Fraunhofer ISE

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SOLARE ENERGIESYSTEME ISE

AGRI-PHOTOVOLTAIK: CHANCE FÜR LANDWIRTSCHAFT UND ENERGIEWENDE

OKTOBER 2020

EIN LEITFADEN FÜR DEUTSCHLAND

© BayWa r.e.

IMPRESSUM

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

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

Hinweis:
Der vorliegende Leitfaden informiert über das Potenzial, den aktuellen Technologiestand sowie den Rechtsrahmen der Agri-Photovoltaik und präsentiert praktische Hinweise zur 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.

1. Auflage Oktober 2020

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 Definition und Potenzial der Agri-Photovoltaik 9
2.3 Forschungsstandorte in Deutschland 10
2.4 Forschungsanlage Heggelbach: Hintergründe und Ergebnisse 12
2.5 Internationale Entwicklung 14

3. Landwirtschaft 17
3.1 Forschungsergebnisse APV-RESOLA 18
3.2 Bewirtschaftung und Kulturauswahl 18
3.3 Wirtschaftlichkeit und Geschäftsmodelle 22
3.4 Landwirte berichten 26

4. Technik 28
4.1 Ansätze für Agri-PV 28
4.2 Modultechnologien 30
4.3 Unterkonstruktion und Fundament 30
4.4 Lichtmanagement 32
4.5 Wassermanagement 33
4.6 Größe der Photovoltaikanlage 33
4.7 Genehmigung, Installation und Betrieb 34

5. Gesellschaft 36
5.1 Einbindung von Bürgerinnen und Bürgern sowie Interessensgruppen 37
5.2 Ansätze und Methoden zur Einbindung 37
5.3 Erfolgsfaktoren 38

6. Politik und Recht 40
6.1 Gesetzliche Rahmenbedingungen 40
6.2 Politische Handlungsempfehlungen 44

7. Agri-Photovoltaik voranbringen 46

8. Literatur und Quellen 48

VORWORT

Ministerin Anja Karliczek
Bundesministerin für Bildung und Forschung
Foto: © BMBF/Laurence Chaperon

Ministerin Julia Klöckner
Bundesministerin für Ernährung und Landwirtschaft
Foto: © CDU Rheinland-Pfalz

Liebe Leserinnen und Leser,

der Klimawandel macht sich überall auf der Welt bemerkbar – besonders auch die Landwirtschaft spürt seine Auswirkungen unmittelbar. Wir müssen deshalb jetzt aktiv werden, die Chancen der Forschung nutzen und Klimaschutzmaßnahmen so ausgestalten, dass Ernährungssicherung und nachhaltige Energieversorgung Hand in Hand gehen.

Nicht nur Deutschland soll bis zum Jahr 2050 klimaneutral werden. Mit dem europäischen Klimagesetz, das unter der deutschen Ratspräsidentschaft erarbeitet wird, wollen wir uns erstmalig in der Europäischen Union diesem ambitionierten Ziel gemeinsam verpflichten. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen wir die erneuerbaren Energien weiter ausbauen. Damit einher geht auch die Frage des Flächenbedarfs und der effizienten Flächennutzung.

Als Bundesministerinnen für Bildung und Forschung und für Ernährung und Landwirtschaft unterstützen wir im engen Schulterschluss die wissenschaftliche Untersuchung und die praktische Erprobung von Lösungsansätzen, welche die Nutzungskonkurrenz zwischen landwirtschaftlicher Nahrungs- und Futtermittelproduktion und erneuerbarer Stromerzeugung austarieren. Mit steigenden Anteilen erneuerbaren Stroms und damit erhöhtem Flächenbedarf wird diese Aufgabe immer schwieriger.

Ein vielversprechendes Konzept zur Kombination beider Nutzungsformen ist die Agri-Photovoltaik (APV). Diese intelligente Doppelnutzung der Fläche für Landwirtschaft und Solarstromerzeugung hat das Potenzial, der Verknappung von Nutzflächen entgegenzuwirken und zur nachhaltigen Entwicklung ländlicher Räume beizutragen. Landwirte erhalten die Möglichkeit, neue Einkommensquellen zu erschließen, ohne dabei die Produktivität ihrer Flächen zu verlieren.

Darüber hinaus könnte diese Technologie die Resilienz des landwirtschaftlichen Betriebs bezüglich klimatischer Veränderungen erhöhen. Denn die APV-Module bieten Schutz vor zu hoher Sonneneinstrahlung, Hitze, Trockenheit und Hagel. Das kann für sehr heiße und trockene Sommer überdurchschnittliche Ernteerträge, zusätzlich zum Ertrag aus der Solarstromproduktion, bedeuten. Ein klarer-Win-Win-Effekt wäre das Ergebnis.

Eine aktuelle Studie konnte im Rahmen des Forschungsprojektes APV-RESOLA genau diesen Effekt für den Hitzesommer 2018 nachweisen. Darüber hinaus verdeutlichen die Ergebnisse auch für weniger extreme Sommer, dass Einnahmen aus der Stromerzeugung mögliche, geringfügige Ertragseinbußen überkompensieren. Somit wäre die Praxistauglichkeit der APV-Pilotanlage gegeben.

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) unterstützen bereits zwei weitere Forschungsprojekte zur Agri-Photovoltaik. So erhöhen wir die Zahl der im Feld getesteten Anwendungsfälle und können die Anlagentechnik weiter optimieren. Praktische Erfahrungen mit der Agri-Photovoltaik und ihr Einsatz in Verbindung mit unterschiedlichen Anbaukulturen und Bewirtschaftungsformen sind essentiell. Nur so können noch offene Fragen beantwortet und darauf basierend zukünftige Weichen gestellt werden.

Der vorliegende Leitfaden informiert umfassend über die Agri-Photovoltaik und die bisherigen Ergebnisse und Erfahrungen. Wir begrüßen das Engagement des Fraunhofer ISE, seiner Partner und weiterer Akteure aus dem Bereich APV ausdrücklich und werden uns als BMEL und BMBF auch weiterhin für die Erforschung und Erprobung dieser Technologie einsetzen.

Die Corona-Pandemie hat uns eindrücklich gezeigt, dass vorsorgendes, schnelles und gemeinsames Handeln dazu beiträgt, den vor uns stehenden Herausforderungen gezielter zu begegnen.

Eile ist auch hier geboten, denn die Klimaveränderungen schreiten voran. Ihre Auswirkungen sind deutlich spürbar. Immer anspruchsvoller wird es, die richtigen Maßnahmen zu ergreifen, um unsere energie- und klimapolitischen Ziele – denen auch die Landwirtschaft verpflichtet ist – zu erreichen. Wir sind überzeugt, dass dies nur mit einer Vielzahl von Instrumenten gelingen kann. Die Agri-Photovoltaik könnte eines davon sein.

1. RESSOURCENEFFIZIENTE LANDNUTZUNG MIT AGRI-PHOTOVOLTAIK

Die Landwirtschaft in Deutschland steht vor der Herausforderung, dass Ackerflächen zunehmend rar werden. Ein Grund ist die stärkere Bebauung durch neue Siedlungen und Straßen. Aber auch die Energiewende benötigt weitere Flächen zur Erzeugung von Solarstrom. Eine Folge des Flächenverbrauchs sind steigende Pachtpreise für Ackerland. Künftig könnte die Agri-Photovoltaik, kurz Agri-PV, die Flächenkonkurrenz durch eine doppelte Nutzung der Flächen entschärfen. Die Technologie der Agri-PV erzeugt erneuerbaren Strom, ohne dass dabei fruchtbarer Ackerboden als Ressource für die Nahrungsmittelproduktion verloren geht.

Der Klimawandel stellt 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 vielerorts unter Druck. Die Handlungsspielräume zwischen dem Arten- und Gewässerschutz einerseits, und der Steigerung beziehungsweise Stabilisierung der Ernteerträge andererseits sind daher eng.

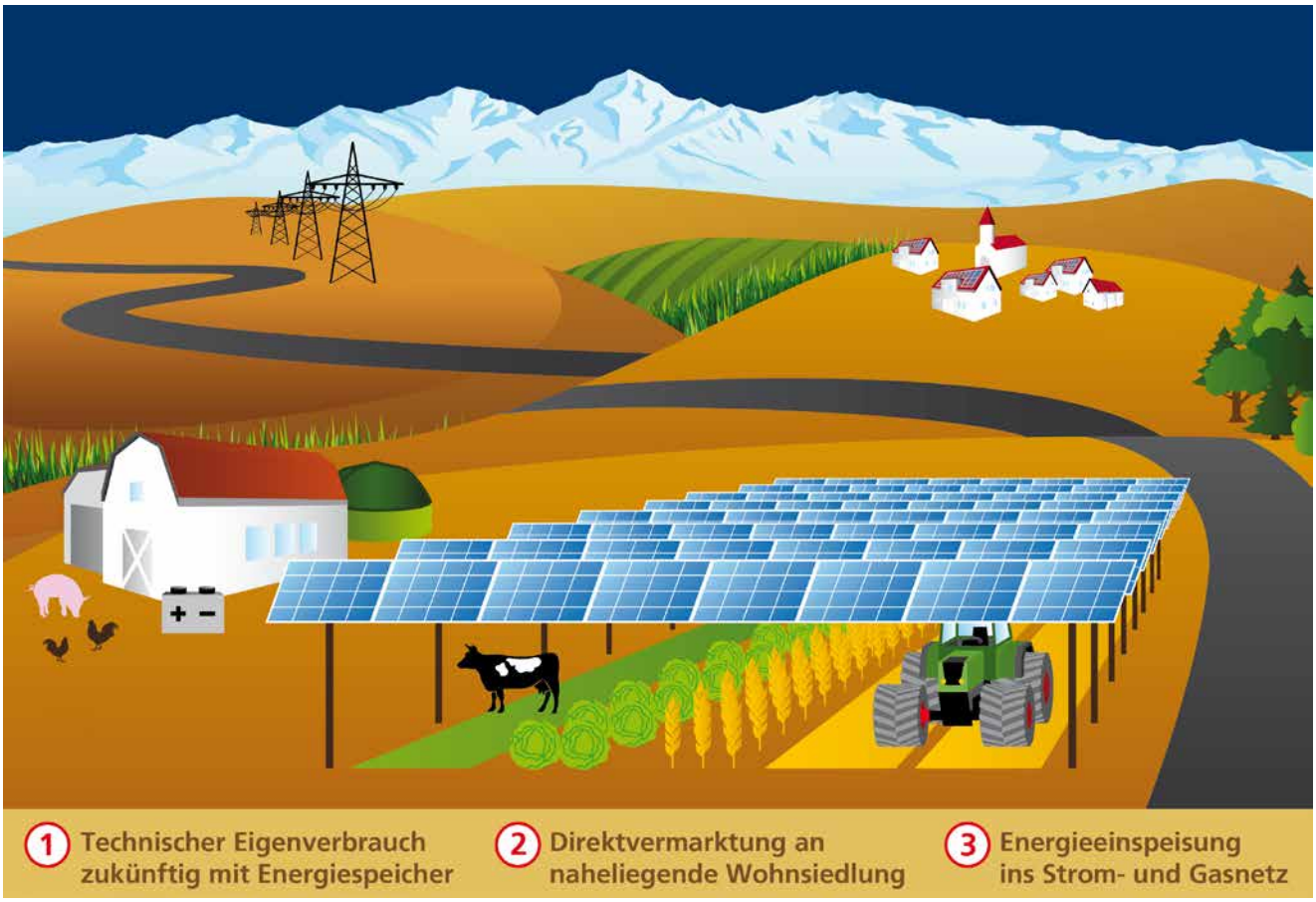


Bild 1: Illustration eines Agri-PV-Systems. © Fraunhofer ISE

Ein weiteres Problem ist die immer knapper werdende Ressource Land – sowohl in Deutschland als auch global. Neben Siedlungs- und Gewerbeflächen sowie Straßen nimmt auch die Energiewende landwirtschaftliche Flächen in Anspruch. Die Landnutzungskonkurrenz führt zu steigenden Pachtpreisen in der Landwirtschaft. Besonders betroffen sind Regionen, die aufgrund fruchtbarer Böden und eines milden Klimas landwirtschaftlich attraktiv sind und wegen hoher Sonneneinstrahlung als Standort für Photovoltaik-Freiflächenanlagen (PV-FFA) in Frage kommen. 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 rückt der Landwirtschaftssektor als einer der großen Emittenten von Treibhausgasen, insbesondere der klimawirksamen Gase Methan und Lachgas, immer stärker in den Fokus. Unter Berücksichtigung der Beschlüsse der Klimakonferenz in Paris im Jahr 2015 und der von der Bundesregierung aufgestellten Klimaziele stellt sich daher die Frage, wie diese Herausforderungen angegangen werden können.

Den Acker doppelt nutzen

Ein möglicher Lösungsansatz könnte in einer doppelten Nutzung landwirtschaftlicher Böden liegen: Agri-PV bietet die Möglichkeit, große Photovoltaik-Flächen im Freiland umzusetzen und gleichzeitig Ackerboden für die Nahrungsmittelproduktion zu erhalten. Das ist nötig, denn die Solarenergie wird 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 Photovoltaik-Kapazität bis zum Jahr 2050 um den Faktor acht bis zehn erhöht werden [1]. Gleichzeitig kann eine effiziente Integration der Photovoltaik (PV) Pflanzen und Böden vor negativen Umwelteinflüssen schützen und einen Beitrag zu Klimaschutz und Klimaanpassung liefern.

Prof. Dr. Adolf Goetzberger, Gründer des Fraunhofer ISE, und Dr. Armin Zastrow wiesen bereits 1981 auf diese Form der doppelten Landnutzung als Erste in der Zeitschrift Sonnenenergie hin (»Kartoffeln unter dem Kollektor«) [2]. Die Innovationsgruppe APV-RESOLA (»Agrophotovoltaik: Beitrag zur ressourceneffizienten Landnutzung«) hat das Konzept aus den 1980er Jahren 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«. Bis 2020 wurde die Technologie der Agri-PV in diesem Vorhaben unter Realbedingungen an einer Pilotanlage hinsichtlich wirtschaftlicher, technischer, gesellschaftlicher und ökologischer Aspekte wissenschaftlich untersucht.

