hochschule für Wirtschaft und Umwelt Nürtingen-Geislingen diese und weitere Aspekte in zwei Praxisbetrieben. Ziel ist es, basierend auf den Beobachtungen Empfehlungen für zukünftige Praxisbetriebe und rechtliche Vorgaben zu entwickeln.

Technische Daten Schöntal 2023:

- Grundfläche: 10 000 m²
- PV-Module: bifaziale PV-Module, 565 W_p (2160 PV-Module)
- Installierte Leistung: 1220 kW_p
- Nutzung: 100 Prozent Netzeinspeisung

Technische Daten Uttenweiler 2024:

- Grundfläche: 23 000 m²
- PV-Module: opake PV-Module, 550 W_p (1928 PV-Module)
- Installierte Leistung: 1060 kW_p
- Nutzung: 100 Prozent Netzeinspeisung



Abb. 27: Agri-PV mit Hühnerhaltung

©Alexa Aldana Torres Boggio, Fraunhofer ISE

2.6 Forschungsprojekte in Deutschland

Tab. 05: Überblick über einige Forschungsprojekte in Deutschland

Projekt	Laufzeit	Auftraggeber	Projektpartner	Weitere Informationen
APV-Obstbau	01.04.2020 – 01.03.2025	BMEL* ¹ , MKUEM* ²	Bio-Obsthof Nachtwey, BayWa r.e. Solar Projects GmbH, DLR-RLP* ¹¹ , EWS* ¹² , Vertriebs GmbH, AGCO GmbH* ¹³ , Fraunhofer ISE	 https://ise.link/apv-obstbau-de
Agri4Power	01.05.2020 – 30.06.2021	BMWK* ³	Fraunhofer IMW* ¹⁴ , DBFZ* ¹⁵ , Stiftung Kulturlandschaft Sachsen-Anhalt, UFZ* ¹⁶	 www.energiesystem-forschung.de/news/energiewende-gesellschaft-projekt-biwibi-agri4power
Landgewinn	01.09.2021 – 31.08.2024	BMWK, Projektträger Jülich	Hochschule Offenburg, Fraunhofer ISE, KIAF* ¹⁷ , IÖW* ¹⁸	 https://fyi-landgewinn.de/
AgriFEe	01.01.2022 – 31.12.2026	BMBF* ⁴	Forschungszentrum Jülich, Fraunhofer ISE	 www.biooekonomierevier.de/Innovationslabor_APV_2_0
Modellregion Agri-PV BW I	01.01.2022 – 01.11.2024	MLR* ⁵ , UM BW* ⁶	Hochschule Kehl, LVWO* ¹⁹ , LTZ* ²⁰ , KOB* ²¹ , Obsthof Bernhard, RWB* ²² , Obsthof Vollmer, Fraunhofer ISE	 https://agripv-bw.de/
SynAgri-PV	01.07.2022 – 01.06.2025	BMBF* ⁴	ZALF* ²³ , Universität Hohenheim, Elysium Solar GmbH, BBH PartGmbH* ²⁴ , Stiftung Umwelt-energierecht, Bosch und Partner GmbH, Fabian Karthaus, Hofgemeinschaft Heggelbach, Fraunhofer ISE	 https://s.fhg.de/synagri-pv-de
VAckerPower	01.11.2022 – 01.10.2025	BMWK	Next2Sun Technology GmbH, Fraunhofer ISE	 https://ise.link/vackerpower
VAckerBio	01.10.2022 – 01.09.2023	DBU* ⁷	Universität Hohenheim, Next2Sun Technology GmbH, Fraunhofer ISE	 https://ise.link/vackerbio
VitiVoltaic	01.07.2020 – 30.06.2025	EFRE* ⁸ , EFRE-REACT* ⁹ , HMUKLV* ¹⁰	Hochschule Geisenheim	 www.hs-geisenheim.de/agri-photovoltaik/?L=0
VitiCult-PVmobil	01.01.2023 – 01.12.2025	BMBF	sbp sonne GmbH* ²⁵ , Hochschule Geisenheim, Fraunhofer ISE	 https://ise.link/viticult-pvmobil
Weinbau 4.0	15.05.2023 – 31.12.2027	MLR, EFRE	WFG* ²⁶ , ZG Raiffeisen eG, ZG Raiffeisen Technik GmbH, Intech GmbH & Co. KG, HEG* ²⁷ , Sick AG, WBI* ²⁸ , KIAF, Fraunhofer ISE, BürgerenergieKaiserstuhl, u. a.	 https://www.wfg-landkreis-emmendingen.de/de/projekte/weinbau-40/weinbau-40

*1 Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL)

*2 Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie und Mobilität des Landes Rheinland-Pfalz (MKUEM)

*3 Bundesministerium für Wirtschaft und Klima (BMKW)

*4 Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)

*5 Ministerium für Ernährung, Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg (MLR)

*6 Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (MU BW)

*7 Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU)

*8 Europäischer Fond für regionale Entwicklung (EFRE)

*9 Recovery Assistance for Cohesion and the Territories of Europe (REACT)

*10 Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (HMUKLV)

*11 Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum Rheinpfalz (DLR RLP)

*12 Elektrizitätswerke Schönau (EWS)

*13 Allie-Gleaner Cooperation (AGCO GmbH)

*14 Fraunhofer-Zentrum für Internationales Management und Wissensökonomie IMW

*15 Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH (DBFZ)

*16 Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH (UFZ)

*17 Kehler Institut für Angewandte Forschung (KIAF)

*18 Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW)

*19 Staatliche Lehr- und Versuchsanstalt für Wein- und Obstbau (LVWO)

*20 Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg (LTZ)

*21 Kompetenzzentrum Obstbau Bodensee (KOB)

*22 Regionalwerk Bodensee (RWB)

*23 Leibniz-Zentrums für Agrarlandschaftsforschung (ZALF)

*24 Becker Büttner Held Rechtsanwälte Wirtschaftsprüfer Steuerberater PartGmbH

*25 schlaich bergermann partner - sbp sonne GmbH

*26 Wirtschaftsförderung des Landkreises Emmendingen mbH (WFG)

*27 Heidelberger Energiegenossenschaft eG (HEG)

*28 Staatliches Weinbauinstitut Freiburg (WBI)

APV-Obstbau

Im Rahmen des Projekts »APV-Obstbau« untersucht das Fraunhofer ISE zusammen mit weiteren Forschungs- und Praxispartnern, inwieweit Agri-PV Schutzfunktionen von Hagelschutznetzen und Folien im Apfelanbau übernehmen kann, welches Anlagendesign sinnvoll ist und inwieweit sich die Anlage auf die Ernteerträge auswirkt.

Agri4Power

Am Fraunhofer IMW wurde in dem Projekt »Agri4Power« von 2020 bis 2021 untersucht, wie durch die Kombination aus senkrechten, bifazialen Solaranlagen mit Blühstreifen zum Artenschutz und paralleler landwirtschaftlicher Produktion nachhaltige Synergien entstehen können. Es wurden ökonomische und ökologische Aspekte sowie Fragen zur gesellschaftlichen Akzeptanz erforscht.^[14]

Landgewinn

Das dreijährige Verbundvorhaben »Landgewinn« erforscht mit einer energiesystemanalytischen Bewertung den Landwirtschaftssektor. Teil des Verbunds sind die Forschungsgruppen Energiesysteme und Energiewirtschaft sowie Photovoltaiktechnik und Pflanzenkohle des Instituts für nachhaltige Energiesysteme der Hochschule Offenburg, das Fraunhofer ISE, die Hochschule Kehl für Öffentliche Verwaltung und das Institut für ökologische Wirtschaftsforschung.

Im Forschungsprojekt wird eine fachlich übergreifende Analyse dreier Dekarbonisierungstechnologien erstellt, um eine Energiesystemanalyse durchführen zu können, die die Potenziale und Handlungsoptionen für die CO₂-Reduzierung in der Landwirtschaft darlegen soll. Neben der Pyrolyse zur Pflanzenkohleherstellung und der Dekarbonisierung der Landmaschinen, liegt der Fokus des Fraunhofer ISE auf der Untersuchung der Agri-PV-Technologie aus ökonomisch-ökologischer Perspektive. Die Hochschule Kehl untersucht zusätzlich die rechtlichen Rahmenbedingungen.

Die Motivation der Projektpartner besteht darin, die Energieversorgung und die Emissionen im Agrarsektor mittel- und langfristig mit den Energie- und Klimazielen in Einklang zu bringen. Viele landwirtschaftliche Betriebe und der Agrarsektor in Deutschland insgesamt, stehen zunehmend unter Druck, da sich seit Jahren die Emissionen und Energieverbräuche des Agrarsektors auf gleichem Niveau befinden. Eine integrierte Begutachtung der Sektoren Land- und Energiewirtschaft im Rahmen der Energiesystemanalyse soll neue Perspektiven für die Erreichung der Energie- und Klimaziele eröffnen. Einfließen werden dabei auch Technologien wie landwirtschaftliche Elektromobilität, Flexibilisierung der Stromnachfrage oder Agroforstsysteme.

AgriFEe

Im Projekt »Koppelung von Photovoltaik und Pflanzenproduktion« (»AgriFEe«, ehemals »APV 2.0«) wurden unter Federführung des Forschungszentrum Jülich gekoppelte Strahlungs- und Simulationsmodelle weiterentwickelt, die die gemeinsame Optimierung von PV- und Pflanzenproduktion ermöglichen. Zur Erfassung der Effekte auf die Nutzpflanzen wird ein an der PV-Unterkonstruktion angebrachtes Phänotypisierungssystem etabliert und eingesetzt, das das Erscheinungsbild von Pflanzen quantitativ analysiert und vermisst. Zusätzlich werden neuartige Nachführungsalgorithmen, Regenwasser-Auffangsysteme und intelligente Bewässerungsstrategien entwickelt. Die Forschungsanlage wurde im Dezember 2021 in Morsche-nich-Alt errichtet.

Modellregion Agri-PV Baden-Württemberg

Die erste Umsetzungsphase der »Modellregion Agri-Photovoltaik Baden-Württemberg« verfolgt das Ziel, den Ausbau der Agri-PV-Technologie in Baden-Württemberg voranzutreiben. In Zusammenarbeit mit 13 Projektpartnern, darunter das Fraunhofer ISE, soll der Forschungsschwerpunkt in der ersten Umsetzungsphase vor allem auf Kern- und Beerenobst liegen. An insgesamt fünf Standorten in Baden-Württemberg werden Agri-PV-Anlagen mit einer Gesamtleistung von bis zu 1700 kW_p errichtet. 2022 wurden bereits drei dieser Anlagen in Kressbronn, Bavendorf und Heuchlingen erfolgreich installiert. Um die Projekte zu vernetzen und Synergien zu nutzen, wurde ein Rahmenprogramm ins Leben gerufen, das gemeinsam von der Hochschule Kehl und dem Fraunhofer ISE geleitet wird. Das Programm befasst sich unter anderem mit Fragen zur Umsetzungsmöglichkeit an anderen Standorten, verschiedenen Forschungsschwerpunkten wie kulturspezifischer Anlagenauslegung und einer differenzierteren Konzeption des rechtlichen Rahmens. Die landwirtschaftlichen Untersuchungen werden vom Landwirtschaftlichen Technologiezentrum Augustenberg, dem Kompetenzzentrum Obstbau Bodensee und der Staatlichen Lehr- und Versuchsanstalt für Wein- und Obstbau durchgeführt. Das Projekt wird von den Landesministerien für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft sowie Ernährung, Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg gefördert.

Abb. 28: Agri-PV-Anlage
in Kressbronn (2022)
© Fraunhofer ISE



SynAgri-PV

Das Forschungsprojekt »Synergetische Integration der Photovoltaik in die Landwirtschaft als Beitrag zu einer erfolgreichen Energiewende – Vernetzung und Begleitung des Markthochlaufs der Agri-PV in Deutschland« (»SynAgri-PV«) startete im Juli 2022 mit einer Laufzeit von drei Jahren und wird vom BMBF finanziert.

Das Projekt verfolgt das übergeordnete Ziel, zentrale technische, juristische, wirtschaftliche und gesellschaftliche Rahmenbedingungen und Voraussetzungen für die Etablierung der Agri-PV auf dem deutschen Markt zu beschreiben, zu bewerten und Vorschläge für eine breite Etablierung von Agri-PV zu entwickeln. Unter Koordination des Fraunhofer ISE sowie des Leibniz-Zentrums für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) begleiten die Projektpartner Universität Hohenheim, Kanzlei Becker Büttner Held, Stiftung Umweltenergierecht, Elysium Solar GmbH sowie Bosch & Partner GmbH den Markthochlauf der Agri-PV in Deutschland aus interdisziplinärer, wissenschaftlicher Sicht. Dafür werden deutschlandweit Daten bestehender Agri-PV-Anlagen ausgewertet, und die zwei assoziierten Landwirtschaftsbetriebe, Fabian Karthaus bei Paderborn und die Hofgemeinschaft Heggelbach nahe des Bodensees, lassen ihre Erfahrungen aus der praktischen Prototypen-Nutzung direkt in das Projekt einfließen.

Ziel ist, evidenzbasiert und unter Einbezug möglichst aller relevanten Akteure gesellschaftliche Zielvorstellungen für den Ausbau der Agri-PV in Deutschland zu entwickeln, Handlungsbedarfe zu dessen Umsetzung zu benennen, Lösungsansätze zu skizzieren und weitere Forschungsfelder zu identifizieren. Dazu werden Beteiligungsformate geschaffen und die gewonnenen Erkenntnisse ausgewertet und der breiten Öffentlichkeit und Politik zugänglich gemacht.



VAcker-Projekte

Im Rahmen der Projekte »VAckerPower« und »VAckerBio« werden umfangreiche Untersuchungen des vertikalen, bifazialen Agri-PV-Systems im Ackerbau durchgeführt.

Die Kombination der beiden Projekte erlaubt dabei eine gesamtheitliche Betrachtung des vertikalen Ansatzes im Ackerbau sowohl mit Blick auf die Landwirtschaft als auch auf den PV-Betrieb. In »VAckerPower« soll der Einfluss des vertikalen Agri-PV-Systems auf die ackerbauliche Flächennutzung untersucht werden. Dabei begleitet das Projekt die ersten Umsetzungen der vertikalen Systeme im Ackerbau in Deutschland aus technischer Perspektive. Gleichzeitig soll die Betriebszuverlässigkeit der Systeme u. a. unter realen Betriebsbedingungen (Soiling, Einsatz von Pflanzenschutz und Dünger etc.) untersucht und Optimierungspotenziale abgeleitet werden. Zusätzlich werden die gesellschaftliche Akzeptanz und Nachhaltigkeitsaspekte dieser und anderer Systeme im Ackerbau betrachtet. Abschließend sollen geeignete Standorte im Rahmen einer Potenzialanalyse identifiziert werden.

In »VAckerBio« hingegen liegt der Fokus auf dem Einfluss der Agri-PV-Anlage auf die ackerbauliche Flächennutzung und die Biodiversität. Für die Untersuchung der pflanzenbaulichen Entwicklung wird ein Mikroklimamonitoring implementiert, Bodenqualität und Kulturwachstum beobachtet. Außerdem werden biodiversitätsfördernde Nutzungskonzepte der ungenutzten Streifen unter den PV-Modulen entwickelt und implementiert. Ein wichtiger Teil der Untersuchung wird auf einer Versuchsfläche der Agri-PV-Anlage in Merzig-Willingen durchgeführt.

VitiVoltaic

Ob PV-Module die Folgen des Klimawandels für den Weinbau abbildern können, soll im Rahmen des Projekts an der Hochschule Geisenheim untersucht werden. Die Agri-PV-Anlage im Rahmen des Forschungsprojekts wurde 2022 in Geisenheim errichtet. Das Projekt wird gefördert durch EFRE (»APV-Weinbau4Real«), EFRE-REACT (apparative Ausstattung), sowie das Hessische Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (»VitiVoltaic4Future«).

Abb. 29: Vertikale Agri-PV-Anlage in Merzig-Willingen, 2023
© Universität Hohenheim

VitiCult-PVmobil

Im Projekt soll eine mobile Agri-PV-Anlage für Jungreben entwickelt werden. Projektpartner sind sbp Sonne, Fraunhofer ISE sowie die Hochschule Geisenheim. Ziel ist es ein System zu entwickeln, das sich flexibel nach den Bedürfnissen der Winzerinnen und Winzer richten kann. Gerade junge Reben sind besonders schutzbedürftig. Es wird untersucht, inwieweit sich dieses System technisch und ökonomisch umsetzen lässt und wie es sich auf die Weinreben aus agrarwissenschaftlicher Sicht auswirkt. Im Rahmen des Forschungsprojekts befindet sich ein Prototyp in der Entwicklung. Gefördert wird das Projekt durch das BMBF.

Weinbau 4.0

Im Rahmen des RegioWIN Projekts »Weinbau 4.0« sollen in den zwei Teilprojekten »Agri-PV im Weinbau« in Oberkirch und Ihringen-Blankenhornsberg und »Agri-PV im Weinbau / Bürger-Viti-PV« in Riegel, die Auswirkung der Agri-PV auf den Weinbau in der Region Südlicher Oberrhein-Hochrhein vom Weinbauinstitut Freiburg untersucht werden. Das im Rahmen des Landeswettbewerbs RegioWIN 2030 »Regionale Wettbewerbsfähigkeit durch Innovation und Nachhaltigkeit« prämierte Leuchtturm-Projekt »Weinbau 4.0« wird aus Fördermitteln aus Baden-Württemberg und aus dem Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) gefördert werden.

Im Vordergrund des Projekts steht die technische Realisierung der Agri-PV im Weinbau sowie die Untersuchung der Weinrebe als Partnerkultur. Dazu sollen im ersten Schritt Fragen zur Rebenentwicklung, Schutzwirkung der Agri-PV für die Rebe und Bewirtschaftungsmöglichkeiten geklärt werden. Auch Fragen zur Ertragssituation, Trauben- und Weinqualität werden bearbeitet. Kooperationspartner sind unter anderem die Intech GmbH & Co. KG, die HEG Heidelberger Energiegenossenschaft eG sowie die Wirtschaftsförderungsgesellschaft des Landkreises Emmendingen mbH als Projektsprecher von »Weinbau 4.0«. Beteiligt sind zudem Projektpartner wie das Weinbauinstitut Freiburg, das Kehler Institut für Angewandte Forschung (KIAF) und das Fraunhofer ISE.

Die Auswirkungen der Agri-PV auf den Weinbau wird an drei Standorten in und um Freiburg untersucht: In Blankenhornsberg, Riegel und Oberkirch. Die Pilotanlage in Riegel ist derzeit noch in Entwicklung.

Agri-PV auf Dauergrünland

Mit diesem Teilprojekt der »Modellregion Agri-PV BW« sollen bis Ende 2025 Erkenntnisse und Erfahrungen zu den Auswirkungen von Agri-PV-Anlagen auf die Grünlandbewirtschaftung und den Grünlandbestand gewonnen werden. Insgesamt werden fünf Standorte mit bereits errichteten Agri-PV-Anlagen auf Praxisbetrieben mit unterschiedlichen Bewirtschaftungsformen im Süden Baden-Württembergs untersucht. Neben intensiv und extensiv bewirtschafteten Flächen mit Schnittnutzung wurde auch ein Standort mit Rinderbeweidung in das Projekt aufgenommen.

Es werden sowohl nachgeführte als auch aufgeständerte PV-Systeme beforscht. Die Datenerhebung erfolgt an verschiedenen Stellen innerhalb der Anlage und an Kontrollpunkten außerhalb der Anlage. Dabei wird der Einfluss der PV-Module auf die Quantität und Qualität des Aufwuchses in den verschiedenen Bereichen der Anlage untersucht. Mit Hilfe von Sensoren zur Erfassung des Mikroklimas sollen Aussagen über klimatische Einflussfaktoren getroffen werden. Darüber hinaus werden durch botanische Erhebungen im Bestand sowie direkt unter den Modulreihen mögliche Unterschiede in der botanischen Zusammensetzung des Aufwuchses analysiert. Das Vorhaben soll die Frage beantworten, inwieweit sich der Arbeitszeitaufwand für die Bewirtschaftung der Fläche verändert und welcher Mehraufwand für die Pflegemaßnahmen der Anlage kalkuliert werden muss. Die Untersuchungen werden von der Dualen Hochschule Ravensburg in Kooperation mit dem Landwirtschaftlichen Zentrum Baden-Württemberg durchgeführt. Gefördert wird das Projekt durch das Ministerium für Ernährung, ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg.

*Abb. 30: Kühe in einer bodennahen Agri-PV-Anlage
© Janine Nachtsheim*



2.7 Internationale Entwicklung

Von den weltweit über 14 GW_p installierter Agri-PV-Leistung (Schätzung Fraunhofer ISE) hält China den größten Anteil mit über 12 GW_p (Stand Juli 2021). Dort steht auch die weltweit größte Agri-PV-Anlage: Unter PV-Modulen mit einer installierten Leistung von 700 MW_p werden am Rand der Wüste Gobi Beeren angebaut. Das trägt auch zur Bekämpfung der Wüstenbildung bei. Andere asiatische Länder, die die Chancen der Agri-PV ebenfalls erkannt haben, sind Japan und Südkorea. Beide Staaten setzen allerdings auf kleinere Anlagen. In Japan sind aktuell mehr als 3 000 Anlagen installiert. In Südkorea, wo eine starke Landflucht herrscht, plant die Regierung den Bau von 100 000 Agri-PV-Anlagen auf Bauernhöfen, um den Landwirtinnen und Landwirten damit eine Altersvorsorge (rund 1 000 US-Dollar monatliches Einkommen aus dem Stromverkauf) zu ermöglichen und dem Hofsterben entgegenzuwirken.

Besonders in (semi)ariden Schwellen- und Entwicklungsländern mit hoher Sonneneinstrahlung kann Agri-PV durch ihren Mehrfachnutzen entscheidende Vorteile bringen. Neben Sonnenschutz für Nutzpflanzen und Tiere liefert sie auch Strom für die Gewinnung und Aufbereitung von Wasser. Das kann dem Trend zur Wüstenbildung und zur Verschlechterung der Bodenqualität entgegenwirken. Auch Kulturen, die normalerweise in Gebieten mit trocken-heißem Klima und starker Sonneneinstrahlung nicht angebaut werden, könnten so mit Hilfe der Agri-PV künftig angebaut werden. Ein weiterer Zusatznutzen in den oft netzfernen Dörfern ist die dezentrale Erzeugung von Solarstrom. Durch Agri-PV könnten Menschen Zugang zu Informationen (z. B. Laden von Radio- und Handy-Akkus), Bildung, besserer medizinischer Versorgung (z. B. Kühlung von Impfstoffen und Medikamenten) bekommen und sich

neue Einkommensquellen erschließen. Gleichzeitig sinkt so die Abhängigkeit der Landbevölkerung von fossilen Energieträgern, wie etwa Diesel für Generatoren. Zudem kann der Solarstrom direkt für die Kühlung und Weiterverarbeitung landwirtschaftlicher Produkte verwendet werden. Diese werden dadurch haltbarer und besser vermarktbar, können auch außerhalb der Erntezeit verkauft werden und so wiederum höhere Erlöse bringen. Dem hohen Potenzial für die Entwicklungszusammenarbeit stehen in vielen Ländern jedoch politische und wirtschaftliche Herausforderungen gegenüber. Vor allem politische Instabilitäten und begrenzte Kapitalstöcke stellen Hürden für den Technologietransfer und für langfristige Investitionen in Agri-PV dar.

Eine Vorstudie des Fraunhofer ISE zu einem Standort im indischen Bundesstaat Maharashtra legt nahe, dass sich durch die Verschattung und die geringere Verdunstung unter Agri-PV bei Tomaten und Baumwolle bis zu 40 Prozent höhere Erträge erreichen lassen^[16]. Im konkreten Fall rechnen Forschende vom Fraunhofer ISE für diese Region mit einer Verdopplung der Landnutzungseffizienz.

Im Rahmen des EU-Programms Horizon 2020 untersuchte das Fraunhofer ISE im Projekt »WATERMED 4.0« mit Partnerinnen und Partnern in Algerien, wie sich die Agri-PV auf den Wasserhaushalt auswirkt. Neben einer verringerten Verdunstung und niedrigeren Luft- und Bodentemperaturen spielt auch die Regenwassergewinnung mit PV-Modulen eine Rolle. Die Regenwassergewinnung über die Module ist – gerade im Hinblick der sich häufenden Trockenperioden – für viele Länder, gebietsweise auch für Deutschland, sehr interessant^[17].

Abb. 31. Agri-PV-Anlage in Indien
© Fraunhofer ISE



2.7.1 Chile

In einem im Frühjahr 2018 abgeschlossenen Projekt zu Agri-PV in Kooperation mit Fraunhofer Chile wurden drei Anlagen mit einer Leistung von je 13 kW_p im Umland der Stadt Santiago in den Gemeinden El Monte, Curacaví und Lampa errichtet. Die Region zeichnet sich durch eine hohe jährliche Sonneneinstrahlung und niedrige Niederschläge aus. Die anhaltende Dürre im ohnehin trockenen und sonnigen Klima hat in den letzten zehn Jahren Niederschlagsrückgänge von 20 bis 40 Prozent verursacht. Aufgrund der klimatischen Bedingungen sind Landwirtinnen und Landwirte aktiv auf der Suche nach schattenspendenden Installationen zum Schutz der Pflanzen vor Austrocknung und Sonnenbrand, weshalb der Einsatz von Agri-PV hohe synergetische Potenziale verspricht.

In dem von der kommunalen Regierung unterstützten Projekt untersuchten die Projektbeteiligten, welche Kulturpflanzen von einer weniger starken Sonneneinstrahlung profitieren. Die landwirtschaftlichen Betriebe wiesen dabei sehr unterschiedliche Profile auf. Ein landwirtschaftlicher Betrieb, der Brokkoli und Blumenkohl anbaut, nutzte den Solarstrom aus der Agri-PV-Anlage für Nachernteprozesse wie Reinigung, Verpackung und Kühlung. Eine weitere Pilotanlage wurde in einem Familienbetrieb errichtet, der auf Kräuternanbau spezialisiert ist. Eine dritte Anlage in einer abgelegenen Region mit schwach entwickelter Infrastruktur und unzuverlässiger Stromversorgung versorgt sieben Familien sicher mit Energie.

Die drei Anlagen in Chile sind die ersten ihrer Art in Lateinamerika. Untersucht wurde, wie die Agri-PV an die dortigen klimatischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen angepasst und insgesamt optimiert werden kann. Die Ergebnisse der landwirtschaftlichen Produktion und der Solarstromerzeugung sind sehr positiv, sodass die Forschung von Fraunhofer Chile mit Unterstützung der dortigen Regierung weiter ausgebaut werden soll. Die drei Pilotanlagen werden weiter im Feldbetrieb überwacht ^[18].



Abb. 32: Pilotanlagen des Fraunhofer Chile Research Instituts in Curacaví und Lampa untersuchen, welche Kulturpflanzen von einer weniger starken Sonneneinstrahlung profitieren
© Fraunhofer Chile

2.7.2 Frankreich

Seit 2017 gibt es in Frankreich separate Ausschreibungen für Agri-PV. Vorgesehen sind 15 MW_p installierte Leistung pro Jahr. Die Zuschläge erfolgen teilweise aufgrund des angebotenen Preises, teilweise aufgrund des Innovationsgehalts des Projekts. Die maximale Größe eines Projekts beträgt 3 MW_p installierte Leistung. In der ersten Ausschreibung 2017 erhielten nur Gewächshäuser einen Zuschlag. In der zweiten und dritten Runde werden jeweils 140 MW_p für Anlagen mit einer Kapazität zwischen 100 kW_p und 3 MW_p ausgeschrieben.

Bezuschlagten Projekten wird eine Einspeisevergütung über 20 Jahre garantiert. Im März 2020 konnten 40 MW_p für Agri-PV-Projekte gesichert werden, vor allem Systeme mit nachgeführten PV-Modulen. 2018 entstand in Tresserre (Département Pyrénées-Orientales in der Region Okzitanien) die bis dato größte europäische Anlage mit nachgeführten PV-Modulen im Weinbau.

