

Agri-Photovoltaik: Chance für Landwirtschaft und Energiewende

Ein Leitfaden für Deutschland | Stand April 2022

Impressum

Herausgeber

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

Autorinnen und Autoren

Max Trommsdorff (Fraunhofer ISE)
Simon Gruber (Fraunhofer ISE)
Tobias Keinath (Fraunhofer ISE)
Michaela Hopf (Fraunhofer ISE)
Charis Hermann (Fraunhofer ISE)
Frederik Schönberger (Fraunhofer ISE)
apl. Prof. Dr. Petra Högy (Universität Hohenheim)
Dr. Sabine Zikeli (Universität Hohenheim)
Andrea Ehmann (Universität Hohenheim)
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)
Stephan Schindele (BayWa r.e.)
Jens Vollprecht, Rechtsanwalt, Dipl. Forstw. (Univ.)
(Becker Büttner Held Rechtsanwälte BBH)

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 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, 2022

2. Auflage, April 2022

Vorwort



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 Erneuerbaren 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 startet dazu voraussichtlich Mitte 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	10
2.3	Definition und Potenzial der Agri-Photovoltaik	11
2.4	Forschungsanlagen in Deutschland	14
2.5	Praxisanlagen in Deutschland	19
2.6	Internationale Entwicklung	21
3	Landwirtschaft	24
3.1	Forschungsergebnisse APV-RESOLA	25
3.2	Bewirtschaftung und Kulturauswahl	26
3.3	Landwirte berichten	31
4	Wirtschaftlichkeit und Geschäftsmodelle	32
4.1	Investitionskosten	33
4.2	Operative Kosten	34
4.3	Stromgestehungskosten	35
4.4	Eigenverbrauch und Stromerlöse	35
4.5	Geschäftsmodelle	36
5	Technik	38
5.1	Ansätze für Agri-PV-Anlagenkonstruktionen	39
5.2	Modultechnologien	40
5.3	Unterkonstruktion und Fundament	41
5.4	Lichtmanagement	43
5.5	Wassermanagement	44
5.6	Größe der Photovoltaikanlage	44
5.7	Genehmigung, Installation und Betrieb	45

6	Gesellschaft	48
6.1	Einbindung von Bürgerinnen und Bürgern sowie Interessensgruppen	49
6.2	Kontextspezifische Akzeptanz	49
6.3	Zwei Beispiele für Dialog und Beteiligung	50
6.4	Erfolgsfaktoren	52
7	Politik und Recht	54
7.1	Gesetzliche Rahmenbedingungen	55
7.2	Politische Handlungsempfehlungen	61
8	Agri-Photovoltaik voranbringen	64
9	Literatur und Quellen	66
9.1	Quellen	66
9.2	Abbildungsverzeichnis	68
9.3	Tabellenverzeichnis	70
9.4	Abkürzungen	70
9.5	Links zu weiterführenden Informationen	70

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 dabei bereits heute vielerorts unter Druck. Die Handlungsspielräume für den Arten- und Gewässerschutz einerseits und die Steigerung beziehungsweise Stabilisierung der Ernteerträge andererseits werden dadurch spürbar enger.

Landwirtschaftliche Flächen doppelt nutzen

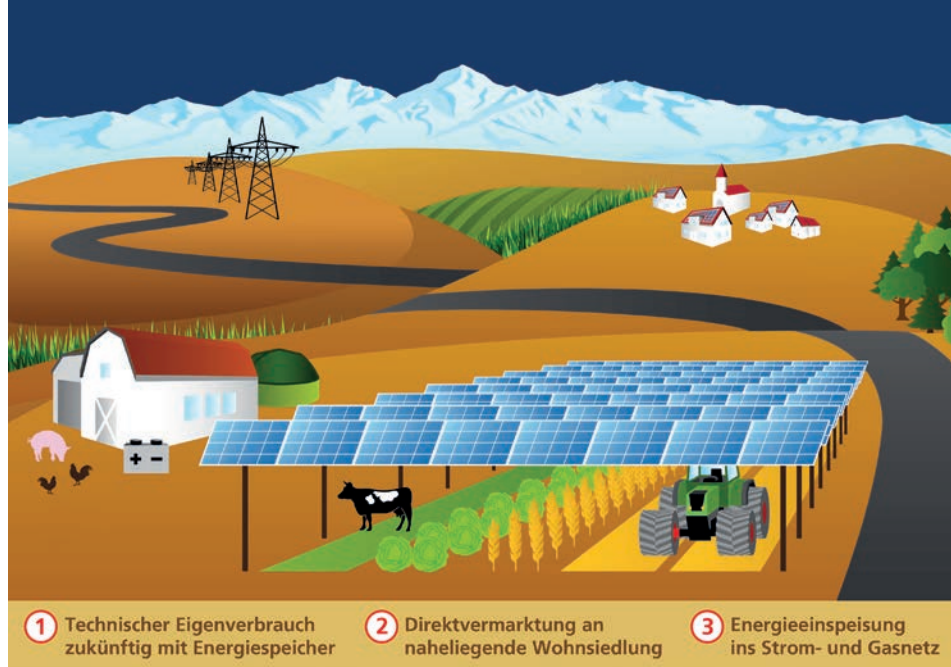
Künftig könnte die Agri-Photovoltaik, kurz Agri-PV, die Flächenkonkurrenz durch eine doppelte Nutzung der Flächen entschärfen: Sie bietet die Möglichkeit, große PV-Flächen im Freiland umzusetzen und gleichzeitig Böden für die Nahrungsmittelproduktion zu erhalten. Die doppelte Nutzung von Flächen für 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 sechs bis acht 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 Metern Durchfahrtshöhe 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 zweiten 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.

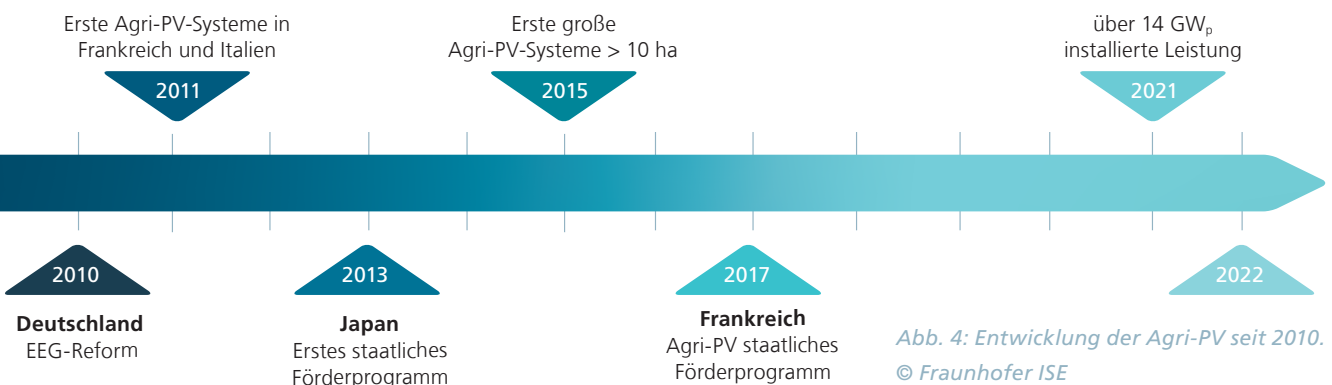


Abb. 3: Projektpartner von APV-RESOLA.



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 fünf 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. 2014), Frankreich (seit 2017), den USA (seit 2018) und zuletzt Korea^[5].



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 zum Beispiel 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

Während die technische und ökonomische Machbarkeit der Agri-PV in vielen Ländern nachgewiesen wurde, bestehen in Deutschland weiterhin Hürden für eine verbreitete Nutzung. So herrscht in Deutschland nach aktueller Gesetzgebung immer noch Unklarheit über die notwendigen Schritte für eine Baugenehmigung. Auch die Fördermöglichkeit im Rahmen der Innovationsausschreibungen des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG 2021) setzt voraussichtlich keine adäquaten Anreize. Nähere Informationen zum Rechtsrahmen in Deutschland finden sich in Kapitel 7.1.

Die gesellschaftliche Akzeptanz stellt für Agri-PV in manchen Regionen eine weitere Herausforderung dar. Die frühzeitige Einbeziehung der Interessensgruppen und der Bürgerinnen und Bürger der Kommunen, auf deren Gemarkung die geplante Agri-PV-Anlage errichtet werden soll, gehört deshalb zu wichtigen Aktionsfeldern und wird in Kapitel 6 thematisiert.

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 ratsam. Nur so können die ökologischen und ökonomischen Chancen und Risiken sowie die nicht-technischen, 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 7.2 dargelegt.

Agri-Photovoltaik auf einen Blick

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

Vorteile

- Vereinbarung von Freiflächen-PV-Anlagen mit Landwirtschaft
- Möglicher Zusatznutzen für die Landwirtschaft unter anderem durch Schutz vor 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
- Gesetzliche Einspeisevergütung nach EEG für kleine, nicht ausschreibungspflichtige hoch aufgeständerte Agri-PV-Anlagen (< 1 MW_p) erreichen (kriteriengestützt)
- Separates Ausschreibungssegment für große, ausschreibungspflichtige hoch aufgeständerte Agri-PV-Anlagen (> 1 MW_p) erreichen (kriteriengestützt)
- Teil-Privilegierung im BauGB: Anlagen im Gartenbau und kleine Anlagen unter einem MW_p als privilegierte Vorhaben nach §35 Baugesetzbuch einordnen, um Genehmigungsverfahren zu vereinfachen
- 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

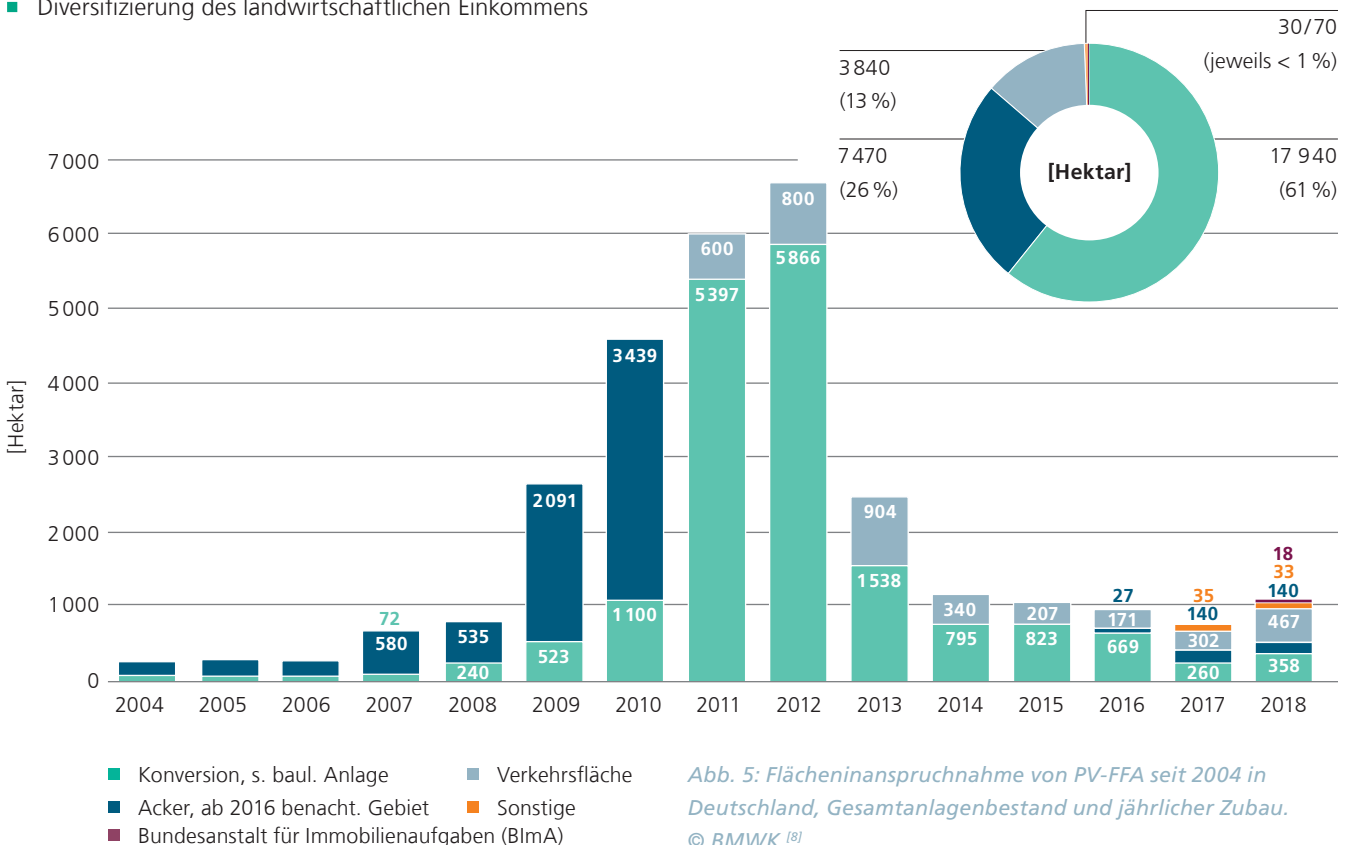


Abb. 5: Flächeninanspruchnahme von PV-FFA seit 2004 in Deutschland, Gesamtanlagenbestand und jährlicher Zubau. © BMWK [8]

2 Daten und Fakten zur Agri-Photovoltaik



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

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 vier und elf Eurocent pro Kilowattstunde.

Solarstrom genießt außerdem eine hohe Akzeptanz in der Bevölkerung. Im Vergleich zur 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, zum Beispiel 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. Grundsätzlich 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 schon 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 BMBF ist Forschung und Entwicklung im Bereich der Agri-Photovoltaik ein wichtiges Unterfangen.

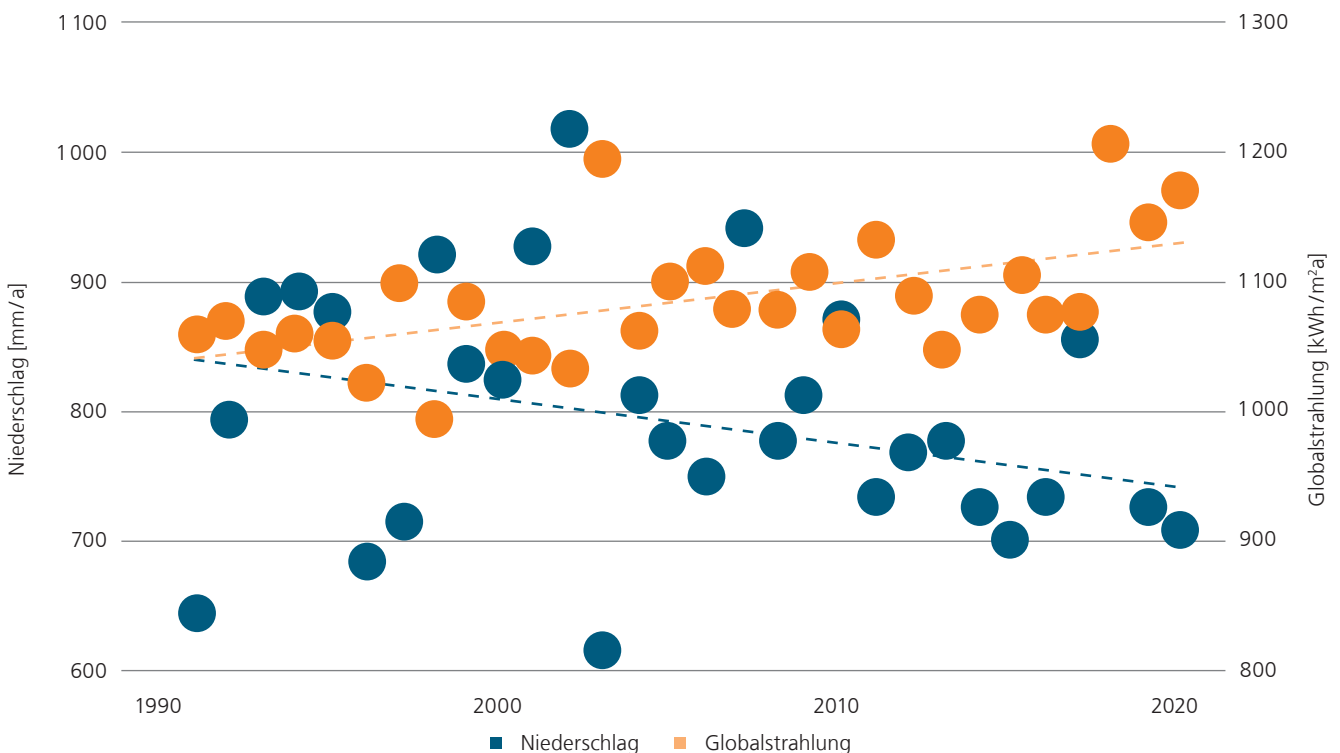
Abb. 7: Typische PV-FFA. © Fraunhofer ISE



2.2 Niederschläge und Globalstrahlung

Obwohl deutschlandweite Langzeitmessungen seit 1880 eine mittlere jährliche Zunahme des Niederschlags von acht Prozent ergeben, zeigt die Niederschlagsentwicklung der vergangenen 30 Jahre 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 zwölf 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 zwölf 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, Darstellung 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.