Am Projekt beteiligt waren das Fraunhofer ISE (Leitung und Koordination), die Universität Hohenheim, das Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) [3] des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), die BayWa r.e. Solar Projects GmbH, der Regionalverband Bodensee-Oberschwaben, die Elektrizitätswerke Schönau und die Hofgemeinschaft Heggelbach. Ziel des Projekts war, die Agri-PV in ihren Grundzügen zu erforschen und die grundsätzliche Machbarkeit der Technologie zu demonstrieren.

Bild 2: Projektpartner von APV-RESOLA.

Mit der Installation der Pilotanlage in Heggelbach im Jahr 2016 untersuchten die Projektpartner des Verbundprojekts in der Bodenseeregion die Kombination von Solarstromerzeugung und Landwirtschaft auf derselben Fläche. In fünf Metern Durchfahrtshöhe befinden sich 720 bifaziale Photovoltaikmodule mit einer installierten Leistung von 194 KW auf einer ein Drittel Hektar großen Ackerfläche. Dabei konnten in den Jahren 2017 und 2018 Steigerungen der Landnutzungseffizienz zwischen 60 und 84 Prozent sowie eine verbesserte Anpassungsfähigkeit bei Trockenperioden nachgewiesen werden. Aktuell wird die Anlage zu weiteren Forschungszwecken genutzt.

Ziel dieses Leitfadens

Dieser Leitfaden stellt die wichtigsten Forschungsergebnisse des Projekts APV-RESOLA vor. 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 Landwirte, Kommunen und Unternehmen.

Bild 3: Agri-PV-Forschungsanlage des Fraunhofer ISE am Bodensee.
© Fraunhofer ISE

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

Historischer Abriss

Die Technologie der Agri-PV hat sich in den letzten Jahren sehr dynamisch entwickelt und ist in fast allen Regionen der Welt verbreitet. Die installierte Leistung stieg exponentiell von rund 5 MW im Jahr 2012 auf mindestens 2,8 GW im Jahr 2020. Möglich wurde dies mit staatlichen Förderprogrammen in Japan (seit 2013), China (ca. 2014), Frankreich (seit 2017), den USA (seit 2018) und zuletzt Korea [4].

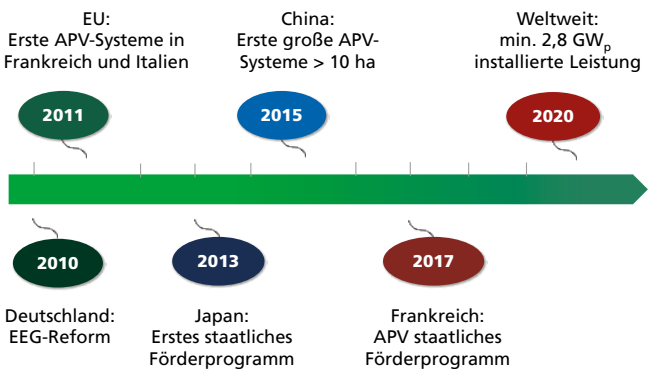


Bild 4: Entwicklung der Agri-PV von 2010 bis heute. © Fraunhofer ISE

Chancen der Agri-PV

Die Technologie der Agri-PV könnte einen aktuell bestehenden Konflikt in dicht besiedelten Ländern entschärfen: Sollen die ohnehin knappen Äcker zur Nahrungsmittel- oder zur Solarstromerzeugung genutzt werden? Die Weltbevölkerung wächst weiter und damit der Bedarf an Nahrungsmitteln. Zugleich werden Flächen für die Erzeugung von Ökostrom benötigt [6], um die Klimakrise zu bewältigen. Die Kombination aus Landwirtschaft und Photovoltaik in Form der Agri-PV-Technologie bietet damit Vorteile für beide Seiten und kann eine adäquate, ressourceneffiziente Lösung für das Problem der Flächenkonkurrenz darstellen.

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 im Projekt APV-RESOLA gezeigt werden. Obst- und Sonderkulturen, die von zunehmenden Hagel-, Frost- und Dürreschäden betroffen sind, können zudem möglicherweise von einer Schutzfunktion durch die Teilüberdachung mit PV-Modulen profitieren [7].

Weitere Synergiepotenziale zwischen der Photovoltaik und Landwirtschaft in einem Agri-PV-System bestehen u. a. durch:

- die Reduktion des Bewässerungsbedarfs um bis zu 20 % [8]
- die Möglichkeiten der Regenwassersammlung für Bewässerungszwecke

AGRI-PHOTOVOLTAIK AUF EINEN BLICK

- Installierte Leistung weltweit mindestens 2,8 GW
- Geschätztes technisches Potenzial in Deutschland: Rund 1700 GW installierte Leistung (GW_p)

VORTEILE

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

HERAUSFORDERUNGEN

- 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
- Einspeisevergütung nach EEG für kleine Agri-PV-Anlagen (< 750 kW_p) erreichen (kriteriengestützt)
- EEG Innovationsausschreibungen für große Agri-PV-Anlagen (> 750 kW_p) erreichen (kriteriengestützt)
- Privilegierung BauGB: Agri-PV-Anlagen aufgrund ihrer Flächenneutralität und ihrem typischen Einsatz im Außenbereich 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 und Bürgerinnen und Bürgern zur Analyse der nicht-technischen Erfolgsfaktoren für die Errichtung einer Agri-PV-Anlage und Identifizierung geeigneter Standorte

- eine mögliche Verminderung der Winderosion
- die Nutzung der PV-Unterkonstruktion für Schutznetze oder -folien
- die Optimierung der Lichtverfügbarkeit für Ackerkulturen z. B. durch nachgeführte PV-Systeme
- eine höhere Effizienz der Module durch bessere konvektive Kühlung
- eine höhere Effizienz bei bifazialen Modulen 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. Solarstrom, der direkt vor Ort genutzt wird, senkt die Stromkosten, da sich dadurch der Bezug von teurem Netzstrom reduziert. Für Landwirtschaftsbetriebe entsteht so die Chance für ein weiteres wirtschaftliches Standbein.

Herausforderungen: Hemmnisse in der Umsetzung

Während die technische und ökonomische Machbarkeit der Agri-PV-Technologie in vielen Ländern nachgewiesen wurde, ist die wohl größte Hürde zur Nutzung des Potenzials der Agri-PV der aktuelle Regelrahmen. So ist beispielsweise in Deutschland entsprechend der aktuellen Gesetzgebung keine duale Flächennutzung von Photovoltaik und Landwirtschaft vorgesehen – und das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) bietet keine adäquate Vergütung. Nähere Informationen zum Rechtsrahmen in Deutschland finden sich in Kap. 6.1.

Die gesellschaftliche Akzeptanz stellt für die Nutzung von Agri-PV-Systemen in manchen Regionen sicherlich eine weitere Herausforderung dar. Die frühzeitige Einbeziehung der Interessensgruppen sowie der Bürgerinnen und Bürger der Kommunen, auf deren Gemarkung die geplante Agri-PV-Anlage errichtet werden soll, gehören damit zu wichtigen Aktionsfeldern dieses Leitfadens und werden in Kap. 5 vorgestellt.

Um verlässlichere Aussagen über die vielfältigen Ansätze der Agri-PV, mögliche Synergieeffekte und Akzeptanzfragen treffen zu können, ist die Umsetzung sowohl von ersten größeren Pilotanlagen als auch von weiteren Forschungsprojekten nötig. Nur so können die ökologischen und ökonomischen Chancen und Risiken sowie die nicht-technischen, gesellschaftlichen Erfolgsfaktoren näher untersucht und gleichzeitig die Investitionsbereitschaft und Kreativität von Akteurinnen und Akteuren, Bürgerinnen und Bürgern sowie Wirtschaftsunternehmen zur Entwicklung von Lösungsansätzen gefördert werden. Eine Handreichung zu möglichen politischen Handlungsfeldern ist in Kap. 6.2 dargestellt.

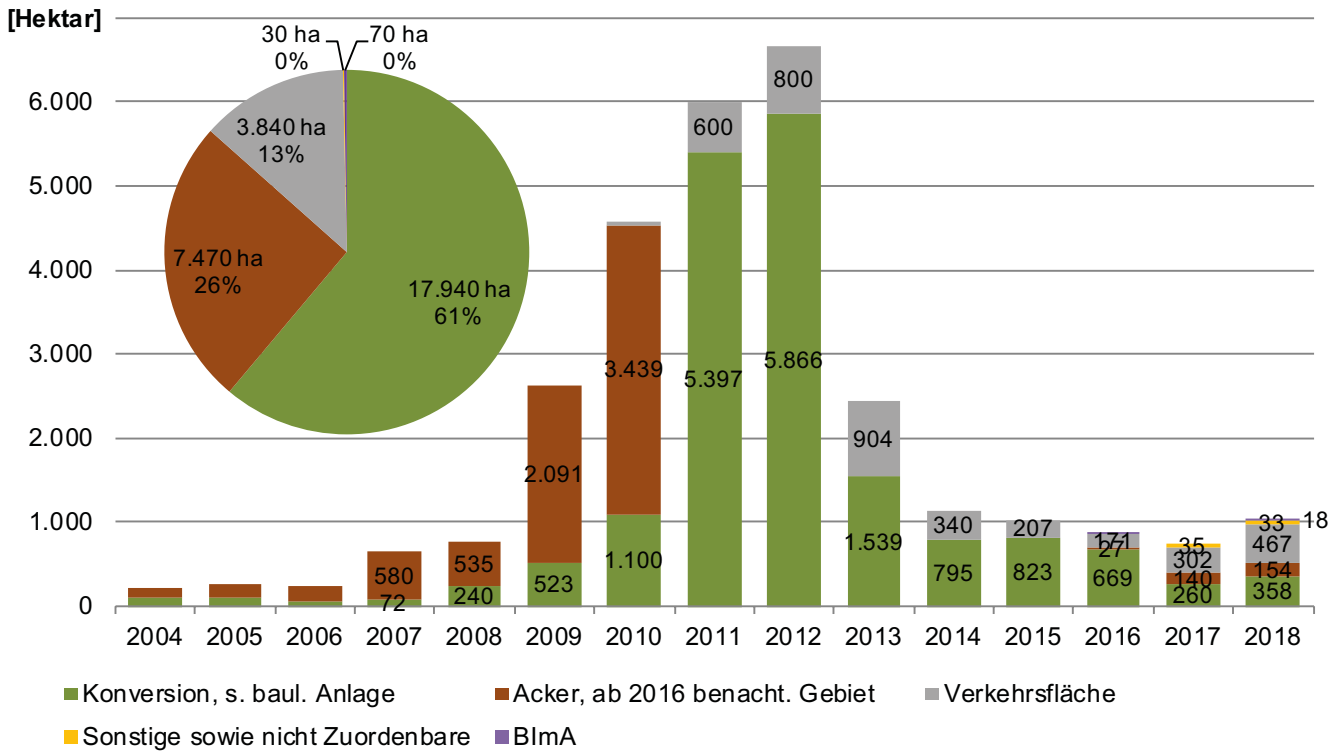


Bild 5: Flächeninanspruchnahme von PV-FFA seit 2004 in Deutschland, Gesamtanlagenbestand und jährlicher Zubau. [5] *© BMWi*

2. DATEN UND FAKTEN ZUR AGRI-PHOTOVOLTAIK

Um die Klimaziele in Deutschland zu erreichen, müssen erneuerbare Energien stark ausgebaut werden. Die günstigste Technologie unter den Erneuerbaren ist inzwischen die Photovoltaik. Solarstrom genießt außerdem eine hohe Akzeptanz in der Bevölkerung. Im Vergleich zur Windenergie oder fossilen Energiequellen ist die PV jedoch auf relativ große Flächen angewiesen. Daher gibt es besonders bei großen PV-Anlagen immer wieder Schwierigkeiten, ausreichende Flächen zu finden. Eine Lösung ist die Integration der PV in unterschiedliche Bereiche der Umwelt des Menschen – ob in die Hülle von Gebäuden, auf Seen oder Verkehrswegen. So können Flächen doppelt genutzt werden. Im Fall der Agri-PV reduziert dies den Landverbrauch. Statt miteinander in Konkurrenz zu stehen, können sich Photovoltaik und Photosynthese sehr gut ergänzen. Die Nutzungskonkurrenz »Tank oder Teller«, der gerade in dicht besiedelten Regionen mit begrenzten Flächen besteht, würde so entschärft.

PV und Windkraft gelten als wichtigste Säulen der zukünftigen Energieversorgung. In Deutschland ist die Einspeisevergütung für Solarstrom nach dem EEG seit dem Jahr 2000 stetig gesunken. Die Preise für PV-Module sind in der Folge immer günstiger geworden, von 2009 bis 2019 um rund 90 Prozent. Neue Photovoltaik-Kraftwerke haben sich inzwischen zu einer der günstigsten Stromquellen in Deutschland entwickelt. Je nach Größe der Anlage liegen die Stromgestehungskosten aktuell zwischen rund vier und neun Cent pro kWh.

Mitte 2020 waren in Deutschland rund 52 GW PV installiert, davon rund 75 Prozent auf Dächern, der Rest in Freiflächenanlagen [9]. Es ist jedoch deutlich mehr nötig. Berechnungen des Fraunhofer ISE gehen von 500 GW installierter Leistung bis 2050 aus. Die Integration der PV-Technologie in Gebäude, Fahrzeuge und Fahrwege und ihre Einbindung in Agri- und

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

Wasserflächen sowie an Plätzen des öffentlichen Lebens im urbanen Raum könnten künftig riesige Ertragsflächen mit einem hohen Potenzial erschließen.

Welcher Teil des technischen Potenzials wirtschaftlich und praktisch nutzbar ist, hängt von komplexen ökonomischen, regulativen und technischen Randbedingungen ab. Hinzu kommen Fragen der Akzeptanz. Grundsätzlich sind für integrierte PV höhere Stromgestehungskosten zu erwarten als bei einfachen, großen Freiflächen-Kraftwerken. Dafür vermeidet integrierte PV Nutzungskonkurrenz und kann Synergien schaffen, indem sie beispielsweise eine Gebäudefassade ersetzt, die Unterkonstruktion einer Lärmschutzwand nutzt, die Reichweite von E-Fahrzeugen erhöht oder landwirtschaftliche Flächen doppelt nutzt. 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 Photovoltaik-Freiflächenanlagen 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 bereits außerhalb von Ausschreibungen nach dem EEG errichtet. Damit entfällt die Lenkungswirkung des EEG zum Schutz hochwertiger Ackerböden.