Allerdings steht die Agri-PV in Frankreich vor einem Akzeptanzproblem. Da bei der ersten Ausschreibungsrunde keine klaren Kriterien für Agri-PV definiert wurden, ist der Anteil der landwirtschaftlichen Produktion in einigen Projekten kaum bzw. gar nicht vorhanden. Diese Art von Mitnahmeeffekten der PV-Branche hat vor allem im Landwirtschaftssektor in Frankreich zu einer gewissen Abwehrhaltung gegenüber Agri-PV geführt. Die französische Umweltagentur für Energie ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) hat 2022 eine Klassifikation für Agri-PV veröffentlicht (»Caractériser les projets photovoltaïques sur terrains agricoles et l'agrivoltaïsme«).

Abb. 33: Studie mit verschiedenen Salatsorten in der Agri-PV-Forschungsanlage der Universität von Montpellier, Frankreich © INRAE/Christian Dupraz



2.7.3 USA

Eine Agri-PV-Forschungsanlage in Massachusetts konnte eine erfolgreiche Doppelnutzung von Pflanzenproduktion und Stromerzeugung nachweisen. Darauf aufbauend, stellt der Bundesstaat seit 2018 Förderungen für die Doppelnutzung bereit. Diese Hilfen sind an Anforderungen gekoppelt: Es werden nur Anlagen gefördert, die auf landwirtschaftlich ausgewiesenen Flächen entstehen und nicht größer als 2 Megawatt sind. Die Unterkante der PV-Module muss bei fix installierten Modulreihen mindestens 2,4 Meter hoch sein, bei Anlagen mit einer Modulnachführung mindestens 3 Meter. Während der Hauptanbauzeit darf zudem kein Punkt des Feldes mehr als 50 Prozent Verschattung aufweisen^[5].

Im Rahmen des Rural Energy Advancement Programs (REAP) stellt auch das US-amerikanische Landwirtschaftsministerium Gelder bereit, um Solaranlagen in ländlichen Gebieten zu fördern.

Weitere Anlagen befinden sich in Arizona, Colorado, Indiana und Oregon. Besonders populär sind Anlagen, die den Fokus nicht auf landwirtschaftliche Nutzung legen, sondern mit artenreichen Habitaten verbunden sind. Mehrere Universitäten und Forschungseinrichtungen arbeiten an der Entwicklung tragfähiger Geschäftsmodelle, um auch die Agri-PV-Anlagen mit Fokus auf landwirtschaftlicher Nutzung attraktiver zu machen.

2.7.4 Mali und Gambia

Mali und Gambia gehören zu den Regionen, die weltweit am stärksten von der Klimakrise betroffen sind. Extreme Wetterereignisse wie Dürren werden sich in Zukunft häufen. Um die Ernährungs- und Energiesicherheit sowie die Stabilität des Agrarsektors in diesen Ländern zu verbessern, wird im Projekt »APV-MaGa« erforscht, inwieweit Agri-PV mit einer integrierten Regenwassergewinnung zu mehr Resilienz in der Landwirtschaft beitragen kann.

Das internationale Konsortium aus Mali, Gambia und Deutschland vereint FuE-Aktivitäten der Agrarwissenschaft, Sozioökonomie und Solarenergie. Die Herausforderungen und Möglichkeiten der Agri-PV sollen aufgezeigt werden und ein tieferes Verständnis der Synergien und Wechselwirkungen des Lebensmittel-Wasser-Energie-Nexus entwickeln. Zusätzlich behandelt das Projekt die sozioökonomische Dimension der Technologie und strebt eine nachhaltige Entwicklung des ländlichen Raums in den Kooperationsländern an.

2.7.5 Türkei

Das Projekt »SusMedHouse« verfolgt das Ziel, die Produktivität, die Anbaueffizienz und die landwirtschaftliche Nachhaltigkeit von Gewächshäusern im Mittelmeerraum zu verbessern. Das Gewächshaus befindet sich in Ankara und umfasst mehrere Bereiche, in denen die Auswirkungen innovativer Anbaumethoden auf die landwirtschaftliche Produktivität untersucht werden.

Das Projekt besteht aus folgenden Komponenten: Künstliche Intelligenz zur Optimierung der Abläufe, Früherkennung von Anomalien und Wirtschaftsprognosen, Entscheidungsunterstützungssystem (DSS), das über eine mobile App bei der Durchführung der erforderlichen Maßnahmen unterstützt, Schädlings- und Erregerbekämpfung (IPPM) zur Gewährleistung der Lebensmittelsicherheit und zur Verringerung des Einsatzes von chemischen Düngemitteln, Entwicklung biologisch abbaubarer Wachstumsmedien aus kreislaufigen Abfallströmen zur Erhöhung der Umweltfreundlichkeit, Optimierung des Sonnenlichts und der Beleuchtung durch eine spezielle Gewächshausmaterialbeschichtung (Sonnenschutz mit niedrigeren Emissionen) und einem Agri-PV-System zum Schutz der Pflanzen und zur Erzeugung von PV-Energie und eine Entwicklung von Biosensoren zur Analyse der Wasserqualität.

Das Fraunhofer ISE ist für das Lichtmanagement in den Gewächshäusern verantwortlich. Die PV-Anlage wurde so konzipiert, dass sie in ein bestehendes Gewächshaus integriert werden kann. Dabei wurden die Bedürfnisse der Pflanzen in den Vordergrund gestellt. Die Auswirkungen von Auslegungsparametern wie PV-Deckungsgrad, PV-Anordnung und Gewächshausausrichtung wurden auf die Lichtverfügbarkeit und -verteilung untersucht. Ein Pilotgewächshaus wurde errichtet und im Juli 2022 in Betrieb genommen. In dem PV-Pilotgewächshaus werden Tomaten, Paprika und Salat getestet.

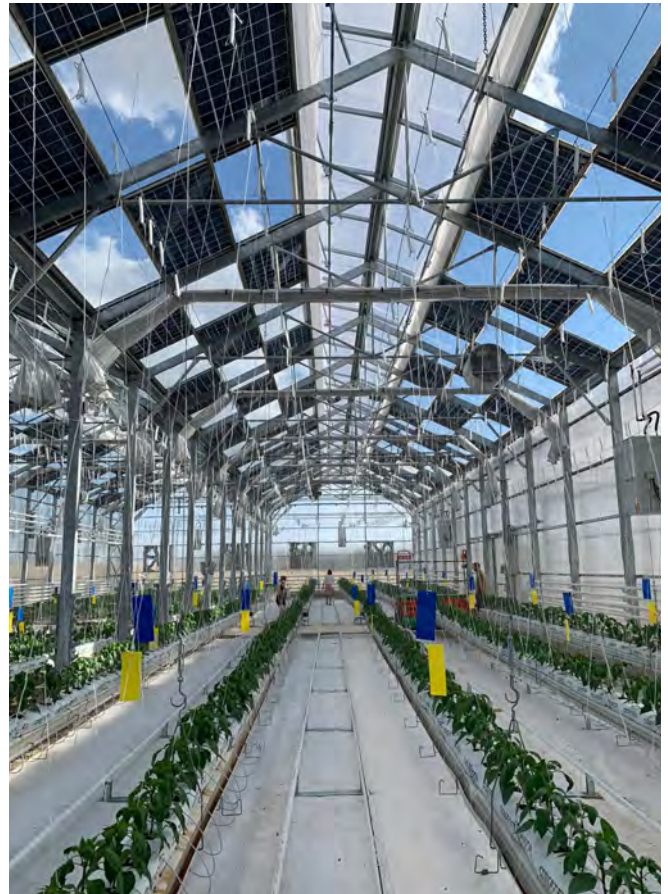


Abb. 34: PV-Gewächshaus © Fraunhofer ISE

3 Landwirtschaft

Wetterextreme der vergangenen Jahre haben gezeigt, dass die zunehmende Klimaerwärmung keine abstrakte Gefahr darstellt, sondern bereits heute große Auswirkungen auf die Landwirtschaft in Deutschland hat. Insbesondere die für das Pflanzenwachstum bedeutsamen Frühjahrsniederschläge sind in den letzten 30 Jahren deutlich gesunken^[19]. Durch zusätzliche Bewässerung können diese Trockenperioden überbrückt und Erträge gesichert werden. Vielerorts bestehen jedoch Entnahmebeschränkungen für Grund- und Oberflächenwasser, sodass weitere Anpassungsmöglichkeiten gefunden werden müssen. Neben der Trockenheit gefährden auch Wetterextreme wie Starkregen, -winde und Hagel den Anbau von Kulturpflanzen.

Um den Herausforderungen der Klimakrise, des Gewässerschutzes und dem Wunsch Ertragseinbußen entgegenzuwirken, ist die Landwirtschaft immer häufiger auf Maßnahmen angewiesen, um die Kulturen zu schützen. Dazu zählt neben dem Anbau in Gewächshäusern und Folientunneln beispielsweise der Einsatz von Hagelschutznetzen im Obstbau. Besonders bei hochpreisigen Sonderkulturen reicht das Spektrum der Maßnahmen gegen Frost- und Hagelschäden von Heizdrähten und Frostschutzkerzen über stationäre Gas- oder Ölbrenner bis hin zu Hubschraubern oder Hagelfliegern, die feinste Silberiodid-Partikel unter der Wolkenbasis ausbringen. Der Einsatz solcher technischen und mechanischen Kulturschutz-

maßnahmen wird in den kommenden Jahrzehnten durch die Klimaveränderung aller Voraussicht nach stark an Bedeutung gewinnen.

Die kombinierte Nutzung landwirtschaftlicher Flächen für Nahrungsmittelproduktion und PV-Stromerzeugung bietet die Chance, viele dieser Herausforderungen gleichzeitig zu adressieren. Landwirtschaftlichen Betrieben bietet Agri-PV Möglichkeiten, ihr Einkommen zu diversifizieren und innerbetriebliche Kreisläufe zu schließen. Insbesondere eine verringerte Verdunstungsrate sowie der Schutz vor Hagel und Frost sind wichtige Faktoren. Indem die vorhandenen Gerüststrukturen genutzt werden, können zudem weitere Schutzsysteme kostengünstig integriert werden. Das kann die Produktivität und die Wertschöpfung der landwirtschaftlichen Flächen deutlich steigern.

Allerdings gibt es beim Einsatz von Agri-PV auch Herausforderungen für die landwirtschaftliche Produktion. Hierzu zählen vor allem die sich verändernden Lichtverhältnisse und die aufgrund der Aufständigung erschwerte Bewirtschaftung. Um Risiken zu minimieren und Synergieeffekte bestmöglich zu nutzen, sollten daher geeignete Kulturpflanzen mit dem passenden Anlagendesign verbunden werden.

Abb. 35: Untersuchte Kulturen in Heggelbach (Sellerie, Kartoffeln, Weizen, Klee gras) © Universität Hohenheim/Andrea Bauerle



3.1 Forschungsergebnisse APV-RESOLA

Im Forschungsprojekt APV-RESOLA wurde unter der Agri-PV-Pilotanlage in Heggelbach erfolgreich eine mehrgliedrige Fruchtfolge aus Klee gras, Winterweizen, Kartoffeln und Sellerie nach biodynamischen Prinzipien angebaut. Dabei zeigte sich, dass der Einfluss der Agri-PV-Anlage auf den Ertrag stark von den Wetterbedingungen abhängt. Bei den Kartoffeln beispielsweise variieren die Ertragsdifferenzen unter Agri-PV im Vergleich zu einer Referenzfläche von minus 20 Prozent im Jahr 2017 bis plus 11 Prozent im trockenen und heißen Jahr 2018.

Die Bewirtschaftung unter einer Agri-PV-Anlage kann, je nach geografischer Lage und lokalen Klimabedingungen, die Verdunstung verringern und vor zu intensiver Sonneneinstrahlung schützen. Dieser Aspekt wird vor dem Hintergrund sich häufender Hitzewellen in Mitteleuropa auch in Deutschland an Bedeutung gewinnen^[20]. Bei Kartoffeln hat sich überdies gezeigt, dass der Anteil vermarktungsfähiger Knollen durch Agri-PV steigen kann.

Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der Universität Hohenheim erhoben neben Daten zu Bestandsentwicklung, Ertrag und Ertragsqualität auch die mikroklimatischen Bedingungen, sowohl unter der Anlage als auch auf einer Referenzfläche ohne PV-Module (siehe Abbildung 27). Die photosynthetisch aktive Sonneneinstrahlung unter der Agri-PV-Anlage war dabei durchschnittlich 30 Prozent niedriger als auf der Referenzfläche. Neben der Sonneneinstrahlung beeinflusste die Agri-PV-Anlage in erster Linie die Niederschlagsverteilung und die Bodentemperatur. Letztere lag im Falle der

Agri-PV im Frühjahr und Sommer unter der Referenzfläche, die Lufttemperatur blieb hingegen weitgehend unverändert. In den heißen und trockenen Sommermonaten 2018 war die Bodenfeuchtigkeit im Weizenbestand im Vergleich zur Referenzfläche höher.

Die ersten Ergebnisse der Erträge im Jahr 2017 auf den Versuchsflächen waren vielversprechend: Bei Klee gras reduzierte sich der Ertrag im Vergleich zur Referenzfläche nur leicht um 5,3 Prozent. Bei Kartoffeln, Weizen und Sellerie hingegen waren die Ertragsverluste durch die Beschattung mit rund 18 bis 19 Prozent etwas stärker ausgeprägt.

Im sehr trockenen Jahr 2018 wurden bei Winterweizen, Kartoffeln und Sellerie höhere Erträge im Vergleich zur Referenzfläche ohne PV-Module erzielt. Am stärksten profitierte davon Sellerie mit einer Ertragssteigerung von 12 Prozent, die Erträge von Kartoffeln und Winterweizen stiegen um 11 bzw. 3 Prozent. Bei Klee gras verminderte sich der Ertrag um 8 Prozent gegenüber der Referenzfläche. Zur Berechnung des Gesamtverlusts sind zusätzlich die Ertragsverluste durch die nicht bearbeitbaren Landstreifen zwischen den Stützpfeilern mit etwa 8 Prozent zu berücksichtigen.

In den Ergebnissen von 2019 waren Ertragsminderung in der Agri-PV-Fläche zu messen, diese betrugen 19 Prozent bei Klee gras, 28 Prozent bei Weizen und 33 Prozent bei Knollensellerie. Im Jahr 2020 gab es eine Ertragssteigerung bei Weizen um 2 Prozent in der Agri-PV-Fläche.

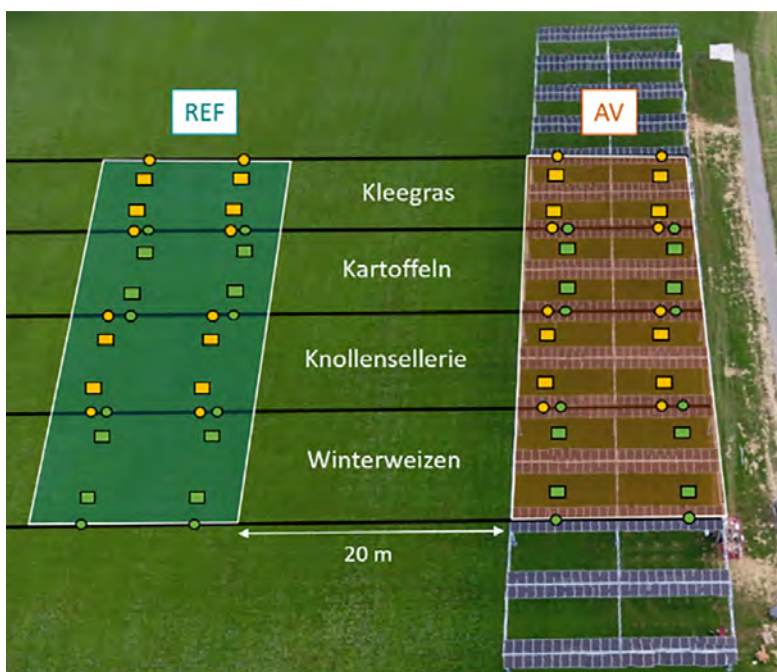


Abb. 36: Feldplan des Versuchsaufbaus 2017 mit Messstationen. Bereiche in denen Proben entnommen wurden, werden durch Kästchen, Positionen von Mikroklimastationen durch Kreise angezeigt © BayWa r.e., verändert durch Axel Weselek/Universität Hohenheim.

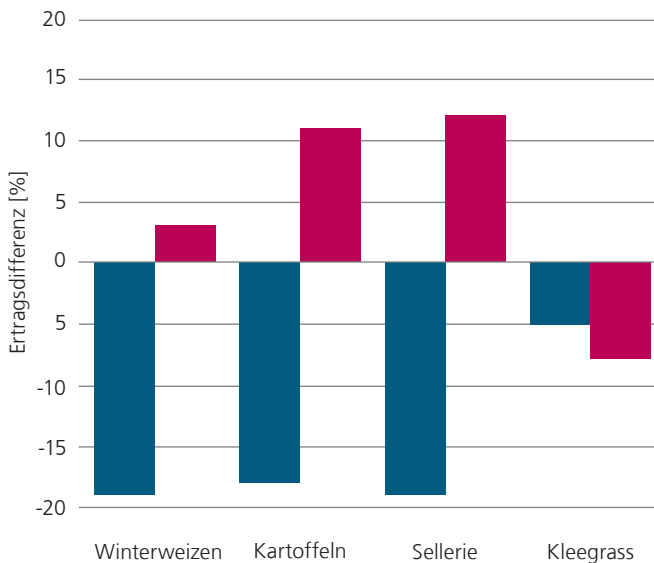


Abb. 37: Ertragsunterschiede der Kulturen unter Agri-PV gegenüber Referenzflächen 2017 (blau) und 2018 (rot) in Heggelbach (ohne Flächenverluste durch Stützen). Daten: Universität Hohenheim, © Fraunhofer ISE

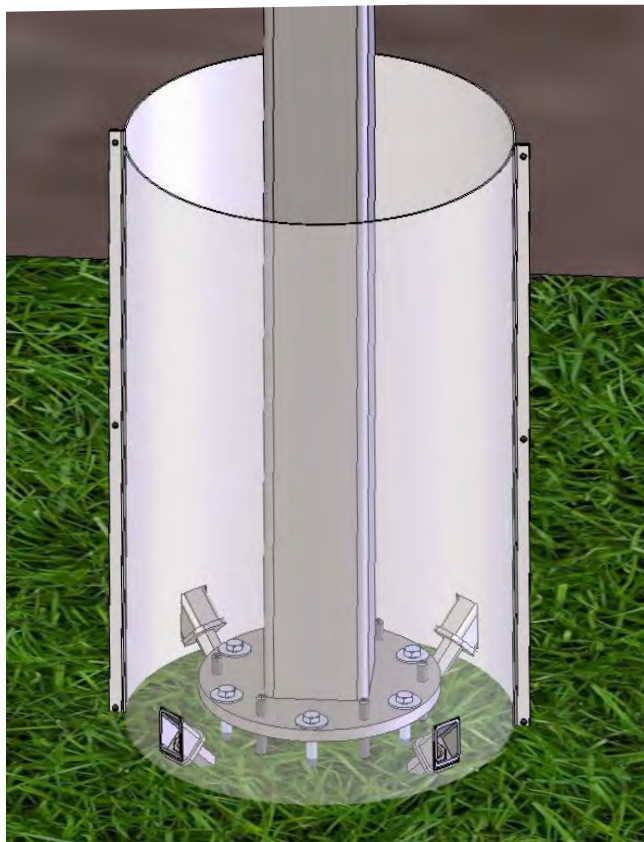


Abb. 38: Rammschutz der Aufständigung der Anlage in Heggelbach gegen mögliche Beschädigungen durch Landmaschinen
© AGROSOLAR Europe GmbH

3.2 Bewirtschaftung und Kulturauswahl

Die Bewirtschaftung unter oder zwischen PV-Modulen unterscheidet sich von einer landwirtschaftlichen Tätigkeit auf »offenem Feld«. Unterschiede ergeben sich bei der Bearbeitung (3.2.1), der Bestandsführung (3.2.2) und der Kulturauswahl (3.2.3).

3.2.1 Unterkonstruktion und Landmaschinen aufeinander abstimmen

Bei der Anlagenplanung müssen praktische Erfordernisse für die spätere Bewirtschaftung berücksichtigt werden. Wichtig ist hierbei vor allem, dass die Ausrichtung der Anlage mit der Bearbeitungsrichtung übereinstimmt und die Abstände zwischen den Stützen der Unterkonstruktion zur Breite und Höhe der eingesetzten Maschinen passen. Besonders zu Beginn muss sich die Maschinenführerin oder der Maschinenführer erst daran gewöhnen, zwischen den Pfeilern zu manövrieren. Im Projekt APV-RESOLA sind die Pfeiler mit einem Ramm-schutz ausgestattet, um eventuellen Schäden an der Anlage vorzubeugen. Der eigentliche Flächenverlust durch Pfeiler und Ramm-schutz lag in Heggelbach bei unter ein Prozent der Ackerfläche. Da die Bewirtschaftung der Streifen zwischen den Stützen mit Maschinen in vielen Fällen nicht praktikabel ist, konnten im Falle der Forschungsanlage in Heggelbach ca. acht Prozent der Ackerfläche nicht genutzt werden. Bei manueller Bewirtschaftung oder Reihensbewirtschaftung reduziert sich der Flächenverlust auf die tatsächlich versiegelte Fläche. Auch innovative Seilzugtechniken können helfen, um die Anzahl der Stützen zu reduzieren und möglichst viel Fläche zu bewirtschaften (Kapitel 5.3). Der Einsatz von Precision Farming und automatischen Spurführungssystemen erleichtert die Bewirtschaftung.

3.2.2 Änderungen des Mikroklimas

Die Verschattung der landwirtschaftlichen Fläche bewirkt unter den PV-Modulen ein verändertes Mikroklima. Neben den zuvor beschriebenen Untersuchungen in Heggelbach wurde auch an Standorten in den USA^[21] und Frankreich^[7] zu möglichen Auswirkungen auf das Mikroklima geforscht. Abhängig von Standort und Design der Anlage konnten die Forschenden dabei unterschiedliche Veränderungen des Mikroklimas feststellen.

In Verbindung mit den Erkenntnissen aus APV-RESOLA lässt sich grundsätzlich zusammenfassen:

1. Die für die Pflanzen verfügbare Sonneneinstrahlung kann je nach technischer Ausführung (zum Beispiel Abstand und Ausrichtung der PV-Module) unterschiedlich ausfallen. Als Richtwert für Deutschland kann im Ackerbau eine Verringerung der Strahlung um rund ein Drittel als akzeptabel betrachtet werden.
2. Je niedriger die Aufständigung, desto stärker sind die mikroklimatischen Veränderungen.
3. An besonders heißen Tagen reduziert sich die Bodentemperatur und in geringerem Maße auch die Lufttemperatur.
4. Je nach Ausrichtung und Design der Anlage kann sich die Windgeschwindigkeit verringern oder erhöhen. Windkanaleffekte und deren Effekte auf das Pflanzenwachstum sollten demnach bei der Anlagenplanung berücksichtigt werden.
5. In einer Agri-PV-Anlage geht weniger Bodenwasser verloren. Je heißer und trockener das Klima, desto stärker steigt tendenziell die Bodenfeuchte im Vergleich zu Referenzflächen ohne Agri-PV.

Eine partielle Überdachung der landwirtschaftlichen Fläche führt zu einer ungleichmäßigen Niederschlagsverteilung im Abtropfbereich der PV-Module. Um in diesem Bereich Bodenerosion durch Abschwemmung von nährstoffreichem Oberboden, Verschlammung, Auswaschung von Keimlingen oder Nährstoffeintrag und -anreicherung von Oberflächen-gewässern entgegenzusteuern, sollten Maßnahmen getroffen werden. Eine Auswahl an Möglichkeiten findet sich im Technikteil (Kapitel 5).

Diese Erkenntnisse spielen eine wichtige Rolle für die landwirtschaftliche Praxis. So müssen beispielsweise bei Systemen, die keinen oder nur unvollständigen Regenschutz bieten, bei der Sortenwahl mögliche Änderungen der Luftzirkulation, der Luftfeuchtigkeit und der Infektionsrisiken für Pilzkrankheiten berücksichtigt werden. Zu bedenken ist auch, dass die geringere Sonneneinstrahlung und Bestandstemperatur die Entwicklungszeit verlängern kann.

Das Wissen über die mikroklimatischen Auswirkungen von Agri-PV bildet neben praktischen Überlegungen zugleich die Basis für die Wahl geeigneter Kulturpflanzen. Insbesondere die teilweise Verschattung unterhalb der Anlage bestimmt die Eignung einzelner Kulturen.

Abb. 39: Illustration einer Agri-PV-Apfelplantage
© Fraunhofer ISE





Abb. 40: Agri-PV mit nachgeführten Modulen in Frankreich
© Sun'Agri



Abb. 41: Witterungsschutz für Himbeeren durch Agri-PV.
300 kW_p Testanlage von BayWa r.e. in den Niederlanden
© BayWa r.e.

3.2.3 Geeignete Kulturpflanzen

Nach derzeitigem Kenntnisstand eignen sich grundsätzlich alle Kulturpflanzen für den Anbau unter einer Agri-PV-Anlage, wobei infolge der Beschattung unterschiedliche Auswirkungen auf die Erträge zu erwarten sind. Ausgesprochen schattentolerante Kulturen wie Blattgemüsearten (z. B. Salat), Feldfutterarten (Klee gras), verschiedene Kern-, Stein- und Beerenobstarten sowie andere Sonderkulturen (z. B. Bärlauch, Spargel, Hopfen) scheinen besonders geeignet.

Dauer- und Sonderkulturen

Bei Sonderkulturen aus dem Wein-, Obst- und Gemüsebau bietet Agri-PV vermutlich das größte Potenzial für Synergieeffekte. Denn die hohe Wertschöpfung pro Fläche und die oftmals relativ empfindlichen Kulturen gehen mit einem größeren Bedarf an Schutzmaßnahmen einher. Die sinnvolle Gestaltung der Agri-PV-Konstruktion kann einen direkten Schutz vor Umwelteinflüssen wie Regen, Hagel und Wind gewährleisten. Zudem lässt sich die Aufständigung auch zur Integration weiterer Schutzelemente wie Hagelschutznetze und Folientunnel verwenden. Die Agri-PV kann helfen, den Folieneinsatz und den damit verbundenen Plastikeintrag in den Boden zu reduzieren. Gleichzeitig lassen sich die Kosten für herkömmliche Schutzmaßnahmen sowie das Ertragsrisiko senken.

Positive Ergebnisse erzielte bereits der Blattgemüseanbau von Salat unter einer Agri-PV-Anlage. Die Pflanzen reagierten auf das um etwa 30 Prozent reduzierte Lichtangebot, ähnlich wie der Sellerie in Heggelbach, mit verstärktem Blattflächenwachstum^[22].

Im Weinbau können sich die als Folge der Klimakrise verstärkte Sonneneinstrahlung und Temperaturveränderung je nach Rebsorte stark auf den Ertrag auswirken und darüber hinaus zu Sonnenbrand und Vertrocknung der Früchte am Rebstock führen. Eine Erhöhung der Sonneneinstrahlung steigert den Zuckergehalt der Trauben, was wiederum den Alkoholgehalt des Weines erhöht und seine Qualität mindern kann. Eine Verschiebung der Anbauregionen und Erntezeitpunkte ist in vielen Regionen bereits deutlich zu beobachten. Die teilweise Beschattung wirkt sich bei hohen Temperaturen daher positiv auf das Wachstum aus und verhindert gleichzeitig ein vorzeitiges Abreifen^[23]. Verglichen mit anderen landwirtschaftlichen Nutzungsarten wird im Weinbau nur eine Höhe des Agri-PV-Systems von zwei bis drei Metern benötigt, wodurch die Kosten der Unterkonstruktion deutlich sinken. Potenziale zur Kostensenkung ergeben sich auch durch die Möglichkeiten, das Agri-PV-System in bestehende Schutzstrukturen zu integrieren. In Frankreich werden Agri-PV-Anlagen im Weinbau vermehrt gefördert und umgesetzt (Kapitel 2.7.2).