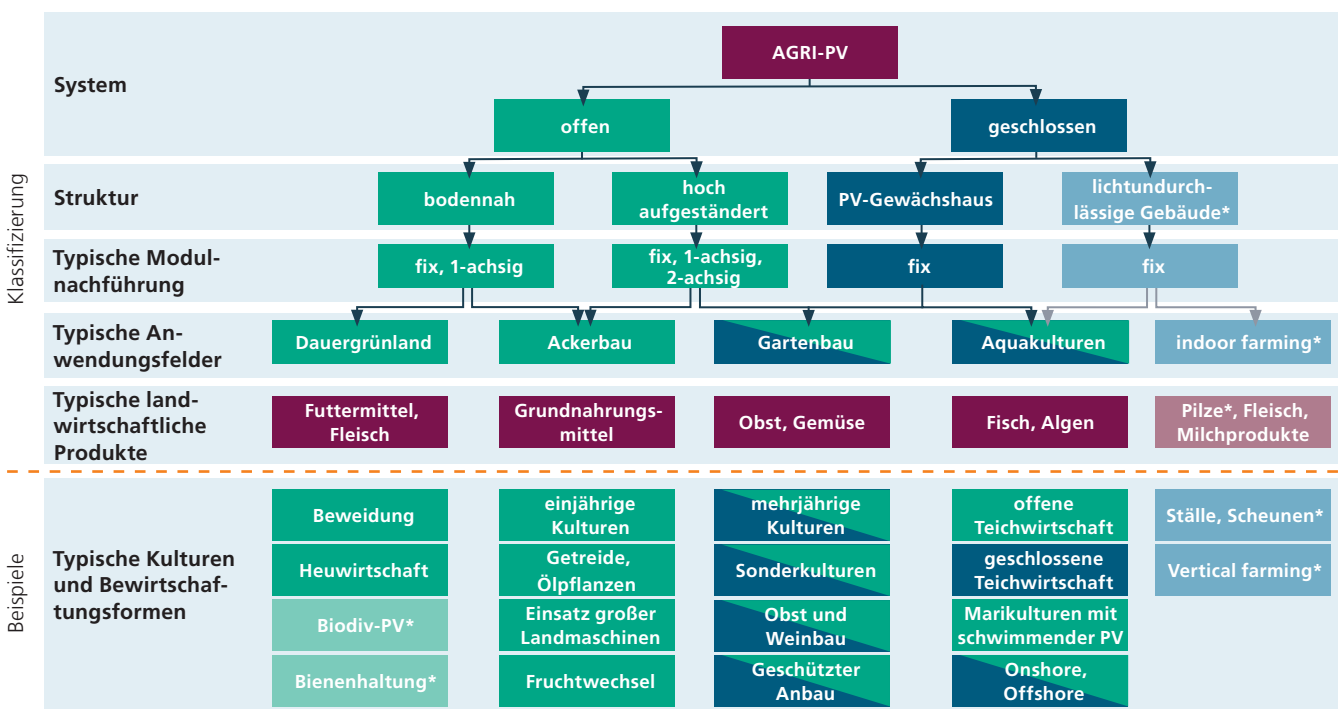
Die technischen Ansätze zur Integration der PV in die Landwirtschaft sind so vielfältig wie die Landwirtschaft selbst. Eine grobe Einteilung kann in offene und geschlossene Systeme vorgenommen werden (siehe Abbildung 9). Geschlossene Systeme umfassen im Wesentlichen PV-Gewächshäuser. Offene Agri-PV-Systeme 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 Meter über dem Boden (siehe Abschnitt zur DIN SPEC 91434 unten). 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 allen 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.

Ähnlich wie im Fall von PV-FFA kann eine Agri-PV-Anlage sowohl mit einer starren Unterkonstruktion als auch mit 1- oder 2-achsigen beweglichen Konstruktionen (sogenannte Tracker) realisiert werden. Bewegliche Systeme ermöglichen durch individuelles Ausrichten der PV-Module ein flexibles 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 Gemüse-, Obst- und Weinbau. In geringerem Umfang wird auch auf bodennahe Anlagen mit Anwendungen im Dauergrünland 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 5.1 zu finden.

Abb. 9: Klassifizierung von Agri-PV-Systemen.
© Fraunhofer ISE



*Keine Agri-PV-Anwendung im engeren Sinne

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

Das Fraunhofer ISE und die Uni Hohenheim haben zusammen mit einem Konsortium aus 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 helfen, Agri-PV-Anlagen klar von herkömmlichen PV-FFA abzugrenzen. Dies erscheint für eine erfolgreiche Markteinführung als notwendige Voraussetzung. Denn die DIN SPEC bietet dem Gesetz- und Fördermittegeber sowie den Genehmigungsbehörden eine Grundlage zur Prüfung und legt Qualitätskriterien für den Bau und den Betrieb von Agri-PV-Anlagen fest. Weitergehend sollen auf Basis der DIN SPEC auch ein Prüfverfahren und Möglichkeiten einer Zertifizierung für Agri-PV-Anlagen entwickelt werden.

In dem Konsortium zur Entwicklung der DIN SPEC haben sich 15 Institutionen beteiligt, die meisten davon aus dem PV-Sektor. Die Anforderungen der DIN SPEC beziehen sich hauptsächlich auf landwirtschaftliche Aspekte, da die relevanten technischen PV-Normen bereits bestehen und auch für die Agri-PV so übernommen werden können. In Tabelle 01 sind die wichtigsten Inhalte der DIN SPEC und deren Kategorisierung von Agri-PV-Anlagen dargestellt.

Grundsätzlich gilt für alle Kategorien, 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

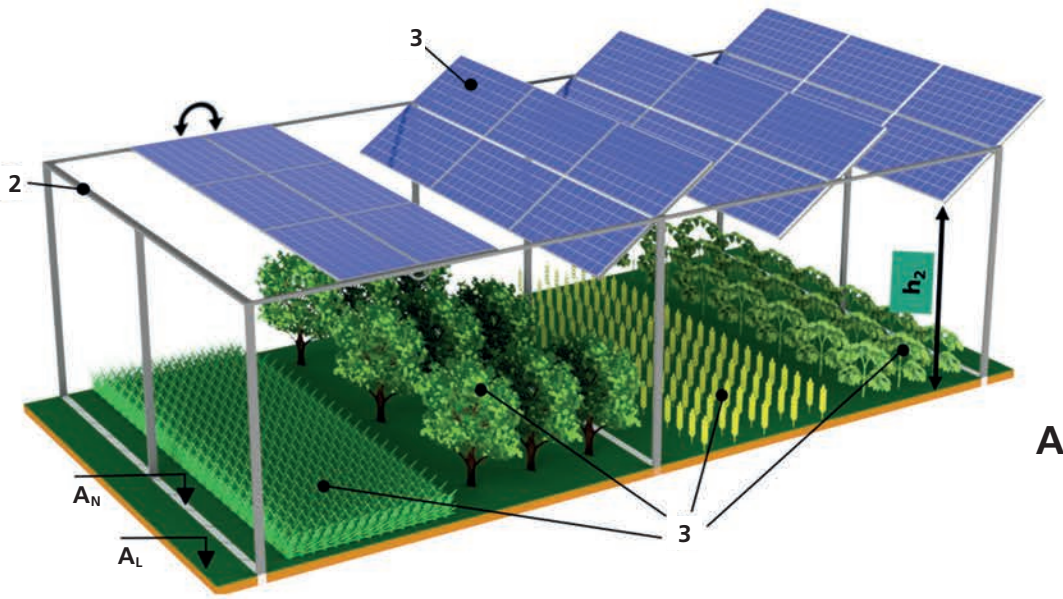
landwirtschaftlichen Nutzungskonzept festgehalten werden. Für das Nutzungskonzept gelten folgende Kernanforderungen und Kriterien:

- Die bisherige landwirtschaftliche Nutzbarkeit der Fläche muss weiterhin gewährleistet sein 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 Gesamtprojektfläche 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 dient ein dreijähriger Durchschnittswert derselben landwirtschaftlichen Fläche oder vergleichbare Daten aus Veröffentlichungen.

Neben diesen zentralen Kenngrößen und Anforderungen enthält die DIN SPEC weitere Empfehlungen für eine erfolgreiche Planung und Installation von Agri-PV-Anlagen. Die DIN SPEC steht unter folgendem Link zum kostenlosen Download zur Verfügung: <https://www.din.de/de/din-und-seine-partner/presse/mitteilungen/oben-strom-unten-gemuese-797786>

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

Agri-PV-Systeme	Nutzung	Beispiele
Kategorie I: Bodennahe Aufständerung < 2,1 m Bewirtschaftung unter der Agri-PV-Anlage (Bild 1)	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 (zum Beispiel Rinder, Geflügel, Schafe, Schweine und Ziegen)
Kategorie II: Bodennahe Aufständerung < 2,1 m Bewirtschaftung zwischen den Agri-PV-Anlagenreihen (Bild 2/3)	2A: 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
	2D: Dauergrünland mit Weidenutzung	Dauerweide, Portionsweide (zum Beispiel Rinder, Geflügel, Schafe, Schweine und Ziegen)



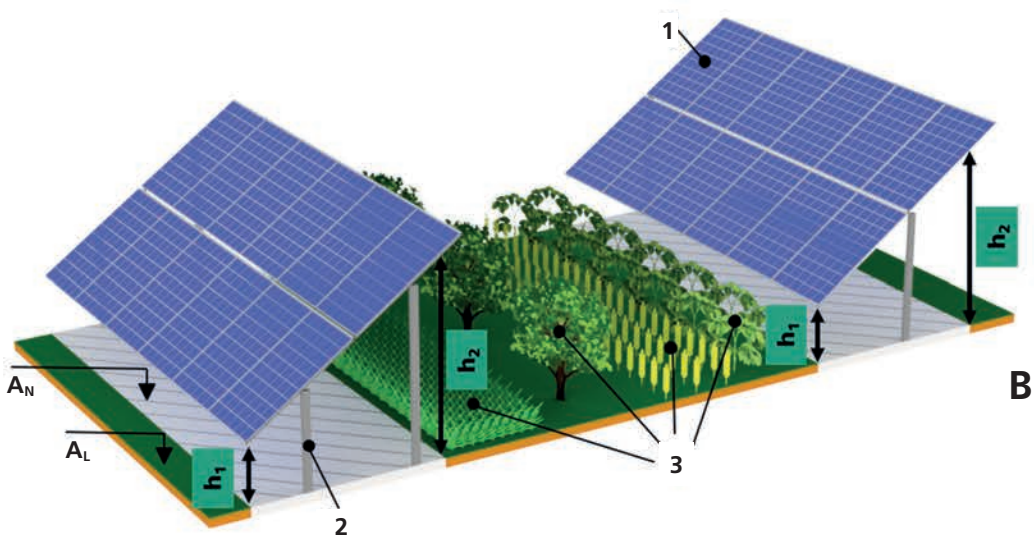
A

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

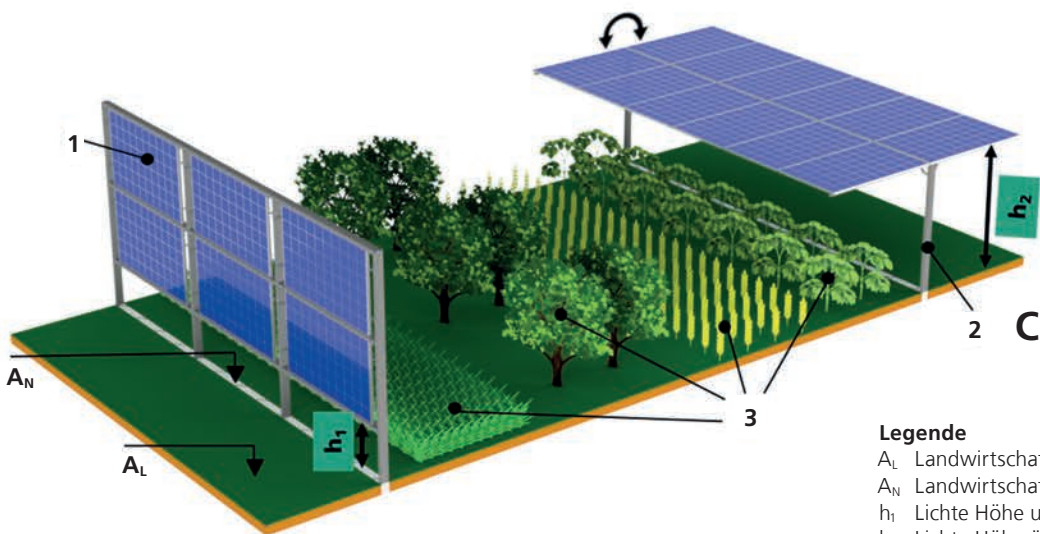
Bild A: Darstellung zu Kategorie I;

Bild B: Darstellung zu Kategorie II, Variante 1;

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



B



C

Legende

- A_L Landwirtschaftlich nutzbare Fläche
- A_N Landwirtschaftlich nicht nutzbare Fläche
- h₁ Lichte Höhe unter 2,10 m
- h₂ Lichte Höhe über 2,10 m
- 1 Beispiele zu Solarmodulen
- 2 Aufständerung
- 3 Beispiele landwirtschaftlicher Kulturen

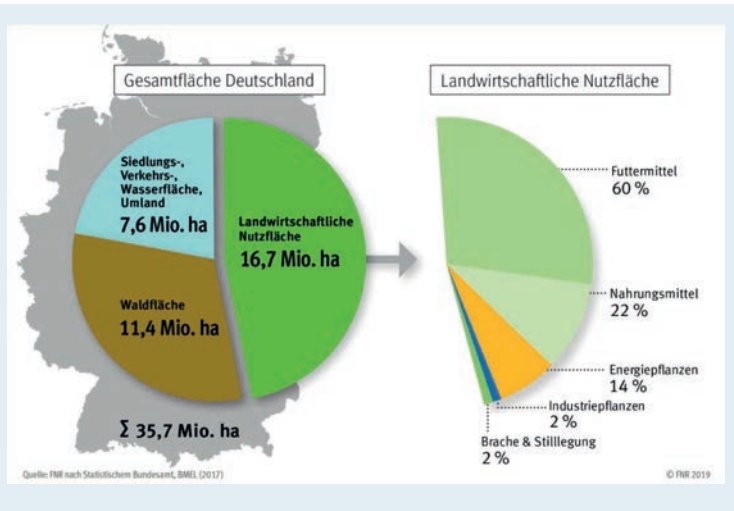


Abb. 11: Flächennutzung in Deutschland.

© Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (2019)^[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 1 700 GW_p. Dabei wurden vorwiegend schattentolerante Kulturen und Kulturen typischer Fruchtfolgen berücksichtigt. Würden von diesen 1700 GW 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 0,25 MW pro Hektar eröffnet der Anbau von Futterpflanzen auf Dauergrünland ein Potenzial von weiteren 1 200 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 14 Prozent der landwirtschaftlichen Flächen (siehe Abbildung 11).

2.4 Forschungsanlagen in Deutschland

In Deutschland wurden bereits mindestens fünf 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 Forschungsanlagen in Deutschland

Agri-PV-Systeme	Standort	Art der landwirtschaftlichen Nutzung	Technologie	Installierte Leistung	Jahr der Inbetriebnahme
1	Weihenstephan/ Freising, Bayern	Gemüsebau	Nachgeführte PV-Modultische	22 kW _p	2011
2	Weihenstephan/ Freising, Bayern	Gemüsebau	PV-Röhren	14 kW _p	2013
3	Heggelbach Landkreis Sigmaringen, Baden-Württemberg	Ackerbau	Nach Südwesten ausgerichtete fix installierte PV-Module	194 kW _p	2016
4	Grafschaft-Gelsdorf, Landkreis Ahrweiler, Rheinland-Pfalz	Ackerbau	Nachgeführt und fix ausgerichtet, teiltransparente PV-Module	258 kW _p	2021
5	Morschenich, Kreis Düren, Nordrhein-Westfalen	Ackerbau	Nachgeführt und fix ausgerichtet, inkl. Wassermanagement	213 kW _p	2022

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 beziehungsweise schwächer beschatteten Bereichen direkt unter beziehungsweise 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 unter einer Agri-PV-Anlage zu vermeiden, entstand 2013 die erste Agri-PV-Anlage (siehe Abbildung 12) mit Ost-West-nachgeführten PV-Modulreihen.

Unterschiedliche Abstände der Module auf den 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 03 dargestellt.

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

Technische Daten:

- Grundfläche: 21 x 23 m = 483 m²
- Modulreihe: 3 Stück à 3,2 x 21 m à 30 Module à 1,6 m²
- Nachführung: Ost-West, kalendergesteuert
- Solarmodule: CSG 245 W; 200 W/m² (Mittelwert; 245 W x 90 = 22 kW_p; 45 W/m²)
- Produktion/a: rund 35 000 kWh
- Installierte Leistung: 22 kW_p
- Nutzung: Eigenverbrauch, keine Einspeisevergütung

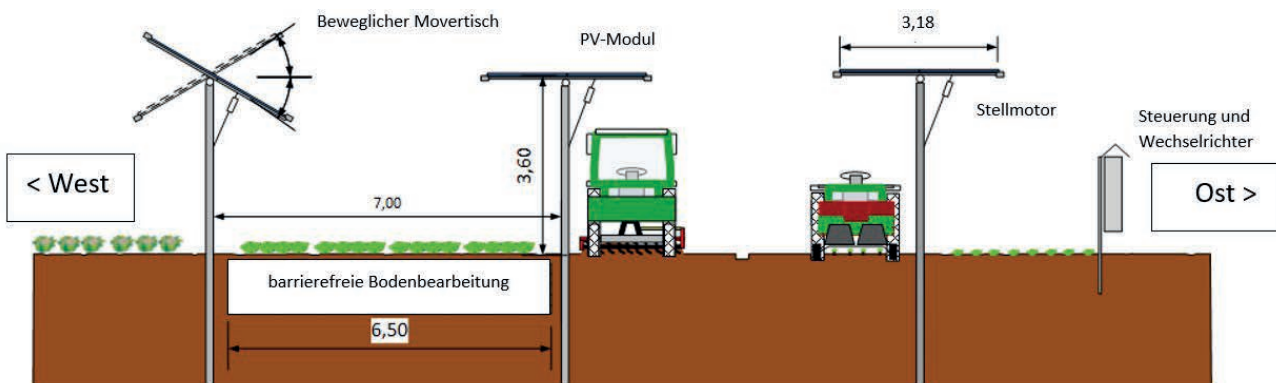


Abb. 12: Querschnitt der Agri-PV-Anlage in Weihenstephan.

© 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
Mittleres Kopfgewicht von Chinakohl unter Agri-PV (2014)	1348 g	1559 g	1970 g	2762 g
	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	

Weihenstephan 2015

Die Anbringung von Regenrinnen an den Abtropfkanten der Module bei der 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 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 (als »Koppelprodukte« bezeichnet) 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 ha großen landwirtschaftlichen Gemischtbetrieb biologisch-dynamisch.

Als Testkulturen wurden Winterweizen, Kartoffeln, Sellerie und Klee gras angebaut. Ein größerer Reihenabstand zwischen den bifazialen Glas-Glas-Solarmodulen in über fünf Metern Höhe und die Ausrichtung nach Südwesten stellen sicher, dass die Nutzpflanzen gleichmäßig Sonnenlicht erhalten. Die Durchfahrthöhe 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 Metern. 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.