In Anbetracht der eingeschränkten Verfügbarkeit fruchtbarer Böden ist es möglich, dass die steigende Flächennachfrage zu neuen Dimensionen der Flächennutzungskonkurrenz und ökonomischen, ökologischen, politischen und gesellschaftlichen Konfliktkonstellationen 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 unter dem Aspekt Deutschland zum Vorreiter bei der Lösung dieser globalen Herausforderungen zu machen (Hightech-Strategie 2025).

Bild 7: Freiflächen-PV-Anlage. © Fraunhofer ISE

2.2 Definition und Potenzial der Agri-Photovoltaik

Agri-PV bezeichnet eine Technologie zur gleichzeitigen Nutzung von Flächen für die Landwirtschaft und die Stromerzeugung mit Photovoltaik [10]. So kann eine Fläche gleichzeitig sowohl der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion (Photosynthese) als auch der Solarstromerzeugung (Photovoltaik) dienen. Teilweise werden auch Tierunterstände mit PV-Modulen zur Agri-PV gezählt, dort fehlen jedoch differenzierende Merkmale zum gewöhnlichen PV-Dach.

Ähnlich wie im Fall von PV-Freiflächenanlagen kann eine Agri-PV-Anlage sowohl mit einer starren Unterkonstruktion, als auch mit 1- oder 2-achsig beweglichen Konstruktionen (sogenannte Tracker) realisiert werden. Bewegliche Systeme ermöglichen ein flexibleres Lichtmanagement durch das Ausrichten der Module. Das Fraunhofer ISE erarbeitet derzeit zusammen mit Partnern aus Wissenschaft und Praxis und dem Deutschen Institut für Normung eine einheitliche Definition des Begriffs.

Die technischen Ansätze zur Integration von PV in die Landwirtschaft sind so vielfältig wie die Landwirtschaft selbst. Eine grobe Einteilung kann in die Kategorien »Kultur«, »Grünland« und »Gewächshäuser« vorgenommen werden. Agri-PV mit Kulturpflanzen wie Dauerkulturen oder einjährigen und überjährigen Kulturen verlangt typischerweise spezialisierte, an die Bewirtschaftung angepasste Aufständerungssysteme für die PV-Module, während bei Agri-PV auf Grünland zumeist gewöhnliche oder nur gering angepasste Unterkonstruktionen für PV-FFA zum Einsatz kommen. Dieser Leitfaden betrachtet im Wesentlichen die Kategorie »Kultur«(Kategorie I), also Anwendungen mit Sonderkulturen wie Gemüse-, Obst- und Weinbau oder Ackerbau (Tabelle 1). In geringerem Umfang wird auch auf Anwendungen im Dauergrünland eingegangen (Kategorie II). Geschlossene Systeme wie Gewächshäuser bleiben unberücksichtigt (Kategorie III).

Innerhalb der Kategorie I wird an einigen Stellen des Leitfadens nochmal in Ackerbau und Dauer- bzw. Sonderkulturen unterschieden. Zwar sind die Anwendungen auch innerhalb dieser Unterkategorien immer noch sehr divers, doch sollen

Tabelle 1: Verschiedene Kategorien der Agri-PV und ihre Anwendungen.

#	Kategorien in Agri-PV	Beispiele
I	**»Kultur«** Einjährige, Überjährige und Dauerkulturen	Obstbau, Beerenobstbau, Weinbau, Ackerbau, Gemüsebau, Feldfutterbau
II	**»Grünland«** Dauergrünland	Weide- und Wiesennutzung
II	**»Gewächshaus«** Pflanzenanbau in geschlossenen Systemen	Gewächshaus, Folientunnel

damit die wichtigsten Unterschiede zwischen den Kulturen in vereinfachter Weise aufgezeigt werden. Nähere Informationen zu den verschiedenen technischen Ansätzen der Kategorien I und II sind in Kapitel 4.1 zu finden.

Das Potenzial ist hoch

Unter allen integrierten PV-Ansätzen birgt die Technologie der Agri-PV das größte Potenzial. Nur rund vier Prozent der deutschen Ackerflächen würden ausreichen, um bilanziell den gesamten, aktuellen Strombedarf (Endenergie) in Deutschland zu decken (rund 500 GW_p installierte Leistung). In einer ersten Abschätzung des Fraunhofer ISE zum technischen Potenzial für die Agri-PV beträgt dieses allein in Deutschland rund 1700 GW_p. Dabei wurden vorwiegend schattentolerante Kulturen in Kategorie I berücksichtigt. Würden von diesen 1700 GW_p nur zehn Prozent genutzt werden, entspräche dies bereits mehr als einer Verdreifachung der aktuellen PV-Kapazität in Deutschland. Aus energetischer Sicht ist diese Doppelnutzung der Ackerfläche deutlich effizienter als der reine Anbau von Energiepflanzen, der in Deutschland immerhin 14 Prozent der landwirtschaftlichen Flächen einnimmt (Abb. 8).

2.3 Forschungsstandorte in Deutschland

In Deutschland wurden bereits drei Agri-PV-Anlagen zu Forschungszwecken in Betrieb genommen. Erste Vorversuche erfolgten 2011 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 u. a. Salat. Es stellte sich heraus, dass die unterschiedliche Beschattung und auch die unterschiedliche Bodenfeuchte in den stärker bzw. schwächer beschatteten Bereichen direkt unter bzw. nördlich der Dummy-Modulreihe bei den Pflanzen erhebliche, für die Praxis ungeeignete Wachstumsunterschiede hervorrief.

Um u. a. diese Probleme einer zu starken Verschattung auf Teilflächen unter einer Agri-PV-Anlage zu vermeiden, entstand 2013 die reale Agri-PV-Anlage (Abb. 9) mit Ost-West-nachgeführten Modulreihen.

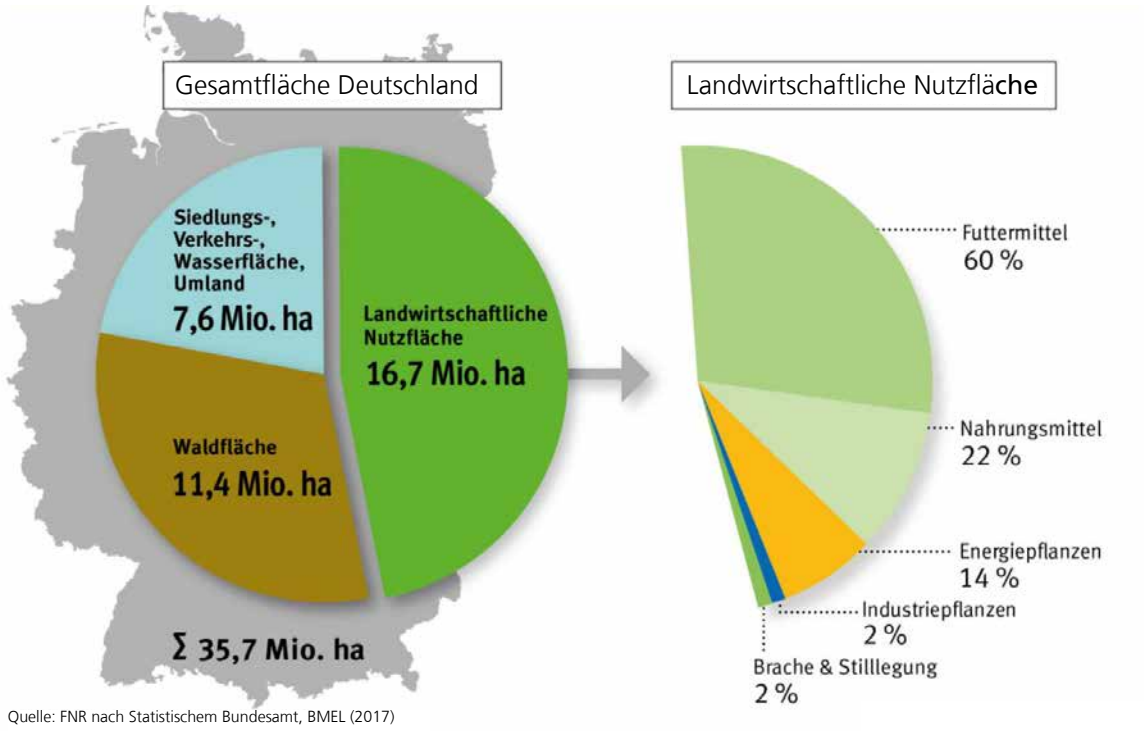


Bild 8: Flächennutzung in Deutschland. © Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. [11]

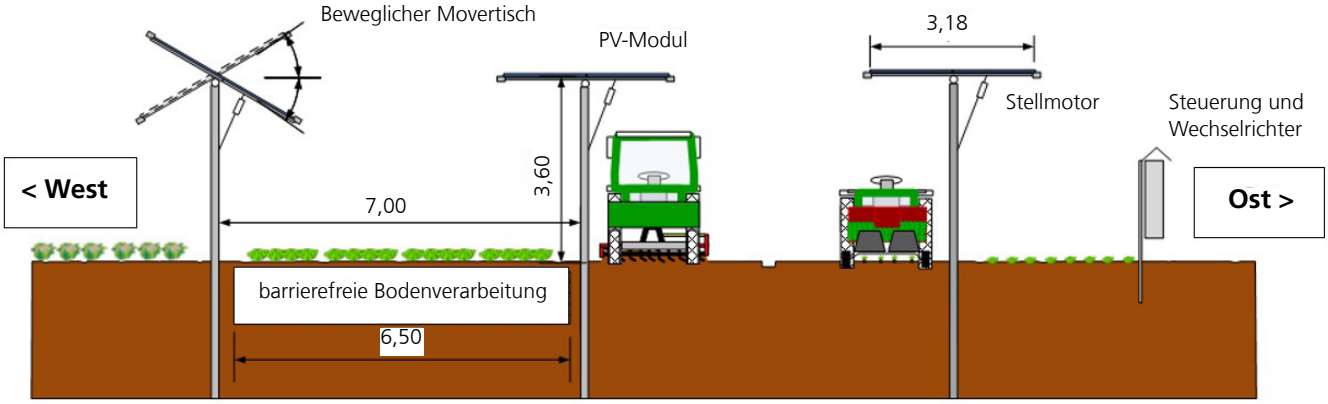


Bild 9: Querschnitt der Agri-PV-Anlage in Weihenstephan. © 2020 B. Ehrmaier, M. Beck, U. Bodmer

Technische Daten der Anlage:

Grundfläche: 21 x 23 m = 483 m²
Movertische: 3 Stück à 3,2 x 21 m à 30 Module à 1,6 m²
Nachführung: Ost-West, kalendergesteuert
Solarmodule: CSG 245 W_p; 200 W_p/m²
(Mittelwert; 245 W_p x 90 = 22 kW_p; 45 W_p/m²)
Produktion/a: rund 35.000 kWh
Nutzung: Eigenverbrauch, keine Förderung

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 zu Chinakohl wiesen auf Ertragsrückgänge zwischen 29 und 50 Prozent hin. Die Ergebnisse sind abhängig von verschiedenen Verschattungsgraden in nachfolgender Tabelle dargestellt:

Ursachen für die Mindererträge der Pflanzen unter Agri-PV sind Bodenverdichtungen, die bei der Errichtung der Anlage entstanden sind, sowie Beschädigungen von Pflanzen unter der Abtropfkante der Module (Abb. 10). Die Anbringung von Regenrinnen an den Abtropfkanten der Module bei der Anlage verursachte vor allem im Winter neue Probleme, so dass alternativ die Auswirkungen horizontal angeordneter, fest aufgeständerter tubularer PV-Module auf den Pflanzenertrag untersucht wurden. In einem Versuch mit Salat (Lollo Rosso) beispielsweise lag der Ertrag unter PV-Röhren bei weniger als 15 Prozent unter dem Ertrag 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. Allerdings muss zur vollständigen Bewertung eine Betrachtung der Stromgestehungskosten (engl. Levelized Cost of Electricity, LCOE) unter Berücksichtigung der Deckungsbeiträge aus der Pflanzenproduktion (als »Koppelprodukte« bezeichnet) erfolgen.

Bild 10: Schaden an Kohlpflanzen.
© 2020 B. Ehrmaier, M. Beck, U. Bodmer

Tabelle 2: Beispiel für den Pflanzenertrag unter SPV und im Freiland. © 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 Rund 50% des Ertrags außerhalb der Agri-PV-Anlage	1559 g Rund 56% des Ertrags außerhalb der Agri-PV-Anlage	1970 g Rund 71% des Ertrags außerhalb der Agri-PV-Anlage	2762 g

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.

Die dritte Forschungsanlage zu Agri-PV wurde in Deutschland 2016 in Heggelbach am Bodensee im Rahmen des Projekts APV-RESOLA errichtet (Kapitel 2.4).

In der Nähe von Dresden untersuchte ein Team unter der Leitung von Prof. Dr. Ulrike Feistel die Auswirkungen einer Agri-PV-Anlage mit Spinat, Bohnen, Erbsen, Mangold und Radieschen auf den Wasserhaushalt des Bodens.

Am Fraunhofer IMW startete 2020 das Projekt BiWiBi, in dem nachhaltige Synergien aus senkrechten, bifazialen Solaranlagen mit Blühstreifen zum Artenschutz und gleichzeitigem Ackerbau auf ökonomische, ökologische und Akzeptanzfragen untersucht werden [12].

Neben den Forschungsanlagen existieren in Deutschland auch private Agri-PV-Anlagen. Unter anderem baut Elektro Guggenmos schon seit 2008 unter Agri-PV in Warmsried (Bayern) Kartoffeln, Weizen und Lauch an.

2.4 Forschungsanlage Heggelbach: Hintergründe und Ergebnisse

Als Standort der Forschungsanlage wurde ein Demeterhof in Heggelbach in der Region Bodensee-Oberschwaben ausgewählt. Die Hofgemeinschaft Heggelbach GbR bewirtschaftet seit mehr als 30 Jahren den mittlerweile 165 Hektar großen landwirtschaftlichen Gemischtbetrieb biologisch-dynamisch. Zu den Demeter-Grundprinzipien gehört, den Betrieb als Ganzes, als Organismus zu betrachten. Seit 2003 beschäftigt sich die Hofgemeinschaft intensiv mit dem Thema Energie. Neben verschiedenen PV-Anlagen, darunter eine Eigenverbrauchsanlage, betreibt sie eine der ersten Holzgasanlagen der Firma Spanner. Mit ihr wird aus Holzhackschnitzeln Wärmeenergie zum Heizen der Gebäude gewonnen und als Nebenprodukt elektrische Energie in das Netz eingespeist. Als Anerkennung für das innovative Energiekonzept erhielt die Hofgemeinschaft 2009 den deutschen Solarpreis.