Vielversprechend erscheinen auch Systeme in Verbindung mit Kernobst wie beispielsweise Äpfeln. Um die Effekte der Klimakrise auf die Qualität der Äpfel und die Ernteerträge in Deutschland zu vermindern, sind oft kostspielige Schutzsysteme nötig. Agri-PV kann diese Kosten reduzieren. Bei manchen Apfelsorten genügen bereits 60 bis 70 Prozent des verfügbaren Lichts für optimale Apfelerträge^[24]. In Rheinland-Pfalz hat das Fraunhofer ISE eine Pilotanlage auf einem Bio-Obsthof errichtet, um zu untersuchen, welche Effekte die PV-Module im Vergleich zu herkömmlichen Schutzvorrichtungen auf den Schädlingsbefall und die Erträge haben. Synergieeffekte sind auch im Hopfenanbau zu erwarten: Die Unterkonstruktion lässt sich sowohl für den Hopfen als Rankhilfe als auch für die Anbringung der PV-Module verwenden. Das kann die Anlagekosten eines Hopfengartens substantiell verringern. Kulturarten und Anbausysteme, bei denen feuchtigkeitsbedingter Pilzbefall nicht durch flankierende Anbaumaßnahmen reduziert werden kann, erscheinen hingegen weniger geeignet.

Ein weiteres Anwendungsfeld innerhalb der Sonderkulturen ist der geschützte Anbau von Strauchbeeren. Hier könnten PV-Module die Rolle von Folientunneln teilweise übernehmen und vor Regen und Hagel schützen. Weitere Vorteile, die sich aus Anwendungen über Dauer- und Sonderkulturen ergeben, sind hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit (Kapitel 4), der gesellschaftlichen Akzeptanz (Kapitel 6) sowie der regulatorischen Umsetzbarkeit (Kapitel 7) zu erwarten.



Abb. 42: Demoprojekt im Beerenbau zeigt hohe Wertschöpfung in der Landwirtschaft © BayWa r.e.

Ackerbau

Die Ergebnisse aus Heggelbach mit verschiedenen landwirtschaftlich relevanten Kulturpflanzen zeigen, dass diese, insbesondere in trockenen Gebieten, durchaus von der Beschattung durch die hoch aufgeständerte Agri-PV-Anlage profitieren können. Dabei ist besonders der positive Effekt auf den Ertrag in heißen und trockenen Jahren hervorzuheben. In niederschlagsreichen Jahren hingegen muss bei Kulturen wie Kartoffeln, Weizen und anderen Getreidearten (Gerste, Roggen oder Triticale) unter feststehenden Unterkonstruktionen im Fall von Heggelbach mit Ertragseinbußen von bis zu 20 Prozent gerechnet werden. Mais eignet sich in gemäßigten Breiten aufgrund seiner Charakteristika als C4-Pflanze (höhere Wärme- und Lichtbedürftigkeit) kaum für den Anbau unter Teilverschattung. Erfahrungen mit anderen verbreiteten Kulturen wie Raps, Rüben und Leguminosen stehen noch aus. Als Empfehlung – auch hinsichtlich einer breiten Akzeptanz in der Bevölkerung und der Landwirtschaft – gilt, dass die Ertragseinbußen insgesamt 20 Prozent nicht übersteigen sollten. Die Ergebnisse aus Heggelbach zeigen, dass dies für einige in Deutschland relevante Ackerkulturen bei geeignetem Lichtmanagement, d. h. eine verringerte Moduldicke und eine angepasste Modulausrichtung, erreicht werden kann. Mit beweglichen hoch aufgeständerten Agri-PV-Systemen lassen sich die Einbußen beim Pflanzenertrag reduzieren, weil das Lichtangebot in kritischen Wachstumsphasen erhöht werden kann.



Abb. 43: Weizenernte mit Mähdrescher © Fraunhofer ISE

Lichtsättigungspunkt

Pflanzen benötigen Licht für die Photosynthese. Dabei unterscheiden sich Pflanzen in ihrer Fähigkeit, das einfallende Licht zu verwerten. Je nach Pflanzenart stagniert die Photosyntheserate ab einer gewissen Lichtintensität (siehe Abbildung 35). Ein wichtiges Kriterium für die Eignung von Pflanzen für Agri-PV ist der Lichtsättigungspunkt. Ab diesem Punkt können Pflanzen zusätzlich Licht nicht in weitere Photosyntheseleistung umsetzen und sogar geschädigt werden. Je früher diese Lichtsättigung bei einer Pflanze einsetzt, desto besser eignet sich diese für den Anbau unter einer Agri-PV-Anlage.^[21]

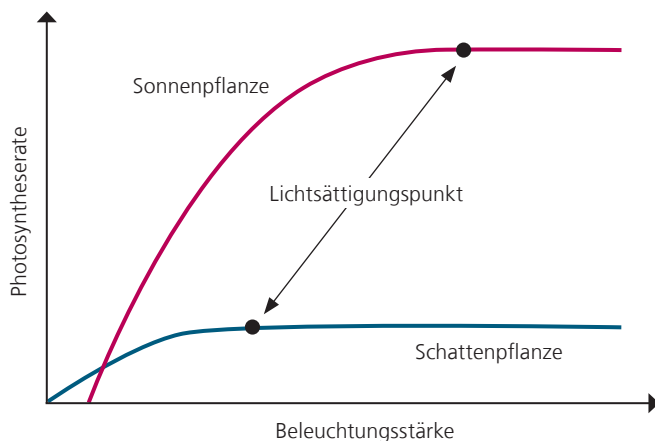


Abb. 44: Schematisch: Photosyntheserate in Abhängigkeit der Beleuchtungsstärke bei Sonnen- und Schattenpflanzen^[24]
© ASPS, abgeändert durch Fraunhofer ISE

Grünland

Eine landwirtschaftliche Doppelnutzung von PV-FFA mit Schafhaltung ist in Deutschland gängige Praxis. Hierbei sind die Systeme typischerweise rein PV-seitig optimiert. Die zu erwartenden Synergieeffekte sind, ebenso wie die landwirtschaftliche Wertschöpfung pro Fläche, im Vergleich zu anderen Agri-PV-Anwendungen eher gering. Konkrete Forschungsergebnisse dazu stehen allerdings noch aus.

Ein neuer Ansatz, welcher die Bewirtschaftung der Fläche trotz bodennaher Aufständigung auf mindestens 90 Prozent der Fläche weiterhin zulässt, ist die Installation vertikaler Agri-PV-Systeme (siehe Abbildung 36). In Deutschland gibt es bereits mehrere Referenzanlagen, beispielsweise in Donaueschingen (Baden-Württemberg) und Eppelborn-Dirmingen (Saarland). Vorteile für das Pflanzenwachstum sind vor allem in windreichen Gebieten wie beispielsweise in Küstennähe zu erwarten. Dort können die Module als Windbrecher fungieren und so der Winderosion entgegenwirken.



Abb. 45: Vertikal errichtete, bifaziale Module im Solarpark in Eppelborn-Dirmingen, Saarland, mit 2 MW_p Leistung, errichtet von Next2Sun © Next2Sun GmbH

3.3 Landwirte berichten

Die Landwirte in Heggelbach berichten überwiegend von positiven Erfahrungen, weisen jedoch auch deutlich auf die Einschränkungen aufgrund des in Deutschland bestehenden rechtlichen Regelwerks hin. In einem Interview erläutern Thomas Schmid und Florian Reyer, warum sie sich für eine Agri-PV-Anlage entschieden haben, wie praktikabel sie ist und was ihrer Meinung nach an den rechtlichen Regelungen geändert werden sollte. Thomas Schmid ist Mitbegründer der seit 1986 bestehenden Demeter-Hofgemeinschaft Heggelbach. Mittlerweile hat er sich aus der aktiven Landwirtschaft zurückgezogen und ist als Aufsichtsrat des Demeter-Verbands und Berater in Baden-Württemberg tätig. Florian Reyer ist seit 2008 Gesellschafter in der Hofgemeinschaft Heggelbach und für die Bereiche erneuerbare Energien, Technik sowie Acker- und Gemüsebau zuständig.

Interview mit Thomas Schmid und Florian Reyer

Was war euer Antrieb als landwirtschaftlicher Praxispartner an dem Pilotprojekt teilzunehmen und eure Fläche für eine Versuchsanlage zur Verfügung zu stellen?

Schmid: »Wir haben seit 15 Jahren bei uns auf dem Hof das Ideal, neben einem geschlossenen Betriebskreislauf auch einen geschlossenen Energiekreislauf zu erreichen. Deshalb haben wir in der Vergangenheit bereits in verschiedene Energieträger (Anmerkung: Holzvergaser, Dach-PV) investiert. Als das Fraunhofer ISE im Jahr 2011 auf uns zukam, war die Energiewende bereits ein großes Thema. Dabei erschien uns die Agri-PV als eine geeignete Möglichkeit, unseren Beitrag zu einer erfolgreichen Energiewende zu leisten und durch die doppelte Landnutzung auch eine Alternative zur Biogas-Produktion auf landwirtschaftlichen Flächen aufzuzeigen.«

Reyer: »Zudem haben wir auch generell ein großes Interesse an innovativen Entwicklungen im Bereich der erneuerbaren Energien.«

Wie verliefen die Planung und der Bau? Wurden alle eure Anforderungen, wie z. B. die Wahrung der Bodenfunktionen, berücksichtigt?

Schmid und Reyer: »Als vollwertiger Praxispartner waren wir an der ganzen Planung beteiligt und konnten bei allen Aspekten mitentscheiden, sodass unsere landwirtschaftlichen Bedürfnisse und hohen Ansprüche an den Erhalt der Bodenfruchtbarkeit von Anfang an berücksichtigt wurden. So wurde beispielsweise zum Aufbau der Anlage vorübergehend eine Baustraße verlegt und durch ein spezielles Verankerungssystem auf Betonfundamente verzichtet.«



Abb. 46: Thomas Schmid und Florian Reyer von der Hofgemeinschaft Heggelbach © AMA Film GmbH

Wie praktikabel ist für euch die Bewirtschaftung unter der Anlage?

Reyer: »Im Hinblick auf die Vorteile der Doppelnutzung ist es absolut praktikabel. Dadurch sind auch gewisse Einschränkungen bei der Bewirtschaftung nicht relevant. Wenn man es machen will, dann geht es auch.«

Welchen Nutzen zieht ihr aus der Stromerzeugung durch die Anlage?

Schmid: »Unser Ziel ist, möglichst viel der erzeugten Energie selbst zu nutzen, um so die Kosten für die Energie zu reduzieren. Daher versuchen wir, den Eigenverbrauch weiter zu steigern und mit Hilfe von unserem Praxispartner, den Elektrizitätswerken Schönau, die Speicherung, Steuerung und den Verbrauch an die Erzeugung anzupassen.«

Würdet ihr euch aus heutiger Sicht wieder für den Bau dieser Anlage entscheiden?

Reyer: »Als Forschungsanlage ja, ansonsten unter den jetzigen Bedingungen nicht.«

Warum? Was muss sich aus eurer Sicht für die erfolgreiche Anwendung der Agri-PV in der Zukunft ändern?

Reyer: »Das ist eine Frage der Voraussetzungen. Alles muss sich ändern!«

Schmid: »Diese sind aktuell in Deutschland* nicht gegeben. Durch den Bau der Anlage bekommen wir für die Fläche keine Agrarsubventionen mehr. Gleichzeitig bekommen wir für den erzeugten Strom auch keine EEG-Einspeisevergütung.«

Reyer: »Eine neue Technologie braucht eine Anschubförderung, damit diese in der Praxis umgesetzt werden kann. Dazu braucht es auch politischen Willen, um die Rahmenbedingungen entsprechend anzupassen.«

Schmid: »Zudem ist noch mehr Forschung nötig, um die Technik auch in anderen Anwendungsgebieten zu erproben, z. B. Hopfenanbau, Obstbau und auch in der konventionellen Landwirtschaft.«

* Die Aussagen beziehen sich auf die regulatorischen Bedingungen im Jahr 2019. Inzwischen wurden einige Rahmenbedingungen angepasst, s. auch Kapitel 6.

4 Wirtschaftlichkeit und Geschäftsmodelle

Hinweis: Die im Kapitel 4 dargelegten Annahmen und Berechnungen zur Wirtschaftlichkeit stammen aus dem Jahr 2020 und spiegeln nicht die aktuellen Preisentwicklungen wider.

Die Kosten der Agri-PV können individuell stark variieren und hängen unter anderem von Faktoren wie der installierten Leistung, der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung, der Lage sowie der verwendeten PV-Modultechnologie ab. Die Anschaffungskosten sind in der Regel höher als die einer konventionellen PV-FFA, was bei hoch aufgeständerten hauptsächlich an der höheren und aufwändigeren Unterkonstruktion sowie der Sonderanfertigung der PV-Module liegt. Durchfahrtshöhe und Pfostenabstand beeinflussen die Kosten der Unterkonstruktion maßgeblich. Der Einsatz kleinerer Landmaschinen bzw. eine manuelle Ausführung möglichst vieler Arbeitsschritte kann sich dabei positiv auf die Wirtschaftlichkeit auswirken. Auch mehrjährige Reihenkulturen bieten Kostenvorteile, da die Pfosten der Unterkonstruktion ohne einen nennenswerten Verlust von Anbaufläche in die Reihen integriert werden können. Gerade wenn auf der landwirtschaftlichen Fläche ohnehin ein Schutz der Kulturen notwendig ist, kann die Investition in eine Agri-PV-Anlage aus Sicht eines landwirtschaftlichen Betriebs lukrativ sein, da sich hier Einsparungsmöglichkeiten ergeben. Im Gegensatz zu herkömmlichen PV-FFA ist eine Einzäunung bei hoch aufgeständerten Agri-PV-Systemen in der Regel nicht nötig, womit dieser Kostenfaktor entfällt.

Im laufenden Betrieb sind bei Agri-PV-Systemen leichte Kosteneinsparungen gegenüber PV-FFA zu erwarten, da Arbeitsschritte wie die Grünschnitte unter den Modulen bereits im Rahmen der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung erledigt werden. Lediglich die nicht bearbeitbaren Streifen sollten gepflegt

werden, um zu verhindern, dass sich unerwünschte Beikräuter ausbreiten. Auch bei der Landpacht kann davon ausgegangen werden, dass durch die Doppelnutzung Kosten umverteilt bzw. eingespart werden können. Hierauf wird in Kapitel 4.1.2 eingegangen.

Für eine Abschätzung der Kosten werden im Folgenden bodennahe und hochaufgeständerte Agri-PV-Systeme unterschieden. Hochaufgeständerte Systeme werden nochmal gesondert für Systeme über 2,5 Meter und ab 4 Meter betrachtet. Als Referenz dienen PV-FFA und kleine PV-Dachanlagen. Aufgrund der hohen ökonomischen Komplexität des Gesamtsystems beschränken sich die folgenden Betrachtungen auf die PV-Ebene. Einnahmen und Ausgaben der Landwirtschaft wurden in dieser Abschätzung nicht berücksichtigt.

Es lässt sich die Tendenz erkennen, dass im Ackerbau Anlagen mit einer höheren installierten Leistung notwendig sind, um Agri-PV wirtschaftlich umzusetzen. Im Gartenbau können auch bei günstigen Voraussetzungen kleinere Systeme wirtschaftlich sein. Fruchtfolgen im Ackerbau führen dazu, dass das Agri-PV-Design an die Bedürfnisse bzw. die Bearbeitungsmaßnahmen aller Kulturen der Fruchtfolge angepasst werden muss. In Dauerkulturen hingegen kann sich das Anlagendesign technisch ganz an den Bedürfnissen und der Bewirtschaftung dieser einen Kultur orientieren.

Die hier angenommenen Zahlen stellen mittelfristig anzunehmende Kosten und Einnahmen dar. Kostenschwankungen und Lieferengpässe wie sie z. B. durch die Corona-Krise oder den Ukraine-Krieg im Falle der Stahl- und Modulpreise zustande kamen, wurden in den Berechnungen nicht berücksichtigt.

4.1 Investitionskosten

Die Abschätzung der Investitionskosten bezieht sich auf eine Fläche von jeweils zwei Hektar und im Falle der Dachanlage auf eine installierte Leistung von 10 kW_p. Da in Deutschland typische Ackerkulturen wie Weizen, Gerste oder Raps tendenziell lichtbedürftiger sind als Kulturen im Gartenbau, werden hier für hochaufgeständerte Agri-PV-Systeme ab vier Meter größere Modulabstände und damit eine geringere Leistung pro Fläche mit 600 kW_p pro Hektar angenommen. Durchfahrts- höhe und Pfostenabstände der Unterkonstruktion entsprechen den Maßen der Anlage in Heggelbach. Für niedrige Dauerkulturen wie beispielsweise Beeren wird eine Leistung von 700 kW_p pro Hektar und eine Durchfahrts- höhe von drei Meter angenommen. Im Dauergrünland wird mit einer Leistung von 300 kW_p pro Hektar gerechnet, denn hier vergrößert sich der Modulreihenabstand entsprechend, um die Bewirtschaftung dazwischen zu ermöglichen.

Für PV-FFA wurde eine Leistung von einem MW_p pro Hektar angesetzt. Ein optimistisches und ein konservatives Szenario spiegeln dabei jeweils die zu erwartende Bandbreite der Kosten wider. Nicht berücksichtigt wurden bei den Agri-PV-Szenarien mögliche Risikoaufschläge oder zusätzliche Kosten, um rechtliche Rahmenbedingungen zu erfüllen. Damit entsprechen die Werte den mittelfristig anzunehmenden Kosten im Falle einer Agri-PV-Markteinführung. Die Unterschiede zwischen den zu erwartenden Investitionskosten für PV-FFA und Agri-PV sind in Abbildung 38 dargestellt. Die Unterschiede der Investitionskosten lassen sich im Wesentlichen auf drei Kostenstellen zurückführen:

1. Der Modulpreis kann sich erhöhen, da diese in Größe oder Lichtdurchlässigkeit der Module an die Bedürfnisse des Pflanzenwachstums angepasst werden (Kapitel 5.2). Bei der Verwendung von bifazialen Glas-Glas-Modulen wurde deshalb in der Beispielrechnung von einem Anstieg auf durchschnittlich 326 Euro pro kW_p ausgegangen. Im Falle

von Sondermodulen, wie semi-transparenten PV-Modulen, liegt der angenommene Preis zwischen 240 und 440 Euro pro kW_p. Diese Mehrausgaben können beim Einsatz von bifazialen Modulen teilweise durch die höhere Stromerzeugung pro installierte Leistung kompensiert werden.

2. Für die Unterkonstruktion sind bei hochaufgeständerten Agri-PV-Systemen (> vier Meter) Kosten von durchschnittlich 372 Euro pro kW_p im Vergleich zu 76 Euro pro kW_p bei PV-FFA zu erwarten. Diese Abschätzung enthält jedoch (noch) viele Unsicherheiten und schwankt je nach Design und möglichen Lern- und Skaleneffekten zwischen 243 und 500 Euro pro kW_p. Bei bodennahen Systemen sind die Kosten für die Unterkonstruktion mit 97 bis 167 Euro pro kW_p deutlich niedriger. Bei hochaufgeständerten Systemen unter vier Meter liegen diese zwischen 243 und 306 Euro pro kW_p.
3. Die Kosten für die Standortvorbereitung und Installation liegen ebenfalls wesentlich höher und werden bei hochaufgeständerten Systemen (> vier Meter) auf 190 bis 266 Euro pro kW_p (PV-FFA: 67 bis 100 Euro pro kW_p) geschätzt. Kostentreibend wirken sich unter anderem Bodenschutzmaßnahmen wie die Verwendung von Baustraßen und eine geringere Flexibilität hinsichtlich der Installation aus, da die Bewirtschaftungszeiten der Landwirtschaft sowie die Befahrbarkeit der Böden berücksichtigt werden müssen. Bei bodennahen oder hochaufgeständerten Systemen unter vier Meter ist hier mit geringeren Kosten von durchschnittlich 93 bzw. 137 Euro pro kW_p zu rechnen.

Abgesehen von den genannten Aspekten sind die Kosten für Wechselrichter, elektrische Komponenten, Netzanschluss und Projektierung nach aktuellem Kenntnisstand in den meisten Fällen mit denen für PV-FFA vergleichbar. In geringem Umfang können Einsparungen erzielt werden, wenn auf eine Umzäunung der Anlage verzichtet wird.

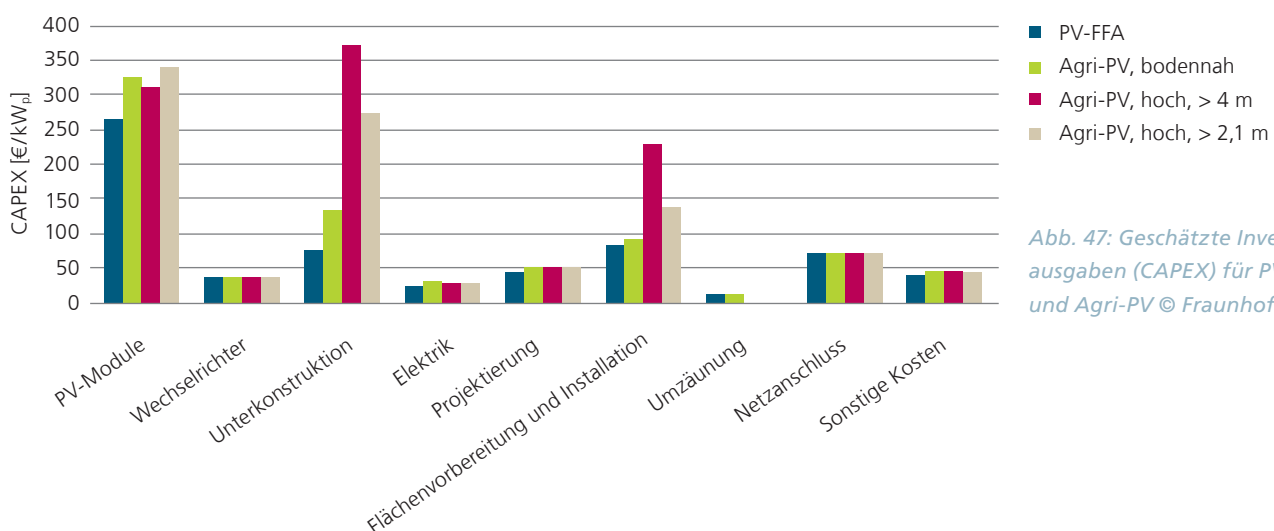


Abb. 47: Geschätzte Investitionsausgaben (CAPEX) für PV-FFA und Agri-PV © Fraunhofer ISE

4.2 Operative Kosten

Die Kosten der Agri-PV können individuell stark variieren und im Gegensatz zu den Investitionskosten sind bei den Betriebskosten tendenziell Einsparungen gegenüber PV-FFA zu erwarten. Verantwortlich für die Einsparungen sind im Wesentlichen folgende Aspekte:

1. Die Kosten der Bereitstellung der Fläche sinken von etwa 2 Euro auf 1,3 bis 1,6 Euro pro kW_p. Für diese Abschätzung wurde angenommen, dass sich die Flächenkosten für Agri-PV-Systeme an den landwirtschaftlichen Pachtpreisen orientieren und sich gleichmäßig auf den Landwirtschaftsbetrieb und die Betreiberin oder den Betreiber der Agri-PV-Anlage verteilen. Je nach Eigentümerstruktur und Geschäftsmodell kann dieser Wert variieren. Im Ackerbau und auf Grünland sind Einsparungspotenziale eventuell höher, da dort im Vergleich zum Gartenbau niedrigere Pachtpreise üblich sind.
2. Durch die landwirtschaftliche Nutzung entfallen PV-seitig die Kosten der Flächenpflege unter den Modulen.
3. Höhere Kosten entstehen hingegen voraussichtlich für die Reinigung der Module oder Reparaturen an der Anlage, wenn diese in größerer Höhe, z. B. mit Hilfe von Hebebühnen, durchgeführt werden müssen. Da in Deutschland Reinigungskosten für PV-Module aufgrund der regelmäßigen Regenfälle jedoch bislang nur eine untergeordnete Rolle spielen, ist der Mehraufwand voraussichtlich überschaubar. In Regionen mit höherer Wahrscheinlichkeit für Verschmutzungen können die Mehrkosten für die Reinigung je nach Reinigungstechnik deutlich stärker ins Gewicht fallen. Zu den Langzeitauswirkungen von Düngern und Pflanzenschutzmitteln auf die Unterkonstruktion und die PV-Module gibt es derzeit noch kaum Erfahrungen.

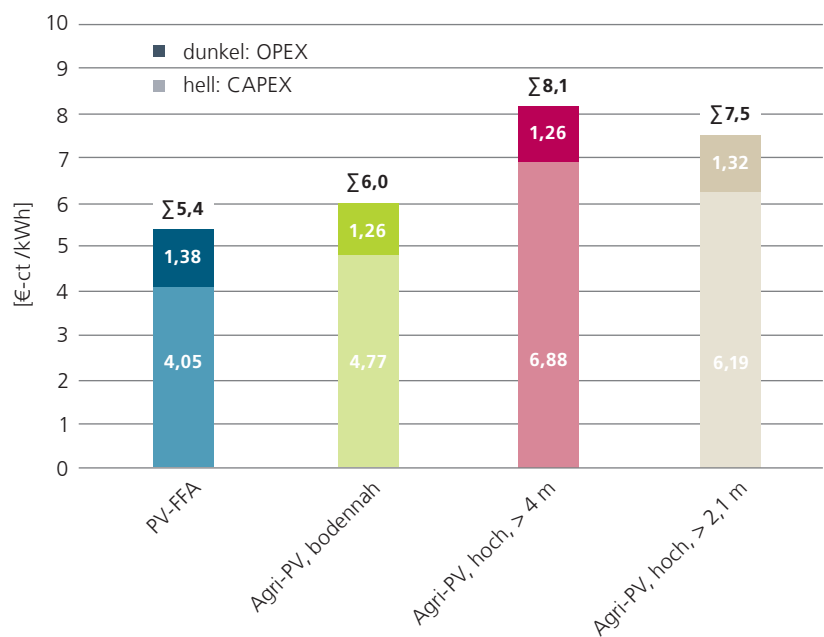
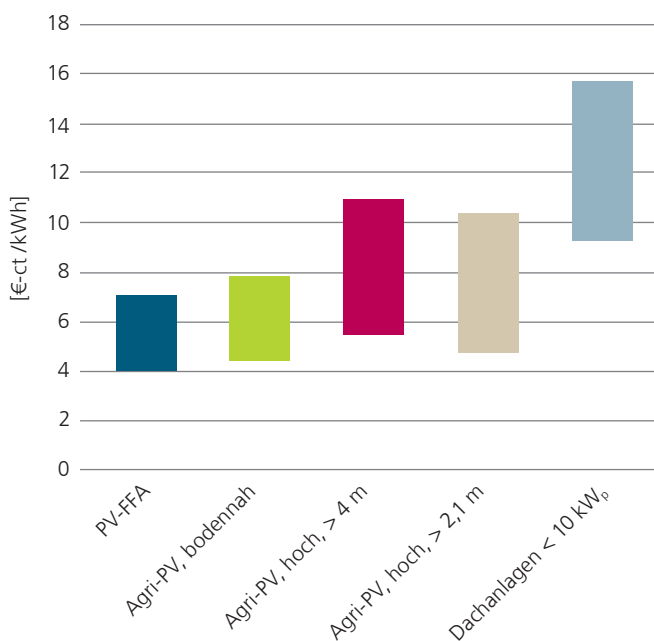


Abb. 48: Geschätzte Stromgestehungskosten unterteilt nach Investitionsausgaben (CAPEX) und Betriebskosten (OPEX) von PV-Freiflächenanlagen und Agri-PV im Vergleich
© Fraunhofer ISE

4.3 Stromgestehungskosten

Im Ergebnis sind die Kosten für die Produktion von Strom bei hochaufgeständerten Agri-PV-Anlagen (> vier Meter) über eine Laufzeit von 20 Jahren mit Stromgestehungskosten von durchschnittlich 8,15 Eurocent pro kWh um etwa 50 Prozent höher als die bei einer durchschnittlichen PV-FFA und im Durchschnitt kosteneffizienter als kleine Dachanlagen. Für bodennahe Agri-PV-Systeme liegen die Stromgestehungskosten mit durchschnittlich 6,03 Eurocent hingegen nur geringfügig über denen einer PV-FFA. Die Bandbreite der Stromgestehungskosten von Agri-PV im Vergleich zu PV-FFA und kleinen Dachanlagen ist in Abbildung 40 dargestellt.