Technische Daten:

- Grundfläche: 25 m x 136 m = 3400 m²
- Modulreihen: 15 Reihen mit 136 m Länge à 48 Module à 1,7 m²
- Nachführung: keine
- Solarmodule: bifaziale Glas-Glas-Modul, SolarWorld, 270 W
- Produktion/a: rund 256 000 kWh im Jahr 2020
- Installierte Leistung: 194,4 kW_p
- Nutzung: Eigenverbrauch, Netzeinspeisung, keine gesetzliche Einspeisevergütung

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 Solarmodule und konnten wirtschaftlich rentabel vermarktet werden.

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 relativ hohe Sonneneinstrahlung in der Region, zum anderen auf die Mehrerträge durch die bifazialen PV-Module zurückzuführen.

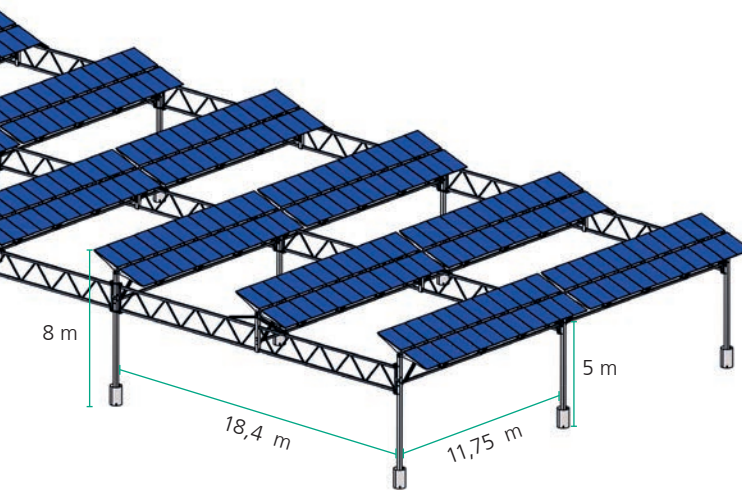
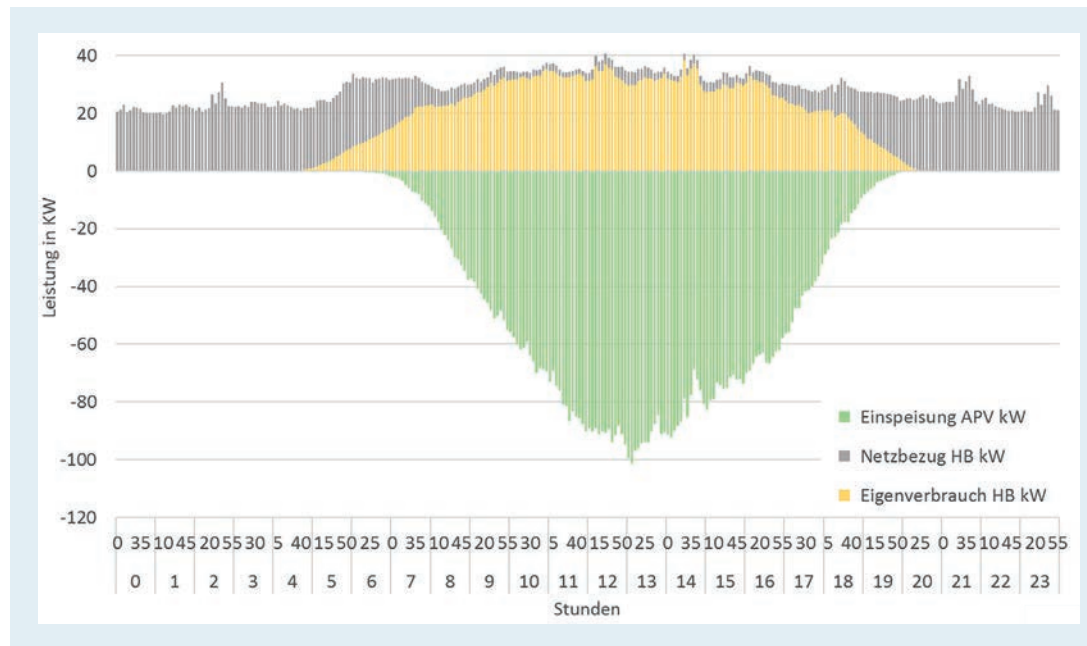


Abb. 13: Skizze der Agri-PV-Anlage in Heggelbach.
© AGRISOLAR Europe GmbH

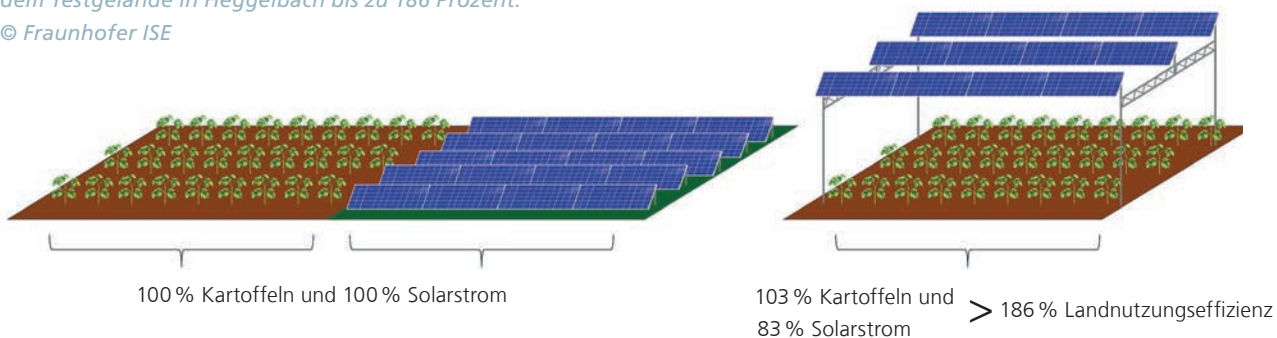
Abb. 14: Die Hofgemeinschaft Heggelbach konnte im Sommer 2017 ihren Strombedarf fast vollständig durch den auf der Agri-PV-Anlage erzeugten Strom decken. © BayWa r.e.



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 Solarmodulen steigerte die landwirtschaftlichen Ernteerträge, die hohe Sonneneinstrahlung erhöhte die Solarstromproduktion. Im Falle der Kartoffelversuche ergab sich so eine Steigerung der Landnutzungseffizienz um 86 Prozent.

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



Die Forschungsgruppe geht davon aus, dass die Pflanzen die Trockenheit des Hitzesommers 2018 durch die Verschattung unter den Solarmodulen besser kompensieren konnten. Diese Beobachtung verdeutlicht das Potenzial der Agri-PV für aride Regionen, aber auch die Notwendigkeit, weitere Versuche in anderen Klimaregionen sowie mit zusätzlichen Kulturen durchzuführen.

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 entspricht.

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.

Forschung an der HTW Dresden

An der HTW Dresden arbeitet das Team um Frau Prof. Feistel seit mehreren Jahren zur Agri-PV und untersucht die Auswirkungen von Solaranlagen auf den Bodenwasserhaushalt. Schwerpunkte sind dabei Veränderungen von Verdunstung und Versickerung und deren Einordnung in den Rahmen klimakrisenbedingter Folgeschäden. Die Untersuchungen umfassen große PV-Anlagen als auch kleine Agri-PV-Systeme.

Projekt Agri4Power – Nachhaltige Kombination von erneuerbaren Energien, Landwirtschaft und Biodiversität

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 erforscht sowie Fragen zur gesellschaftlichen Akzeptanz^[14].

APV Obstbau 2021

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. Hierzu wurde am Bio-Obsthof Nachtwey in Gelsdorf im rheinland-pfälzischen Landkreis Ahrweiler im Frühjahr 2021 eine Forschungsanlage mit 258 kW_p Leistung installiert. Die Agri-PV-Obstbauanlage wird insbesondere hinsichtlich des Lichtmanagements, des Anlagendesigns, der Landschaftsästhetik, ihrer Wirtschaftlichkeit, ihrer Sozialverträglichkeit und pflanzenbaulicher Parameter untersucht.

Technische Daten:

- Grundfläche: 32 m x 111 m = 3 552 m²
- Modulreihen: 8 Reihen fixe Aufständerung mit 111 m Länge à 106 Module à 2,1 m²
3 Reihen nachgeführte Aufständerung mit 111 m Länge à 100 Module à 2,1 m²

- Nachführung: einachsige
- Solarmodule: semitransparente Glas-Glas-Module, 225 W
- Produktion/a: rund 276 000 kWh (Prognose)
- Installierte Leistung: 258 kW_p
- Nutzung: Betrieb E-Traktor, Wasserpumpe, Netzeinspeisung, keine gesetzliche Einspeisevergütung

Dabei werden vier Versuchsvarianten herangezogen: (1) Kontrollvariante mit betriebsüblichen Hagelschutznetzen, (2) Agri-PV-Anlage, (3) Agri-PV-Anlage mit reduziertem Pflanzenschutzmitteleinsatz und (4) Folienüberdachung. Der Projektteil zur gesellschaftlichen Akzeptanz und Sozialverträglichkeit beschäftigt sich mit verschiedenen möglichen Konflikten (Landnutzung, Verteilung, Prozessgerechtigkeit) innerhalb verschiedener Akteurskonstellationen. Die ersten Versuchsergebnisse werden im Herbst 2022 erwartet.

APV 2.0

Im Projekt 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 errichtet.

Technische Daten:

- Grundfläche: 2 x 25 m x 41 m; 2 x 22 m x 39 m für insgesamt 2 050 m² + 1 716 m² = 3 766 m²
- Nachführung: Ost-West bei Teilanlagen, Forschungsalgorithmen; statisch bei zwei Teilanlagen
- Solarmodule: 370 W bifazial
- Installierte Leistung: rund 300 kW_p
- Nutzung: Eigenverbrauch, keine gesetzliche Einspeisevergütung

Abb. 16: Agri-PV-Anlage auf dem Bio-Obsthof Nachtwey.
© Fraunhofer ISE



2.5 Praxisanlagen in Deutschland

Neben den Forschungsanlagen existieren in Deutschland ein gutes Dutzend private Agri-PV-Anlagen. Unter anderem baut die Firma Elektro Guggenmos schon seit 2008 unter Agri-PV in Warmsried (Bayern) Kartoffeln, Weizen und Lauch an. Ein Teil der Anlagen wird im Folgenden vorgestellt. Weitere Anlagen befinden sich derzeit in Planung.

Büren 2019

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.

Technische Daten:

- Grundfläche: 70 x 60 m = 4200 m²
- Modulreihen: 20 Stück à 3,5 x 60 m (116 Module à 1,6 m²)
- Modulausrichtung: Ost-West 15°
- Solarmodule: bifaziale Module: Typ Solarfabrik, Sonderfabrikation 320 W (200 W/m²)
- Nutzung: 50 Prozent Eigenverbrauch / 50 Prozent Einspeisung
- Installierte Leistung: 750 kW_p
- Wechselrichter: Huawei 110 kW_p

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 Meter x 4,2 Meter) und die lichte Durchfahrts-höhe von 3,2 Meter ermöglichen eine Bewirtschaftung mit standardisierten landwirtschaftlichen Gerätschaften. Das eigentliche Dach der Anlage bilden bifaziale Solarmodule, 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.

Tab. 04: Überblick über einige Praxisanlagen in Deutschland

Agri-PV-Systeme	Standort	Art der landwirtschaftlichen Nutzung	Technologie	Installierte Leistung	Jahr der Inbetriebnahme
1	Warmsried, Bayern	Ackerbau, Gemüseanbau, Nutztierhaltung	Fix ausgerichtete PV-Modultische	70 kW _p	2008
2	Eppelborn-Dirmingen, Saarland	Futtermittel	Vertikale PV-Modultische	2 000 kW _p	2018
3	Büren-Steinbach, Nordrhein-Westfalen	Beerenobstbau	Nachgeführte PV-Modultische	750 kW _p	2020
4	Donaueschingen Aasen, Baden-Württemberg	Futtermittel	Vertikale PV-Modultische	4 146 kW _p	2020
5	Altheggenberg, Bayern	Sonderkulturen und Beerensträucher	einachsig, nachgeführte PV-Modultische	749 kW _p	2020
6	Lüptitz, Sachsen	Nutztierhaltung, Gemüseanbau, Bienenweiden	Nachgeführt und fix ausgerichtet, teiltransparente PV-Module	1 045 kW _p	2021

Bürgersolarpark Aasen, Donaueschingen 2020

Bei Aasen, nördlich von Donaueschingen, baute die Firma Next2Sun, in Zusammenarbeit mit der Solverde Bürgerkraftwerke Energiegenossenschaft als Betreiber, eine vertikale Agri-PV-Anlage mit einer Leistung von circa 4,1 MW_p. Die Anlage kann bilanziell 1 400 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 10 Metern, sodass eine landwirtschaftliche Nutzung zwischen den Modulreihen möglich ist.

Technische Daten:

- Grundfläche: 140.000 m²
- Modulreihen: 1,016 m x 0,996 m, 10.960 Module
- Modulausrichtung: 90° Ost beziehungsweise 270° West
- Solarmodule: bifaziale Glas-Glas Module, Typ: Jolywood JW-D72N, 370-380 Watt (Vorderseite) mit jeweils 72 Zellen à 6 Zoll
- Nutzung: 100 Prozent Netzeinspeisung
- Installierte Leistung: 4.146 kW_p
- Produktion/a: 4814 MWh
- Wechselrichter: 46 x Huawei SUN2000-60KTL-M0

Abb. 17: 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: 160.000 m²
- Dachschiffe: 2,016 m x 0,996 m, 2 520 Module
- Dachausrichtung: Ost-West 14°
- Solarmodule: bifaziale 2520 x Jolywood JW-HD144N- mit jeweils 415 W
- Nutzung: 100 Prozent Netzeinspeisung
- Installierte Leistung: 1 045,80 kW_p
- Produktion/a: (voraussichtlich) 1 350 MWh
- Wechselrichter: 29 x Huawei SUN2000-30KTL-M3

Abb. 18: Modulreihe mit bifazialen Modulen der Agri-PV-Anlage in Heggelbach. © Fraunhofer ISE



2.6 Internationale Entwicklung

Von den weltweit über 14 GW_p installierter APV-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 Solarmodulen 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 3000 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 1000 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 (zum Beispiel Laden von Radio- und Handy-Akkus), Bildung, besserer medizinischer Versorgung (zum Beispiel 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 des Fraunhofer ISE für diese Region mit einer Verdopplung der Landnutzungseffizienz.

Im Rahmen des EU-Programms Horizon 2020 untersucht 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].

2.6.1 Forschungsprojekte in 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, unter anderem auch für einen Inkubator zum Ausbrüten von Hühnereiern.

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 bis ins Jahr 2021 weiter im Feldbetrieb überwacht^[18].

*Abb. 19: Pilotanlagen des Fraunhofer Chile Research Instituts in Curacaví und Lampa untersuchen, welche Kulturpflanzen von einer weniger starken Sonneneinstrahlung profitieren.
© Fraunhofer Chile*



2.6.2 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 drei MW_p installierte Leistung. In der ersten Ausschreibung 2017 erhielten nur Gewächshäuser einen Zuschlag. In der zweiten und dritten Runde werden jeweils 140 MW 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 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 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 beziehungsweise gar nicht vorhanden. Diese Art von Mitnahmeeffekten der PV-Branche hat vor allem im Landwirtschaftssektor zu einer gewissen Abwehrhaltung gegenüber Agri-PV geführt. Aktuell arbeitet die französische Umweltagentur für Energie ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) an einer Definition für Agri-PV.

Abb. 20: Studie mit verschiedenen Salatsorten in der Agri-PV-Forschungsanlage der Universität von Montpellier, Frankreich. © INRAE/Christian Dupraz



2.6.3 USA

Auch in den USA sind bereits Agri-PV-Anlagen installiert. Beispielsweise konnte eine Forschungsanlage in Massachusetts 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 zwei Megawatt sind. Die Unterkante der Module muss bei fest 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. Das könnte auch den Ausbau von Agri-PV vorantreiben.

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.

2.6.4 Mali und Gambia

Mali und Gambia gehören zu den Regionen, die weltweit am stärksten von der Klimakrise betroffenen 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 in dem 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. Es will die Herausforderungen und Möglichkeiten der Agri-PV aufzeigen 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.

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 und Hagel den Anbau von Kulturpflanzen.

Um den Herausforderungen der Klimakrise, des Gewässerschutzes und dem Wunsch nach Ertragssteigerung gerecht zu werden, 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 Kulturschutzmaßnahmen 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. 21: Untersuchte Kulturen in Heggelbach (Sellerie, Kartoffeln, Weizen, Kleegras).
© 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 elf 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 22). Die photosynthetisch aktive Sonneneinstrahlung unter der Agri-PV-Anlage war dabei rund 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 zwölf Prozent, die Erträge von Kartoffeln und Winterweizen stiegen um elf beziehungsweise drei Prozent. Bei Klee gras verminderte sich der Ertrag um acht Prozent gegenüber der Referenzfläche. Zur Berechnung des Gesamtverlusts sind zusätzlich die Ertragsverluste durch die nicht bearbeitbaren Landstreifen zwischen den Stützpfählen mit etwa acht Prozent zu berücksichtigen.

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

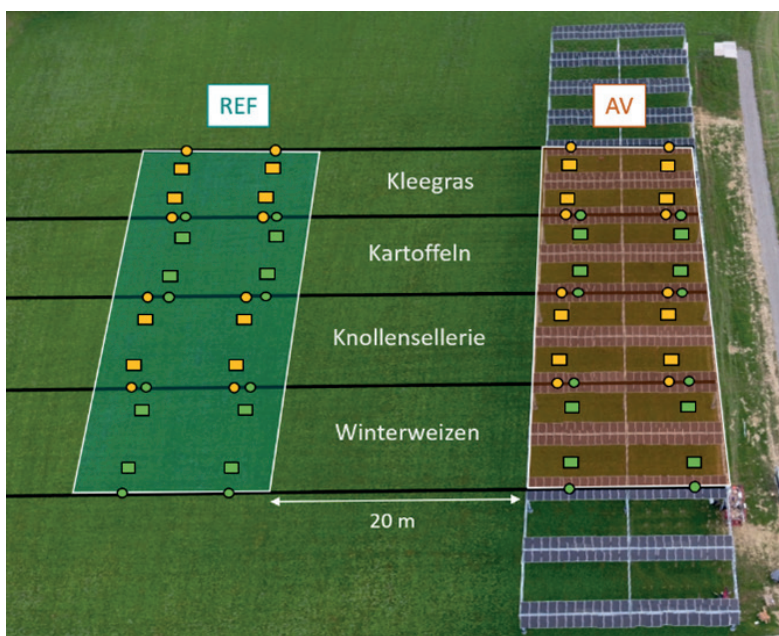


Abb. 22: Feldplan des Versuchsaufbaus 2017 mit Messstationen. Bereiche in denen Proben entnommen wurden, werden durch Kästchen, Positionen von Mikroklimastationen durch Kreise angezeigt. © BayWa r.e., verändert durch Axel Weselek/Universität Hohenheim.