INFO

- Weitere Informationen zum Forschungsprojekt APV-RESOLA finden sich auch auf der Webseite www.agri-pv.org, über die Sie sich für den Agri-PV-Newsletter anmelden können.

2.4.1 Hintergrundinformationen zum Standort

Der Bodenseekreis, einer der drei Kreise dieser Region, zeichnet sich durch einen weit unterdurchschnittlichen Anteil an erneuerbaren Energien (EE) aus und steht der Herausforderung gegenüber, den anvisierten Anteil an EE von zehn Prozent (Stand: 2013) auf 26 Prozent im Jahr 2022 zu steigern. Die PV soll hierbei mit 15 Prozent den größten Anteil tragen. Allein über Dachanlagen ist das jedoch nicht erreichbar [6]. Acker- und Konversionsflächen stehen im Bodenseekreis nur sehr eingeschränkt zur Verfügung. Neue Lösungsansätze sind daher notwendig. Die Technologie der Agri-PV könnte eine wichtige Komponente sein, vor allem wenn, wie im Projekt APV-RESOLA, Bürgerinnen und Bürger frühzeitig in Entscheidungsprozesse eingebunden werden. Das Potenzial für die Alternative Windkraftanlagen ist in der Region sehr begrenzt. Aktuell decken Windenergieanlagen dort nur ein Prozent des Strombedarfs. Dies ist etwa auf die geringe Akzeptanz vor Ort, bedingt durch das Bestreben, Landschaftsbild und Alpenpanoramablick zu schützen, zurückzuführen. Bis 2022 können Windkraftanlagen in dieser Region maximal sechs Prozent des Strombedarfs decken. Auch der Ausweitung der Biomassenutzung zur Stromerzeugung, deren Beitrag 2022 auf zwei Prozent prognostiziert wird, stehen die geringe Flächeneffizienz (ca. Faktor 40 geringerer Stromertrag pro ha als eine gewöhnliche PV-FFA), die höheren Emissionsfaktoren (ca. Faktor 2-3 mehr CO_2-Äquivalent pro erzeugter kWh aus Biogas bzw. Biomethan) und eine schwindende Akzeptanz der lokalen Bevölkerung entgegen.

Als Testkulturen wurden unter der Agri-PV-Anlage in Heggelbach Winterweizen, Kartoffeln, Sellerie und Kleegras angebaut. Ein größerer Reihenabstand zwischen den bifazialen Glas-Glas-Solarmodulen in über fünf Metern Höhe und die Ausrichtung nach Südwesten stellt sicher, dass die Nutzpflan-

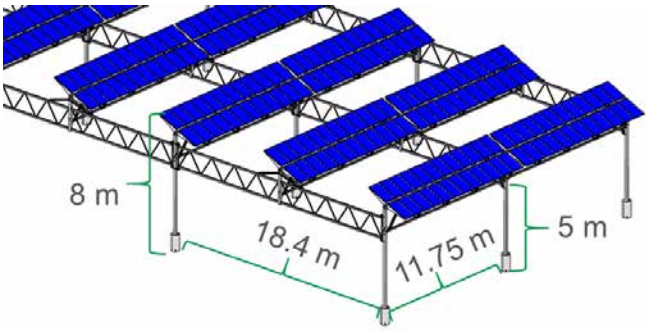


Bild 11: Skizze der Agri-PV-Referenzanlage in Heggelbach.
© Hilber Solar

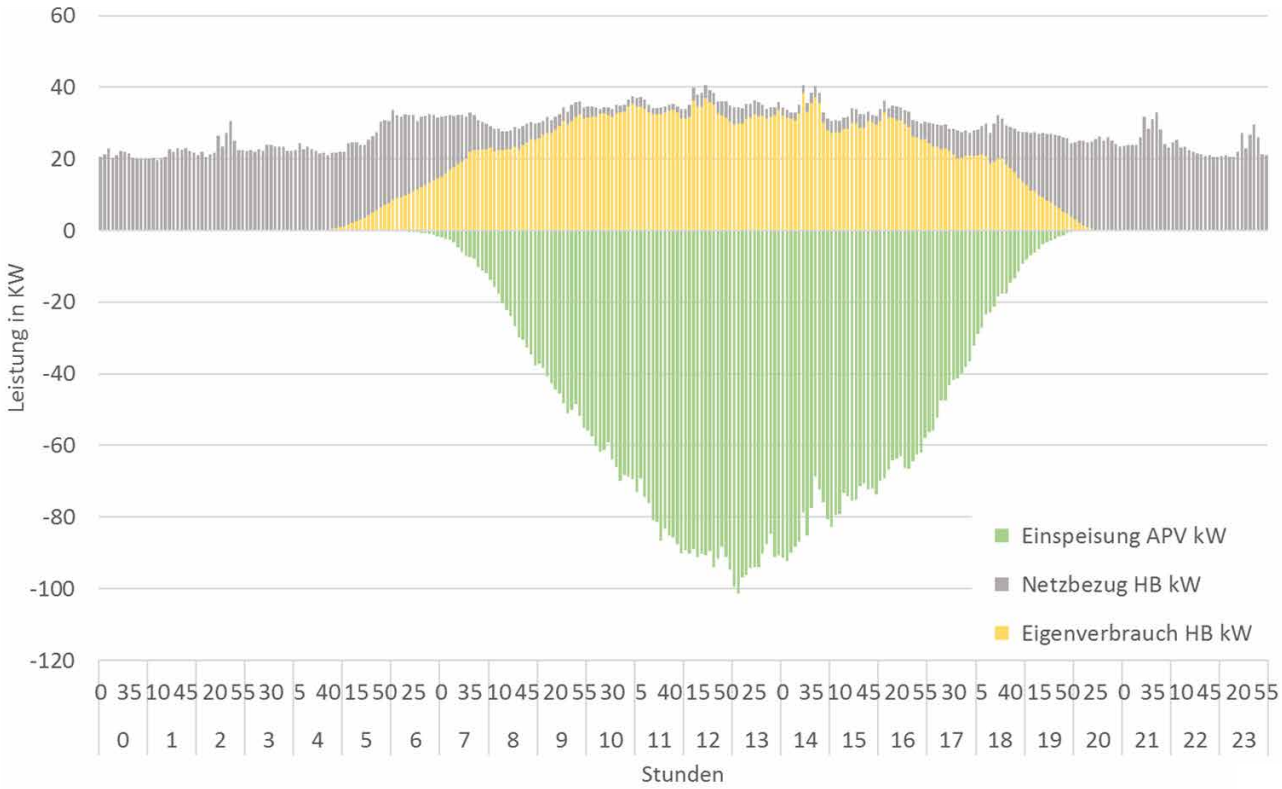


Bild 12: Die Hofgemeinschaft Heggelbach konnte im Sommer 2017 ihren Strombedarf fast vollständig durch den auf der Agri-PV-Anlage erzeugten Strom decken. © BayWa r.e.

zen eine gleichmäßige Verteilung des Sonnenlichts erhalten. Die Durchfahrtshöhe und der Abstand der Aufständerung lässt zudem eine Bewirtschaftung mit großen Landmaschinen wie Mähdreschern ohne größere Einschränkungen zu. 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 unter der von herkömmlichen Freiflächenanlagen. Die Kosten einer solchen Anlage sind bei einer durchschnittlichen Größe von zwei Hektar schon heute mit denen kleiner Solar-Dachanlagen wettbewerbsfähig.

2.4.2 Ergebnisse 2017

Bereits im ersten Projektjahr 2017 konnte eine Steigerung der Landnutzungsrate auf 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 1.266 kWh Strom pro kW_p erzeugt. Dieses Ergebnis liegt ein Drittel über dem deutschlandweiten Durchschnitt von 950 kWh pro kW. Dies ist zum einen auf die relativ hohen Sonneneinstrahlung in der Region, zum anderen auf die Mehrerträge durch die genutzten bifazialen Module zurückzuführen.

Der auf dem Acker 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 für das Betanken des Elektrofahrzeugs sowie die Produktverarbeitung genutzt. Im Sommer deckte die Agri-PV-Anlage fast die gesamte Tageslast. Die Demeter-Landwirte streben an, durch eine Optimierung ihres Verbrauchsverhaltens und den Einsatz eines Stromspeichers mit 150 kWh Kapazität den Grad der Eigennutzung auf 70 Prozent zu steigern. Den überschüssigen Strom nimmt der Projektpartner Elektrizitätswerke Schönau ab.

2.4.3 Ergebnisse im Hitzesommer 2018

Im Hitzesommer 2018 wurde das Ergebnis vom Vorjahr noch deutlich übertroffen. Die Teilverschattung unter den Solarmodulen steigerte die landwirtschaftlichen Ernteerträge, die hohe Sonneneinstrahlung die Solarstromproduktion. Für Kartoffeln ergab sich eine Steigerung der Landnutzungseffizienz um 86 Prozent.

Die Forschungspartner gehen davon aus, dass die Pflanzen den von Trockenheit geprägten Hitzesommer 2018 durch die Verschattung unter den semitransparenten Solarmodulen besser kompensieren konnten. Dieser Befund verdeutlicht das

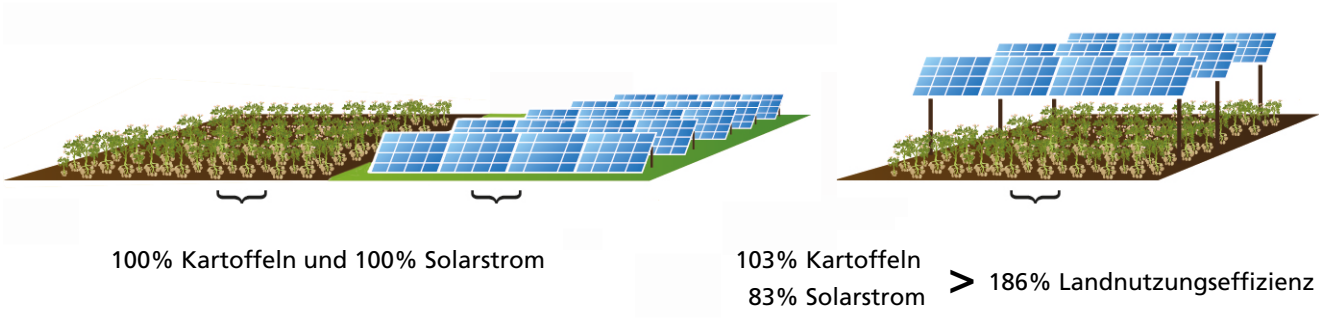


Bild 13: Durch die kombinierte Flächennutzung beträgt die Flächennutzungseffizienz mit Agri-PV auf dem Testgelände in Heggelbach bis zu 186 Prozent. (Illustration Kartoffeln © HappyPictures / shutterstock.com)

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 Vorjahr. Dies steigerte die Solarstromerzeugung im Erntejahr 2018 um zwei Prozent auf 249.857 kWh, was einem außergewöhnlich hohen spezifischen Ertrag von 1.285,3 kWh pro kW_p entsprach.

Die Ergebnisse aus dem Pilotprojekt in Heggelbach deuten auf eine ertragsstabilisierende Wirkung von Agri-PV hin, da Kulturpflanzen insbesondere in Dürreperioden von der zusätzlichen Beschattung profitieren [4].

2.5 Internationale Entwicklung

Gerade in (semi-)ariden Schwellen- und Entwicklungsländern könnte die Technologie der Agri-PV ihren Mehrfachnutzen ausspielen. Neben Schatten für Nutzpflanzen und Tiere (was bereits den Wasserbedarf senkt) liefert sie auch Strom für die Gewinnung und Aufbereitung von Wasser. Das kann dem Trend zur Wüstenbildung und zur Verschlechterung der Bodenqualität entgegenwirken. Auch Fruchtsorten, die normalerweise in semi-ariden Gebieten mit trocken-heißem Klima und starker Sonneneinstrahlung nicht angebaut werden, könnten so durch Agri-PV kultiviert werden. Ein weiterer Zusatznutzen in den oft netzfernen Dörfern ist die dezentrale Erzeugung von Solarstrom. Durch die Technologie der Agri-PV können Menschen Zugang zu Informationen, Bildung, besserer medizinischer Versorgung (z. B. Kühlung von Impfstoffen und Medikamenten) bekommen und sich neue Einkommensquellen erschließen – ohne Böden der Nahrungsmittelproduktion zu entziehen.

Bild 14: Modulreihe mit bifazialen Modulen der Agri-PV-Anlage in Heggelbach. © Fraunhofer ISE

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

Von den weltweit über 2,8 GW_p hält China den größten Anteil mit ca. 1,9 GW_p (Stand 2020). Dort steht auch die weltweit größte 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 1800 Anlagen installiert. In Südkorea, wo eine starke Landflucht herrscht, plant die Regierung den Bau von 100.000 Agri-PV-Anlagen auf Bauernhöfen, um den Landwirten damit eine Altersvorsorge (rund 1000 US-Dollar monatliches Einkommen aus dem Stromverkauf) zu ermöglichen und das Hofsterben einzudämmen.

Bild 15: Pilotanlagen des Fraunhofer Chile Research Instituts in Curacavi und Lampa, Chile untersuchen, welche Kulturpflanzen von einer weniger starken Sonneneinstrahlung profitieren. © Fraunhofer Chile

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 [13]. Im konkreten Fall rechnen Forschende des Fraunhofer ISE für diese Region fast mit einer Verdopplung der Landnutzungseffizienz.

In einem Projekt im Rahmen des EU-Programms Horizon 2020 hat das Fraunhofer ISE mit Partnern in Algerien untersucht, 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 [14].

2.5.1 Forschungsprojekte in Chile

In einem im Frühjahr 2018 abgeschlossen Projekt zu Agri-PV in Kooperation mit Fraunhofer Chile wurden drei Anlagen mit einer Leistung von je 13 kW 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 Niederschlagsrückgänge von 20 bis 40 Prozent in den letzten zehn Jahren verursacht. Aufgrund der klimatischen Bedingungen sind 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 Projektpartner, welche Kulturpflanzen von einer weniger starken Sonneneinstrahlung profitieren. Die landwirtschaftlichen Betriebe wiesen dabei sehr unterschiedliche Profile auf. Die Agri-PV-Anlage in einem landwirtschaftlichen Betrieb, der mit professionellen Methoden Brokkoli und Blumenkohl anbaut, lieferte Solarstrom für die Nachernteprozesse wie Reinigung, Verpackung und Kühlung. Eine weitere Pilotanlage wurde in einem Familienbetrieb errichtet, der spezialisiert auf Kräuteranbau ist. Eine dritte Anlage in einer abgelegenen Region mit schwach entwickelter Infrastruktur und unzuverlässiger Stromversorgung versorgt sieben Familien sicher mit Energie, u. a. auch für einen Inkubator zum Ausbrüten von Hühnereiern.