Nicht berücksichtigt wird bei der Kostenabschätzung, dass Skalierungseffekte im Ackerbau und Grünland durch tendenziell höhere Schlaggrößen und damit größere Agri-PV-Anlagen zu einem Kostenvorteil führen können. Derselbe Vorteil dürfte im Ackerbau und Grünland auch hinsichtlich der Fixkosten (z. B. Projektierung und Netzanschluss) zum Tragen kommen, da diese bei steigender Anlagengröße im Verhältnis geringer ausfallen und sich die Gesamtwirtschaftlichkeit verbessern kann. Andererseits können auch kleine Anlagen, die aufgrund der kleinen Schlaggrößen vermehrt im Gartenbau zu finden sein werden, Vorteile für die Wirtschaftlichkeit mit sich bringen, z. B. wenn Landwirtschaftsbetriebe den erzeugten Strom selbst nutzen. Bei einer entsprechenden Ausgestaltung des Regelrahmens könnten so bei dezentralen und verbrauchernahen Standorten zusätzliche Anreize für den Bau von Agri-PV-Anlagen geschaffen werden.



4.4 Eigenverbrauch und Stromerlöse

Strom aus einem Agri-PV-Kraftwerk ist meistens dann am lukrativsten, wenn er für den Eigenverbrauch genutzt wird und so den externen Strombezug unmittelbar verringert. Beispielsweise können bei einem gewerblichen Strompreis von 14 bis 16 Eurocent pro Kilowattstunde^[25] (und Stromgestehungskosten um 7 Eurocent) pro Kilowattstunde 7 bis 9 Eurocent pro Kilowattstunde eingespart werden. Vorteilhaft für einen hohen Direktverbrauch ist ein Verbrauchsprofil, das dem Erzeugungsprofil ähnelt, mit Spitzen um die Tagesmitte und im Sommerhalbjahr. Je nach Ausrichtung der Agri-PV-Anlage können sich diese Erzeugungsspitzen verschieben.

Bei speicherfähigen Anwendungen wie Kühlung lässt sich das Verbrauchsprofil durch thermische Speicher an die Stromproduktion anpassen. Auch beim Laden von Elektrofahrzeugbatterien kann das Erzeugungsprofil berücksichtigt und der Eigenverbrauch gesteigert werden.

Angeichts der sinkenden Kosten für stationäre Energiespeicher kann ihr Einsatz bei einem günstigen Verbrauchsprofil ebenfalls wirtschaftlich sein und sollte im Einzelfall geprüft werden. Für PV-Strom, der nicht sofort verbraucht oder einem Speicher zugeführt werden kann, muss eine Abnehmerin oder ein Abnehmer gefunden werden. Grundsätzlich kommen dafür EEG-Modelle oder Stromlieferverträge in Frage. Unter welchen Umständen eine EEG-Vergütung erhalten werden kann wird in Kapitel 7.4 dargelegt.

Verschiedene Energieversorgungsunternehmen bieten Betreiberinnen und Betreibern von PV-Kraftwerken eine Abnahme des Stroms über Stromlieferverträge an. Die Umweltbank hat beispielsweise einen Muster-Stromliefervertrag für PV-FFA-Projekte entwickelt.

Abb. 49: Geschätzte Stromgestehungskosten (LCOE) für PV-Freiflächenanlagen und Agri-PV

© Fraunhofer ISE

4.5 Geschäftsmodelle

Dadurch, dass bei Agri-PV die landwirtschaftliche Ebene mit- einbezogen wird, gestalten sich die Geschäftsmodelle oftmals komplexer als bei PV-FFA. Je nach Konstellation der Projekt- beteiligten sind bei der Umsetzung verschiedene Akteure bzw. Aufgabenbereiche mit unterschiedlichen Funktionen involviert.

Dabei lassen sich mindestens vier Bereiche unterscheiden:

1. Bereitstellung der Fläche (Eigentümerschaft)
2. Landwirtschaftliche Bewirtschaftung der Fläche
3. Bereitstellung des PV-Systems
(Eigentümerschaft/Investment)
4. Betrieb des PV-Systems

Basisfall »Alles aus einer Hand«

Im einfachsten Geschäftsmodell können alle vier Bereiche von einer Partei übernommen werden – typischerweise durch einen landwirtschaftlichen Betrieb. Dieses Modell ist vor allem bei kleineren und hofnahen Agri-PV-Systemen in den alten Bundesländern zu erwarten. Denn hier sind diejenigen, die die landwirtschaftliche Fläche bewirtschaften, oft auch ihre Eigentümerinnen und Eigentümer und der Investitionsaufwand könnte überschaubar sein. Dieses Geschäftsmodell bietet mehrere Vorzüge: Zum einen sind die Kosten für die Projektie- rung und der Verhandlungsaufwand bei Verträgen geringer.

Was sollte ein Landwirtschaftsbetrieb idealerweise mitbringen?

Vorteilhafte Faktoren für eine wirtschaftliche Umsetzung von Agri-PV:

- Guter Netzanschluss bezüglich Nähe und Kapazität
- Reihengewirtschaftung
- Dauerkulturen
- Geschützter Anbau
- Geringer Maschineneinsatz / niedrige Durchfahrtshöhe
- Große, zusammenhängende Fläche (> 1 Hektar)
- Geringe Hangneigung
- Hoher und flexibler Eigenverbrauch (z. B. Kühlung, Trocknung, Verarbeitung)
- Investitionsbereitschaft

Zum anderen sind Vor- und Nachteile eines Agri-PV-Systems leichter abzuschätzen, wenn sich die Erträge der landwirt- schaftlichen und der photovoltaischen Aktivität bei derselben wirtschaftlichen Einheit niederschlagen. Dies ist bei Agri-PV- Systemen wegen möglicher Wechselwirkungen zwischen den beiden Aktivitätsbereichen besonders relevant. So können z. B. bei bifazialen PV-Modulen durch die Auswahl der Pflanzenkultur und die landwirtschaftliche Bewirtschaftung die Albedowerte und somit die Stromerträge erhöht werden. Auch die Möglichkeit eines Eigenverbrauchs des erzeugten Stroms sowie die Tatsache, dass viele Landwirtschaftsbetriebe durch Dachanlagen bereits Erfahrung mit dem Betrieb von PV-Systemen haben, sprechen für dieses Geschäftsmodell.

Externes Landeigentum

In vielen Fällen wird sich die Fläche jedoch nicht im Eigentum des landwirtschaftlichen Betriebs befinden. Darauf weist der hohe Pachtanteil in Deutschland vor allem in den neuen Bundes- ländern hin ^[26]. Wenn zumindest die übrigen drei Verantwor- tlichkeiten bei dem Landwirtschaftsbetrieb gebündelt sind, kommen diesem auch in dieser Konstellation die zuvor beschrie- benen Synergieeffekte zugute. Wie bei PV-FFA-Projekten sind daher langfristige Verträge, üblicherweise über 20 Jahre, zur Landpacht und -nutzung notwendig.

Externes PV-Investment

Bei größeren Agri-PV-Systemen dürfte auch die Eigentü- merschaft des PV-Systems seltener sein und die Wahrscheinlichkeit externer Investitionen steigen. Teileigentümerschaften können hier dazu beitragen, die Anreizstruktur für eine synergetische Landdoppelnutzung zu erhalten. Je größer der Anteil von Fremdkapital, desto schwieriger wird es jedoch im laufenden Betrieb den Nutzen beider Produktionsebenen im Blick zu behal- ten. Für dieses Geschäftsmodell sprechen hingegen Skalierungsmöglichkeiten sowie mögliche Optimierungen durch eine höhere Arbeitsteilung.

Geteilte Verantwortlichkeiten

Im Beispiel der Versuchsanlage in Heggelbach ist die Zusammensetzung der Akteurinnen und Akteure relativ komplex. Weder Land-, noch PV- oder Anlageneigentum, noch der Betrieb der Landwirtschaft oder des PV-Systems befinden sich in einer Hand. Die Grundstruktur des dazu nötigen Vertragsgeflechts ist in Abbildung 41 dargestellt. Welche Konstellationen sich in Deutschland durchsetzen werden, ist offen und wird wesentlich vom zukünftigen Regelrahmen abhängen. Es sind auch genossenschaftliche Modelle denkbar, bei denen mehrere Landwirtinnen und Landwirte zusammenwirken.

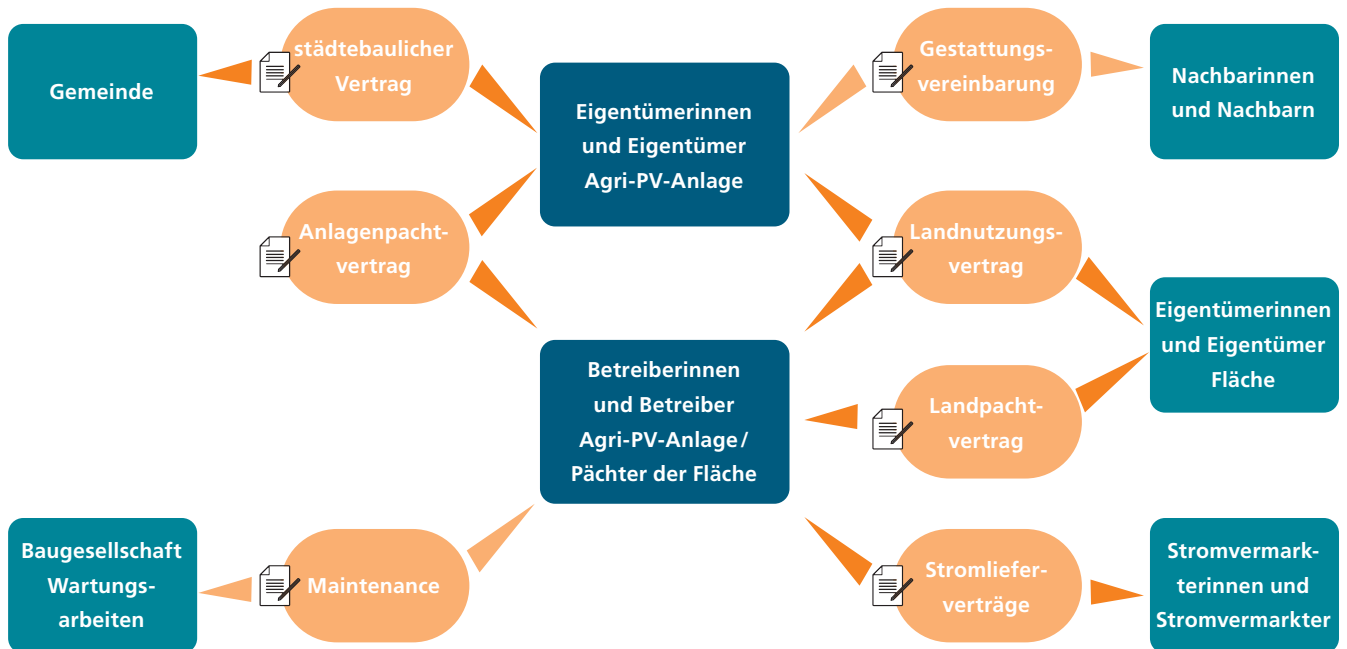


Abb. 50: Interessensgruppen und Vertragsmodell © Fraunhofer ISE

Tab. 06: Konstellationen verschiedener Agri-PV-Geschäftsmodelle (in Anlehnung an Schindele et. al. 2019^[5])

Geschäftsmodell	Funktion			
	Bereitstellung Fläche	Landwirtschaftliche Bewirtschaftung	Bereitstellung PV-System	Betrieb PV-System
1. Basisfall	Landwirtschaftsbetrieb			
2. Externes Landeigentum	Landeigentümerinnen und Landeigentümer	Landwirtschaftsbetrieb		
3. Externes PV-Investment	Landwirtschaftsbetrieb		PV-Investorinnen und Investoren	Landwirtschaftsbetrieb
4. Nur Bewirtschaftung und Betrieb	Landeigentümerinnen und Landeigentümer	Landwirtschaftsbetrieb	PV-Investorinnen und Investoren	Landwirtschaftsbetrieb
5. Nur Bewirtschaftung	Landeigentümerinnen und Landeigentümer	Landwirtschaftsbetrieb	PV-Investorinnen und Investoren	PV-Betreiberinnen und Betreiber

5 Technik

Die Art der Stromerzeugung funktioniert bei Agri-PV-Anlagen auf die gleiche Weise wie bei PV-FFA. Agri-PV stellt wegen der gleichzeitigen Bewirtschaftung der genutzten Fläche jedoch ganz andere Ansprüche an die technischen Komponenten und die Aufständerung der Anlage: Ob Modultechnologie, die Höhe und Ausrichtung der Anlage, die Unterkonstruktion oder das Fundament – alles sollte an die Bewirtschaftung durch Landmaschinen und die Bedürfnisse der Pflanzen angepasst werden. Auch ein durchdachtes Licht- und Wassermanagement ist wichtig, um ausreichend hohe und gleichmäßige Erträge zu sichern.

Um die Doppelnutzung der Fläche für landwirtschaftliche Produktion und Stromerzeugung zu ermöglichen, werden die PV-Module bei hoch aufgeständerten Anlagen je nach Anwendung drei bis fünf (im Hopfenbau auch über sieben) Meter über dem Feld installiert. So können auch große landwirtschaftliche Maschinen, wie z. B. Mähdrescher, die Fläche unter der Agri-PV-Anlage befahren. Damit die Pflanzen ausreichend Licht und Niederschlag bekommen, werden die Reihenabstände zwischen

den PV-Modulen im Vergleich zu gewöhnlichen PV-FFA in vielen Fällen vergrößert. Das reduziert den Flächendeckungsgrad typischerweise auf etwa ein Drittel. In Kombination mit der hohen Aufständerung sichert dieses Vorgehen eine ausreichende Lichtverfügbarkeit. Bei der Verwendung nachgeführter PV-Module kann das Lichtmanagement spezifisch an den Entwicklungszustand und die Bedürfnisse der jeweiligen Kulturpflanzen angepasst werden^[27]. Zeitgleich erhöht sich jedoch der technische sowie der Steuer- und Regelungsaufwand.

Die Unterkonstruktion, und teilweise auch die PV-Module, unterscheiden sich häufig von denen, die in PV-FFA eingesetzt werden. Zur Wahl stehen verschiedene Technologien und Bauformen, die sich jeweils an die standortspezifischen Anforderungen und die Landwirtschaft anpassen. Allgemein sollten Agri-PV-Anlagen dem aktuellen Stand der Technik entsprechen und die gängigen Regelwerke und Normen erfüllen (siehe Abschnitt 2.3 zur DIN SPEC).

*Abb. 51: Hoch aufgeständerte Anlage mit Möglichkeit zur Bewirtschaftung mit dem Kartoffelvollernter
© Hofgemeinschaft Heggbach*



*Abb. 52: PV-Module mit erweiterten Zellzwischenräumen und Schutzfunktion
in den Niederlanden © BayWa r.e.*



5.1 Ansätze für Agri-PV-Anlagenkonstruktionen

Die Agri-PV, wie sie bereits in Ländern wie Frankreich und Japan angewendet wird, nutzt häufig hoch aufgeständerte Anlagen. Die lichte Höhe beschreibt dabei den freien vertikalen Raum zwischen dem Grund und dem niedrigsten Konstruktionselement. Im Folgenden werden verschiedene Möglichkeiten der Anlagenkonstruktion aufgezeigt.

Hoch aufgeständerte Anlagen bergen großes Potenzial für Synergieeffekte (siehe Kapitel 3). Dass die Bewirtschaftung unter den PV-Modulen weiterhin möglich ist, stellt vor allem hochaufgeständerte Anlagen im Ackerbau vor statische und wirtschaftliche Herausforderungen.

Wenn PV-Module neben der Stromerzeugung auch eine Schutzfunktion vor Hagel, Regen, Nachtfrost und anderen Extremwetterereignissen übernehmen, ist die Verwendung von PV-Sondermodulen naheliegend. Abbildung 43 zeigt eine Forschungsanlage der Firma BayWa r.e. über einer Obstplantage. Diese Anlage aus den Niederlanden wurde mit Modulen gebaut, die erweiterte Zellzwischenräume aufweisen, wodurch mehr Sonnenlicht für die Pflanzen zur Verfügung steht und gleichzeitig die Dach- und Schutzfunktion durch transparente Module erhöht werden kann.

Synergieeffekte können auch bei bodennah montierten Modulen auftreten. Die Firma Next2Sun verwendet hierzu bifaziale Module, die senkrecht aufgestellt werden. Diese Art von Anlagen ist aufgrund der niedrigeren Unterkonstruktion kostengünstiger, allerdings bietet sie auch weniger Optionen für das Lichtmanagement. Ein Vorteil der bodennahen Anlagen könnte eine Reduktion der Windgeschwindigkeit sein, was sich wiederum positiv auf die Verdunstung und verringerte Winderosionsgefahr auswirkt.

Eine weitere Ausführungsform sind die von der Firma TubeSolar AG verwendeten horizontal aufgeständerten PV-Röhrenmodule. Dieser innovative Ansatz verspricht eine räumlich gleichmäßige Durchlässigkeit für Licht und Wasser, was vor allem in der landwirtschaftlichen Produktion ohne künstliche Bewässerung vorteilhaft ist. Die Firma Agratio GmbH kombiniert diese neuartigen Module mit einer kostengünstigen Seilkonstruktion als Aufständering.

In Japan werden unter dem Begriff »Solar Sharing« besonders schmale Module über landwirtschaftlichen Flächen installiert, um die Lichtverfügbarkeit und -Verteilung anzupassen. Viele weitere technische Lösungen sind denkbar – jede mit ihren spezifischen Vor- und Nachteilen.

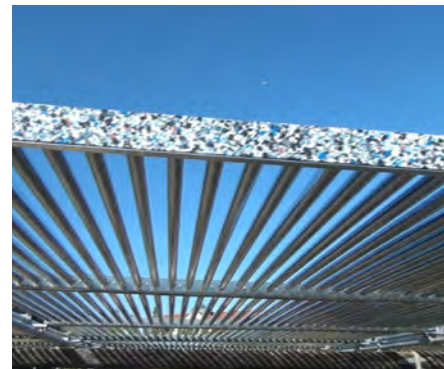
*Abb. 53: Bifaziale, senkrecht aufgestellte Module von Next2Sun, Eppelborn-Dirmingen
© Next2Sun GmbH*



*Abb. 54: PV-Module über einem Folientunnel
© BayWa r.e.*



*Abb. 55: Spezielle Dünnschicht-Module in Röhrenform der Firma TubeSolar
© TubeSolar AG*



*Abb. 56: Halbschatten durch Solarröhren, eingehängt zwischen Spannseilen der Firma TubeSolar
© sbp sonne GmbH*



Abb. 57: Hoch aufgeständerte Anlagen mit schmalen PV-Modulen in Italien © REM Tec



5.2 Modultechnologien

Grundsätzlich lassen sich alle Typen von PV-Modulen für Agri-PV nutzen. Module auf der Basis von waferbasierten Silizium-Solarzellen machen etwa 95 Prozent des PV-Weltmarkts aus. Der übliche Aufbau sieht eine vorderseitige Glasscheibe und eine rückseitige, weiße Deckfolie vor. Dazwischen werden lichtundurchlässige Solarzellen im Abstand von 2–3 mm seriell verbunden und einlamiert. Ein Metallrahmen dient der Befestigung und Stabilisierung.

Im Fall einer transparenten rückseitigen Abdeckung (Glas, Folie) wird das Licht aus den Zellzwischenräumen weitgehend durchgelassen und erreicht bei Agri-PV-Systemen die darunter liegenden Pflanzen. Bei den bisher üblichen PV-Modulen liegt der Flächenanteil der Zwischenräume bei 4 bis 5 Prozent. Zur Steigerung der Lichttransmission können die Zwischenräume jedoch erweitert und die Modulrahmen durch Klemmhalterungen ersetzt werden. Module mit mehr transparenten Flächenanteilen schützen Pflanzen vor Umwelteinflüssen, ohne die Lichtverfügbarkeit in gleichem Maße einzuschränken.

Bifaziale Module können zusätzlich das Licht, das auf der Rückseite eintrifft, zur Stromerzeugung nutzen. Durch sie können die Stromerträge je nach Rückseitenstrahlung um bis zu 25 Prozent gesteigert werden. Durch die tendenziell größeren Reihenabstände und die höhere Aufständering bei Agri-PV empfangen die Modulrückseiten typischerweise mehr Licht als bei herkömmlichen PV-FFA. Daher eignen sich bifaziale PV-Module oft sehr gut für Agri-PV. Ein weiterer Vorteil von Modulen mit Doppelglas-Aufbau ist die erhöhte Resttragfähigkeit bei Glasbruch, was der Verkehrs- und Arbeitssicherheit zugutekommt.

Dünnschichtmodule (CIS, CdTe, a-Si/ μ -Si) können auf flexiblen Substraten realisiert werden, die eine zylindrische Krümmung ermöglichen. Bei sonst gleichem Aufbau ist ihr Flächengewicht um ca. 500 Gramm pro Quadratmeter niedriger als das von Modulen mit waferbasierten Silizium-Solarzellen. Allerdings bieten sie geringere Wirkungsgrade. Bei den flächenbezogenen Kosten liegen Dünnschichtmodule etwas niedriger als solche mit Silizium-Solarzellen.

Ähnliches gilt auch für die organische Photovoltaik (OPV). Im Gegensatz zu siliziumbasierten, kristallinen PV-Modulen bestehen sie aus organischen Kohlenstoffverbindungen. Die aktiven Schichten der OPV lassen sich im Prinzip auch spektral selektiv einsetzen und können in flexible Trägerfolien eingebunden werden. So kann beispielsweise in PV-Folientunneln ein Teil des Sonnenspektrums transmittiert und von den darunter wachsenden Pflanzen genutzt werden. Herausforderungen von OPV-Folien liegen derzeit unter anderem in deren geringen Wirkungsgraden und Haltbarkeit.

Bei der konzentrierenden Photovoltaik (CPV) wird das Licht durch Linsen oder Spiegel auf kleine photoaktive Flächen gebündelt. CPV-Module müssen der Sonne nachgeführt werden, mit Ausnahme von sehr schwach konzentrierenden Systemen. Diffuses Licht wird überwiegend transmittiert. Auch spektral selektive Ansätze können durch CPV umgesetzt werden, wenn die reflektierenden Schichten nur einen Teil des Sonnenspektrums reflektieren. Für den Einsatz bei Agri-PV gibt es aktuell nur sehr wenige kommerzielle Anbieter für CPV-Module. Ein Beispiel ist die Schweizer Firma Insolight.



Abb. 58: Hoch aufgeständerte Anlage mit durchgängigen Modulreihen © Sun'Agri

5.3 Unterkonstruktion und Fundament

5.3.1 Bauweise der Unterkonstruktion

Neben der Durchfahrtshöhe und der Arbeitsbreiten ist bei Agri-PV-Anlagen auch das Vorgewende der später verwendeten landwirtschaftlichen Maschinen zu beachten. Der Abstand zwischen dem Boden und der Unterkante der Konstruktion (lichte Höhe) beträgt im Ackerbau, bei hoch aufgeständerten Systemen, typischerweise mindestens fünf Meter. Vorteile solcher lichten Höhen sind neben der Befahrbarkeit der Fläche eine homogenere Lichtverteilung unter den Modulen. Andererseits sind die Investitionskosten für die Unterkonstruktion bei bodennahen Agri-PV-Anlagen aufgrund eines verminderten Stahlverbrauchs und geringerer Ansprüche an die Statik entsprechend geringer. Mit deutlich größeren Reihenabständen erhöhen sich der Flächenbedarf und damit die Kosten einer Agri-PV-Anlage im Verhältnis zum Stromertrag.

5.3.2 Ein- und zweiachsige Nachführung

Es gibt Anlagen, beispielsweise in Frankreich, die mit einem ein- oder zweiachsigen Nachführsystem (Tracking) arbeiten. Das bedeutet, dass die Ausrichtung der PV-Module durch einen Mechanismus an den jeweiligen Stand der Sonne angepasst wird. Bei der einachsigen Nachführung folgt das Modulfeld der Sonne nur entweder horizontal nach dem Höhenwinkel der Sonne (Elevation) oder vertikal nach der Sonnenbahn (Azimut). Zweiachsige Tracker können beides und liefern daher den größten Solarstromertrag. Allerdings kann bei zweiachsigen Systemen mit großen Modultischen ein Kernschatten unter den Modulen entstehen, während andere Bereiche der landwirtschaftlichen Fläche gar nicht beschattet werden. Ungeachtet der höheren Anschaffungs- und Wartungskosten kann das Tracking jedoch die Energieerträge und das Lichtmanagement für den Pflanzenanbau optimieren^[27] (Kapitel 5.4). Durch den flexiblen Neigungswinkel können nachgeführte Systeme den konstruktiven Schutz vor Hagel oder extremer Sonne durch eine entsprechende Ausrichtung optimieren.

Abb. 59: Einachsiges Tracker-system einer Demonstrations-anlage in Frankreich © Sun'Agri



5.3.3 Verankerung und Fundamentierung

Die Verankerung bzw. die Fundamentierung muss die Statik- und Standsicherheit der Agri-PV-Anlage gewährleisten. Beim Bau einer Anlage ist ein Nachweis über die Einhaltung dieser Sicherheitsanforderungen erforderlich (siehe Kapitel 5.7.2.). Um wertvolle landwirtschaftliche Böden zu schonen, wird von Betonfundamenten abgeraten. Alternativen sind Ramm- oder Schraubfundamente, welche den rückstandslosen Abbau der Anlage ermöglichen.

Konzepte zu mobiler Agri-PV bieten die Möglichkeit, die Anlage ohne den Einsatz von größeren Maschinen auf- und wieder abzubauen und an anderer Stelle zu montieren. Ein möglicher Vorteil: Da es sich hierbei nicht um eine bauliche Veränderung handelt, ist eventuell kein Bauantrag notwendig. Mobile Agri-PV kann so flexibel an die Landwirtschaft angepasst und unter anderem auch für spontane Einsätze in Krisengebieten genutzt werden.

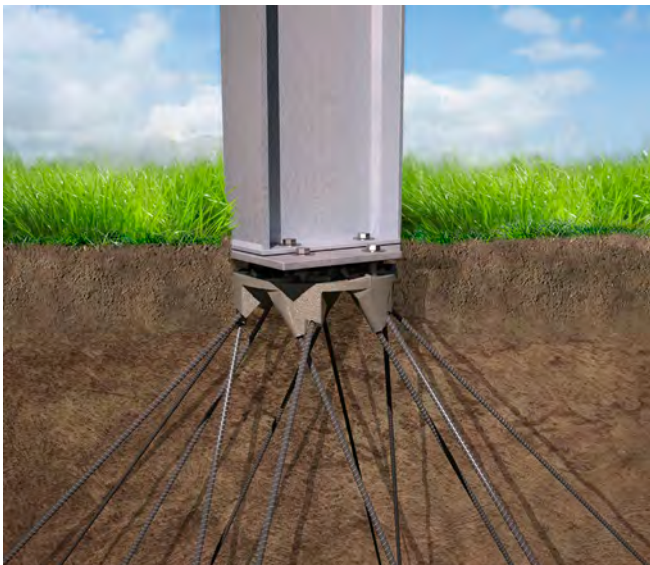


Abb. 60: Spinnanker mit Ankerplatte und Gewindestäben fundamentieren das Montagesystem im Boden
© Spinnanker GmbH

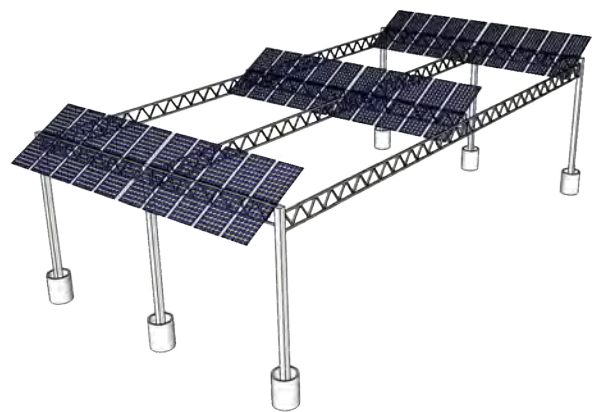
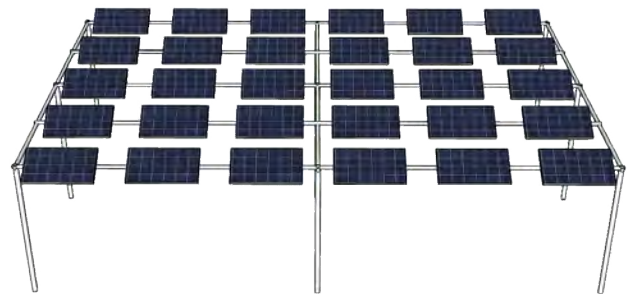


Abb. 61: Illustration verschiedener Anlagentypen mit Ost-West-, Süd- und Süd-Ost-Ausrichtung © Fraunhofer ISE

5.4 Lichtmanagement

Durch den täglichen Lauf der Sonne und sich über das Jahr hinweg verändernde Sonnenstände wird die landwirtschaftliche Fläche stets unterschiedlich verschattet. Für ein gesundes Pflanzenwachstum, eine gleichmäßige Abreife und eine Maximierung der potenziellen Synergieeffekte ist in den meisten Fällen möglichst viel Lichthomogenität wünschenswert. Dies kann auf verschiedene Weise gelingen:

1. Simulationen und Messungen ergaben, dass eine Orientierung nach Süd-Westen oder Süd-Osten mit einer Abweichung von Süden um 30 bis 50 Grad in eine gleichmäßige Verschattung resultiert. Für den Standort Heggelbach wurde eine Abweichung von Süden um 45 Grad umgesetzt. Dabei wurden Einbußen von etwa fünf Prozent bei der Stromerzeugung einkalkuliert. Aufgrund lokaler Gegebenheiten kann die tatsächliche Ausrichtung abweichen.
2. Eine weitere Möglichkeit ist, die Südausrichtung beizubehalten und schmalere PV-Module zu verwenden. Dieser Ansatz ist unter der Bezeichnung »Solar Sharing« häufig in Japan zu finden.
3. Gleichmäßige Lichtverhältnisse können auch durch eine Ost-West-Ausrichtung der PV-Module erzielt werden. Die Schattenwanderung über den Tag hinweg ist bei dieser Ausrichtung maximal. Um dennoch einen Kernschatten unter den fest installierten und vollständig lichtundurchlässigen Modulen zu vermeiden, sollte die Breite der Modulreihen deutlich kleiner sein als die Höhe der Anlage. Als Daumenregel für die Durchfahrts Höhe kann als Minimum das 1,5-fache der Modulreihenbreite angesetzt werden. Bei nachgeführten Modulen sollte dieser Faktor mindestens 2 betragen. Transparente Module hingegen verringern den Faktor in beiden Fällen je nach Grad der Lichtdurchlässigkeit.
4. Eine weitere Möglichkeit, gezieltes Lichtmanagement und hohe Stromerträge zu erreichen, ist eine ein- oder zweiachsige Nachführung von PV-Modulen. Wie bereits in Kapitel 5.3.2 beschrieben, ist diese Variante allerdings mit höheren Investitions- und Wartungskosten verbunden. Systeme, die mit großen Modultischen über zwei Achsen nachführen, sind für den Anbau von Kulturpflanzen tendenziell weniger zu empfehlen, da es hinter den Modulen typischerweise zu Kernschatten kommt. Andere Bereiche der Fläche sind dagegen permanent der vollen Sonneneinstrahlung ausgesetzt.