3.2 Bewirtschaftung und Kulturauswahl

Die Bewirtschaftung unter 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 Rammschutz ausgestattet, um eventuellen Schäden an der Anlage vorzubeugen. Der eigentliche Flächenverlust durch Pfeiler und Rammenschutz lag in Heggelbach bei unter einem 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 Reihenbewirtschaftung 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.

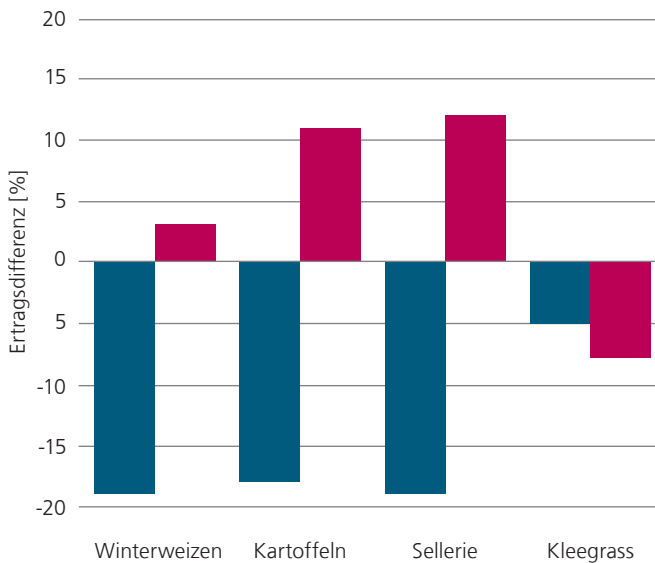


Abb. 23: Ertragsunterschiede der Kulturen unter Agri-PV gegenüber Referenzflächen 2017 (blau) und 2018 (rot) in Heggelbach (ohne Flächenverluste durch Stützen). Daten: Universität Hohenheim, Darstellung: Fraunhofer ISE

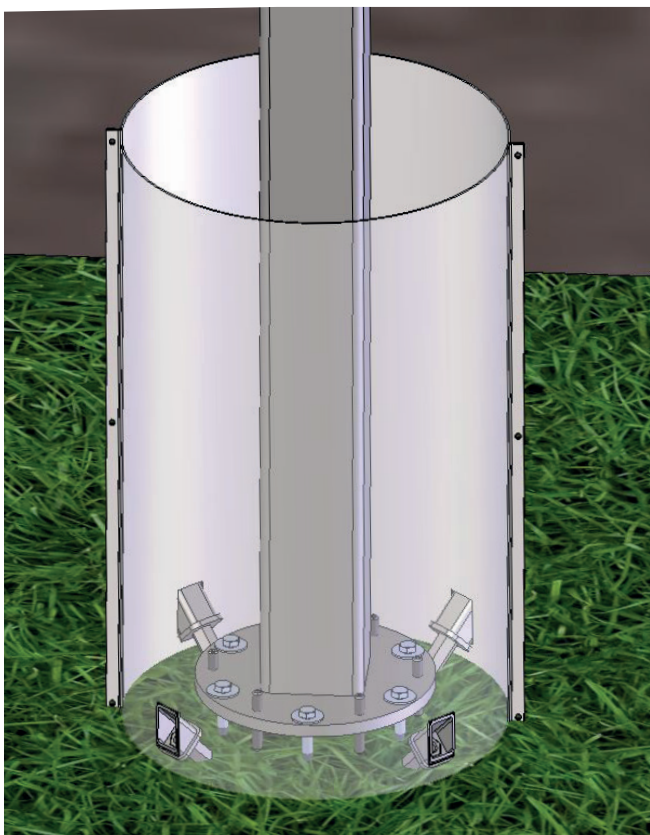


Abb. 24: Rammschutz der Aufständerung der Anlage in Heggelbach gegen mögliche Beschädigungen durch Landmaschinen.

© AGROSOLAR Europe GmbH

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. Windkanal-effekte 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.

Die 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 Oberflächengewässern entgegenzusteuern, sollten Maßnahmen getroffen werden. Eine Auswahl an Möglichkeiten findet sich im Technikteil (Kapitel 5.4).

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. 25: Illustration einer Agri-PV-Apfelplantage.
© Fraunhofer ISE



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 (zum Beispiel Salat), Feldfutterarten (Klee gras), verschiedene Kern-, Stein- und Beerenobstarten sowie andere Sonderkulturen (zum Beispiel 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 (siehe Abbildung 26), 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 2.6.2).

Abb. 26: Agri-PV mit nachgeführten Modulen in Frankreich.
© Sun'Agri



Abb. 27: Witterungsschutz für Himbeeren durch Agri-PV.
300 kW_p, Testanlage von BayWa r.e. in den Niederlanden.
© BayWa r.e.



Vielversprechend erscheinen auch Systeme in Verbindung mit Kernobst wie beispielsweise Äpfel. 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 3.3), der gesellschaftlichen Akzeptanz (Kapitel 5) sowie der regulatorischen Umsetzbarkeit (Kapitel 6) zu erwarten.

Abb. 28: Demoprojekt im Beerenbau zeigt sehr 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 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 Agri-PV-Systemen lassen sich die Einbußen beim Pflanzenertrag reduzieren, weil das Lichtangebot in kritischen Wachstumsphasen erhöht werden kann.

Abb. 29: Weizenernte mit Mähdrescher. © Fraunhofer ISE



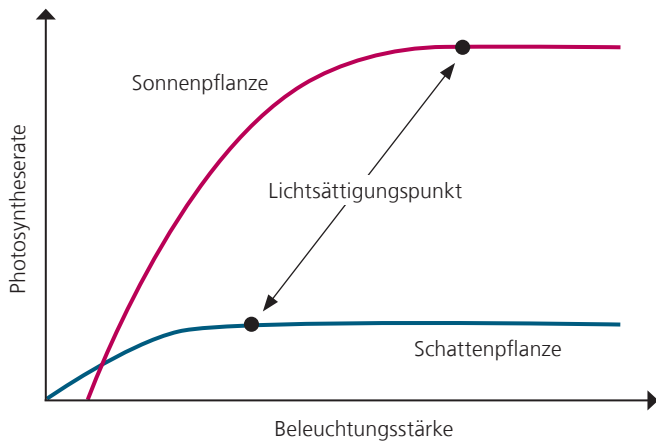


Abb. 30: Schematisch: Photosyntheserate in Abhängigkeit der Beleuchtungsstärke bei Sonnen- und Schattenpflanzen^[24].

© 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 weitgehend zulässt, ist die Installation vertikaler Agri-PV-Systeme (siehe Abbildung 31). In Deutschland gibt es bereits zwei Referenzanlagen 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.

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 30). 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. 31: 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.«

Florian: »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 zum Beispiel 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. 32: Thomas Schmid und Florian Reyer. © 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, zum Beispiel 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

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 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 beziehungsweise 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 beziehungsweise eingespart werden können. Hierauf wird in Kapitel 4.1.2 eingegangen.

Für eine Abschätzung der Kosten werden im Folgenden Anwendungen im Dauergrünland, Ackerbau und Gartenbau unterschieden und mit den Kosten von PV-FFA und kleinen PV-Dachanlagen verglichen. Zum Gartenbau werden hierbei sowohl Dauerkulturen wie Obst oder Wein als auch Sonderkulturen gezählt. 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. Für die Berechnungen wurde vereinfacht angenommen, dass es sich bei Anwendungen im Dauergrünland um bodennahe Systeme handelt, bei Anwendungen im Ackerbau und Gartenbau um hoch aufgeständerte Systeme.

Im Ergebnis gilt tendenziell, dass im Ackerbau Anlagen mit einer höheren installierten Leistung notwendig sind, um Agri-PV wirtschaftlich umzusetzen, während im Gartenbau bei günstigen Voraussetzungen auch kleinere Systeme möglich erscheinen. Fruchtfolgen im Ackerbau führen dazu, dass das Agri-PV-Design an die Bedürfnisse beziehungsweise 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. Am kostengünstigsten sind bodennahe Systeme im Dauergrünland.

Die hier angenommenen Zahlen stellen mittelfristig anzunehmende Kosten und Einnahmen dar. Kostenschwankungen und Lieferengpässe wie sie zum Beispiel 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 zehn kW_p. Da in Deutschland typische Ackerkulturen wie Weizen, Gerste oder Raps tendenziell lichtbedürftiger sind als Kulturen im Gartenbau, werden hier für den Ackerbau größere Modulabstände und damit eine geringere Leistung pro Fläche mit 600 kW_p pro Hektar angenommen. Durchfahrtshöhe und Pfostenabstände der Unterkonstruktion entsprechen den Maßen der Anlage in Hegelbach. Für niedrige Dauerkulturen wie beispielsweise Beeren wird eine Leistung von 700 kW_p pro Hektar und eine Durchfahrtshöhe von drei Metern angenommen. Im Dauergrünland wird mit einer Leistung von 300 kW_p pro Hektar gerechnet.

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 33 dargestellt.

Die Unterschiede der Investitionskosten lassen sich im Wesentlichen auf drei Kostenstellen zurückführen:

1. Der Modulpreis kann sich erhöhen, da bei geringen Bauhöhen die 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, die im Gartenbau eingesetzt werden könnten, 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 im Ackerbau 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 Dauergrünland sind die Kosten für die Unterkonstruktion mit 97 bis 167 Euro pro kW_p deutlich niedriger. Im Gartenbau liegen diese zwischen 243 und 306 Euro pro kW_p.
3. Die Kosten für die Standortvorbereitung und Installation liegen ebenfalls wesentlich höher und werden im Ackerbau 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. Im Dauergrünland und Gartenbau ist hier mit geringeren Kosten von durchschnittlich 93 beziehungsweise 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.

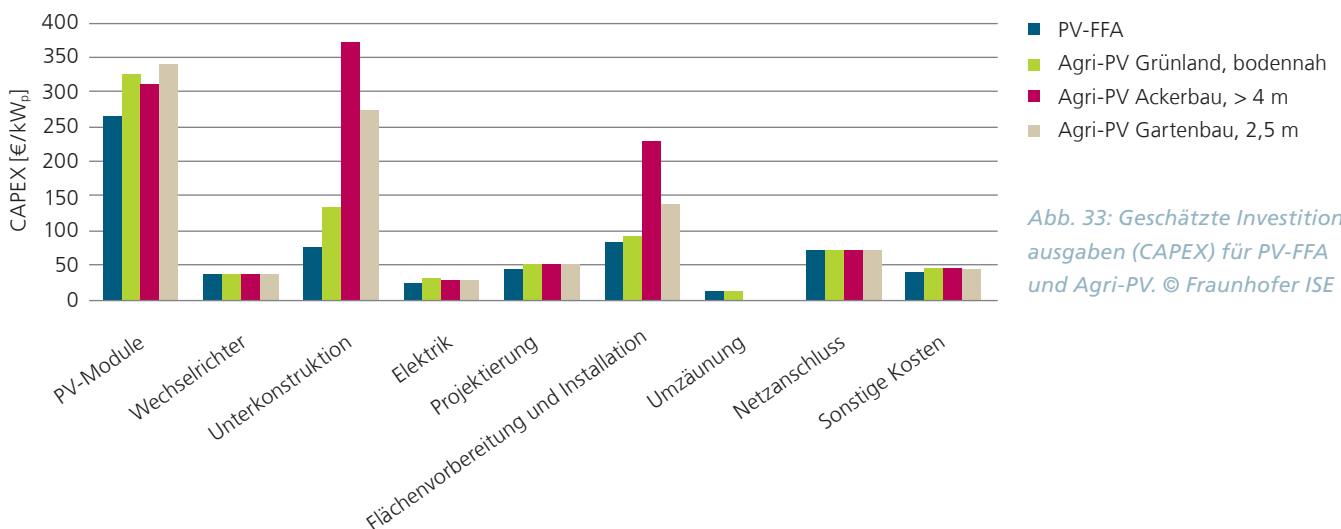


Abb. 33: Geschätzte Investitionsausgaben (CAPEX) für PV-FFA und Agri-PV. © Fraunhofer ISE

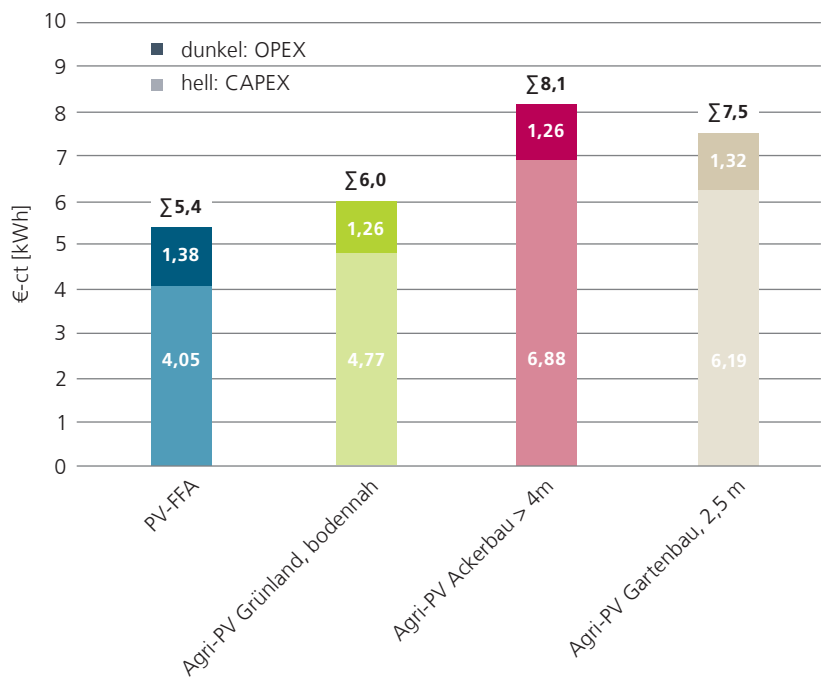
4.2 Operative Kosten

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 auf 1,3 Euro pro kW_p im Ackerbau beziehungsweise Dauergrünland und auf 1,6 Euro pro kW_p im Gartenbau. 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 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, zum Beispiel 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.

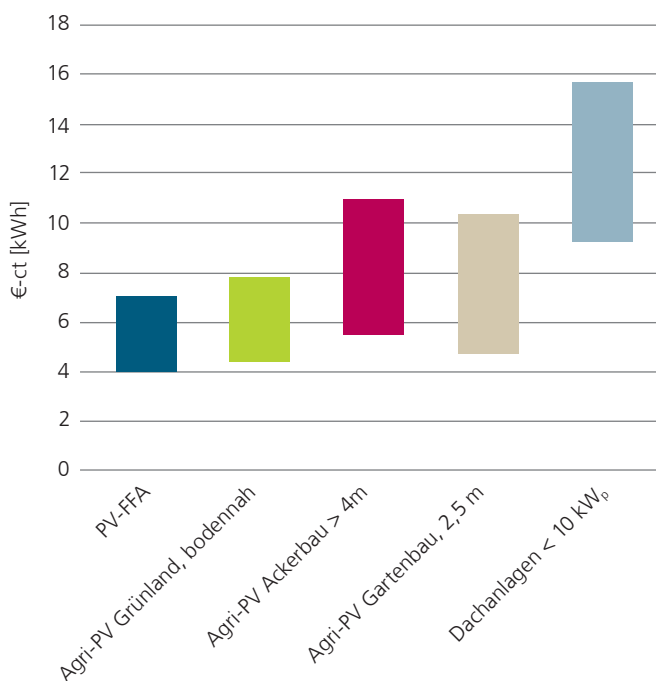
Abb. 34: Geschätzte Stromgestehungskosten unterteilt nach Investitionsausgaben (CAPEX) und Betriebskosten (OPEX) von PV-Freiflächenanlagen und Agri-PV im Vergleich.
© Fraunhofer ISE



4.3 Stromgestehungskosten

Im Ergebnis sind die Kosten für die Produktion von Strom im Ackerbau 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 Dauergrünland 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 35 dargestellt.

Nicht berücksichtigt wird bei der Kostenabschätzung, dass Skalierungseffekte im Ackerbau durch tendenziell höhere Schlaggrößen und damit größere Agri-PV-Anlagen zu einem Kostenvorteil von Anwendungen im Ackerbau gegenüber solchen im Gartenbau führen können. Derselbe Vorteil dürfte im Ackerbau auch hinsichtlich der Fixkosten (zum Beispiel 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 Vorteile für die Wirtschaftlichkeit mit sich bringen, zum Beispiel 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 sieben Eurocent) pro Kilowattstunde sieben bis neun 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.

Angesichts 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 7.1.3 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. 35: 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 Projektbeteiligten sind bei der Umsetzung verschiedene Akteure beziehungsweise 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

Projektierung und der Verhandlungsaufwand bei Verträgen geringer. Zum anderen sind Vor- und Nachteile eines Agri-PV-Systems leichter abzuschätzen, wenn sich die Erträge der landwirtschaftlichen 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 zum Beispiel 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 Bundesländern hin ^[26]. Wenn zumindest die übrigen drei Verantwortlichkeiten bei dem Landwirtschaftsbetrieb gebündelt sind, kommen diesem auch in dieser Konstellation die zuvor beschriebenen 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 Eigentümerschaft 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 behalten. 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 36 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.

Was sollte ein Landwirtschaftsbetrieb idealerweise mitbringen?