Die drei Anlagen in Chile sind die ersten ihrer Art in Lateinamerika. Untersucht wurden die Anpassung und Optimierung der Agri-PV auf landesspezifische klimatische und wirtschaftliche Rahmenbedingungen. Die Ergebnisse der landwirtschaftlichen Produktion und der Solarstromerzeugung sind sehr positiv, sodass der Forschungsschwerpunkt von Fraunhofer Chile mit Unterstützung der dortigen Regierung weiter ausgebaut werden soll. Die drei Pilotanlagen werden bis ins Jahr 2021 weiter im Feldbetrieb überwacht [15].

2.5.2 Frankreich

Auch Frankreich treibt die Agri-PV voran. Seit 2017 gibt es dort separate Ausschreibungen für die Agri-PV. Vorgesehen sind 15 MW installierte Leistung pro Jahr. Die Zuschläge erfolgen teilweise über den angebotenen Preis, teilweise über den Innovationsgehalt des Projekts. Die bisher identifzierten Synergieeffekte für die Landwirtschaft werden ebenfalls positiv bewertet. Die maximale Größe eines Projekts beträgt drei MW installierte Leistung (MW_p). 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 und 3 MW ausgeschrieben.

Bezuschlagte Projekte können sich eine Einspeisevergütung über 20 Jahre sichern. Im März 2020 konnten 40 MW für Agri-PV-Projekte gesichert werden. Auch Agri-PV-Anlagen mit Tracking-System finden in Frankreich Anwendung. 2018 entstand in Tresserre (Département Pyrénées-Orientales in der Region Okzitanien) die bis dato größte Anlage mit nachgeführten Modulen im Weinbau.

Allerdings steht die Agri-PV in Frankreich vor einem großen Akzeptanzproblem. Da bei der ersten Ausschreibungsrunde keine klaren Kriterien für Agri-PV definiert wurden, ist der Anteil der landwirtschaftlichen Produktion in einigen Projekten kaum bzw. gar nicht vorhanden. Diese Art von Mitnahmeeffekten der PV-Branche hat vor allem im Landwirtschaftssektor 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.

2.5.3 USA

Auch in den Vereinigten Staaten von Amerika (USA) sind bereits Agri-PV-Anlagen installiert. Beispielsweise konnte eine Forschungsanlage in Massachusetts die Doppelnutzung von Pflanzenproduktion und Stromerzeugung zeigen. Daraufhin stellt der Bundesstaat ab 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 MW_p 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 weniger als 50 Prozent Verschattung aufweisen [4].

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-Anlagen vorantreiben.

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

Bild 16: Studie mit verschiedenen Salatsorten in der Agri-PV-Forschungsanlage der Universität von Montpellier, Frankreich.
© Christian Dupraz

3. LANDWIRTSCHAFT

Um den Herausforderungen des Klimawandels, des Gewässerschutzes und dem Wunsch nach Ertragssteigerung zu begegnen, wird in der Landwirtschaft immer häufiger auf Kulturschutzmaßnahmen zurückgegriffen. Dazu zählt neben dem Anbau in Gewächshäusern und Folientunneln beispielsweise der Einsatz von Hagelschutznetzen im Obstbau. Gerade 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.

Wetterextreme der vergangenen Jahre haben gezeigt, dass die zunehmende Klimaerwärmung nicht nur eine abstrakte Gefahr darstellt, sondern bereits heute große Auswirkungen auf die Landwirtschaft in Deutschland hat. Insbesondere die für das Pflanzenwachstum bedeutsamen Frühjahrsniederschläge gingen in den vergangenen Jahren zurück [16]. Zusätzliche Bewässerung kann diese Trockenperioden überbrücken und Erträge sichern. Vor dem Hintergrund des steigenden Bewässerungsbedarfs der deutschen Landwirtschaft und in der Regel bereits bestehender Entnahmebeschränkungen für Grund- und Oberflächenwasser sollten weitere Anpassungsmöglichkeiten in Betracht gezogen werden. Daneben gefährden aber auch andere Wetterextreme wie beispielsweise Starkregen und Hagel den Anbau von Kulturpflanzen. Infolge oftmals regional begrenzter, starker Ertragsschwankungen werden landwirtschaftliche Betriebe immer häufiger vor wirtschaftliche Herausforderungen gestellt.

Eine Nutzung landwirtschaftlicher Flächen für Nahrungsmittelproduktion und PV-Stromerzeugung bietet die Chance, viele dieser Herausforderungen gleichzeitig zu adressieren. Für landwirtschaftliche Betriebe bietet Agri-PV Chancen und Möglichkeiten zur Einkommensdiversifizierung und zum Schließen innerbetrieblicher Kreisläufe. Insbesondere die geringere Verdunstungsrate sowie der Schutz vor Hagel und Frost sind hierbei wichtige Faktoren. Durch die Nutzung der vorhandenen Gerüststrukturen können weitere Schutzsysteme kostengünstig integriert werden. Das kann die Produktivität und die Wertschöpfung der landwirtschaftlichen Flächen deutlich steigern.

Allerdings gibt es auch Einschränkungen und Herausforderungen hinsichtlich der landwirtschaftlichen Produktion. Hierzu zählen vor allem die geänderten Lichtverhältnisse sowie die aufgrund der Aufständerung erschwerte Bewirtschaftung. Um Risiken zu minimieren und Synergieeffekte bestmöglich zu nutzen, sollten daher geeignete Kulturpflanzen mit dem passenden Anlagendesign verbunden werden.

Bild 17: Untersuchte Kulturen in Heggelbach (Weizen, Sellerie, Kartoffeln, Kleegras). © Universität Hohenheim

3.1 Forschungsergebnisse APV-RESOLA

Im Forschungsprojekt APV-RESOLA wurde unter der Pilotanlage in Heggelbach eine mehrgliedrige Fruchtfolge aus Kleegras, Winterweizen, Kartoffeln und Sellerie nach biodynamischen Prinzipien angebaut und die Anbaueignung unter Agri-PV erfolgreich demonstriert. Dabei zeigte sich aber auch, dass die Erträge der Kulturen stark abhängig von Wetterschwankungen sind. Bei den Kartoffeln variieren die Erträge unter Agri-PV beispielsweise von minus 20 Prozent im Jahr 2017 bis plus elf Prozent im trockenen und heißen Jahr 2018.

Insofern kann die Bewirtschaftung unter einer Agri-PV-Anlage je nach geografischer Lage und den lokalen Klimabedingungen Verdunstung vermindern und vor zu intensiver Sonneneinstrahlung schützen. Dieser Aspekt wird vor dem Hintergrund sich häufender Hitzewellen in Mitteleuropa auch in Deutschland an Bedeutung gewinnen [17]. 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 (Abb.18). Die photosynthetisch aktive Sonneneinstrahlung unter der Agri-PV-Anlage war dabei rund 30 Prozent niedriger als auf der Referenzfläche. Neben der Sonneneinstrahlung beeinflusste Agri-PV in erster Linie die Niederschlagsverteilung und die Bodentemperatur. Letztere lag im Falle der Agri-PV im Frühjahr und Sommer unter jener der Referenzfläche, wohingegen die Lufttemperatur unverändert blieb. 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 Kleegras 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 Sellerie mit einer Ertragssteigerung von 12 Prozent, die Erträge von Kartoffeln und Winterweizen stiegen um elf bzw. drei Prozent. Bei Kleegras verminderte sich der Ertrag um acht Prozent gegenüber der Referenzfläche. Zur Berechnung der Gesamtertragsverluste sind zusätzlich die Flächenverluste durch die nicht bearbeitbaren Streifen zwischen den Stützpfeilern mit etwa acht Prozent zu berücksichtigen.

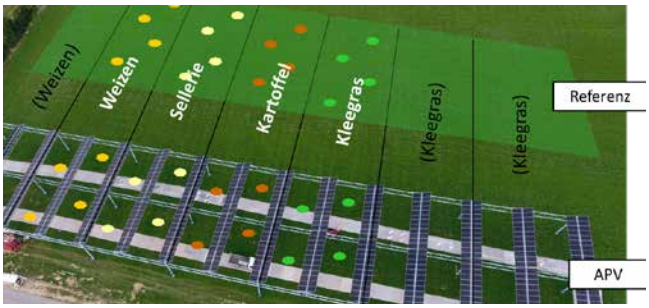


Bild 18: Feldplan des Versuchsaufbaus 2017 mit Messstationen. © BayWa, verändert durch Universität Hohenheim

3.2 Bewirtschaftung und Kulturauswahl

Die Bewirtschaftung unter PV-Modulen unterscheidet sich – wenngleich das Anlagendesign notwendige Anpassungsmaßnahmen in der Bewirtschaftung reduziert – von der landwirtschaft- bzw. gartenbaulichen Tätigkeit auf »offenem Feld«. Dies umfasst praktische Aspekte der Bearbeitung (3.2.1), Bestandsführung (3.2.2) und Kulturauswahl (3.2.3).

3.2.1 Unterkonstruktion und Landmaschinen aufeinander abstimmen

Bei der Anlagenplanung müssen praktische Erfordernisse der Landwirtschaft berücksichtigt werden, um die spätere Bewirtschaftung möglichst wenig zu beeinflussen. Wichtig ist hierbei vor allem, dass die Ausrichtung der Anlage mit der Bearbeitungsrichtung übereinstimmt und die Abstände zwischen den Stützen der Unterkonstruktion zu üblichen Maschinenbreiten und -höhen passen. Die Bewirtschaftung

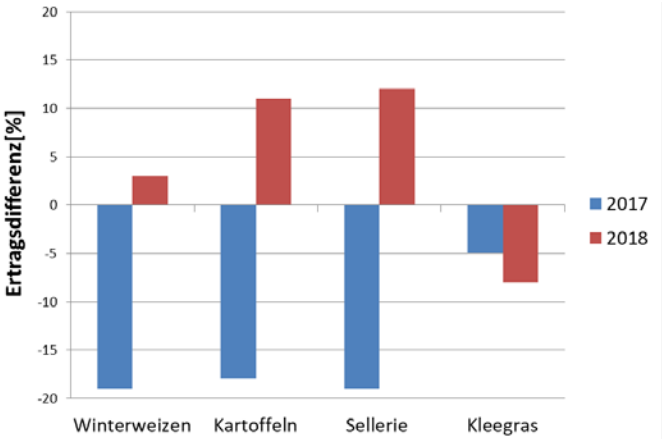


Bild 19: Ertragsunterschiede der Kulturen unter Agri-PV gegenüber Referenzflächen 2017 (blau) und 2018 (rot) in Heggelbach (ohne Flächenverluste durch Stützen). Daten: Universität Hohenheim

erfordert besonders zu Beginn erhöhte Aufmerksamkeit der Fahrerin oder des Fahrers, um Zusammenstöße mit den Pfeilern zu verhindern. Im Projekt APV-RESOLA sind die Pfeiler mit einem Rammschutz ausgestattet. Das beugt Schäden an der Anlage vor. Der tatsächliche Flächenverlust durch Pfeiler und Rammschutz lag in Heggelbach bei unter einem Prozent der Ackerfläche. Da aber die Bewirtschaftung der Streifen zwischen den Stützen bei Maschineneinsatz nicht praktikabel ist, können ca. acht Prozent der Ackerfläche nicht genutzt werden. Bei manueller Bewirtschaftung oder Reihenbewirtschaftung reduziert sich der Flächenverlust auf die tatsächlich versiegelte Fläche. Innovative Seilbahntechniken können zur Lösung dieser Problematik beitragen (Kap. 4.3). Der Einsatz von Precision Farming und automatischen Spurführungssystemen erleichtert die Bewirtschaftung.

3.2.2 Mikroklima unter Agri-PV

Die Verschattung des Ackers bewirkt unter den Modulen ein leicht verändertes Mikroklima. Neben den oben beschriebenen Untersuchungen in Heggelbach wurde auch an Standorten in den USA [18] und Frankreich [8] zu möglichen Auswirkungen auf das Mikroklima geforscht. Abhängig von Standort und Design der Anlage konnten die Forschenden dabei unterschiedliche Veränderungen des Mikroklimas feststellen.

Bild 20: Rammschutz der Aufständerung der Anlage in Heggelbach vor der Beschädigung durch Landmaschinen. © Hilber Solar

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

1) Die für die Pflanzen verfügbare Sonneneinstrahlung kann je nach technischer Ausführung (z. B. Abstand und Ausrichtung der PV-Module) unterschiedlich ausfallen. Als Richtwert für Deutschland gilt eine Verringerung der Strahlung um rund ein Drittel als akzeptabel.
2) Je niedriger die Aufständerung, desto stärker sind die mikroklimatischen Veränderungen.
3) An besonders heißen Tagen reduziert sich die Bodentemperatur und in geringerem Maße auch die Lufttemperatur.
4) Je nach Ausrichtung und Design der Anlage kann sich die Windgeschwindigkeit verringern oder erhöhen. Windkanaleffekte und deren Effekte auf das Pflanzenwachstum sollten demnach bei der Anlagenplanung berücksichtigt werden.
5) Die Bodenwasserverluste unter Agri-PV sind reduziert. Gleichzeitig kann es zur Erhöhung der Luftfeuchtigkeit kommen.

Die teilweise Überdachung der Ackerfläche führt zu einer ungleichmäßigen Niederschlagsverteilung im Abtropfbereich der PV-Module. Um einer erhöhten Bodenerosion in diesem Bereich mit Abschwemmung nährstoffreichen Oberbodens, Verschlämmung, Auswaschen von Keimlingen oder Eutrophierung von Oberflächengewässern entgegenzusteuern, sollten Maßnahmen getroffen werden. Eine Auswahl an Möglichkeiten findet sich im Technikteil (Kap. 4.4).

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,

Bild 21: Illustration einer Agri-PV-Apfelplantage. © Fraunhofer ISE

dass die geringere Bestandstemperatur die Entwicklungszeit verlängern kann. Daher muss durch die Sortenwahl eine rechtzeitige und gleichmäßige Abreife gesichert werden.