Abb. 62: Die Schattenstreifen der PV-Module wandern mit dem Sonnenstand © Universität Hohenheim



Abb. 63: Schattenwurf der lichtdurchlässigen PV-Module über Weinreben © HS Geisenheim



Abb. 64: Konzept einer Regenauffangvorrichtung mit Speichertank © Fraunhofer ISE

5.5 Wassermanagement

Bei Regen kann es durch Abtropfen des Niederschlagswassers an den Modulkanten zu Bodenerosion und Abschwemmen des Bodens kommen. Um negative Folgen für das Pflanzenwachstum und die Bodenqualität zu vermeiden, bieten sich verschiedene Ansätze an: So können – ähnlich wie beim Lichtmanagement – schmale PV-Module oder PV-Röhren die Ansammlung größerer Wassermengen an der Modulkante verhindern. Soll durch die PV-Module hingegen ein konstruktiver Schutz der Kulturen bewirkt werden, bietet es sich eher an, Abtropfkanten durch eine Nachführung der PV-Module^[28] oder durch ein Abführen des Regenwassers zu verhindern. Bei Letzterem ist in den meisten Fällen wichtig, die Wasserverfügbarkeit durch ein Bewässerungssystem sicher zu stellen. Gerade in ariden Regionen können durch das Auffangen und Speichern von Regenwasser Grundwasservorräte geschont oder Landwirtschaft überhaupt erst ermöglicht werden.



Abb. 65: Agri-PV-Anlage in Heggelbach mit einer Leistung von 194 kW_p auf etwa einem Drittel Hektar © Fraunhofer ISE

5.6 Größe der Photovoltaikanlage

Im internationalen Vergleich variiert die Größe von Agri-PV-Anlagen sehr stark. Während es in Japan vermehrt kleinere Anlagen von 30 bis 120 kW_p gibt, wurden in China bereits Agri-PV-Anlagen von mehreren hundert MW_p gebaut. Entscheidende Kriterien sind neben der Wirtschaftlichkeit, der Dezentralität der Energieerzeugung und sozialen Aspekten auch Auswirkungen auf die Kulturlandschaft und die damit einhergehende gesellschaftliche Akzeptanz. Welchen Pfad Deutschland einschlagen wird, ist offen und dürfte auch von Region zu Region unterschiedlich ausfallen. In eher kleinflächigen Regionen Süddeutschlands mit sensiblen Landschaftsbild liegt die Umsetzung kleinerer Systeme nahe, typischerweise über Sonderkulturen. In großflächigen Regionen Nord- und Ostdeutschlands könnten hingegen größere Systeme im Ackerbau sinnvoll sein, nicht zuletzt, um die geringere jährliche Sonneneinstrahlung wirtschaftlich durch Skaleneffekte zu kompensieren.



Abb. 66: Solarpark Eppelborn-Dirmingen mit 2 MW_p mit vertikalen Solarzäunen von Next2Sun © Next2Sun GmbH

Der Flächenbedarf von hoch aufgeständerten Agri-PV-Systemen liegt typischerweise 20 bis 40 Prozent über dem von PV-FFA. Hoch aufgeständerte Agri-PV-Systeme erreichen somit eine Leistung von 500 bis 800 kW_p pro Hektar, eine konventionelle PV-FFA je nach Anlagentyp dagegen 700 bis 1100 kW_p pro Hektar. Bodennahe Agri-PV-Systeme erreichen hingegen nur etwa 250 bis 430 kW_p pro Hektar, der Flächenbedarf ist in diesem Fall somit etwa drei Mal so hoch wie bei PV-FFA.

5.7 Genehmigung, Installation und Betrieb

In aufgeständerten Agri-PV-Anlagen, die per Definition als bauliche Anlage einzustufen sind, werden in der Regel Glas/Glas-Module eingesetzt. Für die PV-Module gibt es in Europa einerseits elektrotechnische Anforderungen hinsichtlich ihrer Sicherheitsqualifikationen nach »Niederspannungsrichtlinie 2014/35/EU« (IEC-Zertifizierung für die Zulassung als Elektrobauteil), und andererseits für die Verwendung von Glas im Bauwesen bestimmte Anforderungen an ein Bauprodukt, welche in der »Bauprodukteverordnung (EU) 305/2011« geregelt sind.

Im Gegensatz zu herkömmlichen PV-FFA werden Agri-PV-Anlagen zur landwirtschaftlichen Bearbeitung planmäßig mit Maschinen befahren. Damit das Arbeiten unter den Glas/Glas-Modulen ohne Gefahr gewährleistet ist, unterliegt in Deutschland die Planung, Bemessung und Ausführung besonderen Vorschriften. Diese sind jeweils aus den Verwaltungsvorschriften der Technischen Baubestimmungen (VwV TB) des jeweiligen Bundeslandes zu entnehmen. Zudem sind dabei die Anforderungen an die Verwendbarkeit von Bauprodukten in den jeweiligen Landesbauordnungen (LBO) zu beachten.

Für Glas im Bauwesen gelten bestimmte Bemessungs- und Konstruktionsregeln, durch die das geforderte Sicherheits- und Schutzniveau sichergestellt wird. Die Regeln verpflichten zur Verwendung von Glas mit sicherem Bruchverhalten (vgl. Normenreihe »DIN 18008 Glas im Bauwesen – Bemessungs- und Konstruktionsregeln«). Bei hoch aufgeständerten Agri-PV-Anlagen kommt eine Konstruktion zum Tragen, die als Überkopfverglasung bezeichnet werden kann, da üblicherweise ein Arbeiten unterhalb der Module notwendig ist. Ist dies der Fall, muss die Resttragfähigkeit der Konstruktion bei Glasbruch ohne nennenswerte Schadens- und Verletzungsfolgen sichergestellt sein. Dies kann durch die Wahl entsprechender Produkte, wie beispielsweise Verbund-Sicherheitsglas und geeigneter Modulrahmen-Konstruktionen, realisiert werden. Von einzelnen Herstellern sind nach der Niederspannungsrichtlinie IEC-zertifizierte Glas/Glas-PV-Module für die Verwendung im Regelungsbereich von DIN 18008 über eine Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (AbZ) und allgemeine Bauartgenehmigung (aBG) kommerziell verfügbar.

Weicht eine Agri-PV-Anlage von den europäischen und deutschen elektrotechnischen oder bauordnungsrechtlichen Vorschriften ab, braucht man eine gesonderte baubehördliche Genehmigung für die Errichtung bzw. einen entsprechenden Verwendbarkeitsnachweis zur Verwendung des PV-Moduls in diesem speziellen baulichen Kontext. Abgesehen davon, ist für jede Agri-PV-Anlage inklusive Moduleindeckung stets ein Nachweis für die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit zu erbringen. Dies ist abhängig von Geometrie, Standort, Eigengewicht und möglichen auftretenden meteorologischen Einwirkungen, wie Wind, Schnee oder thermischen Lasten. Dabei muss sichergestellt sein, dass die möglicherweise extreme Beanspruchung durch die externen Einwirkungen stets kleiner als die Beanspruchbarkeit der Bauteile ist. Weiterhin muss gewährleistet werden, dass die Lasten der Agri-PV-Anlage, bestehend aus ihrem Eigengewicht und den äußeren Einwirkungen, von der Unterkonstruktion sicher in den Baugrund eingeleitet werden können.

Weiterführende Informationen finden Sie in der Broschüre: »Allianz-BIPV_Techn-Baubestimmungen.pdf«, die unter <https://allianz-bipv.org/> zum kostenlosen Download zur Verfügung steht.

An dieser Stelle sei vermerkt, dass die hier aufgezählten Sachverhalte allgemein gültig für Deutschland sind. Je nach Bundesland des Bauvorhabens ist für jede Agri-PV-Anlage eine Abstimmung mit den zuständigen Baurechtsbehörden zu empfehlen. Hierbei sind die geltenden Anforderungen und Vorschriften vorhabenbezogen (Stichwort: vorhabenbezogene Bauartgenehmigung) zu prüfen bzw. zu bewerten. Konkrete Fälle können hierbei im Einzelfall unter Berücksichtigung der örtlichen Gegebenheiten und konstruktiven Rahmenbedingungen sogar im Regelungsbereich oder mit einem speziellen Nachweiskonzept und besonders ergriffenen Maßnahmen – ggf. mit einer Beantragung von Abweichungen von Vorschriften – gelöst werden.

Zudem könnten sich in Zukunft im Rahmen der politisch gewollten Energiewende gewisse Ausnahmeregelungen für Agri-PV-Anlagen auf Länder- oder Bundesebene ergeben, die dann wiederum von den einzelnen Bundesländern in Landesrecht (gleich Baurecht) umgesetzt werden. Dies ist im weiteren Verlauf zu beobachten.



Abb. 67: Arbeiten in einer Agri-PV-Anlage unter den PV-Modulen © Fabian Karthaus

5.7.1 Genehmigungsverfahren bei Agri-PV-Anlagen

Beim Bau einer Agri-PV-Anlage ergeben sich einige Besonderheiten im Genehmigungsprozess. Die notwendige Dokumentation sollte in enger Abstimmung mit der technischen Seite erfolgen. Tabelle 7 bietet einen Überblick über die erforderlichen Genehmigungen, Gutachten und Dokumente.

Die landwirtschaftliche Fläche unter der Agri-PV-Anlage wurde im Falle der Forschungsanlage in Heggelbach als Sondernutzungsgebiet ausgewiesen. Der Antrag auf landwirtschaftliche Flächenprämien wurde abgelehnt, obwohl weiterhin Ackerbau betrieben wird. Weitere Informationen zu Genehmigungsverfahren sind im Abschnitt 7.2 aufgeführt.

Das Fraunhofer ISE hat gemeinsam mit Projektpartnerinnen und -partnern eine DIN-Spezifikation erarbeitet, um Qualitätsstandards zu definieren, die als Kriterien für Ausschreibungen, Fördertatbestände oder erleichterte Planungsprozesse dienen können (siehe Abschnitt 2.3). Hierzu gehören die Definition von Agri-PV-Messzahlen und entsprechende Prüfverfahren, die von Zertifizierungsstellen wie dem Verband für Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik (VDE) oder dem TÜV angewendet werden können.

Tab. 07: Übersicht über Genehmigungsschritte für Agri-PV

Prozessschritte	Institution	Anmerkungen
Baugenehmigung	Gemeinde	Flächennutzungsplan und Bebauungsplan
Erforderliche Gutachten	Zertifizierte Gutachterinnen und Gutachter	Umwelt-, Boden-, und Blendschutzgutachten. Zudem Windlastenprüfung
Eintragung der Grunddienstbarkeiten (opt.)	Grundbuchamt	zum Beispiel Wegerecht und Eigentumsverhältnisse Antragstellung erfolgt über Notarinnen und Notare
Versicherung	Versicherungsgesellschaft	Im Projekt APV-RESOLA konnte die Pilotanlage in Heggelbach zu den gleichen Konditionen wie eine herkömmliche PV-FFA versichert werden

5.7.2 Installation einer Agri-PV-Anlage am Beispiel Heggelbach

Die Projektierung und die Bauleitplanung werden in der Regel von einer Firma der Solarbranche übernommen. Eine Installation durch den Landwirtschaftsbetrieb kann jedoch grundsätzlich auch z. B. in Kooperation mit dem lokalen Maschinenring durchgeführt werden.

Die technischen Partner sind für alle Planungen und Abläufe bezüglich des Baus, der Installation und des Betriebs der Anlage verantwortlich. Hierzu gehören:

- Suche nach Kooperationen zur Übernahme des überschüssigen Stroms und dessen Einspeisung ins Netz.
- Materialbeschaffung und Logistikplanung
- Baustelleneinrichtung und Bodenschutz
- Aufbau der Anlage
- Konzept für Verschaltung, Blitzschutz und Monitoring
- Netzanschluss
- Technische Instandhaltung und Rückbau

Im Falle der Forschungsanlage in Heggelbach konnte nach der Anhörung im Gemeinderat Herdwangen-Schönach sechs Monate später der Bauantrag eingereicht werden. Einen Monat später wurde die Baugenehmigung erteilt. Die Baufreigabe wurde allerdings an die Überprüfung der Statik durch ein unabhängiges Prüfeningenieursbüro geknüpft. Um die tatsächliche Haltekraft der Verankerung nachzuweisen, wurde zudem ein Bodengutachten erstellt. Die Ergebnisse dieses Gutachtens sowie die Rückmeldungen des prüfenden Ingenieursbüros sind in die Überarbeitung der Agri-PV-Unterkonstruktion eingeflossen.

Abb. 68: Baustraßen zur Vermeidung von Bodenverdichtung © BayWa r.e



Die verschiedenen Aufträge für die Installation der Forschungsanlage wurden gemäß der Beschaffungsordnung an diverse Unternehmen vergeben und der Bauablauf in enger Absprache mit der Hofgemeinschaft Heggelbach koordiniert. Die Leistungselektronik und Verkabelung der Anlage wurde installiert, sodass die Forschungsanlage nach der Fertigstellung zügig ans Netz angeschlossen werden konnte.

5.7.3 Agri-PV im laufenden Betrieb

Durch den Anbau der Nutzpflanzen und insbesondere bei hoch aufgeständerten Systemen sind die PV-Module nicht zu jeder Zeit voll zugänglich. Instandhaltungs- und Reparaturarbeiten sollten deshalb zu Brachzeiten vorgenommen werden, während denen die Fläche nicht landwirtschaftlich genutzt wird. Nicht alle Wartungsfahrzeuge eignen sich dabei für die Arbeiten auf der landwirtschaftlichen Fläche. Bei Arbeiten auf lichter Höhe müssen Arbeitskräfte gesichert sein.

Bei der Bewirtschaftung der Fläche kann Erdreich aufgewirbelt werden und es dadurch zu Verschmutzung der PV-Module kommen. Dies ist vor allem bei starkem Wind und besonders ausgetrockneten Böden der Fall. Soweit möglich sollte die Feldbearbeitung bei solchen Bedingungen deshalb vermieden werden.

Abb. 69: Wartungsarbeiten an der Agri-PV-Anlage in Heggelbach © Fraunhofer ISE



6 Gesellschaft

Für das Gelingen der Energiewende ist eine gesellschaftliche Verankerung durch soziale Akzeptanz entscheidend^[29]. Diese hat zwei Facetten: Die grundsätzliche Zustimmung bzw. Ablehnung von politischen Zielen und konkreten Maßnahmen und die Bereitschaft bzw. Ablehnung der Bürgerinnen und Bürgern zu konkreten Infrastrukturmaßnahmen vor Ort, beispielsweise den Bau von PV-FFA oder Agri-PV-Anlagen. Das Ziel der Bundesregierung, den Stromanteil aus erneuerbaren Energien zu erhöhen, findet in der Bevölkerung technologieübergreifend breite Zustimmung. Dies zeigen wissenschaftliche, repräsentative Meinungsumfragen der letzten Jahre^[30]. Den höchsten Zuspruch mit einer Befürwortungsquote von 92 Prozent der Befragten erfährt der Zubau von Solarstromanlagen auf Hausdächern^[31]. Die Zustimmungsrate zum politischen Ziel, PV-FFA auszubauen, liegt mit 74 Prozent deutlich niedriger und geringer als in den Vorjahren, als sie bei 80 Prozent lag^[30].

Doch auch wenn planungsrechtliche und kommunalpolitische Vorgaben erfüllt sind, wird der Ausbau der erneuerbaren Energieversorgung als konfliktträchtig und stockend wahrgenommen, wenn es darum geht, geeignete Standorte für den Bau neuer Anlagen zu finden^[32]. Dies betrifft auch den Bau von PV-FFA, der auf Ablehnung oder gar Widerstand bei den Menschen vor Ort stoßen kann, wenn die Form und das Ausmaß kritisiert und eine Wertminderung ihrer Häuser und ihrer Erholungslandschaft befürchtet wird. Akzeptanzprobleme auf lokaler Ebene entstehen dadurch, dass auf bestimmten Ebenen der politischen Entscheidungen oder im Rahmen wirtschaftlicher Entscheidungen über den Bau von neuen Anlagen in einer bestimmten Ausprägung und Art und Weise entschieden wird, ohne dass Bürgerinteressen und kommunale Anliegen hinreichend berücksichtigt und den Menschen vor Ort Mitsprache- oder Beteiligungsmöglichkeiten eingeräumt wurden. Es ist deshalb nicht verwunderlich, dass gesellschaftliche Gruppen solche Entscheidungen faktisch nicht akzeptieren, auch wenn sie auf planungsrechtlich oder kommunalpolitisch korrekter Weise zustande gekommen sind.

Es gibt Hinweise darauf, dass eine Agri-PV-Anlage aufgrund der Doppelnutzung von landwirtschaftlichen Flächen allgemein positiver bewertet wird als eine PV-FFA. Dennoch ist auch bei Agri-PV-Anlagen die frühzeitige Einbindung der verschiedenen Interessensgruppen und Bürgerinnen und Bürgern mit einem lokalen Bezug zur geplanten Anlage – bereits während der Planung – von entscheidender Bedeutung. Die Entwicklung eines gemeinsamen Verständnisses der zu erreichenden Nachhaltigkeitsziele, sowohl bei der regionalen Nahrungsmittelproduktion, beim Artenschutz und dem Erhalt der Kultur- und Erholungslandschaft, als auch bei der dezentralen Erzeugung, Speicherung und Nutzung von erneuerbarer Energie, ist dabei besonders wichtig^[29]. Eine transdisziplinäre Vorgehensweise trägt dazu bei, die verschiedenen Interessen und Erwartungen, aber auch Präferenzen und Befürchtungen angemessen zu berücksichtigen, Akzeptanzprobleme zu verringern und mit lokalen Interessensgruppen die Energiewende vor Ort voranzutreiben^[33]. Damit können die regionale Investitionsbereitschaft und die lokale Wertschöpfung gesteigert und die Interessen der Bevölkerung bereits im Vorfeld der Entscheidung über den Bau einer Anlage berücksichtigt werden.

Vor allem subjektive Risiko- und Nutzenabwägungen der jeweiligen Interessengruppen spielen eine bedeutende Rolle: Sie führen zu Befürchtungen über mögliche finanzielle, gesundheitliche oder ästhetische Nachteile, die mit lokalen Veränderungen der Umwelt, insbesondere der Flächennutzung und des Landschaftsbildes, einhergehen^[34]. Es ist daher Aufgabe der Investorinnen und Investoren sowie Projektierenderinnen und Projektierender, frühzeitig mit entsprechenden Kommunikationsstrategien auf die gesellschaftlichen Interessensgruppen zuzugehen, um sie transparent zu informieren und in die Lage zu versetzen, sich einzubringen.

6.1 Einbindung von Bürgerinnen und Bürgern sowie Interessensgruppen

Da es sich bei einer Agri-PV-Anlage um eine sektorenübergreifende Unternehmung zwischen Landwirtschaft und Energieversorgung handelt, ist die Kommunikation und der Dialog mit allen mittelbar und unmittelbar Beteiligten von herausragender Bedeutung. Bei der Etablierung von Infrastrukturprojekten gilt es, Interessenskonflikten vorzubeugen, indem die (lokale) Bevölkerung sowie Interessensgruppen frühzeitig involviert und beteiligt werden. Die Einbindung von Bürgerinnen und Bürgern sowie von Interessensgruppen in den Genehmigungsprozess braucht klare Rahmenbedingungen und sollte auf einem geteilten Problemverständnis aufbauen und zu einer gemeinsam entwickelten Lösungsidee führen. Die Projektziele sollten klar und offen kommuniziert werden, um Missverständnisse über die Rolle und den Prozess der Einbindung von Interessensgruppen sowie Bürgerinnen und Bürgern zu vermeiden^[32]. Der Verständigungsprozess sollte ermöglichen, dass die Beteiligten eine neue Perspektive auf eigenlogische Strukturen in ihren Handlungen, Wertvorstellungen und Präferenzen gewinnen: zum einen die Bürgerinnen und Bürgern und Interessensgruppen, die teilweise an einer Änderung der Verantwortungs- und Entscheidungsstrukturen und einer politischen wie auch finanziellen Beteiligung interessiert sind, und zum anderen die Investorinnen und Investoren sowie Projektiererinnen und Projektierern, die nach maßgeschneiderten, einfach umsetzbaren, wirksamen und marktfähigen Lösungen suchen^[32]. Eine wichtige vertrauensbildende Maßnahme ist die proaktive, frühzeitige und umfassende Kommunikation von Informationen über die geplante Anlage, den Genehmigungsprozess und welche Möglichkeiten der Mitsprache und Mitgestaltung gegenüber den Investorinnen und Investoren als auch den Betreiberinnen und Betreibern bestehen. Wie sowohl Interessensgruppen als auch Bürgerinnen und Bürger adressiert und eingebunden, und welche Formen der Beteiligung herangezogen werden, muss kontextspezifisch entschieden werden. Dies hängt von der Konstellation der Akteurinnen und Akteure und ihren individuellen Anliegen ab. Im Allgemeinen gilt: Je früher die Kommunikation beginnt und der Dialog proaktiv hergestellt wird, desto eher können die Gelingensbedingungen und Beteiligungsfragen diskutiert, geprüft und geklärt werden.

6.2 Kontextspezifische Akzeptanz

Die Akzeptanz der Agri-PV wird von Kontextfaktoren beeinflusst. Diese beziehen sich nicht direkt auf die Technologie, sondern auch auf Aspekte, die den Kontext prägen, innerhalb dessen sich der Prozess der Akzeptanzgenese vollzieht und die von außen die Bewertung des Akzeptanzsubjekts gegenüber dem Akzeptanzobjekt beeinflussen. Dazu gehören unter anderem die Nutzung einer Technologie, soziale, rechtliche, naturräumliche Kontexte und Bezüge (physisch, kulturell, sozial, (land-)wirtschaftlich) sowie sozio-politische und normative Rahmenbedingungen (z. B. Leitbilder, Beteiligungskultur und -erfahrungen, Glaubwürdigkeit der beteiligten Personen).

Bei der Anwendung von Agri-PV in Sonder- und Dauerkulturen ist tendenziell eine höhere gesellschaftliche Akzeptanz als im Ackerbau zu erwarten, da diese meist mit einer kleineren Anlagengröße einhergehen. Dadurch und durch die tendenziell niedrigere Durchfahrtschwindigkeit ist die optische Beeinträchtigung geringer. Zudem gibt es hier durch Folientunnel oder Hagelschutznetze bereits eine optische Beeinträchtigung des Landschaftsbildes. Der mögliche Zusatznutzen bei Agri-PV-Anwendungen über Sonder- und Dauerkulturen ist dabei der wichtigste Treiber einer möglicherweise höheren Zustimmung in der Bevölkerung. Der landwirtschaftliche Mehrwert kann sich aus verschiedenen Vorteilen der Agri-PV-Anlage speisen, beispielsweise durch Verringerung des Hitzestresses für die Kulturpflanzen durch Beschattung, Reduzierung des Krankheitsbefalls und des Bedarfs an chemischen Pflanzenschutzmitteln, Erosionsschutz, Bewässerung mit regenerativ erzeugtem Strom, höhere Biodiversität oder stabilere Erträge, auch unter extremen Wetterbedingungen wie Hitzeperioden und Hagel. Die konkrete Manifestierung und Sichtbarmachung dieser Vorteile dürften eine entscheidende Rolle dabei spielen, die Akzeptanzfähigkeit der Agri-PV-Anlagen seitens der Interessensgruppen und der Bevölkerung zu erhöhen.

6.3 Zwei Beispiele für Dialog und Beteiligung

6.3.1 Forschungsprojekt APV-RESOLA



Abb. 70: Bürgerinformationsveranstaltung im Projekt APV-RESOLA © ITAS

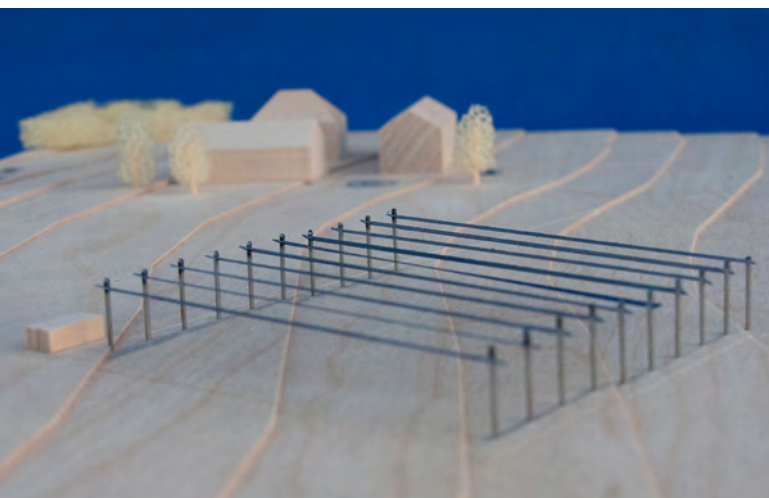


Abb. 71: Modell der Heggelbach-Anlage für Informationsveranstaltungen © Fraunhofer ISE

Das Projekt APV-RESOLA des Instituts für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) zielte auf die frühzeitige Erfassung des gesellschaftlichen Meinungsbildes und normativer Wertemuster zu Agri-PV-Anlagen ab, um daraus mögliche Hindernisse, aber auch Gelingensbedingungen für deren Etablierung abzuleiten. Letztere dienen der Beantwortung gesellschaftlicher Zukunftsfragen für eine nachhaltige, dezentrale Energieversorgung und der Erarbeitung eines gesellschaftlich akzeptierten Agri-PV-Anlagendesigns. Das frühzeitige Zusammenbringen von und der Austausch zwischen den verschiedenen Bürgerinnen und Bürgern sowie den Interessensgruppen hat das gegenseitige Verständnis für Interessen, Wertvorstellungen und Präferenzen geschärft.