Vorteilhafte Faktoren für eine wirtschaftliche Umsetzung von Agri-PV:

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

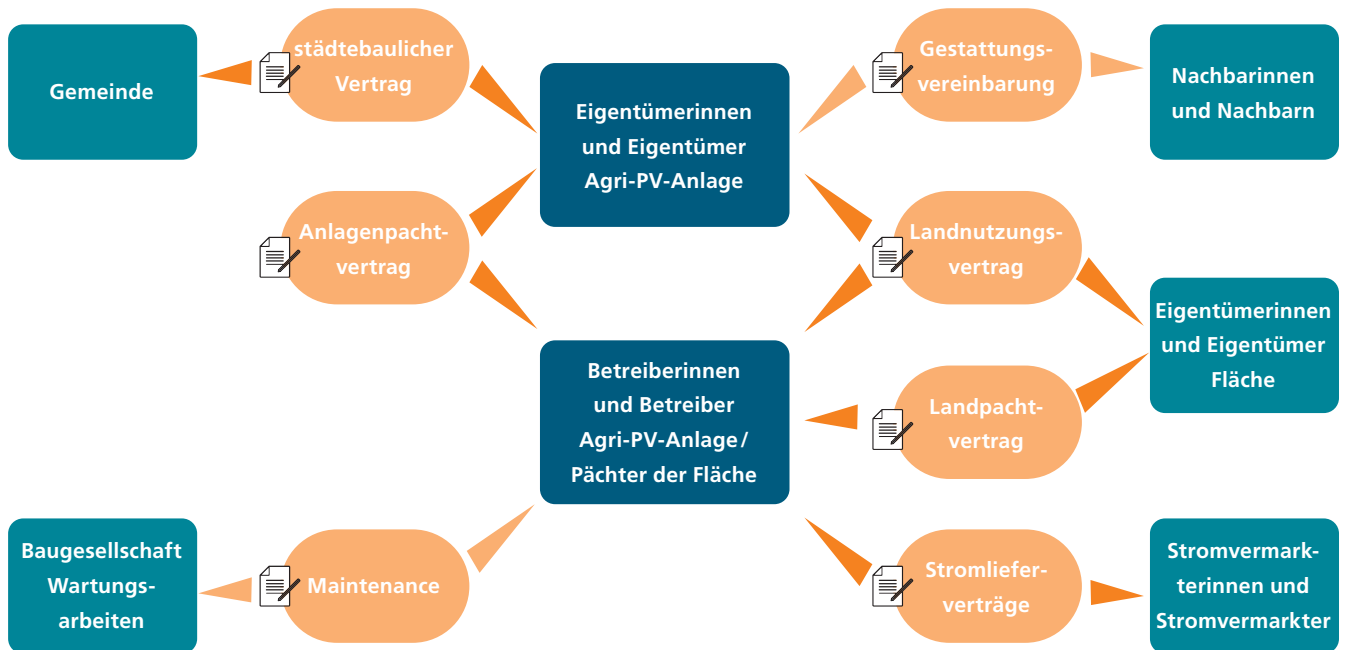


Abb. 36: Interessensgruppen und Vertragsmodell.

Tab. 05: 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 Aufständering 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 Solarmodule 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 zum Beispiel 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 Aufständering 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].

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. 37: Hoch aufgeständerte Anlage mit Möglichkeit zur Bewirtschaftung mit dem Kartoffelvollernter.

© Hofgemeinschaft Heggelbach



Abb. 38: PV-Module mit erweiterten Zellzwischenräumen und Schutzfunktion

in den Niederlanden. © BayWa r.e.



Abb. 39: Bifaziale, senkrecht aufgestellte Module von Next2Sun, Eppelborn-Dirmingen.
© Next2Sun GmbH



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 (siehe Abbildung 37).

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 38 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 Modulteile 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 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. 40: PV-Module über einem Folientunnel.
© BayWa r.e.



Abb. 41: Spezielle Dünnschicht-Module in Röhrenform der Firma TubeSolar.
© TubeSolar AG



Abb. 42: Halbschatten durch Solarröhren, eingehängt zwischen Spannseilen der Firma TubeSolar.
© sbp sonne GmbH



Abb. 43: Hoch aufgeständerte Anlagen mit schmalen PV-Modulen in Italien. © REM Tec



5.2 Modultechnologien

Grundsätzlich lassen sich alle Typen von Solarmodulen 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 einlaminiert. 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 darunterliegenden Pflanzen. Bei den bisher üblichen PV-Modulen liegt der Flächenanteil der Zwischenräume bei vier bis fünf Prozent. Zur Steigerung der Lichttransmission können die Zwischenräume jedoch erweitert und die Modulrahmen durch Klemhalterungen 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. 44 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 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 mit niedriger Durchfahrtshöhe 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 Solarmodule 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 Pflanzenbau 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. 45 Einachsiges Tracker-system einer Demonstrations-anlage in Frankreich.
© Sun'Agri



5.3.3 Verankerung und Fundamentierung

Die Verankerung beziehungsweise 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.

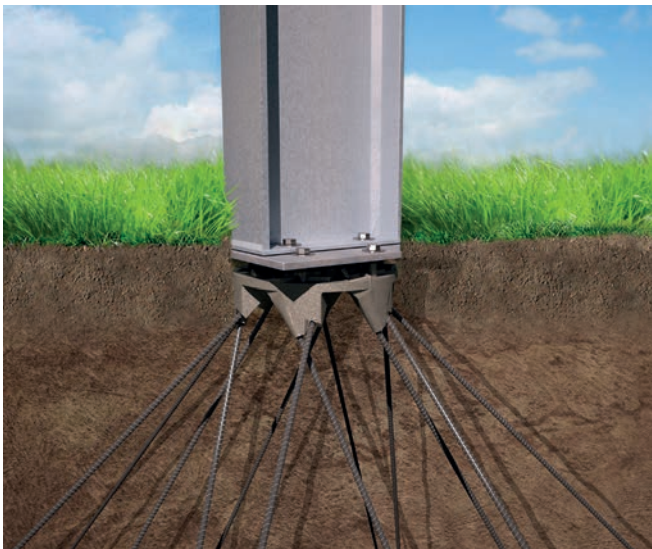


Abb. 46 Spinnanker mit Ankerplatte und Gewindestäben fundamentieren das Montagesystem im Boden.
© Spinnanker GmbH

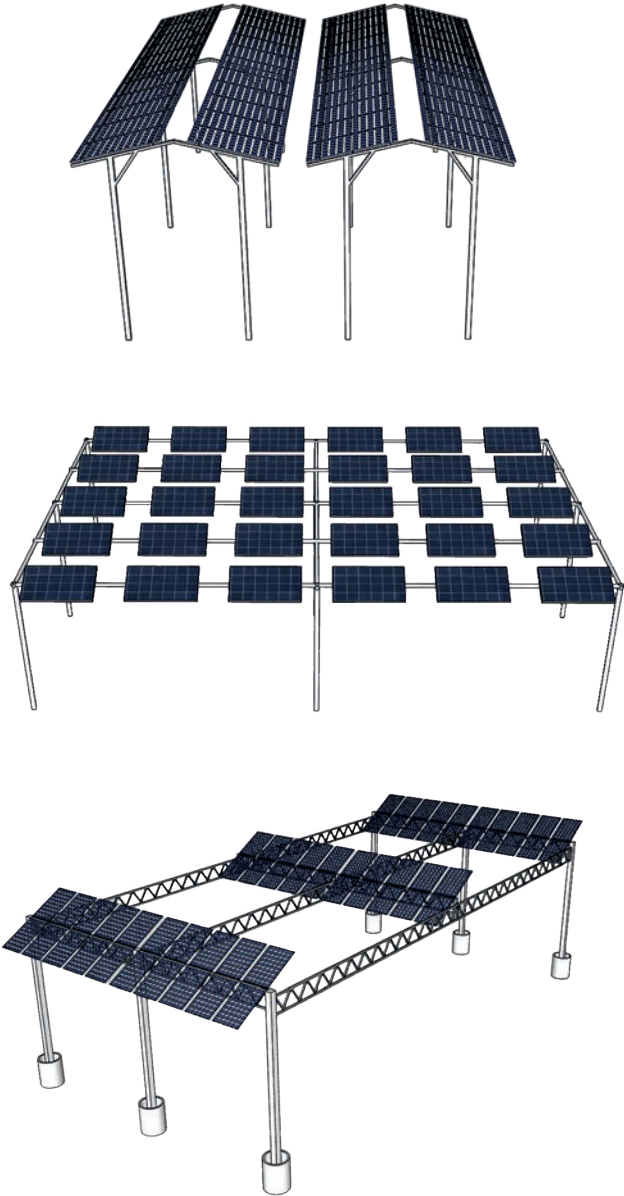


Abb. 47 Illustration verschiedener Anlagentypen mit Ost-West-, Süd- und Süd-Ost-Ausrichtung. © Fraunhofer ISE

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. 48 Die Schattenstreifen der Solarmodule wandern mit dem Sonnenstand. © Universität Hohenheim.

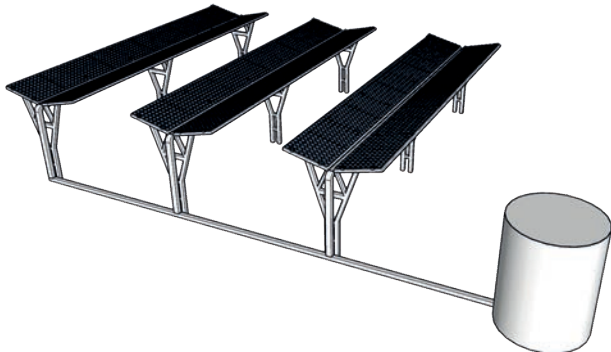


Abb. 49: Konzept einer Regenauffangvorrichtung mit Speichertank. © Fraunhofer ISE

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. 50: 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 Kraftwerke 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 sensiblem 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. 51: 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 1 100 kW_p pro Hektar. Bodennahe Agri-PV-Systeme erreichen hingegen nur 0,25 bis 0,4 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 Solarmodule 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-Solarmodule 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 beziehungsweise einen entsprechenden Verwendbarkeitsnachweis zur Verwendung des Solarmoduls 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-gleich der 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. 52: Arbeiten in einer Agri-PV Anlage unter den Solarmodulen. © 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 6 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 7.1 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. 06: 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 zum Beispiel 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 Baufrei-gabe wurde allerdings an die Überprüfung der Statik durch ein unabhängiges Prüfingenieurbüro geknüpft. Um die tatsächliche Haltekraft der Verankerung nachzuweisen, wurde zudem ein Bodengutachten erstellt. Die Ergebnisse dieses Gutachtens sowie die Rückmeldungen des prüfenden Ingenieurbüros sind in die Überarbeitung der Agri-PV-Unterkonstruktion eingeflossen.

Abb. 53: 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

5.7.3 Agri-PV im laufenden Betrieb

Durch den Anbau der Nutzpflanzen und die Aufständerungshöhe 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. 54: 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 beziehungsweise Ablehnung von politischen Zielen und konkreten Maßnahmen und die Bereitschaft beziehungsweise 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 Jahr^[30]. Den höchsten Zuspruch mit einer Befürwortungsquote von 92 Prozent der Befragten erfährt der Zubau von Solarstromanlagen auf Hausdächern^[31]. Die Zustimmungsraten 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 korrekte 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 Projektierinnen und Projektierern, 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 Projektierinnen 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 (zum Beispiel 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 Durchfahrts Höhe 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. 55 Bürgerinformationsveranstaltung im Projekt APV-RESOLA. © ITAS



Abb. 56 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 56) 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 57). 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.

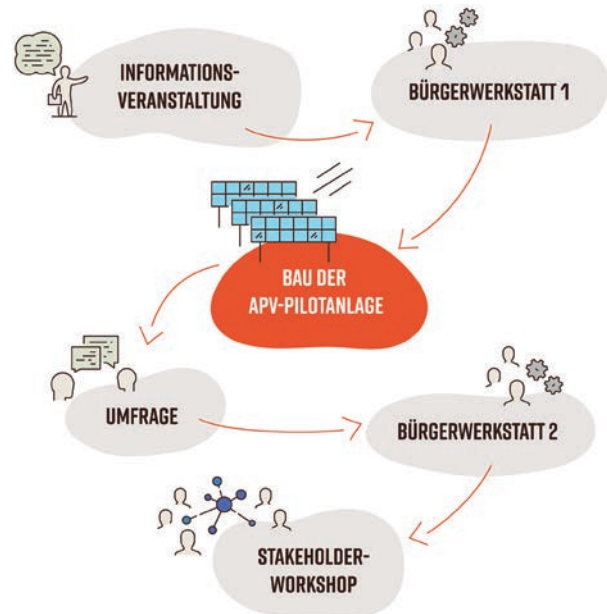


Abb. 57: Mehrstufiger transdisziplinärer Agri-PV-Forschungsansatz. © ITAS.

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 Biotop 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 beziehungsweise hemmen, zu erhalten. Parallel zur Implementierung der Agri-PV-Forschungsanlage fand deshalb eine Befragung von lokalen Vertreterinnen und Vertretern der Verwaltung, des Energie-sektors, 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, zum Beispiel 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, zum Beispiel 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, zum Beispiel 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 (zum Beispiel 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.



Abb. 58: Landwirtschaftlich nicht bearbeitbare Zwischenstreifen könnten bei Agri-PV-Anlagen genutzt werden, um die Biodiversität auf den landwirtschaftlichen Flächen zu erhöhen.

© Fraunhofer ISE

Ökologischer Beitrag

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

7 Politik und Recht

Nach den Vorgaben im Klimaschutzgesetz sollen die Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2045 so weit gemindert werden, dass Netto-Treibhausgasneutralität erreicht wird. Nach dem Jahr 2050 sollen negative Treibhausgasemissionen erreicht werden. Im Koalitionsvertrag zwischen SPD, Bündnis 90/Die Grünen und FDP ist vorgesehen, dass im Jahr 2030 80 Prozent des Bruttostrombedarfs mit erneuerbaren Energien gedeckt werden soll. Um diese Ziele zu erreichen, gehen Szenarien von einem notwendigen Ausbau der PV auf bis zu 500 GW_p aus^[2]. Dies entspricht ungefähr einer Verzehnfachung der momentanen PV-Kapazität. Ein nennenswerter Teil des PV-Ausbaus wird voraussichtlich auf der freien Fläche stattfinden – hier ist PV derzeit am günstigsten.

Eine Expansion von PV-FFA steht jedoch dem politischen Ziel einer Reduktion der Flächeninanspruchnahme entgegen. Demnach soll die Neuinanspruchnahme von Flächen für Siedlungen und Verkehr bis 2030 auf 30 Hektar pro Tag, bis 2050 auf eine Netto-Null reduziert werden. So sollen unter anderem fruchtbare Böden für die Nahrungsmittelproduktion erhalten bleiben. Aktuell werden in Deutschland täglich rund 56 Hektar als Siedlungs- und Verkehrsflächen neu ausgewiesen. Dies entspricht einem Flächenverbrauch von circa 79 Fußballfeldern. Neben PV-Anlagen auf Dächern, an Fassaden, auf versiegelten Flächen und Tagebau-Seen und Parkplätzen könnte auch die Agri-PV zu einer flächenneutralen und gleichzeitig klimafreundlichen Stromerzeugung beitragen.

Ohne die Schaffung entsprechender rechtlicher Rahmenbedingungen wird eine wirtschaftliche Umsetzung von Agri-PV in Deutschland jedoch auf absehbare Zeit kaum möglich sein.

Agrarsubventionen, genehmigungsrechtliche Aspekte und Einspeisevergütungen nach dem EEG sind in den stark regulierten Agrar- und Energiesektoren von essenzieller Bedeutung. Dies gilt vor allem, da die Agri-PV als sehr junge Technologie noch kaum Lern- und Skaleneffekte vorweisen kann, aber dennoch mit etablierten Technologien konkurrieren muss.

Soll die Agri-PV weiter untersucht und deren Potenzial gehoben werden, erscheint deswegen neben weiteren Forschungsprojekten eine marktnahe Umsetzung von Praxisanlagen sinnvoll. Denn so können Erkenntnisse zur Akzeptanz, der Wirtschaftlichkeit und den vielfältigen Einsatzbereichen der Technologie Hand in Hand mit der Landwirtschaft und Solarunternehmen gewonnen werden. Dabei besteht für Deutschland die Chance, aus den Erfahrungen in Frankreich und in anderen Ländern zu lernen und mit geeigneten Förderinstrumenten den Weg für eine Weiterentwicklung der Technologie zu ebnen.

Die im EEG für April 2022 vorgesehene Innovationsausschreibung zu besonderen Solaranlagen stellt mit hoher Wahrscheinlichkeit keine zielgerichtete Förderung der Agri-PV dar. Stattdessen birgt die Ausschreibung durch den Preiswettbewerb unter sehr verschiedenen Anwendungen, den Zwang zu Anlagenkombinationen und die geringe Berücksichtigung der Interessen des Landwirtschaftssektors die Gefahr, dass der Markthochlauf der Agri-PV verzögert wird und die Akzeptanz der Bevölkerung gegenüber der Technologie leidet. Eine Möglichkeit, Agri-PV gezielt und systematisch zu fördern, könnte die Schaffung eines eigenen Marktprämien- und Ausschreibungssegments für hoch aufgeständerte Anlagen sowie die Umsetzung eines »1000-Felder-Programms Agri-PV« sein (siehe Abschnitt 7.2.4).

7.1 Gesetzliche Rahmenbedingungen

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

7.1.1 EU-Direktzahlungen

Im Rahmen ihrer Agrarpolitik gewährt die EU 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. Interessant ist in diesem Zusammenhang ein Urteil des Bundesverwaltungsgerichts (BVerwG) zu einem sogenannten Maislabyrinth². Nach Auffassung des BVerwG steht ein solches Maislabyrinth der Beihilfefähigkeit nicht entgegen, weil es – verkürzt gesagt – die landwirtschaftliche Nutzung der Fläche neben den Wegen des Labyrinths nicht stark einschränkt. Was lässt sich aus dem Urteil für Agri-PV ableiten?

Agri-PV-Anlagen ermöglichen eine gemischte Landnutzung für solare Stromproduktion und Landwirtschaft auf derselben Fläche. Entscheidend ist damit die Frage, ob die Fläche deutlich überwiegend für landwirtschaftliche Zwecke genutzt wird. Zwar wird in § 12 Abs. 3 Nr. 6 DirektZahlDurchfV bestimmt, dass Flächen, auf denen sich Anlagen zur Erzeugung von solarer Strahlungsenergie befinden, hauptsächlich für eine nicht-landwirtschaftliche Tätigkeit genutzt werden. Folgt man der Entscheidung des BVerwG, muss man diese Regelung jedoch mit der »europarechtlichen Brille« lesen: Die landwirtschaftliche Tätigkeit darf durch die Intensität, Art, Dauer oder den Zeitpunkt der Agri-PV »nur« nicht zu stark eingeschränkt werden. Dieser Sichtweise folgte auch der Bayerische Verwaltungsgerichtshof in einem Fall, in dem Schafe unter einer PV-FFA weideten³. Eine starke Einschränkung für die landwirtschaftliche Tätigkeit wäre festzustellen, wenn für die betreffenden Betriebe tatsächliche und nicht unerhebliche Schwierigkeiten oder Hindernisse bei der Ausübung der landwirtschaftlichen Tätigkeit bestehen würden, weil parallel eine anderweitige Tätigkeit ausgeübt wird. Dies war in dem zu entscheidenden Fall nicht gegeben, weshalb die Beihilfen nach Auffassung des Gerichts zu gewähren sind⁴.