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.

3.2.3 Geeignete Kulturpflanzen

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

Dauer- und Sonderkulturen

Bei Sonderkulturen aus dem Wein-, Obst- und Gemüsebau bietet Agri-PV vermutlich das größte Potenzial für Synergieeffekte. Denn die hohe Wertschöpfung pro Fläche und die oftmals relativ empfindlichen Kulturen gehen mit einem größeren Bedarf an Schutzmaßnahmen einher. Die sinnvolle Gestaltung der Agri-PV-Konstruktion kann einen direkten Schutz vor Umwelteinflüssen wie Regen, Hagel und Wind gewährleisten. Zudem lässt sich die Aufständerung 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.

Bild 23: Witterungsschutz für Himbeeren durch Agri-PV, 300 kW_p Testanlage von BayWa. r.e in den Niederlanden. © BayWa r.e.

Positive Erfahrungen erzielte bereits der Blattgemüseanbau von Salat unter einer Agri-PV-Anlage. Die Pflanzen reagierten auf ein um etwa 30 Prozent reduziertes Lichtangebot, ähnlich wie der Sellerie in Heggelbach, mit verstärktem Blattflächenwachstum [19].

Im Weinbau können sich die als Folge des Klimawandels verstärkte Sonneneinstrahlung und Temperaturveränderung je nach Weinsorte stark auf die Qualität des Ertrags auswirken und darüber hinaus zu Sonnenbrand und Vertrocknung der Früchte am Rebstock führen. Eine Erhöhung der Globalstrahlung steigert den Zuckergehalt der Trauben, was wiederum den Alkoholgehalt des Weines erhöht und seine Qualität mindert. Eine Verschiebung der Anbauregionen und Erntezeitpunkte ist die Folge. Die teilweise Beschattung bei hohen Temperaturen wirkt sich daher positiv auf das Wachstum aus und verhindert gleichzeitig ein vorzeitiges Abreifen [20]. Verglichen mit anderen landwirtschaftlichen Nutzungsarten wird im Weinbau nur eine Höhe des Agri-PV-Systems von zwei bis drei Metern benötigt (Abb. 22), wodurch die Kosten der Unterkonstruktion deutlich sinken können. Potenziale zur

Bild 22: Agri-PV mit nachgeführten Modulen in Frankreich. © Sun'Agri

Bild 24: Demoprojekt im Beerenbau zeigt sehr hohe Wertschöpfung in der Landwirtschaft. © BayWa r.e.

Bild 25: Weizenernte mit Mähdrescher. © Fraunhofer ISE

Kostensenkung ergeben sich auch durch die Möglichkeiten, das Agri-PV-System in bestehende Schutzstrukturen zu integrieren. In Frankreich werden Agri-PV-Anlagen vermehrt in Rebanlagen gefördert und umgesetzt (Kap 2.3).

Vielversprechend erscheinen auch Systeme in Verbindung mit Kernobst wie beispielsweise Äpfeln. Um durch den Klimawandel bedingte Risiken für die Ernteerträge und Apfelqualität in Deutschland zu vermindern, sind oft kostspielige Schutzsysteme nötig. Agri-PV kann diese Kosten reduzieren. Gleichzeitig genügen bereits 60 bis 70 Prozent des verfügbaren Lichts für optimale Apfelerträge [21]. In Rheinland-Pfalz plant das Fraunhofer ISE eine Pilotanlage auf einem Bio-Obsthof, um die Effekte der PV-Module auf den Schädlingsbefall und die Erträge im Vergleich zu herkömmlichen Schutzvorrichtungen zu untersuchen. Synergieeffekte sind auch im Hopfenanbau zu erwarten: Die Unterkonstruktion lässt sich sowohl für den Hopfen als auch die PV-Module verwenden. Das verringert die Anlagekosten eines Hopfengartens substantiell. Kulturarten und Anbausysteme, in denen feuchtigkeitsbedingter Pilzbefall nicht durch flankierende Anbaumaßnahmen reduziert werden kann, erscheinen dagegen weniger geeignet.

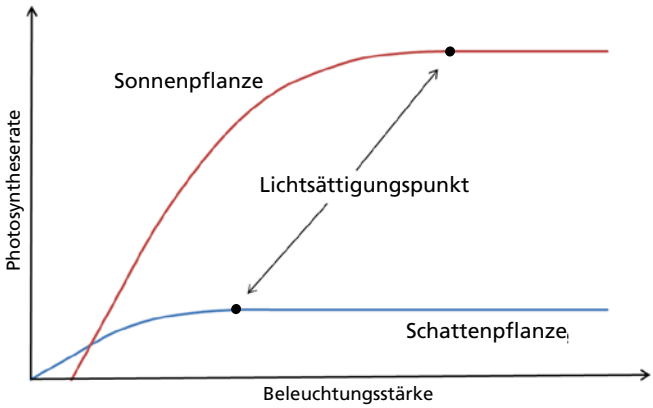


Bild 26: Schematisch: Photosyntheserate in Abhängigkeit der Beleuchtungsstärke bei Sonnen- und Schattenpflanzen. (Quelle: verändert nach [21])

Bild 27: Vertikal errichtete bifaziale Module im Solarpark in Eppelborn-Dirmingen, Saarland mit 2 MW_p Leistung, errichtet von Next2Sun. © Next2Sun GmbH

Ein weiteres Anwendungsfeld der Sonderkulturen liegt im Bereich des geschützten Anbaus von Strauchbeeren. Hier könnten PV-Module die Rolle von Folientunneln teilweise übernehmen und vor Regen und Hagel schützen. Weitere Vorteile von Anwendungen über Dauer- und Sonderkulturen sind hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit (Kap. 3.3), der gesellschaftlichen Akzeptanz (Kap. 5) sowie der regulatorischen Umsetzbarkeit (Kap. 6) zu erwarten.

Ackerbau

Die Ergebnisse aus Heggelbach mit verschiedenen relevanten landwirtschaftlichen Kulturpflanzen zeigen, dass diese, insbesondere in trockenen Gebieten, durchaus von der Beschattung durch die Agri-PV-Anlage profitieren können. Besonders der positive Effekt auf den Ertrag in heißen und trockenen Jahren ist dabei hervorzuheben. In gewöhnlichen, niederschlagsreichen Jahren hingegen muss bei Kulturen wie Kartoffeln, Weizen und anderen Getreidearten (Gerste, Roggen oder Triticale) unter feststehenden Unterkonstruktionen mit Ertragseinbußen von bis zu 20 Prozent gerechnet werden. Mais eignet sich in gemäßigten

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 Abb. 26). Ein wichtiges Kriterium für die Eignung von Pflanzen für Agri-PV ist der Lichtsättigungspunkt. Ab diesem Punkt können Pflanzen zusätzliches 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]

Breiten aufgrund seiner Charakteristika als C4-Pflanze (höhere Wärme- und Lichtbedürftigkeit) kaum für den Anbau in Teilverschattung. Erfahrungen mit anderen wichtigen 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. verringerter Moduldichte und angepasster Modulausrichtung, erreicht werden kann. Mit beweglichen Agri-PV-Systemen lassen sich die Einbußen im Pflanzenertrag reduzieren, weil das Lichtangebot in kritischen Wachstumsphasen erhöht werden kann.

Grünland

Eine landwirtschaftliche Doppelnutzung von PV-FFA mit Schafhaltung ist in Deutschland gängige Praxis. Bei diesem Ansatz sind die Systeme typischerweise rein PV-seitig optimiert. Die zu erwartenden Synergieeffekte sind genauso 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 Aufständerung weitgehend zulässt, ist die Installation vertikaler Agri-PV-Systeme (Abb. 27). In Deutschland gibt es bereits zwei Referenzanlagen in Donaueschingen (Baden-Württemberg) und Eppelborn (Saarland). Vorteile für das Pflanzenwachstum sind vor allem in windreichen Gebieten wie bspw. in Küstennähe zu erwarten. Dort können die Module als Windbrecher fungieren und so zur Minderung der Winderosion beitragen.

3.3 Wirtschaftlichkeit und Geschäftsmodelle

Die Kosten von Agri-PV können individuell stark variieren und hängen unter anderem von Faktoren wie der installierten Leistung, der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung, der Lage des Ackerschlags 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 liegt. Daher spielen die Durchfahrtshöhe und die Pfostenabstände der Unterkonstruktion eine entscheidende Rolle. Kleinere Landmaschinen und ein hoher Anteil an manuellen Arbeitsschritten dürften sich in den meisten Fällen deshalb positiv auf die Wirtschaftlichkeit auswirken. Auch mehrjährige Reihenkulturen bieten Kostenvorteile, da die Stützen ohne nennenswerte Reduktion der Anbaufläche in die Reihen integriert werden können. Eine Einzäunung ist bei Agri-PV-Systemen in der Regel, im Gegensatz zu normalen PV-Freiflächenanlagen, nicht nötig, womit dieser Kostenfaktor entfällt.

Im laufenden Betrieb sind bei Agri-PV-Systemen leichte Einsparungen zu erwarten, da gegenüber normalen PV-FFA einige Arbeiten wie beispielsweise die Beikrautbeseitigung unter den Modulen im Rahmen der üblichen Bewirtschaftung ohnehin stattfinden. Lediglich die nicht bearbeitbaren Streifen zwischen der Aufständerung sollten gepflegt werden, um ein Ausbreiten unerwünschter Beikräuter zu verhindern. Auch bei der Landpacht kann davon ausgegangen werden, dass sich durch die Doppelnutzung Kosteneinsparungen ergeben.

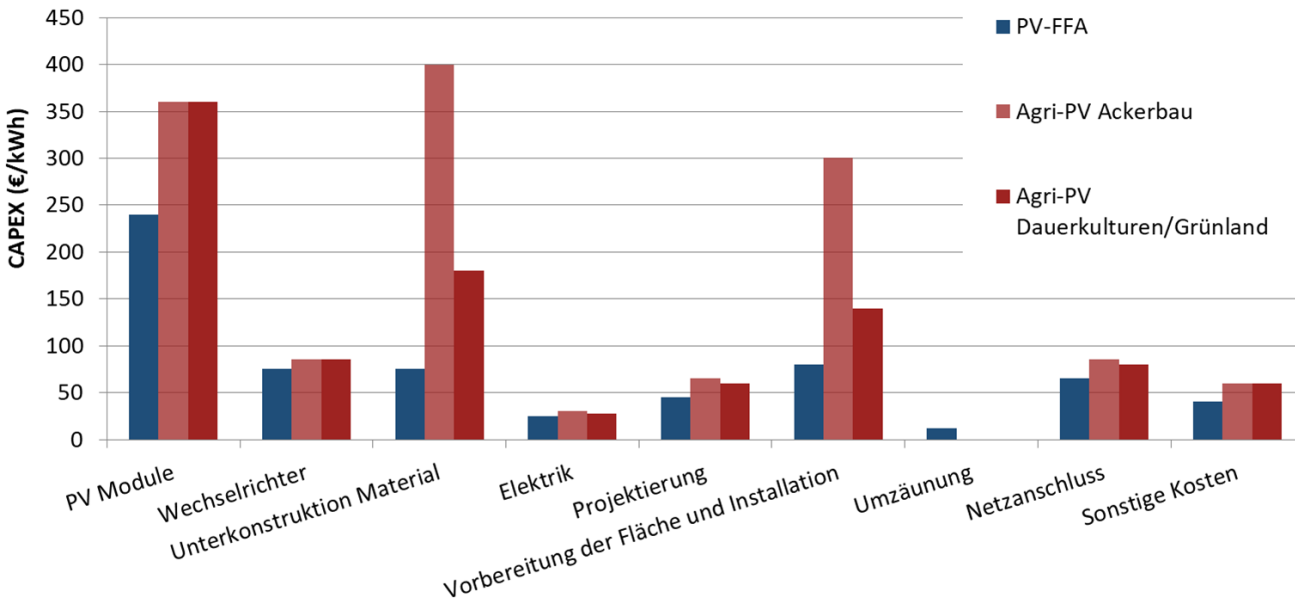


Bild 28: Investitionsausgaben (CAPEX) für PV-Freiflächenanlagen und Agri-PV. Daten aus [4, 22]

Für eine Abschätzung der Kosten werden im Folgenden Anwendungen im Ackerbau und in Dauer- und Sonderkulturen unterschieden und mit den Kosten von PV-FFA und Dachanlagen verglichen. Einnahmen und Ausgaben der Landwirtschaft wurden in dieser Abschätzung nicht berücksichtigt.

Das Ergebnis: Tendenziell gilt, dass im Ackerbau Anlagen mit einer höheren installierten Leistung notwendig sind, um Agri-PV wirtschaftlich umzusetzen, während auf Dauer- und Sonderkulturen bei günstigen Voraussetzungen auch kleinere Systeme möglich erscheinen. Durch eine konstante landwirtschaftliche Bewirtschaftung besteht im Falle von Dauerkulturen zudem die Option, das PV-Design technisch ganz an die Bedürfnisse der Landwirtschaft anzupassen. Bei einer Bewirtschaftung im Fruchtwechsel sollte sich das Agri-PV-Design an Durchschnittswerten der angebauten Kulturen orientieren.

3.3.1 Investitionskosten

Die Abschätzung der Investitionskosten bezieht sich auf eine Fläche von jeweils zwei Hektar pro Anlage und im Falle der Dachanlage auf eine installierte Leistung von zehn kW_p. Da für typische Ackerkulturen in Deutschland wie Weizen, Gerste oder Raps eine geringere Verschattung und damit eine geringere Leistung pro Fläche angemessen erscheint, wird in der Kostenabschätzung für den Ackerbau eine Leistung von 600 kW_p pro Hektar angenommen. Durchfahrtshöhe und Pfostenabstände der Unterkonstruktion entsprechen den Maßen der Anlage in Heggelbach. Für niedrige Dauerkulturen wie beispielsweise den Beerenanbau wird eine Leistung von 700 kW_p pro Hektar und eine Durchfahrtshöhe und -breite von drei Meter bzw. zehn Meter angenommen.

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 Rechtskosten, welche nach Stand 2020 noch hinzukämen. Damit entsprechen die Werte den mittelfristig anzunehmenden Kosten im Falle einer Agri-PV-Markteinführung. Die Unterschiede der zu erwarteten Investitionskosten für PV-FFA und Agri-PV sind in Abbildung 28 dargestellt.