Konkret wurde im Projekt APV-RESOLA am Standort der Pilotanlage auf einer nach den Demeter-Richtlinien biologisch-dynamisch bewirtschaftenden Ackerbaufläche der Hofgemeinschaft Heggelbach in der Bodenseeregion ein mehrstufiger transdisziplinärer Prozess durchlaufen, um die Bürgerinnen und Bürger sowie Interessensgruppen mit verschiedenen Formaten und an mehreren Zeitpunkten einzubinden. Nach einer Informationsveranstaltung für alle Interessierten erfolgte der Aufruf an alle Bürgerinnen und Bürger zwischen 18 und 80 Jahren im direkten Umfeld der geplanten Pilotanlage, sich zu melden, wenn sie am Prozess beteiligt werden wollten. Mit den Interessierten fand anschließend vor dem Bau der Pilotanlage auf der Grundlage eines Modells (siehe Abbildung 62) ein ergebnisoffenes Brainstorming zu Chancen und Herausforderungen der Agri-PV statt^[33]. Die Teilnehmenden waren sich einig, dass der Einfluss der Agri-PV auf die regionale Nahrungsmittelherstellung und die Erholungs- und Kulturlandschaft berücksichtigt werden muss und Entscheidungen über Anlagenstandorte auf kommunaler Ebene getroffen werden sollten, um lokale Besonderheiten und regionalspezifische Kriterien für Größe und Konzentration zu berücksichtigen^[34]. Auf diese erste Bürgerwerkstatt folgten eine Besichtigung der Pilotanlage und eine Umfrage bei der Eröffnung der Pilotanlage. Ein Jahr nach der Inbetriebnahme der Anlage wurden die Teilnehmenden der ersten Veranstaltung erneut eingeladen. Ziel der zweiten Bürgerwerkstatt war es, mögliche Veränderungen im Meinungsbild sowie in den Bewertungsmustern zu analysieren. Einige Teilnehmende bestätigten ihre Ablehnung der Anlage, die sie als störend empfanden. »Mir gefällt es gar nicht. Es ist ein mächtiges Bauwerk irgendwie für mich so mitten in der Landschaft. Als Pilot-Anlage in ihrer Größe, habe ich auch kein

Problem. Die kann man schon sehen. Aber wenn ich mir das im Großen vorstelle irgendwo, das kann ich mir überhaupt nicht vorstellen.« Andere Teilnehmende waren dagegen positiv überrascht und hatten ihre anfangs geäußerten Befürchtungen relativiert. »Ja, also wenn man da jetzt drunter steht, ich finde es ist nicht so massiv, eher licht und luftig. Es macht für mich jetzt nicht den Eindruck einer Industrieanlage«. Jedoch wurde der Zeitraum, um die Anlage zu beurteilen als zu kurz empfunden. »Man braucht viele Jahre, damit die Folgen, (negativ/positiv) von Agri-PV bemerkbar sind.«

In der zweiten Bürgerwerkstatt wurden außerdem Auswahlkriterien für die Standortsuche einer Agri-PV-Anlage entwickelt. Diese umfassen sowohl Restriktionen, also Faktoren, welche eine Nutzung einschränken oder verhindern, als auch Vorrangaspekte, welche für eine Nutzung sprechen oder diese ermöglichen. Diese Kriterien wurden von den Teilnehmenden angewandt, um beispielhaft geeignete Standorte für Agri-PV in der Gemeinde Herdwangen-Schönach in der Bodenseeregion zu identifizieren. Dieses Planspiel ermöglichte es den Teilnehmenden, die kontextspezifischen und komplexen Zusammenhänge selbst zu erarbeiten und in wirklichkeitsnaher Umgebung die Anwendbarkeit der erarbeiteten Kriterien zu überprüfen (siehe Abbildung 63). Ein Fazit waren Handlungsempfehlungen zu politischer Steuerung der Flächennutzung für PV-FFA und Agri-PV. »Man muss Regelungen treffen, dass das Land nicht an Energieversorger teurer verpachtet wird und tatsächlich unter diesen Anlagen noch Landwirtschaft betrieben wird.« Einige Aspekte wurden als zentrale Erfolgsfaktoren identifiziert und noch im Versuchsstadium umgesetzt. Ein prominentes Beispiel dafür ist die Erhöhung der Ressourceneffizienz durch die lokale Speicherung und Nutzung des erzeugten Stroms (mehr unter Abschnitt 6.4). »Wenn ich kein Speicherkonzept habe, brauche ich nicht Solaranlagen aufstellen. Das ist das größte Problem. Der Speicher. Wenn man den Speicher hätte, wäre das sofort in Ordnung.«

Die Ergebnisse und Handlungsempfehlungen der zweiten Bürgerwerkstatt wurden in einem Workshop mit den Interessensvertreterinnen und Interessensvertretern diskutiert. Beteiligt waren Vertreterinnen und Vertreter von Unternehmen der Technologieentwicklung, der Energiewirtschaft und Energiegenossenschaften, aus der Kommunal-, Regional- und Landesverwaltung, der Landwirtschaft, aus Naturschutz und Tourismus sowie eine Vertretung der Bürgerinnen und Bürger.

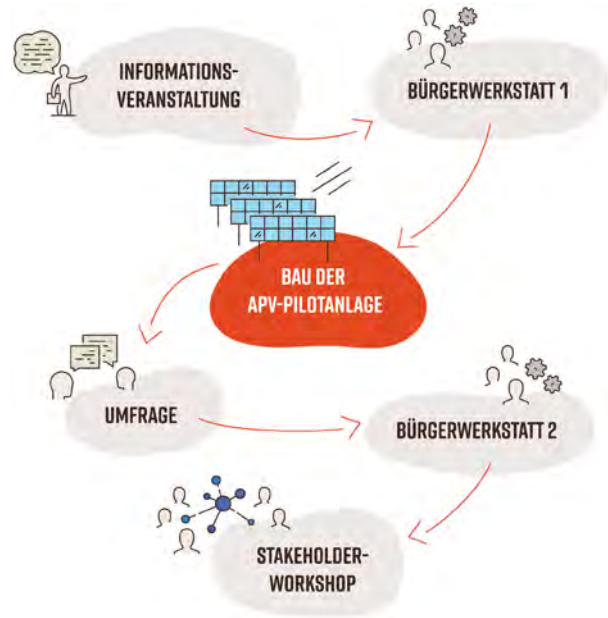


Abb. 72: Mehrstufiger transdisziplinärer Agri-PV-Forschungsansatz © ITAS

Als entscheidend für die regionale Flächennutzung für Solarparks oder Agri-PV wurde eine kriterienorientierte und ergebnisoffene Erarbeitung von möglichen Standorten gesehen.

»Man sollte das Land und den ländlichen Raum nicht nur als billigen Energielieferanten für die städtischen Räume sehen. Es sollte klar sein, wo es notwendig und wo nicht. Spielt eine Hanglage, spielen Biotope eine Rolle? Damit es nicht diesen Wildwuchs wie bei Biogasanlagen gibt.« Wichtig dabei ist eine proaktive, frühzeitige und offene Kommunikation über geplante Vorhaben und die Beteiligung von Bürgerinnen und Bürgern vor Ort. »Wenn der Bürger mitgenommen wird im Projekt, nicht nur ein bisschen beteiligt, sondern wenn es ein Bürgerprojekt ist, dann hat das Projekt größere Chance auf Verwirklichung«. Denn es besteht große Sorge und »Angst, dass riesige Flächen überbaut werden« und die gewohnte und geliebte Natur- und Erholungslandschaft vor der Haustür negativ verändert wird. »Ich finde es paradox, dass man sagt, Wind stört die Leute und den Tourismus und man würde dann gegebenenfalls zehn Hektar Agrophotovoltaik am Stück zulassen können.«

6.3.2 Forschungsprojekt APV Obstbau

Ein anderes Beispiel für die frühzeitige Einbindung von Interessensgruppen ist das Forschungsprojekt APV Obstbau im rheinland-pfälzischen Landkreis Ahrweiler. Für den Erfolg einer technologischen Innovation wie Agri-PV bedarf es nicht nur der Befürwortung seitens der Bevölkerung, sondern aller Akteurinnen und Akteure, die bei der Implementierung einer Anlage involviert sind. Ziel der qualitativen Analyse war daher, ein subjektives Stimmungsbild hinsichtlich der Faktoren, die die Befürwortung von Agri-PV fördern bzw. hemmen, zu erhalten. Parallel zur Implementierung der Agri-PV-Forschungsanlage fand deshalb eine Befragung von lokalen Vertreterinnen und Vertretern der Verwaltung, des Energiesektors, der Umwelt- und Artenschutzverbände, des Landwirtschaftssektors, der Landwirtschaftsverbände, der Lokalpolitik und der Wissenschaft statt. Inhaltlich adressieren die Interviewfragen die Kenntnis über das Projekt APV-Obstbau, die Bewertung der Agri-PV, sowie die Einschätzung von Chancen, Herausforderungen und Zukunftsaussichten der Agri-PV.

Als Ergebnis zeigt sich Interessensgruppen-übergreifend eine mehrheitlich positive Einstellung gegenüber der Agri-PV für die Obstanbauregion, deren Zukunft und dem Forschungsprojekt. Die Interviewergebnisse verdeutlichen, dass die Akzeptanz von Agri-PV (wie bei erneuerbaren Energien allgemein der Fall) stark von regionalen Gegebenheiten abhängig ist^[5]. In der Region des Forschungsprojektes APV-Obstbau werden Folien und Hagelschutznetze im Obstanbau bereits seit mehreren Jahren großflächig angewendet. Der gewohnte Anblick überbauter Kulturlandschaft begünstigt die ästhetische Einschätzung von technischen Bauten wie der Agri-PV, insbesondere wenn diese weitere Synergieeffekte aufzeigen. Hierzu zählen vor allem die duale Landnutzung zur Nahrungsmittel- und Energieerzeugung, wirtschaftliche Gewinne für die Landwirtinnen und Landwirte sowie positive Umweltauswirkungen. Für Landwirtinnen und Landwirte spielt zudem der Pflanzenschutzfaktor der Agri-PV eine entscheidende Rolle. Als akzeptanzhemmend gelten insbesondere Unsicherheiten hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit einer Agri-PV-Anlage, deren Integration in ein modernes, landwirtschaftliches Arbeitsmanagement sowie die aktuellen rechtlichen Rahmenbedingungen für deren Bau. Für Arten- und Umweltschützerinnen und -schützer sind womöglich auftretende negative Umweltauswirkungen ebenfalls kritisch zu betrachten. Auf Basis der Einschätzung der lokalen Akteurinnen und Akteure können im Anschluss konkrete, Interessensgruppen-spezifische Kommunikationskonzepte für den Kontext im Landkreis Ahrweiler entwickelt werden. Auch wenn die Ergebnisse solcher Studien regional- und kontextgebunden sind, können daraus gewonnene Erkenntnisse und entstandene Kommunikationskonzepte als Vorlage für zukünftige Projekte dienen.

6.4 Erfolgsfaktoren

Die transdisziplinäre Forschung im Projekt APV-RESOLA hat die folgenden wesentlichen Erfolgsfaktoren für eine gesellschaftsverträgliche Nutzung der Agri-PV identifiziert, die aus Sicht des bisherigen Stands des Projekts APV Obstbau bestätigt werden:

Zubau-Strategie

1. Das vorhandene PV-Potenzial an Dachflächen, Industriegebäuden und Parkplätzen sollte prioritär genutzt werden, bevor Standorte für Agri-PV-Anlagen gesucht werden.
2. Die Anlagen sollten an Standorten errichtet werden, an denen durch die Doppelnutzung der Fläche Synergien entstehen, z. B. durch die Schattenwirkung zur Minderung von Hitzestress bei Kulturpflanzen oder die Strombereitstellung für eine Bewässerung der Kulturen oder digitale Landbewirtschaftung mit elektrifizierten und zukünftig autonomen Systemen.

Produktion von Nahrungsmitteln und Energie

3. Die landwirtschaftliche Bewirtschaftung zur Nahrungsmittelproduktion unter Agri-PV-Anlagen sollte verpflichtend sein, um eine einseitige Optimierung der Stromerzeugung und eine »Pseudolandwirtschaft« unter den PV-Modulen zu verhindern.
4. Die Anlagen sollten in die dezentrale Energieversorgung integriert werden, um den Solarstrom zur Eigenversorgung oder für Prozesse mit höherer Wertschöpfung, z. B. zur Bewässerung, Kühlung oder Verarbeitung landwirtschaftlicher Erzeugnisse, zu nutzen.
5. Die Anlagen sollten mit einem Energiespeichersystem zur Erhöhung der Ressourceneffizienz kombiniert werden, um Stromangebot und -nachfrage lokal zusammenzubringen.

Integration in die Erholungs- und Kulturlandschaft

6. Die Größe und Konzentrierung der Anlagen sollte begrenzt und – analog zu Windkraftanlagen – Mindestabstände zu Wohngebieten unter Berücksichtigung lokaler Standorteigenschaften und gesellschaftlicher Präferenzen festgelegt werden. Um die Anzahl der Anlagen in landwirtschaftlich genutzten Regionen zu steuern, sollte die regionale Raumordnung die Genehmigung von Agri-PV steuern, z. B. durch eine Grundflächenzahl-Begrenzung¹.
7. Agri-PV-Anlagen dürfen die Qualität von Nah- und Fernerholungsangeboten und das Landschaftsbild nicht negativ verändern. Standorte mit natürlichem Sichtschutz (z. B. am Waldrand) oder flache Standorte sollen bevorzugt ausgewählt werden, um die Anlagen bestmöglich in das Landschaftsbild zu integrieren.

¹ In der BauNVO (Baunutzungsverordnung) für die Baugebietstypen üblich.

Ökologischer Beitrag

8. Landwirtschaftlich nicht nutzbare Zwischenstreifen der Anlagen sollten als Erosionsschutzstreifen oder als Korridorbiotope dem Erhalt oder einer Erhöhung der Biodiversität in der Landwirtschaft dienen.



Abb. 73: Landwirtschaftlich nicht bearbeitbare Zwischenstreifen könnten bei Agri-PV-Anlagen genutzt werden, um die Biodiversität auf den landwirtschaftlichen Flächen zu erhöhen
© Fraunhofer ISE

7 Politik und Recht

Erstellt durch Herrn Rechtsanwalt und Dipl. Forstw.
(Univ.) Jens Vollprecht, (Becker, Büttner, Held, Berlin)

Im Folgenden werden die wichtigsten gesetzlichen Rahmenbedingungen im Überblick dargestellt. Dabei kann nicht auf alle rechtlichen Aspekte und Fallkonstellationen eingegangen werden. Letztlich muss jeder Einzelfall individuell betrachtet und gewürdigt werden. Zudem ist zu beachten, dass in vielen Fällen noch keine Rechtsprechung zu den aufgeworfenen Fragen ergangen ist, so dass die eingenommenen Standpunkte mit Rechtsunsicherheiten behaftet sein können. Im Zweifelsfall ist daher zu empfehlen, bei der Planung eines Agri-PV-Projekts Rechtsrat einzuholen.

7.1 EU-Direktzahlungen

Im Rahmen der europäischen Agrarpolitik erhalten Betriebsinhaberinnen und Betriebsinhaber bei Erfüllung der entsprechenden Voraussetzungen Direktzahlungen für Flächen, die primär landwirtschaftlich genutzt werden. Eine wichtige Frage ist daher, ob eine landwirtschaftliche Fläche aufgrund der Nutzung von Agri-PV diese Beihilfefähigkeit verliert.

Zur Umsetzung der zahlreichen europäischen Vorgaben zur Gemeinsamen Europäischen Agrarpolitik gibt es u. a. die GAP-Direktzahlungen-Verordnung (GAPDZV). Danach tritt der beschriebene Verlust nicht ein, wenn es sich bei der Anlage um eine Agri-PV-Anlage handelt.² Was eine solche Agri-PV-Anlage ist, wird in § 12 Abs. 5 S. 1 GAPDZV bestimmt. Danach ist eine Agri-PV-Anlage eine auf einer landwirtschaftlichen Fläche errichtete Anlage zur Nutzung von solarer Strahlungsenergie, die eine Bearbeitung der Fläche unter Einsatz üblicher landwirtschaftlicher Methoden, Maschinen und Geräte nicht ausschließt und die landwirtschaftlich nutzbare Fläche unter Zugrundelegung der DIN SPEC 91434 um höchstens 15 Prozent verringert.³

7.2 Vorgaben des öffentlichen Baurechts

Bei Agri-PV-Anlagen handelt es sich um bauliche Anlagen i. S. d. Bauordnungsrechts, so dass grundsätzlich eine Baugenehmigung erforderlich ist. Eine Baugenehmigung wird erteilt, wenn öffentlich-rechtliche Vorschriften dem Vorhaben nicht entgegenstehen. Zu den öffentlich-rechtlichen Vorschriften zählen insbesondere die des Bauplanungsrechts. Zu beachten ist, dass auch sog. genehmigungsfreie Anlagen diese Anforderungen erfüllen müssen. Die Genehmigungsfreiheit ist also kein »Freibrief«. Zu beachtende öffentlich-rechtliche Vorschriften können in einem Bebauungsplan niedergelegt werden.

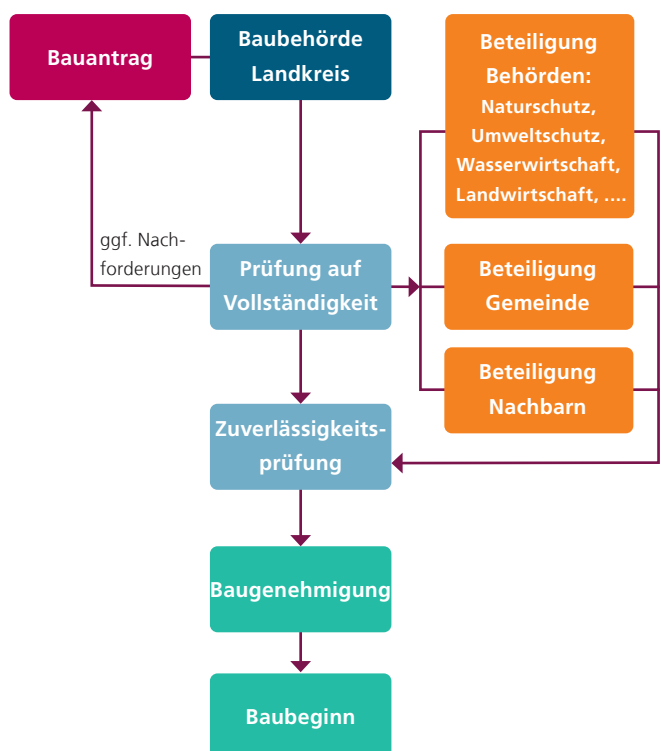


Abb. 74: Beispiel für den Ablauf eines Baugenehmigungsverfahrens © Fraunhofer ISE

² Vgl. § 12 Abs. 4 Nr. 6 GAPDZV.

³ Ursprünglich galten 85 Prozent der Fläche als förderfähig, wenn die Voraussetzungen erfüllt werden (vgl. § 12 V S. 2 GAPDZV a.F.). Ab dem 01.01.2025 ist diese Regelung gestrichen worden, so dass die Fläche förderfähig ist, soweit die Fläche unter Zugrundelegung der DIN SPEC 91434 landwirtschaftlich nutzbar ist

7.2.1 Außerhalb des Geltungsbereichs eines Bebauungsplans

Befindet sich das Grundstück nicht innerhalb des Geltungsbereichs eines Bebauungsplans, wird auf einen »gesetzlichen Ersatzbebauungsplan« zurückgegriffen. Welcher genau zur Anwendung kommt, hängt davon ab, ob sich das Vorhaben in einer bebauten Umgebung (Innenbereich i. S. d. § 34 BauGB) oder im Außenbereich (§ 35 BauGB) befindet. Typischerweise liegen die in Frage kommenden Flächen für die Realisierung von Agri-PV-Projekten im Außenbereich. Daher wird auf § 34 BauGB hier nicht eingegangen.

Grundsätzlich sind Bauvorhaben im Außenbereich nur unter deutlich erhöhten Voraussetzungen möglich, außer es handelt sich um ein vom Gesetzgeber privilegiertes Vorhaben. Eine explizite Privilegierung für Agri-PV-Anlagen wurde jüngst in § 35 Abs. 1 Nr. 9 BauGB eingeführt. Danach greift der Privilegierungstatbestand unter vier Voraussetzungen. Erstens muss es sich um eine Agri-PV Anlage handeln, die den Anforderungen an besondere Solaranlagen nach dem EEG entspricht (§ 48 Abs. 1 S. 1 Nr. 5 lit. a, b oder c EEG 2023).⁴ Zweitens muss das Vorhaben in einem räumlich-funktionalen Zusammenhang mit einem forst-, landwirtschaftlichen oder gartenbaulichen Betrieb stehen (§ 35 Abs. 1 Nr. 1 oder 2 BauGB). Drittens darf die Grundfläche der besonderen Solaranlage 25 000 Quadratmeter nicht überschreiten. Zuletzt darf pro Betrieb oder Betriebsstätte nur eine Anlage betrieben werden.

Zudem wurde ein weiterer Privilegierungstatbestand für die Nutzung solarer Strahlungsenergie aufgenommen (§ 35 Abs. 1 Nr. 8 lit. b BauGB) auf die sich Agri-PV Anlagen berufen können. Diese Privilegierung gilt für Vorhaben, die der Nutzung solarer Strahlungsenergie dienen und sich vereinfacht in bis zu 200 Metern Entfernung längs von einer Autobahn oder Schiene befinden.

Für die erwähnten Privilegierungen nach § 35 Abs. 1 Nr. 9 und 8 lit. b BauGB muss zudem eine Verpflichtungserklärung abgegeben werden, wonach das Vorhaben nach dauerhafter Aufgabe der zulässigen Nutzung zurückgebaut und Bodenversiegelungen beseitigt werden; zudem ist bei diesen Privilegierungstatbeständen bei einer zulässigen Nutzungsänderung die Rückbauverpflichtung zu übernehmen.⁵

Soll die Agri-PV-Anlage auf einer anderen Fläche errichtet werden, kann sich der Begründungsaufwand für die Einstufung als privilegiertes Vorhaben deutlich erhöhen. Allerdings kommen je nach Ausgestaltung des Projekts verschiedene andere Privilegierungstatbestände in Betracht.

Privilegierte Vorhaben sind gemäß § 35 Abs. 1 i. V. m. Abs. 5 S. 1 BauGB zulässig, wenn – neben weiteren Voraussetzungen – die ausreichende Erschließung gesichert ist, das Vorhaben in einer flächensparenden, die Bodenversiegelung auf das notwendige Maß begrenzenden und den Außenbereich schonenden Weise ausgeführt wird und öffentliche Belange dem Vorhaben nicht entgegenstehen. Hier kann § 2 EEG 2023 bei der Beurteilung eine wichtige Rolle spielen. Gemäß Satz 1 dieser Vorschrift liegen die Errichtung und der Betrieb von Erneuerbare Energien Anlagen sowie der dazugehörigen Nebenanlagen im überragenden öffentlichen Interesse und dienen der öffentlichen Sicherheit. Nach Satz 2 der Vorschrift sollen, bis die Stromerzeugung im Bundesgebiet nahezu treibhausgasneutral ist, die erneuerbaren Energien als vorrangiger Belang in die jeweils durchzuführenden Schutzgüterabwägungen eingebracht werden. Dazu gehört insbesondere die nachvollziehende Abwägung im planungsrechtlichen Außenbereich, wenn keine Ausschlussplanung erfolgt.

Gelingt eine Privilegierung nach § 35 Abs. 1 BauGB nicht, sollte geprüft werden, ob eine Zulässigkeit als »Sonstiges Vorhaben« nach § 35 Abs. 2 BauGB möglich ist. Neben den auch für die privilegierten Vorhaben geltenden Voraussetzungen (Erschließung, flächensparende Bodenversiegelung, Schonung des Außenbereichs) dürfen bei diesen Vorhaben öffentliche Belange durch das Vorhaben nicht beeinträchtigt werden (§ 35 Abs. 2 i. V. m. Abs. 5 S. 1 BauGB). Anders als bei den privilegierten Vorhaben ist die Schwelle also nicht ein »Entgegenstehen«, sondern bereits eine Beeinträchtigung öffentlicher Belange. Wegweisend ist in diesem Zusammenhang ein Urteil des OVG Münster vom 16.05.2023.⁶ In dem Urteil entschied das Gericht, dass bei der Frage, ob öffentliche Belange (z. B. Landschaftsbild) einer EEG-Anlage entgegenstehen, die Wertung des § 2 EEG zu berücksichtigen sei. Schlussendlich kam das Urteil zu einer Zulässigkeit einer 217 m hohen Windenergieanlage. Da § 2 EEG genauso für Solaranlagen gilt, können die Aussagen auch auf Solarenergie übertragen werden.

Ist die Zulässigkeit eines Vorhabens im unbeplanten Außenbereich nicht möglich, kann die Fläche aus dem unbeplanten in den beplanten Bereich »gezogen« werden. Dies gelingt, indem für die Fläche ein Bebauungsplan aufgestellt wird (dazu gleich mehr).

⁴ Hierfür muss die Anlage auch im Einklang mit den Festlegungen der Bundesnetzagentur stehen, die wiederum auf die bereits erwähnte DIN SPEC Norm verweist. Vgl. dazu eingehend unten im Teil 7.4.3.

⁵ Vgl. § 35 Abs. 5 S. 2 BauGB.

⁶ 7 D 423/21.AK.

7.2.2 Innerhalb des Geltungsbereichs eines Bebauungsplans

Befindet sich die Fläche im Geltungsbereich eines Bebauungsplans, müssen die im Bebauungsplan vorgegebenen Anforderungen erfüllt werden. Wichtig ist insbesondere, dass die Vorgaben sowohl den Betrieb einer Solaranlage als auch eine landwirtschaftliche Nutzung der Fläche ermöglichen. Den Bauplanungsbehörden stehen dabei mehrere Instrumente zur Verfügung. Ein Instrument sind Festsetzungen im Bebauungsplan. Für diese Festsetzungen existiert ein Katalog an möglichen Gebietstypen (Wohngebiet, Gewerbegebiet ...) an die sich eine Gemeinde grundsätzlich halten muss (sog. Typenzwang. Vgl. § 9 BauGB i.V.m. BauNVO). So kann eine planungsrechtliche Grundlage beispielsweise durch die Festsetzung eines sonstigen Sondergebiets i. S. d. § 11 Abs. 1, Abs. 2 BauNVO geschaffen werden. Danach gilt als sonstiges Sondergebiet ein Gebiet für Anlagen, die der Erforschung, Entwicklung oder Nutzung erneuerbarer Energien, wie Wind- und Sonnenenergie, dienen. Problematisch ist dabei, dass eine Festsetzung einzig als Sondergebiet Solar die landwirtschaftliche Verwendung der Fläche möglicherweise nicht ausreichend berücksichtigt. Das Gebiet sollte deshalb gleichzeitig als Fläche für die Landwirtschaft nach § 9 Abs. 1 Nr. 18 lit. a BauGB ausgewiesen werden. Es ist anerkannt, dass sich Festsetzungen nach § 9 BauGB für einzelne Flächen überlagern und so wechselseitig ergänzen können. Unterschiedliche Festsetzungen für ein und dieselbe Fläche scheiden zwar aus, wenn sie sich gegenseitig ausschließen. Agri-PV-Anlagen gewährleisten die Umsetzung der unterschiedlichen Vorgaben auf derselben Fläche jedoch, sodass diese »doppelten« Festsetzungen möglich sind. Zudem kommt in Betracht, als Festsetzung »Sondergebiet Agri-PV« zu wählen. Diese Festsetzungen sind durch entsprechende textliche Beschreibungen zu flankieren.