Bei einer sachgemäßen Planung und Installation einer Agri-PV-Anlage wird die landwirtschaftliche Nutzung einer Fläche nicht oder nur in sehr geringem Maß beeinträchtigt (zum Beispiel durch die Verankerung des PV-Befestigungssystems). Daher sprechen gute Argumente dafür, dass Landwirtschaftsbetriebe, die eine Fläche bewirtschaften, auf der eine Agri-PV-Anlage installiert ist, im Einklang mit den EU-rechtlichen Vorgaben für Direktzahlungen handeln und diese für die Bewirtschaftung der Fläche erhalten können sollten. Eine Konkretisierung der Direktzahlungen-Durchführungsverordnung könnte für die Betreiberinnen und Betreiber Planungssicherheit schaffen. Die Erfüllung der Anforderungen der DIN SPEC 91434 könnte eine passende Voraussetzung für den Erhalt der Direktzahlungen darstellen. Solange regulatorisch weiterhin Unklarheiten bestehen, bietet es sich grundsätzlich an, frühzeitig das Gespräch mit der verantwortlichen Behörde zu suchen. Ein Referentenentwurf des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft sieht vor, dass ab 2023 ein Anspruch auf 85 Prozent der Direktzahlungen besteht, soweit mindestens 15 Prozent der landwirtschaftlichen Nutzfläche bewirtschaftet werden können⁵.

Die diesbezüglichen Vorgaben in der DirektZahlDurchfV wurden mittlerweile geändert und die Änderungen am 31.01.2022 im Bundesgesetzblatt veröffentlicht: In § 12 Abs. 4 Nr. 6 GAPDZV ist nunmehr vorgesehen, dass der Ausschluss nicht gilt, wenn es sich um eine Agri-PV-Anlage handelt. Eine Agri-PV-Anlage wird in Absatz 5 des § 12 GAPDZV dahingehend definiert, dass es sich dabei um eine auf einer landwirtschaftlichen Fläche errichtete Anlagen zur Nutzung von solarer Strahlungsenergie handelt, 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 91434:2021-05 um höchstens 15 Prozent verringert. Förderfähig sind dann – so in der Verordnung weiter – 85 Prozent der landwirtschaftlichen Fläche. Diese Regelung tritt gemäß § 28 Abs. 2 GAPDZV an dem Tag in Kraft, an dem das GAP-Direktzahlungen-Gesetz in Kraft tritt.

² BVerwG, Urt. v. 04.07.2019, Az. 3 C 11.17.

³ Vgl. Urt. v. 01.06.2021, Az. BV 19.98; weiterführend EuGH, Urt. v. 02.07.2015, Az. C-684/13 (sog. Demmer-Urteil); VG München, Urt. v. 19.04.2016, Az. 21 B 15-2391; VG Regensburg Urt. v. 15.11.2018, Az. RO 5 K 17.1331

⁴ Vgl. Urt. v. 01.06.2021, Az. BV 19.98;

⁵ https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Glaeserne-Gesetze/Referentenentwurf/gapdzg.pdf?__blob=publicationFile&v=2

7.1.2 Öffentliches Recht

Bei Agri-PV handelt es sich üblicherweise um bauliche Anlagen im Sinne des Bauordnungsrechts. Für deren Errichtung ist in der Regel eine Baugenehmigung⁶ erforderlich. Sie wird erteilt, wenn öffentlich-rechtliche Vorschriften nicht dagegensprechen. Zu den öffentlich-rechtlichen Vorschriften zählen unter anderem bauordnungsrechtliche Vorgaben (ergeben sich aus den Bauordnungen der Länder) und bauplanungsrechtlichen Vorgaben (ergeben sich nach dem bundesgesetzlichen Baugesetzbuch).

Die bauplanungsrechtliche Zulässigkeit richtet sich nach der Lage des Grundstücks: Befindet sich das Grundstück in einem Bebauungsplangebiet, müssen die Vorgaben des Bebauungsplans berücksichtigt werden (vergleiche §§ 30, 31, 33 BauGB). Auf einem unbeplanten Grundstück hängt die bauplanungsrechtliche Zulässigkeit davon ab, ob sich das Vorhaben im Innenbereich (vergleiche § 34 BauGB) oder im Außenbereich (vergleiche § 35 BauGB) befindet⁷.

Typischerweise liegen die in Frage kommenden Flächen im Außenbereich. Hier differenziert das BauGB zwischen sogenannten privilegierten und sonstigen Vorhaben: Privilegierte Vorhaben sind nach § 35 Abs. 1 BauGB nur in Ausnahmefällen unzulässig, nämlich dann, wenn ihnen öffentliche Belange entgegenstehen. Sonstige Vorhaben sind dagegen nach § 35 Abs. 2 BauGB im Außenbereich grundsätzlich immer unzulässig, es sei denn, öffentliche Belange werden ausnahmsweise nicht beeinträchtigt. Öffentliche Belange werden in Absatz 3 des §35 BauGB zum Teil explizit aufgeführt. Dazu gehören beispielsweise Darstellungen in Flächennutzungsplänen oder Vorgaben in Raumordnungsplänen.

§ 35 Abs. 1 BauGB enthält eine abschließende Liste der privilegierten Vorhaben. Zu diesen privilegierten Vorhaben gehört ein Vorhaben, wenn es unter anderem

- einem land- oder forstwirtschaftlichen Betrieb dient und nur einen untergeordneten Teil der Betriebsfläche einnimmt (Nr. 1),
- einem Betrieb der gartenbaulichen Erzeugung dient (Nr. 2) oder
- der Nutzung solarer Strahlungsenergie in, an und auf Dach- und Außenwandflächen von zulässigerweise genutzten Gebäuden dient, wenn die Anlage dem Gebäude baulich untergeordnet ist (Nr. 8).

Agri-PV-Anlagen werden also nicht explizit als privilegierte Vorhaben genannt. Dies kann den Begründungsaufwand für die Einstufung von Agri-PV als privilegiertes Vorhaben deutlich erhöhen. Dies zeigt sich schon an dem Begriff des »Dienens« (Nr. 1): So soll diese Voraussetzung nach Ansicht des BVerwG nur erfüllt sein, »wenn ein vernünftiger Landwirt auch und gerade unter Berücksichtigung des Gebots der größtmöglichen Schonung des Außenbereichs dieses Vorhaben mit etwa gleichem Verwendungszweck und mit etwa gleicher Gestaltung und Ausstattung für einen entsprechenden Betrieb errichten würde und das Vorhaben durch diese Zuordnung zu dem konkreten Betrieb auch äußerlich erkennbar geprägt wird«⁸. Wie kann das bei Agri-PV-Anlagen verstanden werden? Grundsätzlich erfüllen die für die Energieversorgung der Gebäude und des Betriebs notwendigen Anlagen diese Vorgabe. Entscheidend ist, ob der betriebsbezogene Anteil der Energieerzeugung gemessen an der Gesamtkapazität der Anlage erheblich ins Gewicht fällt: Überwiegt er den zur Einspeisung in das öffentliche Netz bestimmten Anteil nicht deutlich, fehlt die »dienende« Funktion der Anlage.

Das BVerwG erachtet die Verwendung von ca. zwei Drittel des in einer Windkraftanlage erzeugten Stroms in einem landwirtschaftlichen Betrieb als ausreichend⁹. Die erwähnte Prägung des Betriebs durch das Vorhaben dürfte grundsätzlich eine gewisse räumliche Nähe der Agri-PV-Anlage zu den Schwerpunkten der betrieblichen Abläufe verlangen.

Mit Blick auf die Klimakrise und den damit verbundenen Anforderungen in der Land- und Forstwirtschaft beziehungsweise dem Gartenbau (unter anderem Schutz vor Hagel, Starkregen, hoher Sonneneinstrahlung) dürfte sich die dienende Funktion i. S. d. § 35 Abs. 1 Nr. 1 beziehungsweise Nr. 2 BauGB bei entsprechender Konzeption der Anlagen aus deren Schutzfunktion für die Pflanzen, den Boden und den Wasserhaushalt zukünftig in verstärkter Weise ergeben. Damit wäre es unerheblich, zu welchem Anteil der Strom aus den Anlagen in dem jeweiligen Betrieb genutzt wird. Mit anderen Worten: Ein geringer Eigenverbrauch des Stroms stünde der Einstufung als privilegiertes Vorhaben in diesem Fall nicht entgegen¹⁰.

Der in § 35 Abs. 1 Nr. 1 BauGB verwendete Begriff der Landwirtschaft ist in § 201 BauGB eigenständig geregelt. Dort wird auch die gartenbauliche Erzeugung erwähnt. Die Privilegierung nach § 35 Abs.1 Nr. 2 BauGB dürfte demnach auch solche

⁶ Eine BImSchG ist nicht erforderlich, da Agri-PV-Anlagen nicht im Anhang zur Vierten Verordnung zur Durchführung des Bundesimmissionsschutzgesetzes (4. BImSchV) aufgeführt sind.

⁷ Vgl. dazu auch Vollprecht/Trommsdorff/Hermann, Legal Framework of Agrivoltaics in Germany, AIP Conference Proceedings 2361, 020002 (2021).

⁸ BVerwG, Urt. v. 03.11.1972, Az. 4 C 9.70.

⁹ BVerwG, Beschl. v. 04.11.2008, Az. 4 B 44.08.

Betriebe betreffen, die Pflanzen in Töpfen, Containern und sonstigen Behältnissen, insbesondere in Gewächshäusern, aufziehen.

Scheidet die Zulässigkeit des Vorhabens im Außenbereich nach § 35 BauGB aus, sollte über die Aufstellung eines Bebauungsplans – gegebenenfalls mit einer Teiländerung des Flächennutzungsplans – nachgedacht werden. In diesem Fall müssten »nur« die Vorgaben des Bebauungsplans erfüllt werden. Problematisch ist insoweit allerdings der sog. Typenzwang, da die Gemeinde an die Festsetzungen nach § 9 BauGB und die Baunutzungsverordnung (BauNVO) gebunden ist. Eine Lösung könnte die Festsetzung eines sonstigen Sondergebiets »Photovoltaik« nach § 11 BauNVO sein. Allerdings stellt sich die Frage, ob zugleich auch eine landwirtschaftliche Nutzung festgesetzt werden kann. Eine Lösung könnte möglicherweise sein, das Gebiet gleichzeitig als Fläche für die Landwirtschaft nach § 9 I Nr. 18 lit. a BauGB auszuweisen¹¹.

Eine andere Möglichkeit bietet der Erlass eines sogenannten vorhabenbezogenen Bebauungsplans. Damit könnten planungsrechtliche Spielräume genutzt werden, da die Gemeinde das Vorhaben hier ohne Berücksichtigung von § 9 BauGB¹² und der BauNVO zulassen kann. Allerdings kommt den Vorgaben des BauGB und der BauNVO stets eine Leitfunktion zu. Auch im Rahmen eines vorhabenbezogenen Bebauungsplans muss daher die geordnete städtebauliche Entwicklung beachtet werden¹³.

Generell ist bei Agri-PV auch die Frage zu beantworten, ob es sich dabei um Eingriffe in den Naturhaushalt handelt. Eingriffe sind vorrangig zu vermeiden, nicht vermeidbare erhebliche Beeinträchtigungen sind zu kompensieren¹⁴. Hier besteht jedoch das Privileg, dass eine Nutzung nach den Regeln der guten landwirtschaftlichen Praxis keinen Eingriff darstellt¹⁵. Wird eine Fläche zur Erzeugung von Strom genutzt, stellt dies derzeit in der Regel einen Eingriff im Sinne des § 14 Abs. 1 Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG) dar. So wurde beispielsweise auch das Forschungsprojekt APV-RESOLA als Eingriff gewertet, und es mussten Ökopunkte nach der Ökokonto-Verordnung (ÖKVO) in Anspruch genommen werden. Diese Verordnung enthält für Baden-Württemberg Vorgaben für die

Anerkennung und Bewertung von zeitlich vorgezogenen Maßnahmen des Naturschutzes und der Landschaftspflege (Ökokonto-Maßnahmen), die zu einem späteren Zeitpunkt einem Eingriffsvorhaben als Kompensationsmaßnahmen zugeordnet werden sollen.

Da Agri-PV für die landwirtschaftliche Nutzung der Flächen bei entsprechender Konzeption auch mit Blick auf die Klimakrise Vorteile bringen kann, sollte im Einzelfall geprüft werden, ob die Flächennutzung den Regeln der guten landwirtschaftlichen Praxis zugeordnet wird und damit keinen Eingriff im Sinne des BNatSchG darstellt. Führt man diesen Gedanken weiter, könnte man auch die Frage aufwerfen, ob eine Agri-PV-Anlage sogar Ökopunkte nach der ÖKVO generieren kann.

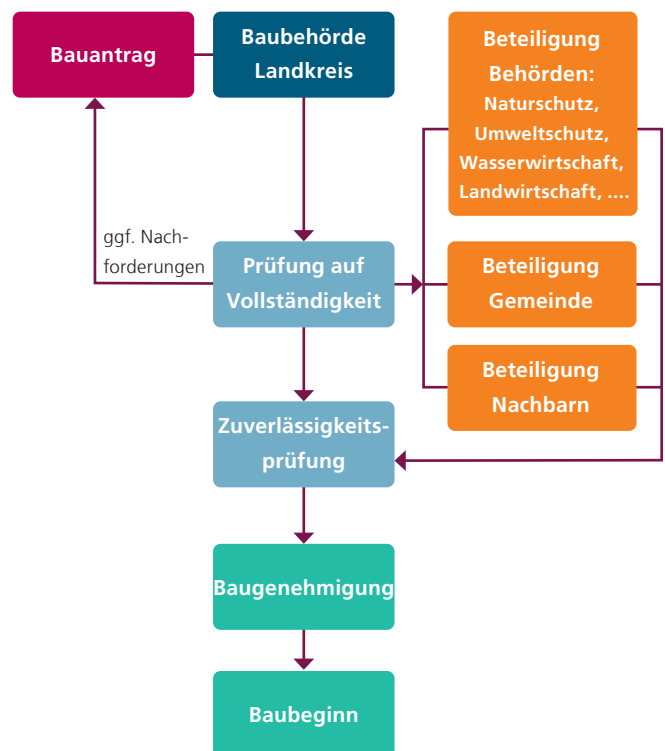


Abb. 59: Beispiel für den Ablauf eines Baugenehmigungsverfahrens. © Fraunhofer ISE

¹⁰ So Vollprecht/Kather, Der Rechtsrahmen für Agri-PV: Aktuelle Herausforderungen und Lösungsansätze, IR 2021, S. 266ff. ¹² Insb. § 9 BauGB.

¹¹ So Vollprecht/Kather, Der Rechtsrahmen für Agri-PV: Aktuelle Herausforderungen und Lösungsansätze, IR 2021, S. 266ff.

¹² Insb. § 9 BauGB.

¹³ BVerwG, NVwZ 2003, 98.

¹⁴ Vgl. § 13 Abs. 1 BNatSchG

¹⁵ Vgl. § 13 Abs. 2 BNatSchG

7.1.3 Das Erneuerbare-Energien-Gesetz

Agri-PV-Anlagen sind Anlagen zur Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien i. S. d. § 3 Nr. 1 EEG. Damit steht der Betreiberin oder dem Betreiber einer Agri-PV-Anlage ein Anspruch gegenüber dem Netzbetreiber auf vorrangigen Netzanschluss nach § 8 Abs. 1 EEG zu. Dabei ist die Netzanschlussmöglichkeit zu ermitteln, welche die geringsten volkswirtschaftlichen Gesamtkosten aufweist. Erst wenn diese Variante gefunden ist, wird ermittelt, wer welche Kosten zu tragen hat. Dabei gilt grundsätzlich: Die Netzausbaukosten trägt der Netzbetreiber, die Netzanschlusskosten die Anlagenbetreiberin oder der Anlagenbetreiber¹⁶.

Zudem hat die Betreiberin oder der Betreiber einer Agri-PV-Anlage nach § 11 Abs. 1 EEG einen Anspruch auf vorrangige Abnahme des erzeugten Stroms. Die Anlagenbetreiberin oder der Anlagenbetreiber muss den Strom aber nicht einspeisen, sondern kann ihn grundsätzlich auch selbst nutzen¹⁷ oder »vor« dem Netz an einen Dritten liefern¹⁸.

Komplizierter wird es bei der finanziellen Förderung für den eingespeisten Strom. Zunächst ist zu berücksichtigen, dass Betreiberinnen und Betreiber von Anlagen mit einer installierten Leistung von mehr als 100 kW_p¹⁹ verpflichtet sind, den Strom über einen Dritten zu vermarkten. Der Netzbetreiber steht damit als Käufer des Stroms nur noch in Ausnahmefällen zur Verfügung²⁰. Im Falle der geförderten Direktvermarktung hat die Anlagenbetreiberin oder der Anlagenbetreiber gegenüber dem Netzbetreiber allerdings nach § 20 EEG einen Anspruch auf die sogenannte Marktprämie; zudem erhält sie oder er vom Direktvermarkter das vereinbarte Entgelt für den gelieferten Strom. Überschreitet die Anlage nicht die 100-kW_p-Grenze, ist der Netzbetreiber zum Kauf des Stroms verpflichtet. Die Betreiberin oder der Betreiber erhält dann die sogenannte Einspeisevergütung vom Netzbetreiber.

Betreiberinnen und Betreiber von Anlagen mit einer installierten Leistung von mehr als 750 kW_p müssen erfolgreich an einer Ausschreibung für Solaranlagen des ersten²¹ beziehungsweise zweiten²² Segments nach §§ 29 ff. i. V. m. § 37 ff. beziehungsweise 38c ff. EEG teilnehmen. Ohne einen Zuschlag beziehungsweise bei den Anlagen des ersten Segments ohne eine sog. Zahlungsberechtigung können sie vom Netzbetreiber keine finanzielle Förderung nach dem EEG beanspruchen²³. Zu beachten ist hier auch § 27a EEG: Grundsätzlich darf der Strom aus »Ausschreibungsanlagen« nicht zur Eigenversorgung genutzt werden. Sind die Anlagen nicht größer als 750 kW_p, gelten die in § 48 EEG festgelegten anzulegenden Werte, wobei hier immer auch die Degression zu beachten ist.