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

1). Der Modulpreis kann sich erhöhen, da beispielsweise bei geringen Bauhöhen die Größe oder Lichtdurchlässigkeit der Module an die Bedürfnisse des Pflanzenwachstums angepasst werden muss (Kap. 4.2). Bei der Verwendung von bifazialen Glas-Glas-Modulen wurde deshalb in der Beispielrechnung von einem Anstieg von durchschnittlich 220 Euro pro kW_p auf 360 Euro pro kW_p gegenüber Standard-PV-Modulen ausgegangen. Diese Mehrausgaben werden teilweise durch die höhere Stromerzeugung pro installierter Leistung kompensiert.

2). Für die Unterkonstruktion sind im Ackerbau Kosten von durchschnittlich 400 Euro pro kW_p im Vergleich zu 75 Euro pro kW_p im Falle von PV-FFA zu erwarten. Gleichzeitig ist diese Abschätzung mit hohen Unsicherheiten behaftet und schwankt je nach Design und möglichen Lern- und Skaleneffekten zwischen 320 und 600 Euro pro kW_p. Mit 130 bis 220 Euro pro kW_p sind die Kosten für die Unterkonstruktion für Sonder- und Dauerkulturen deutlich niedriger.

3). Die Kosten für die Standortvorbereitung und Installation liegen ebenfalls wesentlich höher und werden im Ackerbau auf 250 bis 350 Euro pro kW_p (PV-FFA: 70 bis

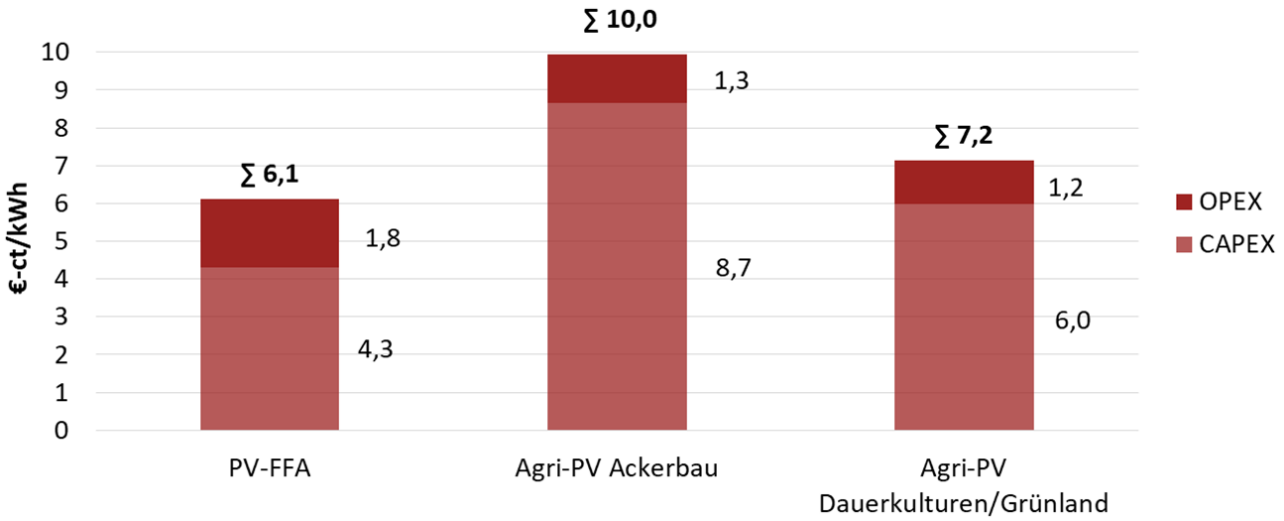


Bild 29: CAPEX / OPEX von PV-FFA und Agri-PV im Vergleich. Daten aus [4, 22]

100 Euro pro kW_p) geschätzt. Kostentreibend wirken sich u. a. Bodenschutzmaßnahmen wie die Verwendung von Baustraßen oder eine geringere Flexibilität hinsichtlich der Installation aus, da sich die Bauplanungen nach den Bewirtschaftungszeiten der Landwirtschaft sowie der Befahrbarkeit der Böden richten müssen. Bei Sonder- und Dauerkulturen ist einem deutlich geringeren Anstieg der Kosten auf 120 bis 180 Euro pro kW_p zu rechnen.

Abgesehen von den oben genannten Aspekten sind die Kosten wie z. B. für Wechselrichter, elektrische Komponenten und Projektierung zum aktuellen Kenntnisstand in den meisten Fällen vergleichbar und unterscheiden sich im Durchschnitt kaum von PV-FFA. Im geringen Umfang können Einsparungen erzielt werden, wenn auf eine Umzäunung der Anlage verzichtet wird.

3.3.2 Operative Kosten

Im Gegensatz zu den Investitionskosten sind bei den Betriebskosten tendenziell Einsparungen gegenüber PV-FFA zu erwarten. Verantwortlich für die Einsparungen sind im Wesentlichen:

1). Die **Kosten der Bereitstellung** der Fläche sinken von etwa 3 auf 0,8 Euro pro kW_p im Ackerbau und 1 Euro pro kW_p für Dauer- und Sonderkulturen. Zur Abschätzung wurde angenommen, dass sich die Flächenkosten für Agri-PV-Systeme an den landwirtschaftlichen Pachtpreisen orientieren und sich gleichmäßig auf die Landwirtin oder den Landwirt und die Betreiberin oder den Betreiber der Agri-PV-Anlage verteilen. Je nach Eigentümerstruktur und Geschäftsmodell kann dieser Wert jedoch stark variieren. Im Ackerbau sind Einsparungspotenziale eventuell höher, da dort im Vergleich zu Dauer- und Sonderkulturen generell niedrigere Pachtpreise üblich sind.

2). Durch die landwirtschaftliche Nutzung entfallen PV-seitig die Kosten der **Flächenpflege** unter den Modulen.

3). Höhere Kosten entstehen hingegen voraussichtlich für die Reinigung der Module oder Reparaturen an der Anlage, wenn diese in größerer Höhe z. B. mit Hebebühnen durchgeführt werden müssen. Da in Deutschland Reinigungskosten für Module aufgrund der regelmäßigen Regenfälle jedoch bislang nur eine untergeordnete Rolle spielen, ist der Mehraufwand überschaubar. In Regionen mit höheren Verschmutzungswahrscheinlichkeiten können die Mehrkosten für die Reinigung hingegen 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 keine Erfahrungen.

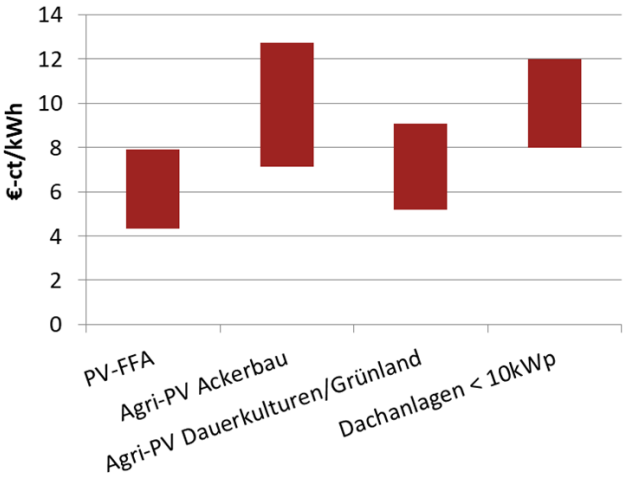


Bild 30: Geschätzte durchschnittliche Stromgestehungskosten (LCOE) für PV-FFA und Agri-PV. Daten aus [3, 4, 23, 24]

3.3.3 Stromgestehungskosten

Im Ergebnis ist die Produktion von Strom im Ackerbau über eine Laufzeit von 20 Jahren mit Stromgestehungskosten von durchschnittlich 9,93 Eurocent pro kWh fast doppelt so teuer wie durchschnittliche PV-FFA sowie im Durchschnitt vergleichbar mit kleinen Dachanlagen. Für Dauerkulturen mit einer niedrigeren Durchfahrtshöhe liegen die Stromgestehungskosten mit durchschnittlich 7,13 Eurocent hingegen etwa lediglich ein Drittel über denen einer PV-FFA. Die Bandbreite der Stromgestehungskosten von Agri-PV im Vergleich zu PV-FFA und kleinen Dachanlagen ist in Abbildung 30 dargestellt.

Nicht berücksichtigt wird bei der Kostenabschätzung, dass Skalierungseffekte im Ackerbau durch tendenziell höhere Schlaggrößen zu einem Kostenvorteil von Agri-PV im Ackerbau gegenüber Agri-PV auf Sonder- und Dauerkulturen führen können. Derselbe Vorteil dürfte im Ackerbau auch hinsichtlich der Fixkosten der Projektierung zum Tragen kommen, da bei kleinen Anlagen z. B. die Anbindung an das Stromnetz ein entscheidender Faktor für die Höhe der Fixkosten und damit der gesamten Wirtschaftlichkeit ist. Andererseits können kleine Anlagen auch Vorteile für die Wirtschaftlichkeit mit sich bringen, wenn z. B. 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.

3.3.4 Eigenverbrauch und Stromerlöse

Strom aus einem Agri-PV-Kraftwerk ist zumeist dann am wertvollsten, wenn er für den Eigenverbrauch genutzt wird und so den externen Strombezug unmittelbar verringert. Bspw. können bei einem gewerblichen Strompreis von 14 bis 16 Cent (ct) pro kWh [25] und Stromgestehungskosten um 9 ct/kWh 5 bis 7 Cent pro kWh eingespart werden. Vorteil-

haft für einen hohen **Direktverbrauch** ist ein Verbrauchsprofil, das dem Erzeugungsprofil ähnelt, mit Spitzen um die Tagesmitte und im Sommerhalbjahr.

Bei **speicherfähigen Anwendungen** wie Kühlung lässt sich das Verbrauchsprofil bspw. 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 der 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 ein Abnehmer gefunden werden. Grundsätzlich kommen dafür EEG-Modelle oder Stromlieferverträge in Frage.

Eine **EEG-Vergütung** ist aktuell nur möglich, wenn das Agri-PV-Kraftwerk auf Streifen längs von Autobahnen oder Schienenwegen errichtet wird. Für Kraftwerke über 750 kW_p Nennleistung ist die erfolgreiche Teilnahme an einer Ausschreibung verpflichtend und Eigenverbrauch nicht zulässig.

Verschiedene Energieversorgungsunternehmen bieten Betreiberinnen und Betreibern von PV-Kraftwerken eine Abnahme des Stroms über **Stromlieferverträge** an. Die Umweltbank hat bspw. einen Muster-Stromliefervertrag für Freiflächen-Photovoltaik-Projekte auf Basis von Power Purchase Agreements (PPA) entwickelt.

3.3.5 Geschäftsmodelle

Durch die Einbeziehung der landwirtschaftlichen Ebene geht die Komplexität eines Agri-PV-Geschäftsmodells oftmals über die einer PV-FFA hinaus. Je nach Konstellation der Projektpartner sind bei der Umsetzung verschiedene Parteien mit unterschiedlichen Funktionen involviert.

Dabei lassen sich mindestens vier Funktionen unterscheiden:

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

Im einfachsten Geschäftsmodell können alle vier Funktionen 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, wenn der Investitionsaufwand überschaubar und eine Eigentümerschaft der Fläche wahrscheinlich ist. Vorteile liegen dabei neben den geringeren Kosten für Projektierung und Vertragsverhandlungen sowie einer stärkeren Dezentralität vor allem darin, dass mögliche Vor- und Nachteile eines Agri-PV-Systems leichter und dynamischer berücksichtigt werden können, wenn sich die Interaktionen zwischen der landwirtschaftlichen und der photovoltaischen Ebene bei derselben wirtschaftlichen Einheit niederschlagen. Dies ist bei Agri-PV-Systemen wegen möglichen Wechselwirkungen zwischen den beiden Ebenen besonders relevant. So können zum Beispiel bei bifazialen PV-Modulen durch die Auswahl der Pflanzenkultur

Tabelle 3: Konstellationen verschiedener Agri-PV-Geschäftsmodelle (in Anlehnung an [4]).

Geschäftsmodell	Funktion			
	Bereitstellung Fläche	Landwirtschaftliche Bewirtschaftung	Bereitstellung PV-System	Betrieb PV-System
1. Basisfall	Landwirtschaftsbetrieb			
2. Externes Landeigentum	Landeigentümer*innen	Landwirtschaftsbetrieb		
3. Externes PV-Investment	Landwirtschaftsbetrieb		PV-Investor*in	Landwirtschaftsbetrieb
4. Nur Bewirtschaftung und Betrieb	Landeigentümer*innen	Landwirtschaftsbetrieb	PV-Investor*in	Landwirtschaftsbetrieb
5. Nur Bewirtschaftung	Landeigentümer*innen	Landwirtschaftsbetrieb	PV-Investor*in	PV-Betreiber*in

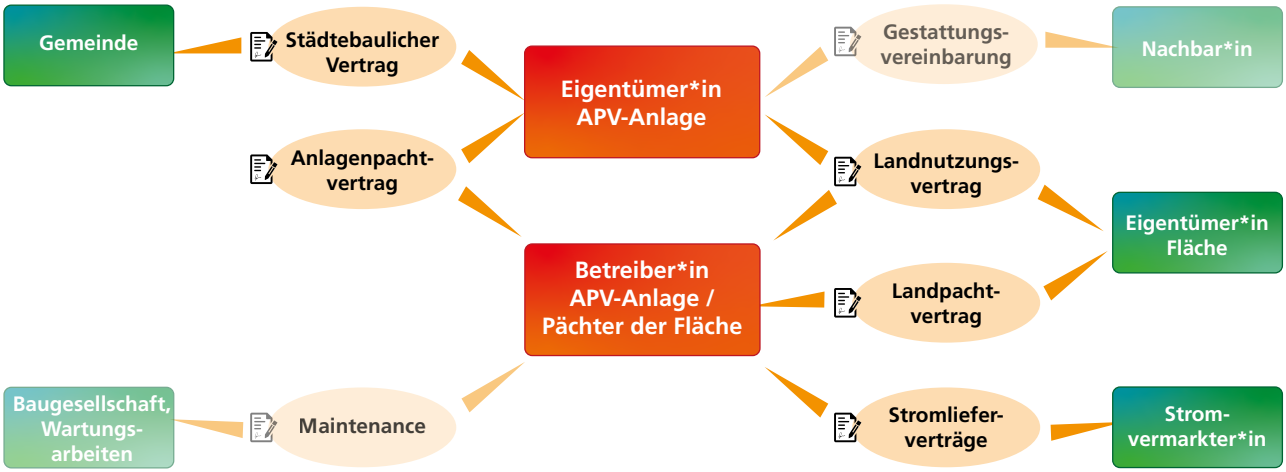


Bild 31: Interessensgruppen und Vertragsmodell.

und die landwirtschaftliche Bewirtschaftung die Albedo 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.