7.3 Erbschaft-, Schenkungs-, Grund- und Grunderwerbsteuer

Wird auf einer Fläche eine Freiflächenanlage errichtet, besteht die Gefahr, dass die Fläche nicht mehr dem landwirtschaftlichen und forstwirtschaftlichen Vermögen zugeordnet wird, sondern dem Grundvermögen. Das bedeutet, dass die Begünstigungen für landwirtschaftliches und forstwirtschaftliches Vermögen bei der Erbschaft-, Schenkungs-, Grund- und Grunderwerbsteuer entfallen – und dies ggf. sogar auch rückwirkend, wenn die sog. Behaltensfristen nach der Hofübergabe noch nicht abgelaufen sind. Nach den gleich lautenden Erlassen der obersten Finanzbehörden der Länder zur Zurechnung und Bewertung von Agri-PV-Anlagen vom 15.07.2022⁷ gilt für Zwecke der Grundsteuer, der Erbschaft- und Schenkungsteuer sowie der Grunderwerbsteuer folgende Regelung: Flächen, auf denen Solaranlagen stehen, die nach der DIN SPEC 91434 Agri-PV-Anlagen der Kategorie I oder II sind, sind dem land- und forstwirtschaftlichen Vermögen zuzurechnen. Folglich kommt es in diesem Fall zu keiner Schlechterstellung. Aber auch wenn die Anlage die DIN SPEC 91434 Norm nicht erfüllt und daher aus der Begünstigung rausfallen würde, gibt es Gestaltungsmöglichkeiten, die beschriebenen Nachteile abzuwenden. Für Bayern etwa gilt eine Sonderregel.⁸

7.4 Erneuerbare-Energien-Gesetz 2023

Agri-PV-Anlagen erzeugen Strom aus solarer Strahlungsenergie und sind damit als »ganz normale« Anlagen zur Erzeugung von Strom aus Erneuerbaren Energien i. S. d. § 3 Nr. 1 EEG 2023 einzustufen.

⁷ BStBl I 2022 S. 1226.

⁸ Nach Art. 9 Abs. 3 Bayerisches Grundsteuergesetz (BayGrStG) ist die Besteuerung nach der günstigeren Grundsteuer A trotz einer Übertragung der bisher dem land- und forstwirtschaftlichen Vermögen zugeordneten Flächen für den Betrieb von Freiflächen-Photovoltaikanlagen möglich, wenn eine vertragliche Rückbaupflicht mit anschließender Weiterführung der land- und forstwirtschaftlichen Nutzung vertraglich vereinbart wurde.

7.4.1 Netzanschluss und Kostentragung

Betreiber solcher Anlagen haben einen Anspruch gegenüber dem Betreiber des Netzes für die allgemeine Versorgung (Netz) auf vorrangigen Netzanschluss nach § 8 Abs. 1 EEG 2023. Das EEG 2023 gibt auch vor, an welcher Stelle die Anlage an das Netz anzuschließen ist. Leitgedanke ist dabei die Minimierung der volkswirtschaftlichen Kosten: Es ist die Netzanschlussvariante zu ermitteln, welche die geringsten volkswirtschaftlichen Gesamtkosten aufweist. Erst wenn diese Variante gefunden ist, wird bestimmt, wer welche Kosten zu tragen hat. Dabei gilt: Die Netzanschlusskosten trägt der Anlagenbetreiber, die Netzausbaukosten der Netzbetreiber.⁹

7.4.2 Abnahme des Stroms

Darüber hinaus steht dem Betreiber der Agri-PV-Anlage gegenüber dem Netzbetreiber nach § 11 Abs. 1 EEG 2023 ein Anspruch auf vorrangige Abnahme des erzeugten Stroms zu. D. h., der Netzbetreiber darf nur in Ausnahmefällen die Einspeisung in das Netz unterbinden. Dies gilt z. B. beim sog. Redispatch 2.0. In diesem Fall hat der Anlagenbetreiber dann u. a. einen Anspruch auf Entschädigung für den nicht eingespeisten Strom.¹⁰

Der Anlagenbetreiber muss den Strom aber nicht einspeisen, sondern kann ihn »vor« dem Netz auch selbst nutzen oder an einen Dritten liefern.¹¹

7.4.3 Finanzielle Förderung

Komplexer wird es im Hinblick auf die finanzielle Förderung nach dem EEG 2023 für den eingespeisten Strom. Hier haben sich mit dem EEG 2023 für Agri-PV-Anlagen zahlreiche positive Änderungen ergeben.

Verpflichtende Direktvermarktung, Teilnahme an Ausschreibungen und Förderzeitraum

Zunächst ist zu beachten, dass Betreiber von Anlagen mit einer installierten Leistung von mehr als 100 kW_p¹² »verpflichtet« sind, den Strom an einen Dritten zu vermarkten (sog. verpflichtende Direktvermarktung).¹³ Das bedeutet jedoch nicht, dass der Netzbetreiber in diesem Fall keine Zahlungen leisten muss: Bei der geförderten Direktvermarktung hat der Anlagenbetreiber gegenüber dem Netzbetreiber nach § 20 EEG 2023 einen Anspruch auf die sog. Marktprämie. Diese ist die Differenz zwischen dem sog. anzulegenden Wert¹⁴ und dem Jahresmarktwert für Solarenergie.¹⁵ Da der Strom an den Dritten verkauft wird und dieser dafür den vereinbarten Preis an den Anlagenbetreiber zahlt, erhält der Betreiber bei der geförderten Direktvermarktung für den eingespeisten Strom in Summe also die Marktprämie und den mit dem Direktvermarkter vereinbarten Preis. Zwar kann der Anlagenbetreiber den Strom auch an den Netzbetreiber verkaufen. Er erhält dann aber nur die niedrige Ausfallvergütung.¹⁶ Zudem drohen Nachteile, wenn er zu lange in der sog. Ausfallvergütung bleibt.¹⁷ Diese Nachteile sollen für den Betreiber Anreize setzen, möglichst schnell wieder in die Direktvermarktung zu wechseln.

Im Weiteren unterscheidet das EEG zwischen Anlagen, die für eine Förderung an einer Ausschreibung teilnehmen und einen Zuschlag erhalten müssen und solchen Anlagen, die hiervon befreit sind. Die Unterscheidung zwischen diesen Gruppen ist abhängig vom Anlagentyp und der installierten Leistung. Bei Agri-PV-Anlagen handelt es sich in der Regel um Freiflächenanlagen. Weist die Anlage eine Leistung von mehr als 1000 kW_p¹⁸ auf (Ausschreibungsanlage), muss der zukünftige Betreiber erfolgreich an einer Ausschreibung für Solaranlagen

⁹ Vgl. § 16 Abs. 1; § 17 EEG 2023.

¹⁰ Vgl. dazu Lamy/Lehnert, EnWZ 2021, 208ff.

¹¹ Da das Netz in diesen Konstellationen nicht genutzt wird, fallen keine Netzentgelte an. Entsprechendes gilt für die netzgekoppelten Abgaben und Umlagen (z. B. KWK-Umlage, § 19 Abs. 2 StromNEV-Umlage, Offshore-Netzumlage, Konzessionsabgabe). Deshalb kann der Anlagenbetreiber z. B. dem Beliefernden einen günstigeren Preis für den Strom anbieten als ein Lieferant, der die Belieferung über das Netz abwickelt. Zu beachten ist allerdings die Stromsteuer, wobei hier u. a. die Befreiungstatbestände nach § 9 Abs. 1 Nr. 1 und 3 StromStG Optimierungsmöglichkeiten eröffnen können.

¹² Bei der Ermittlung der Anlagengröße hier und im Folgenden sind in der Regel die »Verklammerungsvorschriften« des § 24 Abs. 1 und teilweise auch des Abs. 2 EEG 2023 zu beachten.

¹³ Dies lässt sich aus § 21 Abs. 2 Nr. 2 EEG 2023 ableiten.

¹⁴ Bei dem anzulegenden Wert handelt es sich um einen Betrag in Cent pro Kilowattstunde.

¹⁵ Vgl. Nr. I.2. Anlage 1 EEG 2023.

¹⁶ Vgl. § 21 Abs. 2 Nr. 2 EEG 2023.

¹⁷ Vgl. § 21 Abs. 2 Nr. 2 EEG 2023 und § 52 Abs. 1 Nr. 5 EEG 2023.

¹⁸ Vgl. § 22 Abs. 3 S. 2 Nr. 1 EEG 2023.

des sog. ersten Segments¹⁹ teilnehmen²⁰. Im Rahmen der Ausschreibung geben die Betreiber einen Cent Betrag pro kWh an, zu dem sie die Anlage betreiben werden. Um direkt unrentable Projekte auszuschließen²¹ gibt es einen gesetzlichen Höchstwert²², der nicht überschritten werden darf. Der Höchstwert liegt im Kalenderjahr 2025 bei 6,80 ct/kWh.²³ Zudem muss der Betreiber nach Inbetriebnahme der Anlage eine sog. Zahlungsberechtigung bei der Bundesnetzagentur beantragen.²⁴ Eine Ausnahme von der Pflicht zur Teilnahme an einer Ausschreibung gilt u. U., wenn die Agri-PV-Anlage von einer sog. Bürgerenergiegesellschaft i. S. d. § 3 Nr. 15 EEG 2023 betrieben wird: In diesem Fall erhöht sich die Grenze, ab der an einer Ausschreibung teilgenommen werden muss, auf 6 000 kW_p.²⁵ Damit kann die Gründung einer Bürgerenergiegesellschaft nicht nur mit Blick auf eine Erhöhung der Akzeptanz für das Agri-PV-Projekt sinnvoll sein.

Mit dem Solarpaket I wurde die installierte Leistung, bis zu der eine finanzielle Förderung beansprucht werden kann, von 20 MW_p auf 50 MW_p erhöht.²⁶ Damit können nun auch Anlagen mit einer Leistung von mehr als 20 MW_p, die aufgrund von Skaleneffekten kosteneffizienter sind, eine finanzielle Förderung nach dem EEG erhalten.

Die finanzielle Förderung wird ab dem Zeitpunkt der Inbetriebnahme der Anlage für 20 Jahre gezahlt.²⁷ Hinzuweisen sei an dieser Stelle darauf, dass die Ansprüche auf Netzanschluss und auf Abnahme des Stroms nicht zeitlich limitiert sind – insoweit handelt es sich also um »Ewigkeitsrechte«.

Voraussetzungen für die finanzielle Förderung

Neben den allgemeinen Voraussetzungen für eine finanzielle Förderung nach dem EEG 2023 sind insbesondere die speziellen Vorgaben für die Solarenergie zu erfüllen.

Zu beachten ist, dass die finanzielle Förderung von Freiflächenanlagen auf landwirtschaftlich genutzten Flächen begrenzt wird. Bis 2030 darf nur ein Gebot für eine PV-Anlage auf einer landwirtschaftlich genutzten Fläche abgegeben werden, wenn die installierte Leistung von Freiflächenanlagen in Deutschland auf landwirtschaftlich genutzter Fläche 80 GW_p unterschreitet. Ab 2031 erhöht sich dieser Wert auf 177,5 GW_p.²⁸ In § 48 Abs. 5 EEG 2023 wird eine entsprechende Begrenzung für Anlagen vorgesehen, die kein Gebot abgeben müssen, da deren anzulegender Wert gesetzlich bestimmt wird. Diese Regelung ist mit Hinblick auf Flächenverbrauch grundsätzlich zu begrüßen. Da besondere Solaranlagen wie Agri-PV die landwirtschaftlich nutzbare Fläche nicht wie eine normale Freiflächen PV-Anlage verringern, sollte dieser Anlagentyp bei der Ermittlung der Schwellenwerte jedoch nicht berücksichtigt werden. Denn diese zeichnen sich durch eine Doppelnutzung der Flächen aus, sodass die landwirtschaftliche Nutzung kaum eingeschränkt wird.

Im Folgenden wird nur auf die sog. besonderen Solaranlagen eingegangen, die seit dem 01.01.2023 Teil der Förderkulisse des EEG sind.²⁹ Zu den besonderen Solaranlagen gehören auch Agri-PV-Anlagen.³⁰ Gefördert werden Anlagen auf

- Ackerflächen mit gleichzeitigem Nutzpflanzenanbau auf derselben Fläche (Acker-Agri-PV),
- Flächen mit gleichzeitiger landwirtschaftlicher Nutzung in Form eines Anbaus von Dauerkulturen oder mehrjährigen Kulturen auf derselben Fläche (Kulturen-Agri-PV) und
- Grünland bei gleichzeitigen landwirtschaftlicher Nutzung als Dauergrünland (Grünland-Agri-PV).

¹⁹ Freiflächenanlagen und Solaranlagen, die auf, an oder in baulichen Anlagen errichtet werden sollen, die weder Gebäude noch Lärmschutzwände sind; vgl. § 3 Nr. 4a EEG 2023.

²⁰ Siehe §§ 29 ff. i. V. m. § 37 ff. EEG 2023.

²¹ Vgl. § 33 Abs. 1 S. 1 Nr. 4 EEG 2023.

²² Vgl. § 37b EEG 2023.

²³ Festlegung der BNetzA v. 17.12.2024, Az. Az.: 4.08.01.01/1#39, abrufbar unter: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/Ausschreibungen/Solar1/FestlegungSolar12025.pdf?__blob=publicationFile&v=5.

²⁴ Vgl. § 38 EEG 2023.

²⁵ Vgl. § 22 Abs. 3 S. 2 Nr. 2 EEG 2023.

²⁶ Vgl. § 38a Abs. 1 S. 1 Nr. 5 lit. a EEG 2023.

²⁷ Vgl. § 25 Abs. 1 EEG 2023; beachte ggf. auch § 51a EEG 2023. Für Anlagen, deren finanzielle Förderung gesetzlich festgelegt ist, verlängert sich die Zahlung bis zum 31.12. des zwanzigsten Jahres.

²⁸ § 37 Abs. 4 EEG 2023

²⁹ Freilich können auch die Fördertatbestände für die „klassischen“ Freiflächenanlagen genutzt werden, wenn die entsprechenden Voraussetzungen – wie z.B. § 37 Abs. 1 Nr. 2 EEG 2023 bzw. § 48 Abs. 1 Nr. 3 EEG 2023 – erfüllt werden.

³⁰ Bei den „Ausschreibungsanlagen“ ergibt sich dies aus § 37 Abs. 1 Nr. 3 lit. a bis c EEG 2023, bei den anderen Anlagen aus § 48 Abs. 1 Nr. 5 lit. a bis c EEG 2023.

Die Flächen dürfen in allen drei Fällen nicht als Moorboden³¹ einzustufen sein und zumindest im Falle des § 48 Abs. 1 S. 1 Nr. 5 lit. a bis c EEG nicht rechtsverbindlich als Naturschutzgebiet im Sinn des § 23 des Bundesnaturschutzgesetzes (BNatSchG) oder als Nationalpark im Sinn des § 24 BNatSchG festgesetzt worden sein. Hervorzuheben ist zudem, dass die Flächen nicht im Bereich eines beschlossenen Bebauungsplans liegen müssen. Bei der Grünland-Agri-PV darf die Fläche zudem nicht in einem Natura 2000-Gebiet i. S. d. § 7 Abs. 1 Nr. 8 BNatSchG liegen und kein Lebensraumtyp sein, der in Anhang I der Richtlinie 92/43/EWG aufgeführt ist.

Die Details zu diesen besonderen Solaranlagen werden in Festlegungen der BNetzA bestimmt.³² Mit Blick auf die Acker-Agri-PV und die Kulturen-Agri-PV ist die Festlegung der BNetzA vom 01.10.2021³⁴ anzuwenden. Bezüglich der Grünland-Agri-PV gilt die Festlegung der BNetzA vom 01.07.2023.³⁵ Bei den Festlegungen spielt die DIN SPEC 91434 eine wichtige Rolle.

Da die Errichtung und der Betrieb besonderer Solaranlagen bei bestimmten Konzepten gegenüber »klassischen« PV-FFA mit höheren Kosten verbunden ist, sieht das EEG eine höhere finanzielle Förderung für diese Konzepte vor (sog. Technologie Bonus). Bei diesen Konzepten handelt es sich um Solaranlagen, die

- ausschließlich senkrecht ausgerichtet und insgesamt mit einer lichten Höhe von mindestens 0,80 Metern oder
- sonst insgesamt mit einer lichten Höhe von mindestens 2,10 Metern

aufgeständert werden sollen.³⁶ Diese „Mehrvergütung« wird bei den »Ausschreibungsanlagen« zukünftig in einem wettbewerblichen Verfahren ermittelt und kann zudem – anders als bislang – auch für Anlagen in Anspruch genommen werden, die nicht an den Ausschreibungen teilnehmen dürfen. Die Ausschreibungen für Solaranlagen des ersten Segments werden

zweistufig durchgeführt: In der ersten Stufe der Ausschreibung treten in einem sog. Untersegment nur die besonderen Solaranlagen – neben Agri-PV-Anlagen mit den erwähnten Konzepten auch Moor-PV-Anlagen, Floating-PV-Anlagen und Parkplatz-PV-Anlagen – miteinander in Wettbewerb.³⁷ Das Ausschreibungsvolumen beträgt im Jahr 2025 800 MW_p und wird bis zum Jahr 2029 stufenweise auf insgesamt 2075 MW_p ansteigen. Der Höchstwert für dieses Untersegment liegt deutlich über dem Höchstwert für das erste Segment. Damit wird die Möglichkeit eröffnet, dass im Jahr 2025 Gebote mit einem Gebotswert von mehr als 6,80 ct/kWh einen Zuschlag erhalten und damit die höheren Kosten gedeckt werden können. Der Höchstwert reduziert sich ab dem Jahr 2025 in Abhängigkeit von den Ausschreibungsergebnissen der letzten drei vorangegangenen Gebotsterminen, deren Ergebnisse zum Gebotstermin bekanntgegeben wurden, beträgt jedoch höchstens 9,5 ct/kWh.³⁸ Sind alle Gebote für das Untersegment bezuschlagt bzw. das Ausschreibungsvolumen erreicht oder überschritten, treten in der zweiten Stufe der Ausschreibung alle ggf. nicht bezuschlagten Gebote aus dem Untersegment und alle anderen Gebote für Anlagen des ersten Segments miteinander in Wettbewerb – allerdings ist hier der Höchstwert für das erste Segment zu beachten – z. B. im Jahr 2025 also der Wert von 6,80 ct/kWh. Überschreitet der Gebotswert eines Gebots für eine bestimmte Agri-PV-Anlage bzw. Moor-PV-Anlage also diesen Wert und ist nicht im Untersegment bezuschlagt worden, wird es von der Ausschreibung in der zweiten Stufe ausgeschlossen. Bei den Agri-PV-Anlagen, die nicht an der Ausschreibung teilnehmen dürfen, wird der sog. Technologie-Bonus ab dem Jahr 2025 berechnet, indem die Differenz zwischen dem jeweils im vorangegangenen Kalenderjahr im Untersegment geltenden Höchstwert und dem anzulegenden Wert nach § 48 Abs. 1 EEG 2023 gebildet wird. Gute Argumente sprechen dafür, dass dabei auch die Degression (halbjährige Verringerung des anzulegenden Wertes) nach § 49 EEG 2023 zu berücksichtigen ist.

³¹ Definiert in § 3 Nr. 34a EEG 2023.

³² Das ist ein wesentlicher Unterschied zu den Anforderungen an die finanzielle Förderung für Freiflächenanlagen im Allgemeinen nach § 37 Abs. 1 Nr. 2 EEG 2023 bzw. § 48 Abs. 1 Nr. 3 EEG 2023.

³³ Auf die Festlegungen der BNetzA kommt es an, weil das EEG für die technische Ausbuchstabierung auf diese verweist (vgl. § 37 Abs. 1 Nr. 3 EEG oder § 48 Abs. 1 Nr. 5 EEG jeweils i.V.m. § 85c EEG 2023).

³⁴ Festlegung vom 1.10.2021 - Az.: 8175-07-00-21/1, abrufbar unter: https://data.bundesnetzagentur.de/Bundesnetzagentur/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/Ausschreibungen/Innovations/gezeichnetefestlegungoktober2021.pdf.

³⁵ Festlegung der BNetzA vom 01.07.2023, abrufbar unter: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/Ausschreibungen/Solar1/BesondereSolaranlagen/Festlegung.pdf?__blob=publicationFile&v=1.

³⁶ Vgl. § 37d Abs. 1 S. 2 EEG 2023 und § 48 Abs. 1 b EEG 2023.

³⁷ Vgl. § 37d EEG 2023.

³⁸ Vgl. § 37b Abs. 2 EEG 2023.

7.4.4 Kommunale Beteiligung bei Freiflächenanlagen

§§ 53 Abs. 5; 54 Abs. 2 EEG 2023 enthalten spezielle Sanktionen für Agri-PV-Anlagen, wenn Verstöße gegen Vorgaben der erwähnten Festlegungen der BNetzA vorliegen.

Anzumerken ist, dass zahlreiche Vorschriften, die mit dem Solarpaket I in das EEG aufgenommen wurden, u. a. auch die Vorschriften zum Untersegment, zum Technologie-Bonus und zu der »50-MW_p-Fördergrenze« unter einem beihilferechtlichen Genehmigungsvorbehalt stehen. D. h., erst ab der beihilferechtlichen Genehmigung durch die Europäische Kommission dürfen die in § 101 EEG 2023 angeführten Vorschriften angewandt werden. Bis dahin gelten noch die entsprechenden »alten« Regelungen in der am 15.05.2024 geltenden Fassung.

Innovationsausschreibungen³⁹

Teilnahmeberechtigt sind bei den Innovationsausschreibungen nur Anlagenkombinationen i. S. d. Innovationsausschreibungsverordnung (InnAusV). Das heißt, die Agri-PV-Anlagen müssen mit einem Speicher oder einer anderen erneuerbaren Energien Anlage gekoppelt werden und den Strom über einen gemeinsamen Netzverknüpfungspunkt einspeisen.⁴⁰ Bieter, die sich in der Ausschreibung durchsetzen, erhalten vom Netzbetreiber für den eingespeisten Strom die Marktprämie nach § 19 Abs. 1 Nr. 1 EEG 2023.⁴¹

Mit Blick auf die Akzeptanz ist § 6 EEG 2023 interessant: Diese Regelung sieht vor, dass Betreiber von Freiflächensolaranlagen betroffenen Gemeinden Zuwendungen in Höhe von bis zu 0,2 ct je eingespeister kWh gewähren können.⁴² Die Zuwendung ist vom Netzbetreiber zu erstatten, wenn für den Strom eine finanzielle Förderung nach dem EEG oder einer auf Grund des EEG erlassenen Rechtsverordnung in Anspruch genommen wurde. Sonst muss der Anlagenbetreiber diesen Betrag aus der eigenen Tasche zahlen.

³⁹ Auf die Ausschreibungen für innovative Konzepte mit wasserstoffbasierter Stromspeicherung nach § 39o EEG 2023 bzw. für Anlagen zur Erzeugung von Strom aus Grünen Wasserstoff nach § 39p EEG 2023 wird hier nicht eingegangen. Zwar könnten auch Agri-PV-Anlagen in diesem Kontext eine Rolle spielen. Allerdings sind die entsprechenden Verordnungen noch nicht erlassen worden, sodass konkrete Aussagen dazu derzeit noch nicht getroffen werden können.

⁴⁰ Vgl. § 2 Abs. 1 InnAusV.

⁴¹ Vgl. § 8 Abs. 1 InnAusV. Die sog. fixe Marktprämie ist ebenso abgeschafft worden wie die Sonderregelungen für besondere Solaranlagen, da diese ab dem 01.01.2023 in die Ausschreibungen des ersten Segments nach dem EEG 2023 überführt wurden; vgl. zu den ursprünglichen Regelungen Vollprecht/Kather, IR 2021, 266 (268).

⁴² Vgl. zur ähnlichen Regelung für Windkraftanlagen Baur/Lehnert/Vollprecht, EnWZ 2021, 341 ff. Vom Bundesverband Neue Energiewirtschaft e.V. wurde ein Mustervertrag für die Gemeindebeteiligung entwickelt, der unter <https://sonne-sammeln.de/kommunen/kostenloser-mustervertrag/> abgerufen werden kann.

8 Agri-Photovoltaik voranbringen

Klimakrise, Wasserknappheit und der stetig steigende Bedarf an Energie und Nahrungsmitteln stellt die Gesellschaft vor Aufgaben von bisher nicht gekanntem Ausmaß. In den kommenden Jahren wird sich entscheiden, ob und wie die Menschheit die globalen Herausforderungen meistern wird. Wenn die Lebensqualität in Industrieländern erhalten und in Ländern des Globalen Südens verbessert werden soll, müssen wir Wege finden, um scheinbar gegenläufige Ziele zu erreichen: Es gilt, den erreichten Wohlstand zu sichern, Entwicklung und eine lebenswerte Zukunft zu ermöglichen und gleichzeitig den Verbrauch natürlicher Ressourcen und den Ausstoß klimaschädlicher Stoffe zu verringern. Die Agri-PV kann hier einen relevanten Beitrag liefern.

In diesem Leitfaden wurde der technische Stand der Agri-PV, ihr Potenzial und ihre vielfältigen Anwendungsfelder aufgezeigt. Neben einer effizienteren Landnutzung kann Agri-PV zu einer Erhöhung der Klimaresilienz und einer Senkung des Wasserverbrauchs in der Landwirtschaft beitragen, stabile zusätzliche Einkommensquellen für Landwirtschaftsbetriebe generieren und damit die Resilienz vieler Höfe gegenüber Ernteausfällen erhöhen. Dabei stellt für die konkrete Umsetzung von Agri-PV eine frühzeitige Beteiligung der Bürgerinnen und Bürger vor Ort ein entscheidendes Erfolgskriterium dar. Mit Stromgestehungskosten zwischen sechs und zehn Euro-cent pro Kilowattstunde ist Agri-PV schon heute mit anderen erneuerbaren Energiequellen wettbewerbsfähig. Um eine wirtschaftliche Umsetzung von Agri-PV zu ermöglichen, wurden in den letzten Jahren die wichtigsten Anpassungen des Rechtsrahmens in Deutschland erfolgreich vorgenommen. In diesem Prozess wurde zudem auch das Potenzial anderer, ähnlicher PV-Konzepte mit doppeltem Landnutzungscharakter erkannt und die politischen Rahmenbedingungen hierfür gesetzt, darunter PV-Anlagen auf wiederzuvernässenden Moorböden, PV-Anlagen zur Steigerung der Artenvielfalt sowie Agri-PV-Anlagen mit einer extensiven Bewirtschaftung. Während diese Entwicklung im Sinne des Klima- und Artenschutzes sehr zu begrüßen ist, erscheint für einen nachhaltigen Markthochlauf eine ausreichende definitorische Trennschärfe zwischen diesen PV-Konzepten von zentraler Wichtigkeit, um die Transparenz und letztlich die gesellschaftliche Akzeptanz gegenüber

Agri-PV zu erhalten. Beim bevorstehenden Markthochlauf erscheinen daher folgende Handlungsfelder besonders relevant:

- Eine klare Definition mit messbaren Kriterien der verschiedenen PV-Konzepte mit doppeltem Flächennutzungscharakter, welche nicht primär auf eine intensive landwirtschaftliche Nutzung der Fläche, sondern auf eine Steigerung der Artenvielfalt oder der Bereitstellung weiterer Ökosystemdienstleistungen abzielen.
- Eine Vergütung des Stroms aus Agri-PV-Anlagen nach EEG zu differenzierten Vergütungssätzen, die die Mehrkosten und Synergien der verschiedenen bodenhanhen und hoch aufgeständerten Agri-PV-Anwendungen ausreichend berücksichtigen.
- Eine wissenschaftliche Begleitung des Markthochlaufs, um die notwendige Datenbasis zur Bewertung der verschiedenen Anlagentypen und Anwendungsbereiche zu schaffen und um Fehlentwicklungen rechtzeitig und effektiv begegnen zu können.

Besonders geeignet für einen Markteintritt der Agri-PV erscheinen gartenbauliche Anwendungen. Gründe hierfür sind die häufige räumliche Nähe der Erzeugungsflächen zum Hof, die hohen Synergiepotenziale für die Kulturpflanzen, die geringeren Kosten der Aufständigung sowie die relativ leichte Integration in die Bewirtschaftungsweisen von Dauerkulturen. Zudem können Genehmigungsverfahren durch die baurechtliche Privilegierung hofnaher Agri-PV-Anlagen mit räumlich-funktionalem Zusammenhang nach § 35 Abs. 1 Nr. 2 BauGB vereinfacht umgesetzt werden. Dies ist typischerweise vor allem bei Agri-PV im Gartenbau der Fall.

Ein weiterer Vorteil im Gartenbau könnte in einer allgemeinen Steigerung der landwirtschaftlichen Wertschöpfung liegen. Denn viele gartenbauliche Anwendungen sind hochproduktiv: Mit nur rund 1,3 Prozent der landwirtschaftlichen Fläche trägt der Gartenbau über 10 Prozent der Wertschöpfung in der Landwirtschaft bei^[35]. Würden durch eine Förderung von Agri-PV im Gartenbau Anreize für landwirtschaftliche Betriebe gesetzt werden, verstärkt in diesem Sektor aktiv zu sein, so könnte dies selbst bei einem sehr kleinen Flächenanteil der Agri-PV von

deutlich unter einem Prozent eine Hebelwirkung für die gesamte landwirtschaftliche Produktion in Deutschland entfalten. Dies gilt vor allem im Bereich der Obst- und Beerenproduktion.