Bei PV-FFA ist zudem die unter anderem in § 38a Abs. 1 Nr. 5 EEG verankerte »20-MW-Grenze« zu beachten: Ist die Anlage größer, kann insoweit keine finanzielle Förderung beansprucht werden. Bei Anlagen des zweiten Segments darf die Gebotsmenge pro Gebot 20 MW nicht überschreiten²⁴.

Die finanzielle Förderung wird ab dem Zeitpunkt der Inbetriebnahme der Anlage für 20 Jahre gezahlt. Für Anlagen, deren finanzielle Förderung gesetzlich festgelegt ist, verlängert sich die Zahlung bis zum 31. Dezember des zwanzigsten Jahres.

Neben den allgemeinen Voraussetzungen für eine finanzielle Förderung nach dem EEG sind insbesondere die weiteren speziellen Vorgaben bei der Solarenergie zu beachten, die im Folgenden skizzenhaft und damit nicht abschließend dargestellt werden:

Wie sich § 48 EEG entnehmen lässt, besteht ein Anspruch auf die finanzielle Förderung, wenn die Anlage auf, an oder in einem Gebäude (Aufdachanlage) oder einer sonstigen

¹⁶ Vgl. § 16 Abs. 1; § 17 EEG.

¹⁷ In diesem Fall kann möglicherweise die EEG-Umlage reduziert werden.

¹⁸ Da das Netz für die allgemeine Versorgung in diesen Konstellationen nicht genutzt wird, fallen Netzentgelte nicht an. Entsprechendes gilt für die netzgekoppelten Abgaben und Umlagen (zum Beispiel KWK-Umlage, § 19 Abs. 2 StromNEV-Umlage, Offshore-Netzumlage, Konzessionsabgabe). Deshalb kann der Anlagenbetreiber zum Beispiel dem Belieferten einen günstigen Preis für den Strom anbieten.

¹⁹ 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 zu beachten.

²⁰ Vgl. § 21 Abs. 1 Nr. 2 EEG.

²¹ Freiflächenanlagen und Solaranlagen, die auf, an oder in baulichen Anlagen errichtet werden sollen, die weder Gebäude noch Lärmschutzwände sind; vgl. § 3 Nr. 4a EEG.

²² Solaranlagen, die auf, an oder in einem Gebäude oder einer Lärmschutzwand errichtet werden sollen; vgl. § 3 Nr. 4b EEG.

²³ Vgl. § 22 Abs. 3 EEG; bei der Ermittlung der »750-kW-Grenze« sind ebenfalls die in § 24 Abs. 1 und 2 EEG enthaltenen »Verklammerungsvorschriften« zu beachten

²⁴ Vgl. § 38c Abs. 2 EEG.

baulichen Anlage angebracht ist und diese vorrangig zu anderen Zwecken als der Erzeugung von Solarstrom errichtet worden ist. Letztlich geht es hier darum, dass die Solaranlage auf einer Fläche errichtet wird, die »sowieso« genutzt wird (»Doppelnutzung«). Dabei kann die PV-Anlage auch als Dach angebracht sein²⁵. Bei PV-Anlagen auf Gewächshäusern muss beispielsweise gewährleistet sein, dass die Nutzung des Gewächshauses in seiner eigentlichen Funktion im Vordergrund steht. Das ist unter anderem dann nicht der Fall, wenn Pflanzen angebaut werden, die gemeinhin kein Gewächshaus benötigen. Hier ist im Ergebnis eine genaue Prüfung des Einzelfalls erforderlich. Bei »Nichtwohngebäuden« im unbeplanten Außenbereich nach § 35 BauGB – wie zum Beispiel Gewächshäusern – ist allerdings die Einschränkung nach Absatz 3 des § 48 EEG zu beachten.

Bei den Aufdachanlagen – vermutlich jedoch nicht bei Anlagen auf sonstigen baulichen Anlagen – ist zudem noch Folgendes zu beachten: Nach § 48 Abs. 5 EEG besteht der Anspruch auf finanzielle Förderung bei Anlagen mit einer Leistung zwischen 300 und 750 kW_p nur für 50 Prozent des erzeugten Stroms. Soll dies verhindert werden, muss die Anlagenbetreiberin beziehungsweise der Anlagenbetreiber an den Ausschreibungen teilnehmen – allerdings gilt dann unter anderem das Eigenversorgungsverbot nach § 27a EEG.

Werden diese Vorgaben nicht erfüllt, könnte sich dennoch die Förderfähigkeit unter anderem aus § 48 Abs. 1 Nr. 3 EEG ergeben: Voraussetzung ist in diesen Fällen immer, dass zumindest ein beschlossener Bebauungsplan vorliegt. Wenn dieser Bebauungsplan nach dem 1. September 2003 mit dem Zweck der Errichtung einer Solaranlage aufgestellt oder geändert worden ist, müssen sich die Agri-PV-Anlagen auf bestimmten Flächen befinden, zum Beispiel längs von Autobahnen oder

Schienenwegen innerhalb eines Korridors von 200 Metern, gemessen vom äußeren Rand der befestigten Fahrbahn – wobei hier noch ein 15 Meter breiter Korridor freigehalten werden muss – oder auf einer sogenannten Konversionsfläche.

Eine Erweiterung dieser Flächenkulisse ergibt sich nur für Anlagen, die an Ausschreibungen teilnehmen müssen. Eine finanzielle Förderung kommt dann auch bei Flächen in Betracht, deren Flurstücke zum Zeitpunkt des Beschlusses über die Aufstellung oder Änderung des Bebauungsplans als Acker- oder Grünland genutzt worden sind, – verkürzt gesagt – keiner anderen als der in § 37 Abs. 1 EEG genannten Flächenkategorie zugeordnet werden können und zudem in einem benachteiligten Gebiet liegen²⁶. Dies gilt jedoch nur, wenn und soweit die Landesregierung für Gebote auf den entsprechenden Flächen eine Rechtsverordnung erlassen hat (sog. Länderöffnungsklausel). Dies ist bisher nur in Bayern, Baden-Württemberg, Hessen, Niedersachsen, Sachsen, im Saarland und in Rheinland-Pfalz erfolgt.

Mit Blick auf die Akzeptanz ist der in der Sommernovelle in das EEG eingefügte § 6 EEG interessant: Diese Regelung sieht vor, dass Betreiber von Freiflächensolaranlagen betroffenen Gemeinden Zuwendungen in Höhe von bis zu 0,2 Eurocent je eingespeister Kilowattstunde gewähren können. Hierfür ist unter anderem ein schriftlicher Vertrag zwischen Anlagenbetreibendem und der betroffenen Gemeinde erforderlich²⁷. Bei Anlagen, die eine finanzielle Förderung erhalten, werden die Zuwendungen vom Netzbetreiber erstattet. Bei den anderen Anlagen (sog. PPA-Anlagen) muss der Anlagenbetreibende diesen Betrag aus der eigenen Tasche zahlen.

²⁵ Vgl. zum EEG 2004 BGH, Urt. v. 17.11.2010, Az. VIII ZR 277/09.

²⁶ Vgl. § 37 Abs. 1 S. 1 lit. h.) und i.) EEG.

²⁷ Der Bundesverband Neue Energiewirtschaft (bne) stellt einen kostenfreien Mustervertrag für die kommunale Beteiligung, ein Beiblatt mit nützlichen Erläuterungen zu den Vertragsinhalten und weitere Informationen zur Verfügung; abrufbar unter <https://sonne-sammeln.de/mustervertrag/>.

7.1.4 Berücksichtigung der Agri-PV im Rahmen der Innovationsausschreibungen des Erneuerbare-Energien-Gesetzes

Mit der am 1. Januar 2021 in Kraft getretenen EEG-Novelle wurde im Rahmen der Innovationsausschreibungen ein eigenes Segment in Höhe von 50 MW_p installierte Leistung für sogenannte »besondere Solaranlagen« eingeführt. Der Deutsche Bundestag hat im Juni 2021 eine Erhöhung auf 150 Megawatt beschlossen. Zu den besonderen Solaranlagen gehören neben PV-Anlagen über Parkplätzen und schwimmenden Solaranlagen auch Solaranlagen auf Ackerflächen oder Gartenbauflächen – also Dauerkulturen und mehrjährige Kulturen – bei gleichzeitigem Nutzpflanzenanbau auf der Fläche. Welche Anforderungen an die besonderen Solaranlagen gestellt werden, hat die Bundesnetzagentur (BNetzA) in einer Festlegung vom 1. Oktober 2021 näher geregelt²⁸. Verkürzt gesagt müssen bei den Agri-PV-Anlagen insbesondere die Anforderungen der DIN SPEC 91434 erfüllt werden. Dieses Segment wird es vorerst nur im Rahmen der Ausschreibungsrunde am 1. April 2022 geben. Bis dahin müssen entsprechende Gebote bei der Bundesnetzagentur abgegeben werden.

Teilnahmeberechtigt sind allerdings nur Anlagenkombinationen i. S. d. § 2 Innovationsausschreibungsverordnung (InnAusV). Das heißt, Agri-PV-Anlagen müssen mit einem Speicher oder einer anderen Ökostromanlage gekoppelt werden und den Strom über einen gemeinsamen Netzverknüpfungspunkt einspeisen. Ein Gebot für eine Anlagenkombination, die auch eine besondere Solaranlage enthält, muss eine Mindestgröße von 100 kW_p umfassen und darf eine Gebotsmenge von zwei Megawatt Peak nicht überschreiten.

§ 37 EEG ist nicht anzuwenden, sodass die Anforderungen für die finanzielle EEG-Förderung bezüglich Flächenkulisse und Bebauungsplan²⁹ nicht beachtet werden müssen. Betreiber von Agri-PV-Anlagen, die eine Ausschreibung gewinnen, erhalten vom Netzbetreiber für den eingespeisten Strom einen festen Betrag pro Kilowattstunde (sog. Fixe Marktprämie). Der maximale Wert des bei der Ausschreibung zugelassenen Gebots wird voraussichtlich bei rund 7,43 Eurocent pro Kilowattstunde liegen. Als zweite Einnahmequelle können Erlöse aus dem Verkauf des Stroms generiert werden – je nach Verkaufszeitpunkt voraussichtlich um die vier bis sechs Eurocent pro Kilowattstunde. Wie bei allen Ausschreibungsanlagen im EEG darf der Strom zudem gemäß § 27a EEG grundsätzlich nicht selbst verbraucht werden, sondern muss entweder vor dem Stromnetz an einen Dritten geliefert oder in das Stromnetz eingespeist werden.

²⁸ https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/Ausschreibungen/Innovations/Gezeichnete-FestlegungOktober2021.pdf?__blob=publicationFile&v=3

²⁹ Wichtig: Insoweit handelt es sich um eine Anforderung für die finanzielle Förderung nach dem EEG. Nach dem öffentlichen Recht kann sich durchaus noch das Erfordernis eines Bebauungsplans ergeben (vgl. dazu oben).

7.2 Politische Handlungsempfehlungen

7.2.1 Möglichkeiten zu Nachbesserungen bei den Innovationsausschreibungen

Während die Berücksichtigung der Agri-PV im Rahmen der Innovationsausschreibungen des EEG grundsätzlich ein Schritt in die richtige Richtung ist, erscheint die Regelung für eine zielgerichtete Förderung der Agri-PV aus verschiedenen Gründen wenig geeignet. Nachbesserungsbedarf besteht vor allem bei folgenden Punkten:

Keine Pflicht zu Anlagenkombinationen

Eine Teilnahme an den Innovationsausschreibungen des EEG ist nur für Anlagenkombinationen möglich. Die Pflicht einer Kopplung an einen Speicher oder (eine) weitere EE-Anlagen stellt jedoch eine inhaltlich kaum begründbare Einschränkung für die zu fördernden Agri-PV-Anlagen dar. Das in den Innovationsausschreibungen vorgegebene Ziel der Netzdienlichkeit sollte daher unabhängig von einer möglichen finanziellen Förderung der Agri-PV betrachtet werden. Denn der innovative Ansatz bei der Agri-PV ist in dem Nebeneinander von Energieerzeugung und landwirtschaftlicher Nutzung auf der Fläche zu sehen, sodass eine besondere Markt- oder Netzdienlichkeit der Agri-PV-Anlage im Rahmen der Innovationsausschreibung im April 2022 irrelevant sein sollte.

Realistische Chance auf Förderung

Die Ausschreibung für Agri-PV ist zusammen mit schwimmender PV und PV-Parkplatzüberdachungen geplant. Durch den direkten Wettbewerb zwischen den drei Anlagentypen ist offen, welche Technologie sich bei der gemeinsamen Ausschreibung am Ende durchsetzen wird. Die Kostenstrukturen der drei flächenneutralen PV-Technologien unterscheiden sich möglicherweise derart, dass nicht alle drei Anlagentypen Zuschläge erhalten können. Können die anderen Anlagentypen also günstiger anbieten, werden keine Agri-PV-Anlagen zum Zug kommen. Zudem besitzen innerhalb der Agri-PV bodennahe Systeme mit Anbau zwischen den Modulreihen (Kategorie II, DIN SPEC 91434) durch ihre weniger aufwändige Unterkonstruktion einen klaren Wettbewerbsvorteil, der sich voraussichtlich stark auf die Zusammensetzung der bezuschlagten Projekte auswirken wird. Hoch aufgeständerte Systeme mit Anbau zwischen den Modulreihen (Kategorie I, DIN SPEC 91434) werden demzufolge wahrscheinlich kaum eine Förderung erhalten. Dabei ermöglichen gerade diese Systeme eine effizientere Flächennutzung und bieten den Kulturen Schutz gegen Folgen des Klimawandels.

Eigenverbrauch des produzierten Stroms für Landwirtschaftsbetriebe ermöglichen

Eine Anforderung, die das EEG an Ausschreibungsanlagen stellt, ist, dass der Strom grundsätzlich nicht selbst verbraucht werden darf, sondern entweder vor dem Stromnetz an einen Dritten geliefert oder vollständig in das Stromnetz eingespeist wird. Für herkömmliche PV-FFA gilt dies ab der ausschreibungspflichtigen Leistung von derzeit 750 kW_p. Da in der Innovationsausschreibung im April 2022 auch kleinere Agri-PV-Anlagenkombinationen ab 100 kW_p gefördert werden können, gilt das Eigenversorgungsverbot auch für diese Agri-PV-Anlagen unter 750 kW_p. Durch die Integration in den landwirtschaftlichen Betrieb ist Agri-PV grundsätzlich gut geeignet, um Strombedarf von Landwirtschaftsbetrieben zu decken. Dass dies unter den aktuellen Bedingungen ausgeschlossen wird, verringert die Wirtschaftlichkeit von Agri-PV-Anlagen. Dies gilt vor allem für kleinere Anlagen, bei denen der Eigenverbrauch tendenziell einen größeren Anteil am produzierten Strom einnimmt und die somit durch die Einsparungen an Netzentgelten am meisten profitieren könnten.

Realistische Chance auf Förderung auch für kleinere Anlagen

Im direkten Wettbewerb haben größere Anlagen aufgrund von Skaleneffekten typischerweise einen Vorteil gegenüber kleineren Systemen. Durch den Kostendruck bei Ausschreibungen werden in der Innovationsausschreibung 2022 daher tendenziell größere Agri-PV-Anlagen einen Zuschlag erhalten. Dies widerspricht jedoch der Idee, in den ersten Förderjahren eine große Bandbreite verschiedener Anwendungen zu ermöglichen, um so Erkenntnisse zu deren Synergiepotenzialen zu generieren. Auch könnte diese Tendenz der gesellschaftlichen Akzeptanz für Agri-PV schaden, da kleinere, dezentrale Anlagen in Hofnähe vermutlich einen größeren Rückhalt in der Gesellschaft fänden.

Planungssicherheit und langfristige Investitionsanreize durch mehrjährige Förderung

Die einmalige Durchführung einer Innovationsausschreibung mit dem Segment »besondere Solaranlage« im April 2022 bietet deutschen Solarunternehmen und Landwirtschaftsbetrieben wenig verlässliche Perspektiven, um in die Entwicklung von Agri-PV-Systemen und entsprechende Produktstrategien oder Projekte zu investieren. Durch mehrjährig konstante und transparente Förderungsbedingungen könnte hingegen Planungssicherheit und Investitionsanreize geschaffen und die Weichen für eine nachhaltige Energiegewinnung der Zukunft gestellt werden.

7.2.2 Explizite Privilegierung von Agri-PV-Anlagen

Eine explizite Privilegierung von Agri-PV-Anlagen gemäß § 35 Abs. 1 BauGB erscheint grundsätzlich sinnvoll, da sie der Landwirtschaft dienen können und aufgrund ihrer landwirtschaftlichen Nutzung natürlicher Teil des Außenbereichs sind. Öffentliche Belange werden durch Agri-PV-Anlagen kaum berührt: Die Anlagen dienen dem Klimaschutz, erhöhen die Klimaresilienz und reduzieren den Wasserverbrauch. Allerdings wird das Landschaftsbild durch die Anlagen beeinträchtigt. Standorte außerhalb sensibler Landschaftsbilder sind daher zu bevorzugen, zum Beispiel Flächen entlang eines Waldrandes oder Standorte, an denen Schutzkonstruktionen für die Landwirtschaft verbreitet sind.

Praxisbeispiel Himbeerplantage

Zum Schutz von Himbeeren vor Hagel und starker Sonnenbestrahlung kann eine PV-Modulreihe über dem Spalierobst einen doppelten Nutzen erzielen. Die Wertschöpfung der Himbeerkultivierung steht dabei typischerweise über der Solarstromerzeugung.

7.2.3 Aufnahme »Sondergebiet Agri-Photovoltaik« in BauNVO

Aufgrund der oben beschriebenen Unsicherheiten im Zusammenhang mit den bauplanerischen Festsetzungsmöglichkeiten sollte mit einem »Sondergebiet Agri-Photovoltaik« ein neuer »Siedlungsbaustein« in der BauNVO aufgenommen werden.

7.2.4 Mögliche Förderkriterien und -szenarien

Im sogenannten Osterpaket wurde von der Bundesregierung Anfang April 2022 ein Gesetzentwurf vorgelegt, in dem auch eine umfangreiche Förderung der Agri-PV im EEG vorgeschlagen wird. Vorgesehen sind darin unter anderem eine Ausweitung der Flächenkulisse auf Ackerflächen und Flächen des Gartenbaus sowie eine Technologieprämie für hoch aufgeständerte Agri-PV. Die konkrete Ausgestaltung der EEG-Novelle 2023 wird erst in der nächsten Ausgabe des Leitfadens thematisiert.

Neben einer generellen Ausweitung der Flächenkulisse erscheint im Rahmen des EEG eine gesetzliche Einspeisevergütung besonders für nicht ausschreibungspflichtige hoch aufgeständerte Agri-PV als wichtig. Für größere ausschreibungspflichtige Anlagen wäre ein separates Ausschreibungssegment speziell für hoch aufgeständerte Agri-PV zielführend.

Um Genehmigungsverfahren zu vereinfachen, könnten durch eine Teil-Privilegierung jene Agri-PV-Systeme als privilegierte Vorhaben nach §35 Baugesetzbuch eingeordnet werden, welche eine besonders hohe gesellschaftliche Akzeptanz erfahren. Dies könnten Anlagen im Gartenbau und kleine Anlagen unter einem MWp Leistung sein.

Agri-PV in Kombination mit einem Anbau von Paludikulturen stellen eine zukunftsorientierte Anwendung dar, durch die wichtige Klimaschutzpotenziale gehoben werden können. Deshalb sollten bei der Ausgestaltung des rechtlichen Rahmens auch Anlagen auf wiedervernässten Moorböden ermöglicht werden.

Da bei Agri-PV eine Doppelnutzung vorliegt – landwirtschaftlich und energetisch – ist dieser Sachverhalt vergleichbar mit der Doppelnutzung bei Gebäuden beziehungsweise sonstigen baulichen Anlagen³⁰. Dies spricht dafür, beide Konstellationen bei der rechtlichen Ausgestaltung der Regelung gleich zu behandeln. Ein Bebauungsplan wäre dann mit Blick auf das EEG ebenso entbehrlich wie das Vorliegen einer bestimmten Flächenkategorie. Die landwirtschaftliche Nutzung muss weitgehend uneingeschränkt fortgeführt werden können. Dies ist allein aus Gründen der Akzeptanz wichtig und vermeidet Wertungswidersprüche innerhalb des EEG. Um dies sicherzustellen, sollte auf die Voraussetzungen für die EU-Direktzahlungen zurückgegriffen werden. Dies erhöht zudem die Rechtssicherheit. Denn die dazu ergangene Rechtsprechung³¹ könnte dann auf die »neue« Regelung im EEG übertragen werden. Wie könnte die Umsetzung aussehen?

Unter anderem in § 48 Abs. 1 Satz 1 EEG könnte hinter Nummer 1 eine neue Nummer 2 eingefügt werden. Die Vorschrift würde dann wie folgt lauten:

»Für Strom aus Solaranlagen, deren anzulegender Wert gesetzlich bestimmt wird, beträgt dieser [...] Eurocent pro Kilowattstunde, wenn die Anlage [...]

³⁰ Vgl. dazu oben zu § 48 Abs. 1 S. 1 Nr. 1 EEG.

³¹ Vgl. dazu oben zur DirektZahlDurchfV.

auf einer landwirtschaftlichen Fläche errichtet worden ist und die landwirtschaftliche Tätigkeit auf dieser Fläche ausgeübt wird, ohne durch die Intensität, Art, Dauer oder den Zeitpunkt des Betriebs der Anlage stark eingeschränkt zu sein, [...]«

Hinter Satz 1 könnte mit Blick auf den Nachweis der Voraussetzungen folgender Satz 2 eingefügt werden:

»Als Nachweis der Voraussetzungen des Satzes 1 Nummer 2 gilt insbesondere die Vorlage eines Bescheids für diese Fläche über die Zuwendung einer Betriebsprämie im Sinne der Verordnung (EU) Nr. 1307/2013 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Dezember 2013 mit Vorschriften über Direktzahlungen an Inhaber landwirtschaftlicher Betriebe im Rahmen von Stützungsregelungen der Gemeinsamen Agrarpolitik und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 637/2008 des Rates und der Verordnung (EG) Nr. 73/2009 des Rates (ABl. L 347 vom 20.12.2013, S. 608) in der jeweils geltenden Fassung.«

Entsprechende Ergänzungen müssten unter anderem in § 37 Abs. 1 EEG erfolgen.

Derzeit liegen die Investitionskosten für Agri-PV-Anlagen und andere flächenneutrale PV-Kraftwerke etwas höher als bei herkömmlichen PV-FFA. Um den daher erforderlichen Marktanschub für diese innovativen Systeme zu gewährleisten, könnte eine Technologieprämie (Eurocent pro Kilowattstunde) im EEG eingeführt werden: Die gesetzlich bestimmte Vergütung (vgl. § 48 EEG) würde entsprechend erhöht und wäre damit auskömmlich. Die Prämie würde von Jahr zu Jahr sinken und einen Wert von null erreichen, sobald die neuen PV-Kraftwerkstechnologien wettbewerbsfähig sind und damit kein Marktanschub mehr notwendig ist. Bei den aktuellen Ausschreibungen (vgl. §§ 37ff. EEG) kommen die flächenneutralen Solarkraftwerkstechnologien aufgrund der beschriebenen Kostenstruktur derzeit kaum zum Zug. Die Technologieprämie könnte diese Wettbewerbsnachteile ausgleichen. Denn sie würde – so die Idee – den Zuschlagswert entsprechend erhöhen, also erst nach Abschluss des Ausschreibungsverfahrens berücksichtigt werden. Die Bieterinnen und Bieter könnten daher mit einem niedrigeren Gebotswert in die Ausschreibungen gehen und sich so gegenüber den herkömmlichen PV-FFA besser durchsetzen.

Um den Nutzen für die Landwirtschaft sicherzustellen, sollten die Ansprüche an ein Agri-PV-System zudem im Regelwerk genau definiert sein. Ein Anknüpfungspunkt könnten die Kennzahlen und Prüfverfahren der DIN SPEC 91434 sein.

Ein weiteres mögliches Förderszenario ist ein 1000-Felder-Programm: Entsprechend dem 1000-Dächer-Programm für PV-Anlagen in den 1990er-Jahren könnte ein gezieltes und systematisches Förderprogramm aufgesetzt werden, welches die spezifischen Herausforderungen und Förderbedarfe sowohl bodennaher als auch hoch aufgeständerter Agri-PV-Systeme in den Anwendungsfeldern Gartenbau/Dauerkulturen, Ackerbau und PV-Gewächshäusern in angemessener Weise berücksichtigt. Durch ein begleitendes wissenschaftliches Mess- und Auswerteprogramm könnte die notwendige Datengrundlage für die Ausgestaltung zukünftiger rechtlicher Rahmenbedingungen erhalten werden.

8 Agri-Photovoltaik voranbringen

Klimakrise, Wasserknappheit und der stetig steigende Bedarf an Energie und Nahrungsmitteln stellen die Menschen 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 vielfältigen Anwendungsfelder aufgezeigt. Neben einer effizienteren Landnutzung kann Agri-PV zu 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 6 und 10 Eurocent pro Kilowattstunde ist Agri-PV schon heute mit anderen erneuerbaren Energiequellen wettbewerbsfähig. Eine wirtschaftliche Umsetzung von Agri-PV ist in Deutschland jedoch aufgrund des fehlenden gesetzlichen Regelrahmens nur in seltenen Fällen möglich. Eine Anpassung des Regelrahmens an die technischen Fortschritte der Agri-PV könnte beispielsweise umfassen:

- eine Privilegierung von Agri-PV gemäß § 35 Abs. 1 BauGB, um Genehmigungsverfahren zu erleichtern
- eine Vergütung des Stroms aus Agri-PV-Anlagen nach EEG zu Vergütungssätzen, die zwischen denen von PV-FFA und Dachanlagen liegen, zum Beispiel in Form von Sonderausweisungen für Agri-PV
- die Umsetzung eines 1000-Felder-Programms zur Förderung und Weiterentwicklung der Agri-PV

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. Auch in Bezug auf die Genehmigung ist mit Vorteilen zu rechnen. Zudem ist im Gartenbau ist die Einstufung von Agri-PV als privilegiertes Bauvorhaben nach § 35 Abs. 1 Nr. 2 BauGB möglicherweise einfacher zu erreichen.

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, auch 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.

Zwar konnte bei den meisten Systemen, welche bisher untersucht wurden, ein 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 könnten die Kombination mit Energiespeichern, organischer PV-Folie und solarer Wasseraufbereitung und -verteilung betreffen. Auch der Einsatz von elektrischen Landmaschinen und intelligente und automatische 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 ersten Anlagen in Deutschland haben die technische Machbarkeit der Agri-PV aufgezeigt. Um jedoch das Potenzial der Technologie voll zu entfalten, reichen die bisher ergriffenen Maßnahmen in Deutschland bei weitem nicht aus. Denn herkömmliche Ausschreibungen werden der Vielfalt verschiedener Anwendungsfelder und teilweise noch unbekannter Synergieeffekte nicht gerecht, wenn dort nur Anlagen mit aktuell geringsten Stromgestehungskosten den Zuschlag erhalten.

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/roes15_apvres.php
- [5] Schindele, S., Trommsdorff, M., Schlaak, A., Oberfell, 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. <https://www.imw.fraunhofer.de/de/forschung/projekteinheit-center-for-economics-of-materials/forschungsprojekte/BiWiBi.html>
- [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] Basseur, 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] Abeyasinghe, 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., Cheviron, 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., Gözl, 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 Agrarstrukturerhebung 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	6
Abb. 2	Illustration eines Agri-PV-Systems. © Fraunhofer ISE	7
Abb. 3	Projektpartner von APV-RESOLA.	7
Abb. 4	Entwicklung der Agri-PV seit 2010. © Fraunhofer ISE	8
Abb. 5	Flächeninanspruchnahme von PV-FFA seit 2004 in Deutschland, Gesamtanlagenbestand und jährlicher Zubau. © BMWi [8]	9
Abb. 6	Anwendungen für die Integration von Photovoltaik. © Fraunhofer ISE	10
Abb. 7	Freiflächen-PV-Anlage. © Fraunhofer ISE	11
Abb. 8	Entwicklung der Niederschläge und der Globalstrahlung in Deutschland seit 1991 Daten: Deutscher Wetterdienst. Darstellung Fraunhofer ISE.	12
Abb. 9	Klassifizierung von Agri-PV-Systemen. © 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	13
Abb. 10	Illustration der Kategorien und Nutzungsformen der DIN SPEC 91434.	15
Abb. 11	Flächennutzung in Deutschland. © Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (2021) [13]	16
Abb. 12	Querschnitt der Agri-PV-Anlage in Weihenstephan. © 2020 B. Ehrmaier, M. Beck, U. Bodmer	12
Abb. 13	Skizze der Agri-PV-Referenzanlage in Heggelbach. © Hilber Solar	18
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.	19
Abb. 15	Durch die kombinierte Flächennutzung beträgt die Flächennutzungseffizienz mit Agri-PV auf dem Testgelände in Heggelbach bis zu 186 Prozent. (Illustration Kartoffeln © HappyPictures / shutterstock.com)	19
Abb. 16	Bio Obsthof Nachtwey © Fraunhofer ISE	20
Abb. 17	Vertikale Agri-Photovoltaik in Donaueschingen Aasen. © solverde Bürgerkraftwerke	22
Abb. 18	Modulreihe mit bifazialen Modulen der Agri-PV-Anlage in Heggelbach. © Fraunhofer ISE	23
Abb. 19	Pilotanlagen des Fraunhofer Chile Research Instituts in Curacavi und Lampa, Chile untersuchen, welche Kulturpflanzen von einer weniger starken Sonneneinstrahlung profitieren. © Fraunhofer Chile	24
Abb. 20	Studie mit verschiedenen Salatsorten in der Agri-PV-Forschungsanlage der Universität von Montpellier, Frankreich. © Christian Dupraz	25
Abb. 21	Untersuchte Kulturen in Heggelbach (Weizen, Sellerie, Kartoffeln, Klee gras). © Universität Hohenheim	26
Abb. 22	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	27
Abb. 23	Ertragsunterschiede der Kulturen unter Agri-PV gegenüber Referenzflächen 2017 (blau) und 2018 (rot) in Heggelbach (ohne Flächenverluste durch Stützen). Daten: Universität Hohenheim	28
Abb. 24	Rammschutz der Aufständigung der Anlage in Heggelbach vor der Beschädigung durch Landmaschinen. © Hilber Solar	28
Abb. 25	Illustration einer Agri-PV-Apfelplantage. © Fraunhofer ISE	29
Abb. 26	Agri-PV mit nachgeführten Modulen in Frankreich. © Sun'Agri	30
Abb. 27	Witterungsschutz für Himbeeren durch Agri-PV, 300 kW _p Testanlage von BayWa. r.e in den Niederlanden. © BayWa r.e.	30
Abb. 28	Demoprojekt im Beerenbau zeigt sehr hohe Wertschöpfung in der Landwirtschaft. © BayWa r.e.	31
Abb. 29	Weizenernte mit Mähdrescher. © Fraunhofer ISE	31
	Schematisch: Photosyntheserate in Abhängigkeit der Beleuchtungsstärke bei Sonnen- und Schattenpflanzen. (Quelle: © ASPS, verändert nach [24])	32
Abb. 30	Vertikal errichtete bifaziale Module im Solarpark in Eppelborn-Dirmingen, Saarland mit 2 MW _p Leistung, errichtet von Next2Sun. © Next2Sun GmbH	32
Abb. 31	Thomas Schmid und Florian Reyer. © AMA Film	33

Abb. 32 Investitionsausgaben (CAPEX) für PV-Freiflächenanlagen und Agri-PV. Daten aus [5, 25]	35	Abb. 51 Arbeiten in einer Agri-PV-Anlage unter den Solarmodulen.	48
Abb. 33 Stromgestehungskosten unterteilt nach CAPEX / OPEX von PV-Freiflächenanlagen und Agri-PV im Vergleich. Daten aus [5, 25]	36	Abb. 52 Baustraßen zur Vermeidung von Bodenverdichtung. © BayWa r.e.	49
Abb. 34 Geschätzte durchschnittliche Stromgestehungskosten (LCOE) für PV-Freiflächenanlagen und Agri-PV. Daten aus [4, 5, 26, 27]	37	Abb. 53 Wartungsarbeiten an der Agri-PV-Anlage in Heggelbach.	49
Abb. 35 Interessensgruppen und Vertragsmodell.	39	Abb. 54 Bürgerinformationsveranstaltung im Projekt APV-RESOLA. © ITAS	52
Abb. 36 Hoch aufgeständerte Anlage mit Möglichkeit zur Bewirtschaftung mit dem Kartoffelvollernter. © Hofgemeinschaft Heggelbach	40	Abb. 55 Modell der Heggelbach-Anlage für Informationsveranstaltungen. © Fraunhofer ISE	52
Abb. 37 PV-Module mit erweiterten Zellzwischenräumen und Schutzfunktion in den Niederlanden. © BayWa r.e.	40	Abb. 56 Mehrstufiger transdisziplinärer Agri-PV-Forschungsansatz. © ITAS	53
Abb. 38 Bifaziale, senkrecht aufgestellte Module von Next2Sun, Eppelborn-Dirmingen. © Next2Sun GmbH	41	Abb. 57 Die nicht landwirtschaftlich bearbeitbaren Zwischenstreifen könnten bei Agri-PV-Anlagen genutzt werden, um die Biodiversität auf der Ackerfläche zu erhalten oder zu erhöhen. © Fraunhofer ISE	55
Abb. 39 PV-Module über einem Folientunnel. © BayWa r.e.	41	Abb. 58 Beispiel für den Ablauf eines Baugenehmigungsverfahrens.	59
Abb. 40 Spezielle Dünnschicht-Module in Röhrenform der Firma TubeSolar. © TubeSolar AG	41		
Abb. 41 Halbschatten durch Solarröhren, eingehängt zwischen Spannseilen der Firma TubeSolar. © sbp sonne gmbh	41		
Abb. 42 Hoch aufgeständerte Anlagen mit schmalen PV-Modulen. © REM Tec	41		
Abb. 43 Hoch aufgeständerte Anlage mit durchgängigen Modulreihen. © Sun'Agri	42		
Abb. 44 Einachsiges Trackersystem einer Demonstrationsanlage in Frankreich. © Sun'Agri	43		
Abb. 45 Spinnanker mit Ankerplatte und Gewindestäben fundamentieren das Montagesystem im Boden. © Spinnanker	44		
Abb. 46 Illustration verschiedener Anlagentypen mit Ost-West-, Süd- und Süd-Ost-Ausrichtung. © Fraunhofer ISE	44		
Abb. 47 Die Schattenstreifen der Solarmodule wandern mit dem Sonnenstand. © Universität Hohenheim	45		
Abb. 48 Konzept einer Regenauffangvorrichtung mit Speichertank. © Fraunhofer ISE	46		
Abb. 49 Agri-PV-Anlage in Heggelbach mit einer Leistung von 194 kW _p . © Fraunhofer	46		
Abb. 50 Solarpark Eppelborn-Dirmingen mit 2 MW _p mit vertikalen Solarzäunen von Next2Sun. © Next2Sun GmbH	46		

9.3 Tabellenverzeichnis

Tab. 01	Überblick über Kategorien und Nutzungsformen der DIN SPEC 91434.	14
Tab. 02	Überblick über bisherige Forschungsanlagen in Deutschland.	16
Tab. 03	Schaden an Kohlpflanzen. © 2020 B. Ehrmaier, M. Beck, U. Bodmer	17
Tab. 04	Bio Obsthof Nachtwey © Fraunhofer ISE	21
Tab. 05	Konstellationen verschiedener Agri-PV-Geschäftsmodelle (in Anlehnung an ⁴⁾).	39
Tab. 06	Übersicht über Genehmigungsschritte für Agri-PV.	48

9.4 Abkürzungen

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

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=BIXPf-e1aOU>

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://www.ise.fraunhofer.de/de/geschaeftsfelder/photovoltaik/photovoltaische-module-und-kraftwerke/integrierte-pv/agrar-photovoltaik.html>

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

Kontakt

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

Dr. Harry Wirth
Bereichsleiter Photovoltaische
Module und Kraftwerke

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