Bei den Diskussionen zu Agri-PV wird häufig das Argument angebracht, zuerst solle das Potenzial der Dachflächen in Deutschland besser ausgeschöpft werden. Zweifellos werden Dachanlagen auch in Zukunft ein wichtiger Bestandteil des PV-Zubaus sein, und das nicht nur aufgrund ihrer Dezentralität und Flächenneutralität. Doch sprechen gute Gründe dafür, Agri-PV ergänzend zu den bisherigen erneuerbaren Stromerzeugungstechnologien einzusetzen. Denn zum einen kann Agri-PV – vor allem im Falle größerer Systeme – aufgrund von Skaleneffekten im Durchschnitt günstiger realisiert werden als Dachanlagen und somit dazu beitragen, dass erneuerbarer Strom bezahlbar bleibt. Zum anderen können die Module im besten Fall einen Zusatznutzen für das Pflanzenwachstum stiften, während Dachanlagen »nur« flächenneutral sind. Außerdem erfordert die Dynamik der Klimakrise eine gleichzeitige Aktivierung aller sinnvollen Optionen.

Zwar konnte bei den meisten Systemen, welche bisher untersucht wurden, ein leichter Rückgang der Ernteerträge beobachtet werden. Die Ernteergebnisse der Forschungsanlage in Heggelbach im Jahr 2018 weisen jedoch darauf hin, dass die Agri-PV trotz ihres frühen technischen Stadiums eine mögliche Antwort auf die vielfältigen Herausforderungen in der Landwirtschaft bieten könnte. Eine dieser Herausforderungen sind die zunehmenden Dürreperioden in Deutschland. Auch die Tatsache, dass durch die Klimakrise die Durchschnittstemperatur, Wetterextreme, und im Falle von Zentraleuropa auch die Sonneneinstrahlung zunehmen werden, legt nahe, dass das Potenzial einer Schutzfunktion durch PV-Module für Pflanzen in Zukunft größer wird.

Zukünftige Forschungsfelder der Agri-PV sind Potenzialanalysen in Bezug auf unterschiedliche Kulturen, Bauweisen, PV-Modul-Nachführungen und Validierung von Modellen zur Ertragsprognose. Auch die Kombination mit Energiespeichern, organischer PV-Folie und solarer Wasseraufbereitung und -verteilung sowie der Einsatz elektrischer Landmaschinen und intelligenter und

automatischer Feldbearbeitung sind teilweise vielversprechende Forschungsbereiche. Eine Zukunftsvision ist das »Swarm-farming«, bei dem kleinere, solar elektrifizierte Landmaschinen automatisiert unter der Agri-PV-Anlage arbeiten und die Energie hierzu direkt auf der Fläche erzeugen. Die Anforderungen an die Durchfahrtshöhe könnten dadurch möglicherweise deutlich reduziert werden. Die Unterkonstruktion und Stromerzeugung einer Agri-PV-Anlage bieten hier günstige Bedingungen für die Integration solcher Smart-Farming-Elemente. Am Fraunhofer ISE wird derzeit eine automatische Feldbearbeitung in die Unterkonstruktion eines Agri-PV-Systems integriert und auf einer Fläche von 1,2 × 3 Meter getestet.

PV wird neben Windenergie langfristig zur wichtigsten Säule der Energieversorgung. Die Klimakrise und die voranschreitende Wasserknappheit erfordern neue Ansätze in der Landwirtschaft, auch, um die Betriebe ökonomisch und ökologisch resilienter zu machen. Um die Landnutzungskonkurrenz zu entschärfen, bietet die Agri-PV eine Möglichkeit, die PV-Leistung auszubauen, während gleichzeitig fruchtbarer Boden als Ressource für die Nahrungsmittelproduktion nutzbar bleibt. Die doppelte Verwendung der Flächen erhöht die Landnutzungseffizienz beträchtlich. Gleichzeitig könnten die durch verstärkte und häufigere Extremwetterereignisse wie Hitze, Starkregen oder Wassermangel beanspruchten Böden geschützt werden. Darüber hinaus kann die Agri-PV den Energieverbrauch landwirtschaftlicher Betriebe klimafreundlicher decken.

Die spezifischen Herausforderungen und Förderbedarfe der Agri-PV können nur im Rahmen eines sektorübergreifenden Austauschs erkannt werden. Ein wichtiger und zentraler Schritt ist deswegen die Etablierung eines funktionierenden Dialogs zwischen dem Agrar- und dem Energiesektor. Erst dann können Rahmenbedingungen geschaffen werden, die die Bedürfnisse des Landwirtschaftssektors einerseits, und die techno-ökonomischen Möglichkeiten des PV Sektors andererseits in angemessener Weise berücksichtigen. Erst dann kann es gelingen, die Agri-PV gezielt und systematisch zu fördern. Erst dann kann die Chance, welche Agri-PV für die Landwirtschaft und Energiewende bietet, in vollem Umfang ergriffen werden.

9 Literatur und Quellen

9.1 Quellen

- [1] Ketzer, D.: Land Use Conflicts between Agriculture and Energy Production. Systems Approaches to Allocate Potentials for Bioenergy and Agrophotovoltaics. Dissertation, 2020
- [2] Sterchele, P., Brandes, J., Heilig, J., Wrede, D., Kost, C., Schlegl, T., Bett, A. u. Henning, H.-M.: Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem. Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen, Freiburg 2020. <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/wege-zu-einem-klimaneutralen-energiesystem.html>, abgerufen am: 08.06.2020
- [3] Goetzberger, A. u. Zastrow, A.: Kartoffeln unter dem Kollektor. Sonnenenergie 3/81 (1981), S. 19–22
- [4] Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse: APV-RESOLA – Innovationsgruppe Agrophotovoltaik: Beitrag zur ressourceneffizienten Landnutzung. Projektbeschreibung, o. J. https://www.itas.kit.edu/projekte_oes15_apvres.php
- [5] Schindele, S., Trommsdorff, M., Schlaak, A., Obergfell, T., Bopp, G., Reise, C., Braun, C., Weselek, A., Bauerle, A., Högy, P., Goetzberger, A. u. Weber, E.: Implementation of agrophotovoltaics: Techno-economic analysis of the price-performance ratio and its policy implications. Applied Energy 265 (2020), S. 114737
- [6] Stellungnahme zur BMWK-Konsultation »Eckpunkte für ein Ausschreibungsdesign für Photovoltaik-Freiflächenanlagen. «. Agrophotovoltaik (APV) als ressourceneffiziente Landnutzung, Luhmann, D. H.-J., Fishedick, P. D. M. u. Schindele, S., 2014
- [7] Elamri, Y., Cheviron, B., Lopez, J.-M., Dejean, C. u. Belaud, G.: Water budget and crop modelling for agrivoltaic systems: Application to irrigated lettuces. Agricultural Water Management 208 (2018), S. 440–453
- [8] Kelm, T., Metzger, J., Jachmann, H., Günnewig, D., Michael, P., Schicketanz, S., Pascal, K., Miron, T. u. Venus, N.: Vorbereitung und Begleitung bei der Erstellung eines Erfahrungsberichts gemäß § 97 Erneuerbare-Energien-Gesetz. Teilvorhaben II c: Solare Strahlungsenergie. Abschlussbericht, 2019. https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/bmwi_de/zsv-boschundpartner-vorbereitung-begleitung-eeg.pdf?__blob=publicationFile&v=7
- [9] Bundesverband Solarwirtschaft e.V.: Entwicklung des deutschen PV-Marktes. Auswertung und grafische Darstellung der Meldedaten der Bundesnetzagentur. Stand: Mitte Februar 2020, 2020
- [10] DWD – Deutscher Wetterdienst: Zeitreihen und Trends. <https://www.dwd.de/DE/leistungen/zeitreihen/zeitreihen.html?nn=344886#buehneTop>, abgerufen am: 21.12.2021
- [11] Ionita, M., Nagavciuc, V., Kumar, R. u. Rakovec, O.: On the curious case of the recent decade, mid-spring precipitation deficit in central Europe. npj Climate and Atmospheric Science 3 (2020) 1
- [12] Weselek, A., Ehmann, A., Zikeli, S., Lewandowski, I., Schindele, S. u. Högy, P.: Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities. A review. Agronomy for Sustainable Development 39 (2019) 4, S. 35
- [13] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.: Anbau und Verwendung nachwachsender Rohstoffe in Deutschland. Stand: März 2019, 2019
- [14] Fraunhofer-Zentrum für Internationales Management und Wissensökonomie IMW: Nachhaltige Kombination von bifacialen Solarmodulen, Windenergie und Biomasse bei gleichzeitiger landwirtschaftlicher Flächennutzung und Steigerung der Artenvielfalt, o. J. (Abschlussbericht) https://www.openagrar.de/servlets/MCRFileNodeServlet/openagrar_derivate_00043193/BMWi_03EI5209A-D_Schlussbericht-TIB-20211129.pdf
- [15] Next2Sun GmbH: Referenzen. <https://www.next2sun.de/referenzen/>
- [16] Feasibility and Economic Viability of Horticulture Photovoltaics in Paras, Maharashtra, India, Trommsdorff, M., Schindele, S., Vorast, M., Durga, N., Patwardhan, S. M., Baltins, K., Söthe-Garnier, A. u. Grifi, G., 2019
- [17] Schneider, K.: Agrophotovoltaik: hohe Ernteerträge im Hitzesommer. Freiburg 2019
- [18] Schneider, K.: Agrophotovoltaik goes global: von Chile bis Vietnam. Freiburg 2018
- [19] Brasseur, G. P., Jacob, D. u. Schuck-Zöller, S.: Klimawandel in Deutschland. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2017

- [20] Ballester, J., Rodó, X. u. Giorgi, F.: Future changes in Central Europe heat waves expected to mostly follow summer mean warming. *Climate Dynamics* 35 (2010) 7–8, S. 1191–1205
- [21] Barron-Gafford, G. A., Pavao-Zuckerman, M. A., Minor, R. L., Sutter, L. F., Barnett-Moreno, I., Blackett, D. T., Thompson, M., Dimond, K., Gerlak, A. K., Nabhan, G. P. u. Macknick, J. E.: Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands. *Nature Sustainability* 2 (2019) 9, S. 848–855
- [22] Marrou, H., Wery, J., Dufour, L. u. Dupraz, C.: Productivity and radiation use efficiency of lettuces grown in the partial shade of photovoltaic panels. *European Journal of Agronomy* 44 (2013), S. 54–66
- [23] Abeysinghe, S. K., Greer, D. H. u. Rogiers, S. Y.: The effect of light intensity and temperature on berry growth and sugar accumulation in *Vitis vinifera* 'Shiraz' under vineyard conditions. *VITIS - Journal of Grapevine Research* 58/1 (2019), S. 7–16
- [24] Büchele, M.: Lucas' Anleitung zum Obstbau. Libreka GmbH; Verlag Eugen Ulmer 2018
- [25] The Power to Change: Solar and Wind Cost Reduction Potential to 2025, International Renewable Energy Agency, 2016
- [26] Solaranlage Ratgeber: Anschaffungskosten für Photovoltaik-Anlagen, o. J. <https://www.solaranlage-ratgeber.de/photovoltaik/photovoltaik-wirtschaftlichkeit/photovoltaik-anschaffungskosten>, abgerufen am: 07.08.2020
- [27] E.ON Energie Deutschland GmbH: Solaranlage Kosten: Was kostet Photovoltaik 2020?, o. J. <https://www.eon.de/de/pk/solar/photovoltaik-kosten.html>, abgerufen am: 07.08.2020
- [28] Grave, K., Hazart, M., Boeve, S., Blücher, F. von, Bourgault, C., Bader, N., Breitschopf, B., Friedrichsen, N., Arens, M., Aydemir, A., Pudlik, M., Duscha, V. u. Ordonez, J.: Stromkosten der energieintensiven Industrie. Ein internationaler Vergleich. Zusammenfassung der Ergebnisse, 2015
- [29] Tietz, A.: Der landwirtschaftliche Bodenmarkt – Entwicklung, Ursachen, Problemfelder. *Wertermittlungsforum* 36(2) (2018), S. 54–58
- [30] Valle, B., Simonneau, T., Sourd, F., Pechier, P., Hamard, P., Frisson, T., Ryckewaert, M. u. Christophe, A.: Increasing the total productivity of a land by combining mobile photovoltaic panels and food crops. *Applied Energy* 206 (2017), S. 1495–1507
- [31] Elamri, Y., Chevion, B., Mange, A., Dejean, C., Liron, F. u. Belaud, G.: Rain concentration and sheltering effect of solar panels on cultivated plots. *Hydrology and Earth System Sciences* 22 (2018) 2, S. 1285–1298
- [32] Rösch, C.: Agrophotovoltaik – die Energiewende in der Landwirtschaft. *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society* 25 (2016) 4, S. 242–246
- [33] Soziales Nachhaltigkeitsbarometer der Energiewende 2019. Kernaussagen und Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse, Wolf, I., Potsdam 2020
- [34] Soziales Nachhaltigkeitsbarometer der Energie- und Verkehrswende 2021. Kernaussagen und Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse, Wolf, I., Fischer, A.-K. F. u. Huttarsch, J.-H., Potsdam 2021
- [35] Rösch, C., Götz, S., Hildebrand, J., Venghaus, S. u. Witte, K.: Transdisziplinäre Ansätze zur Erforschung gesellschaftlicher Akzeptanz. *Energy Research for Future – Forschung für die Herausforderungen der Energiewende* (2019)
- [36] Ketzer, D., Weinberger, N., Rösch, C. u. Seitz: Land use conflicts between biomass and power production – Citizens' participation in the technology development of agrophotovoltaics. *Journal of Responsible Innovation* (2020) 7 (2), S. 193–216
- [37] Ketzer, D., Schlyter, P., Weinberger, N. u. Rösch, C.: Driving and restraining forces for the implementation of the Agrophotovoltaics system technology A system dynamics analysis. *Journal of environmental management* 270 (2020), S. 110864
- [38] BMEL Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft: Der Gartenbau in Deutschland Auswertung des Gartenbaumoduls der Agrarstrukturhebung 2016. https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/Gartenbauerhebung.pdf?__blob=publicationFile&v=7

9.2 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Agri-PV-Forschungsanlage am Bodensee © Fraunhofer ISE	
Abb. 2	Illustration eines Agri-PV-Systems © Fraunhofer ISE	
Abb. 3	Projektpartner von APV-RESOLA	
Abb. 4	Entwicklung der Agri-PV seit 1981 © Fraunhofer ISE	
Abb. 5	Flächeninanspruchnahme von PV-FFA seit 2004 in Deutschland, Gesamtanlagenbestand und jährlicher Zubau © BMWK ^[8]	
Abb. 6	Anwendungen für die Integration von Photovoltaik © Fraunhofer ISE	
Abb. 7	Typische PV-FFA © Fraunhofer ISE	
Abb. 8	Entwicklung der Niederschläge und der Globalstrahlung in Deutschland seit 1991 Daten: Deutscher Wetterdienst © Fraunhofer ISE	
Abb. 9	Klassifizierung von Agri-PV-Systemen © Fraunhofer ISE	
Abb. 10	Illustration der Kategorien und Nutzungsformen der DIN SPEC 91434 © Fraunhofer ISE	
Abb. 11	Flächennutzung in Deutschland © Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (2023) ^[13]	
Abb. 12	Querschnitt der Agri-PV-Anlage in Weihenstephan © 2020 B. Ehrmaier, M. Beck, U. Bodmer	
Abb. 13	Skizze der Agri-PV-Referenzanlage in Heggelbach © AGRISOLAR Europe GmbH	
Abb. 14	Die Hofgemeinschaft Heggelbach konnte im Sommer 2017 ihren Strombedarf fast vollständig durch den auf der Agri-PV-Anlage erzeugten Strom decken © BayWa r.e.	
Abb. 15	Durch die kombinierte Flächennutzung betrug die Flächennutzungseffizienz mit Agri-PV im Kartoffelanbau auf dem Testgelände in Heggelbach bis zu 186 Prozent © Fraunhofer ISE	
Abb. 16	Agri-PV-Anlage auf dem Bio-Obsthof Nachtwey (2021, 2023) © Fraunhofer ISE	
Abb. 17	Agri-PV-Anlage in Blankenhornsberg 2023 © Jona Pillatzke, WBI	
Abb. 18	Agri-PV-Anlage in Geisenheim © HS Geisenheim	
Abb. 19	Erste Agri-PV-Anlage im Obstversuchsgut © Tobias Gabler, LVWO Weinsberg	
Abb. 20	Zweite Agri-PV-Forschungsanlage des LVWO © Thorsten Espey, LVWO Weinsberg	
Abb. 21	Agri-PV Forschungsanlage in Augustenberg © Constanze Mesca, LTZA Augustenberg	
Abb. 22	Hochaufgeständerte Agri-PV-Anlage über einer Wiederaufforstungsfläche © Emil Steidle GmbH & Co. KG	22
Abb. 23	Agri-PV-Anlage mit den Hopfensorten Herkules und Hallertauer Tradition. © Agrarenergie.solar	23
Abb. 24	Modulreihe mit bifazialen Modulen der Agri-PV-Anlage in Heggelbach © Fraunhofer ISE	24
Abb. 25	Vertikale Agri-PV in Aasen, Donaueschingen © Solverde Bürgerkraftwerke	25
Abb. 26	Agri-PV-Anlage auf dem Obsthof Vollmer © Emil Steidle GmbH & Co. KG	26
Abb. 27	Agri-PV mit Hühnerhaltung © Alexa Aldana Torres Boggio, Fraunhofer ISE	27
Abb. 28	Agri-PV-Anlage in Kressbronn (2022) © Fraunhofer ISE	29
Abb. 29	Vertikale Agri-PV-Anlage in Merzig-Willingen, 2023 © Universität Hohenheim	30
Abb. 30	Kühe in einer bodennahen Agri-PV-Anlage © Janine Nachtsheim	31
Abb. 31	Agri-PV-Anlage in Indien © Fraunhofer ISE	32
Abb. 32	Pilotanlagen des Fraunhofer Chile Research Instituts in Curacavi und Lampa untersuchen, welche Kulturpflanzen von einer weniger starken Sonneneinstrahlung profitieren © Fraunhofer Chile	33
Abb. 33	Studie mit verschiedenen Salatsorten in der Agri-PV-Forschungsanlage der Universität von Montpellier, Frankreich © INRAE/Christian Dupraz	34
Abb. 34	PV-Gewächshaus © Fraunhofer ISE	35
Abb. 35	Untersuchte Kulturen in Heggelbach (Sellerie, Kartoffeln, Weizen, Klee gras) © Universität Hohenheim/Andrea Bauerle	36
Abb. 36	Feldplan des Versuchsaufbaus 2017 mit Messstationen. Bereiche in denen Proben entnommen wurden, werden durch Kästchen, Positionen von Mikroklimastationen durch Kreise angezeigt © BayWa, verändert durch Axel Weselek/Universität Hohenheim	37
Abb. 37	Ertragsunterschiede der Kulturen unter Agri-PV gegenüber Referenzflächen 2017 (blau) und 2018 (rot) in Heggelbach (ohne Flächenverluste durch Stützen) Daten: Universität Hohenheim, © Fraunhofer ISE	38
Abb. 38	Rammschutz der Aufständigung der Anlage in Heggelbach vor der Beschädigung durch Landmaschinen © AGROSOLAR Europe GmbH	38

Abb. 39 Illustration einer Agri-PV-Apfelplantage © Fraunhofer ISE	39	Abb. 56 Halbschatten durch Solarröhren, eingehängt zwischen Spannseilen der Firma TubeSolar © sbp sonne GmbH	51
Abb. 40 Agri-PV mit nachgeführten Modulen in Frankreich © Sun'Agri	40	Abb. 57 Hoch aufgeständerte Anlagen mit schmalen PV-Modulen in Italien © REM Tec	51
Abb. 41 Witterungsschutz für Himbeeren durch Agri-PV. 300 kW _p Testanlage von BayWa. r.e in den Niederlanden © BayWa r.e.	40	Abb. 58 Hoch aufgeständerte Anlage mit durchgängigen Modulreihen © Sun'Agri	52
Abb. 42 Demoprojekt im Beerenbau zeigt hohe Wertschöpfung in der Landwirtschaft © BayWa r.e.	41	Abb. 59 Einachsiges Trackersystem einer Demonstrations- anlage in Frankreich © Sun'Agri	53
Abb. 43 Weizenernte mit Mähdrescher © Fraunhofer ISE	41	Abb. 60 Spinnanker mit Ankerplatte und Gewindestäben fundamentieren das Montagesystem im Boden © Spinnanker GmbH	54
Abb. 44 Schematisch: Photosyntheserate in Abhängigkeit der Beleuchtungsstärke bei Sonnen- und Schattenpflanzen ^[24] © ASPS, abgeändert durch Fraunhofer ISE	42	Abb. 61 Illustration verschiedener Anlagentypen mit Ost-West-, Süd- und Süd-Ost-Ausrichtung © Fraunhofer ISE	54
Abb. 45 Vertikal errichtete, bifaziale Module im Solarpark in Eppelborn-Dirmingen, Saarland mit 2 MW _p Leistung, errichtet von Next2Sun © Next2Sun GmbH	42	Abb. 62 Die Schattenstreifen der Solarmodule wandern mit dem Sonnenstand © Universität Hohenheim	49
Abb. 46 Thomas Schmid und Florian Reyer von der Hofgemeinschaft Heggelbach © AMA Film GmbH	43	Abb. 63 Schattenwurf der lichtdurchlässigen PV-Module über Weinreben © HS Geisenheim	49
Abb. 47 Geschätzte Investitionsausgaben (CAPEX) für PV-FFA und Agri-PV © Fraunhofer ISE	45	Abb. 64 Konzept einer Regenauffangvorrichtung mit Speichertank © Fraunhofer ISE	56
Abb. 48 Geschätzte Stromgestehungskosten unterteilt nach Investitionsausgaben (CAPEX) und Betriebskosten (OPEX) von PV-Freiflächen- anlagen und Agri-PV im Vergleich © Fraunhofer ISE	46	Abb. 65 Agri-PV-Anlage in Heggelbach mit einer Leistung von 194 kW _p auf etwa einem Drittel Hektar © Fraunhofer ISE	56
Abb. 49 Geschätzte Stromgestehungskosten (LCOE) für PV-Freiflächenanlagen und Agri-PV © Fraunhofer ISE	47	Abb. 66 Solarpark Eppelborn-Dirmingen mit 2 MW _p mit vertikalen Solarzäunen von Next2Sun © Next2Sun GmbH	56
Abb. 50 Interessensgruppen und Vertragsmodell © Fraunhofer ISE	49	Abb. 67 Arbeiten in einer Agri-PV-Anlage unter den Solarmodulen © Fabian Karthaus	58
Abb. 51 Hoch aufgeständerte Anlage mit Möglichkeit zur Bewirtschaftung mit dem Kartoffelvollernter © Hofgemeinschaft Heggelbach	50	Abb. 68 Baust Straßen zur Vermeidung von Boden- verdichtung © BayWa r.e.	59
Abb. 52 PV-Module mit erweiterten Zellzwischenräumen und Schutzfunktion in den Niederlanden © BayWa r.e.	50	Abb. 69 Wartungsarbeiten an der Agri-PV-Anlage in Heggelbach © Fraunhofer ISE	59
Abb. 53 Bifaziale, senkrecht aufgestellte Module von Next2Sun, Eppelborn-Dirmingen © Next2Sun GmbH	51	Abb. 70 Bürgerinformationsveranstaltung im Projekt APV-RESOLA © ITAS	62
Abb. 54 PV-Module über einem Folientunnel © BayWa r.e.	51	Abb. 71 Modell der Heggelbach-Anlage für Informationsveranstaltungen © Fraunhofer ISE	62
Abb. 55 Spezielle Dünnschicht-Module in Röhrenform der Firma TubeSolar © TubeSolar AG	51	Abb. 72 Mehrstufiger transdisziplinärer Agri-PV- Forschungsansatz © ITAS	63
		Abb. 73 Landwirtschaftlich nicht bearbeitbare Zwischenstreifen könnten bei Agri-PV-Anlagen genutzt werden, um die Biodiversität auf den landwirtschaftlichen Flächen zu erhöhen © Fraunhofer ISE	65
		Abb. 74 Beispiel für den Ablauf eines Baugenehmigungs- verfahrens © Fraunhofer ISE	66

9.3 Tabellenverzeichnis

Tab. 01	Überblick über Kategorien und Nutzungsformen der DIN SPEC 91434	11
Tab. 02	Überblick über bisherige Agri-PV-Forschungsanlagen in Deutschland	13
Tab. 03	Schaden an Kohlpflanzen © 2020 B. Ehrmaier, M. Beck, U. Bodmer	14
Tab. 04	Überblick über aufgeführte und einige weitere Praxisanlagen in Deutschland	20
Tab. 05	Überblick über einige Forschungsprojekte in Deutschland	23
Tab. 06	Konstellationen verschiedener Agri-PV-Geschäftsmodelle (in Anlehnung an Schindele et. al. 2019 ^[5])	43
Tab. 07	Übersicht über Genehmigungsschritte für Agri-PV	52

9.4 Abkürzungen

Agri-PV	Agri-Photovoltaik
APV-RESOLA	Agrophotovoltaik-Ressourceneffiziente – Landnutzung
BauGB	Baugesetzbuch
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CAPEX	Investitionsausgaben (capital expenditure)
CIS	Kupfer-Indium-Selenid
CdTE	Cadmiumtellurid
CPV	Konzentrierende Photovoltaik
EE	Erneuerbare Energien
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
GW	Gigawatt
GWh	Gigawattstunde
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
LCOE	Stromgestehungskosten (Levelized Cost of Electricity)
MW	Megawatt
MWh	Megawattstunde
OPEX	Betriebskosten (operational expenditure)
OPV	Organische Photovoltaik
PPA	Power Purchase Agreements
PV-FFA	Photovoltaik – Freiflächenanlagen
REAP	Rural Energy Advancement Programs
STC	Standard-Testbedingungen
TWh	Terrawattstunde
W	Watt
Wh	Wattstunden
a-Si	Amorphes Silizium
μ-Si	Mikrokristallines Silizium
ZALF	Leibniz-Zentrums für Agrarlandschaftsforschung

9.5 Links zu weiterführenden Informationen

Webseite zur Agri-Photovoltaik des Fraunhofer ISE:

<https://www.agri-pv.org>

Kurzfilm über die Agri-PV-Forschungsanlage in Heggelbach:

<https://www.youtube.com/watch?v=BlXPf-e1a0U>

Handlungsleitfaden Freiflächensolaranlagen des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg:

<https://um.baden-wuerttemberg.de/de/service/publikation/did/handlungsleitfaden-freiflaechensolaranlagen/>

FuE für Agri-Photovoltaik am Fraunhofer ISE:

<https://ise.link/agri-pv>

Projektseite APV-Obstbau:

<https://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/apv-obstbau.html>

Branchenverzeichnis Agri-Photovoltaik des Beratungsnetzwerks LandSchafttEnergie:

<https://www.landschafttnergie.bayern/beratung/branchenverzeichnis/>

DIN SPEC 91434:2021-05, »Agri-Photovoltaik-Anlagen - Anforderungen an die landwirtschaftliche Hauptnutzung«:

<https://www.beuth.de/de/technische-regel/din-spec-91434/337886742>

Statusbericht zu Agri-Photovoltaik des Technologie- und Förderzentrums, Straubing:

<https://www.tfz.bayern.de/service/presse/268709/index.php>

Gefördert durch



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft



SynAgri-PV

Kontakt

Dr. Max Trommsdorff
Tel. +49 761 4588-2456
max.trommsdorff@ise.fraunhofer.de

Dr. Harry Wirth
Bereichsleiter Strom

Fraunhofer-Institut
für Solare Energiesysteme ISE
Heidenhofstraße 2
79110 Freiburg

www.ise.fraunhofer.de
www.agri-pv.org

Institutsleitung
Prof. Dr. Hans-Martin Henning
Prof. Dr. Andreas Bett



PDF-Version des
Agri-PV-Leitfadens