In vielen Fällen wird sich die Fläche jedoch nicht im Eigentum des landwirtschaftlichen Betriebs befinden. Darauf weist der hohe Pachtanteil in Deutschland und vor allem in den neuen Bundesländern hin [26]. Verbleiben alle weiteren Funktionen beim Landwirtschaftsbetrieb, fallen auch bei dieser Konstellation die synergetischen Zusatznutzen an einer Stelle an. Daher sind, wie bei PV-FFA-Projekten, langfristige Verträge, üblicherweise über 20 Jahre, zur Landpacht und -nutzung notwendig.

Bei größeren Agri-PV-Systemen dürfte auch eine 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 Fremdkapitalanteil, desto schwieriger wird es jedoch, im laufenden Betrieb den Nutzen beider Produktionsebenen im Auge zu behalten. Für dieses Geschäftsmodell sprechen Skalierungsmöglichkeiten sowie mögliche Optimierungen durch eine höhere Arbeitsteilung.

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 31 dargestellt. Welche Konstellationen sich in Deutschland durchsetzen werden, ist derzeit offen und hängt wesentlich vom zukünftigen Regelrahmen ab. Weiterhin 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 bzgl. Nähe und Kapazität
- Reihenbewirtschaftung
- Dauerkulturen
- geschützter Anbau
- geringer Maschineneinsatz / niedrige Durchfahrtshöhe
- große, zusammenhängende Fläche (>1 Hektar)
- Geringe Hangneigung
- Hoher und flexibler Eigenverbrauch (z. B. Kühlung, Trocknung, Verarbeitung)
- Investitionsbereitschaft

3.4 Landwirte berichten

Die Erfahrungen der Landwirte in Heggelbach sind überwiegend positiv, sie zeigen jedoch deutlich die Grenzen des rechtlichen Regelwerks in Deutschland auf. In einen Interview erläutern Thomas Schmid und Florian Reyer, warum sie sich für eine Agri-PV-Anlage entschieden haben, wie praktikabel sie ist und was an den rechtlichen Regelungen geändert werden sollte. Thomas Schmid ist Mitbegründer der seit 1986 bestehenden Demeter-Hofgemeinschaft Heggelbach. Mittlerweile aus der aktiven Landwirtschaft zurückgezogen, ist er 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

Bild 32: Thomas Schmid und Florian Reyer. © AMA Film

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

Thomas: 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 z. B. die Wahrung der Bodenfunktionen berücksichtigt?

Thomas und Florian: 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.

Wie praktikabel ist für euch die Bewirtschaftung unter der Anlage?

Florian: 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?

Thomas: 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 (Anmerkung: aufgrund der fehlenden Einspeisevergütung) und mit Hilfe von unserem Praxispartner, den Elektrizitätswerken Schönau (EWS), die Speicherung, Steuerung und den Verbrauch an die Erzeugung anzupassen.

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

Florian: 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?

Florian: Das ist eine Frage der Voraussetzungen. Alles muss sich ändern!
Thomas: 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.
Florian: 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.
Thomas: Zudem ist noch mehr Forschung nötig, um die Technik auch in anderen Anwendungsgebieten zu erproben, z. B. Hopfenanbau, Obstbau und auch in der konventionellen Landwirtschaft.

4. TECHNIK

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

Um die Doppelnutzung der landwirtschaftlichen Fläche für Ackerbau und Stromerzeugung zu ermöglichen, werden die Solarmodule je nach Anwendung in typischerweise drei bis fünf (im Hopfenbau auch über sieben) Metern Höhe über dem Feld installiert. Das ermöglicht auch großen landwirtschaftlichen Maschinen, wie z. B. Mähdreschern die Fläche unter der Agri-PV-Anlage zu befahren. Damit die Pflanzen ausreichend Licht und Niederschlag bekommen, werden die Reihenabstände zwischen den Modulen im Vergleich zu gewöhnlichen PV-FFA vergrößert. Das reduziert den Flächendeckungsgrad auf etwa ein Drittel. In Kombination mit der hohen Aufständerung sichert dieses Vorgehen eine homogene Lichtverteilung und in Folge gleichmäßiges Pflanzenwachstum. Bei der Verwendung nachgeführter Module kann das Lichtmanagement spezifisch an den Entwicklungszustand und die Bedürfnisse der Kulturpflanzen angepasst werden [27].

Die Wahl der Unterkonstruktion, teilweise auch der Solarmodule, unterscheidet sich dabei zumeist wesentlich zu PV-FFA. Verschiedene Technologien und Bauformen passen sich an die standortspezifischen Anforderungen und die Landwirtschaft an. Deshalb empfiehlt es sich, das Lichtmanagement bei der Anlagenplanung zu berücksichtigen. Allgemein sollten Agri-PV-Anlagen dem aktuellen Stand der Technik sowie den gängigen Regelwerken und Normen entsprechen.

4.1 Ansätze für Agri-PV

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 zur Doppelnutzung der landwirtschaftlichen Fläche aufgezeigt.

Bild 33: PV-Module mit erweiterten Zellzwischenräumen und Schutzfunktion in den Niederlanden. © BayWa r.e.

Bild 34: Hoch aufgeständerte Anlage mit Möglichkeit zur Bewirtschaftung mit dem Kartoffelvollernter.
© Hofgemeinschaft Heggelbach

Hoch aufgeständerte Anlagen bergen großes Potenzial für Synergieeffekte (Kapitel 3), sie müssen jedoch eine Bewirtschaftung unter den PV-Modulen ermöglichen (Abb. 34).

Dabei können die PV-Module auch eine wichtige Schutzfunktion vor Hagel, Regen, Nachtfrost und anderen Extremwetterereignissen übernehmen. Abbildung 33 zeigt eine Forschungsanlage der Firma BayWa r.e. über einer Obstplantage. Diese Anlage aus den Niederlanden wurde mit Modulen gebaut, die erweiterte Zellzwischenräume aufweisen, was die Dach- und Schutzfunktion erhöht und gleichzeitig mehr Sonnenlicht für die Pflanzen zur Verfügung stellt als andere PV-Anlagen.

Synergieeffekte können ebenso bei bodennah montierten Modulen auftreten. Next2Sun verwendet hierzu bifaziale Module, die senkrecht aufgestellt werden. Diese Art von Anlagen ist aufgrund der niedrigeren Unterkonstruktion kostengünstiger, allerdings bieten sie auch weniger Optionen für das Lichtmanagement. Ein Vorteil der bodennahen Anlagen könnte jedoch eine Reduktion der Windgeschwindigkeit sein, welche sich auch auf die Verdunstung auswirkt.

Eine weitere Anwendung sind die von der Firma TubeSolar AG verwendeten horizontal aufgeständerten PV-Röhrenmodule. Dieser innovative Ansatz verspricht räumlich gleichmäßigen Licht-und Wasserdurchlässigkeit, was vor allem im Ackerbau ohne künstlicher Bewässerung vorteilhaft ist. Die Partnerfirma Agratio GmbH kombiniert diese neuartigen Module mit einer kostengünstigen Seilkonstruktion als Aufständerung.

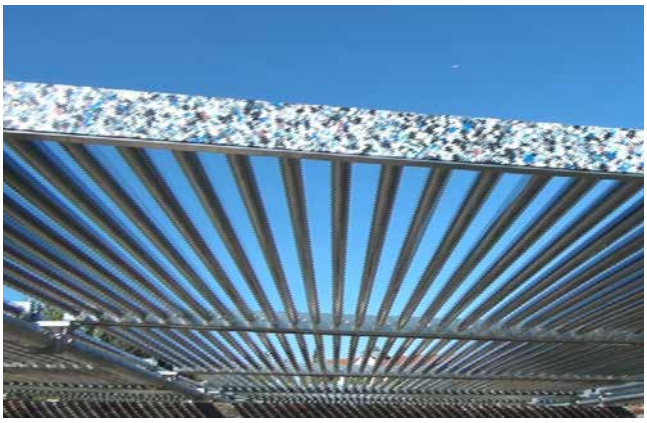


Bild 37: Spezielle Dünnschicht-Module in Röhrenform der Firma TubeSolar. © TubeSolar AG

Bild 35: Bifaziale, senkrecht aufgestellte Module von Next2Sun, Donaueschingen. © Next2Sun GmbH

Bild 38: Halbschatten durch Solarröhren, eingehängt zwischen Spannseilen der Firma TubeSolar. © sbp sonne gmbh

Bild 36: PV-Module über einem Folientunnel. © BayWa r.e.

Bild 39: Hoch aufgeständerte Anlagen mit schmalen PV-Modulen. © REM Tec

In Japan werden unter dem Begriff »Solar Sharing« besonders schmale Module über Ackerflächen installiert, um die Lichtverfügbarkeit anzupassen. Die Agri-PV-Anlagen dienen hier auch als zusätzliches Einkommen und Altersvorsorge für Landwirtinnen und Landwirte. Viele weitere, technische Lösungen sind denkbar und bieten sowohl unterschiedliche Vor- als auch Nachteile.

4.2 Modultechnologien

Grundsätzlich lassen sich alle Typen von Solarmodulen für Agri-PV nutzen. Module auf der Basis von waferbasierten Silicium-Solarzellen machen etwa 95% des PV-Weltmarkts aus. Der übliche Aufbau sieht eine vorderseitige Glasscheibe und eine rückseitige, weiße Deckfolie vor. Dazwischen werden opake (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 üblichen Modulen liegt der Flächenanteil der Zwischenräume bei vier bis fünf Prozent. Zur Steigerung der Lichttransmission können die Zwischenräume erweitert und die Modulrahmen durch Klemmhalterungen ersetzt werden. Module mit vergrößerten transparenten Flächenanteilen schützen Pflanzen vor Umwelteinflüssen, ohne die Lichtverfügbarkeit in gleichem Maße einzuschränken.

Bifaziale Module können auch das Licht, das auf der Rückseite eintrifft, zur Stromerzeugung nutzen. Durch sie können je nach Rückseitenstrahlung höhere Stromerträge von bis zu 25 Prozent erzielt werden. Durch die tendenziell größeren Reihenabstände und die höhere Aufständerung bei Agri-PV empfangen die Modulrückseiten besonders viel Licht. Damit eignen sich bifaziale Module meist sehr gut für Agri-PV. Auch für die Forschungsanlage Heggelbach wurden bifaziale Glas-Glas-Module verwendet. Ein weiterer Vorteil von Modulen mit Doppelglas-Aufbau ist die erhöhte Resttragfähigkeit bei Glasbruch, was der Verkehrs- und Arbeitssicherheit zugutekommt.

Bild 40: Hoch aufgeständerte Anlage mit durchgängigen Modulreihen. © Sun'Agri

Dünnschichtmodule (CIS, CdTe, a-Si/µ-Si) können auf flexiblen Substraten realisiert werden, die eine zylindrische Krümmung ermöglichen. Bei sonst gleichem Aufbau liegt ihr Flächengewicht um ca. 500 g/m^2 (Gramm pro Quadratmeter) niedriger als bei Modulen mit waferbasierten Silicium-Solarzellen, allerdings bieten sie etwas geringere Wirkungsgrade. Dünnschichtmodule liegen auch bei den flächenbezogenen Kosten etwas niedriger.

Gleiches gilt auch für die **organische Photovoltaik (OPV)**. Die aktiven Schichten der OPV lassen sich im Prinzip auch spektral selektiv einsetzen. So kann ein Teil des Sonnenspektrums transmittiert und von den darunter wachsenden Pflanzen genutzt werden. Die OPV befindet sich jedoch noch ein einem technisch nicht ausgereiften Stadium. Herausforderungen sind u. a. geringe Wirkungsgrade 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. Für den Einsatz bei Agri-PV gibt es aktuell nur sehr wenige kommerzielle Anbieter für OPV- und CPV-Module.

4.3 Unterkonstruktion und Fundament

4.3.1 Bauweise der Unterkonstruktion

Auch die Art der Unterkonstruktion muss an die landwirtschaftliche Nutzung und die jeweiligen Bedürfnisse angepasst werden. Beispiele hierfür sind die Planung der Anlagenhöhe und der Abstände zwischen den Stahlstützen. Wichtig ist, das Vorgewende, die Durchfahrtshöhe und die Arbeitsbreiten der später verwendeten landwirtschaftlichen Maschinen zu beachten. Die Forschungsanlage in Heggelbach wurde so konzipiert, dass selbst große Erntemaschinen durchfahren können. Der Abstand zwischen dem Grund und der Unterkante der Konstruktion beträgt dabei fünf Meter. Vorteile einer großen lichten Höhe sind neben den möglichen Synergieeffekten (Kapitel 3) die gute Befahrbarkeit der Fläche und die homogenere Lichtverteilung unter der Anlage. Anderer-

seits sind die Investitionskosten für die Unterkonstruktion bei Agri-PV-Anlagen mit niedriger Durchfahrtshöhe aufgrund eines verminderten Stahlverbrauchs und geringerer Ansprüche an die Statik entsprechend geringer.

Der Reihenabstand, die Ausrichtung sowie die Höhe der Agri-PV-Anlage sind von entscheidender Bedeutung, da sie die Lichtverfügbarkeit mitbestimmen. Deshalb sollten diese immer an die landwirtschaftlichen Erzeugnisse der Fläche angepasst werden. Beispielsweise beläuft sich der Reihenabstand der Forschungsanlage in Heggelbach auf 9,5 Meter bei einer Modulreihenbreite von 3,4 Metern. Je nach Schattentoleranz der Kulturpflanzen können diese Werte gegebenenfalls unter- oder überschritten werden. Mit deutlich größeren Reihenabständen erhöhen sich jedoch der Flächenbedarf und die Kosten einer Agri-PV-Anlage im Verhältnis zum Stromertrag.

4.3.2 Ein- und zweiachsige Nachführung

Es gibt Anlagen, beispielsweise in Frankreich, die mit einem 1- oder 2-achsigen Nachführsystem (Tracking) arbeiten. Das bedeutet, dass die Solarmodule durch einen Mechanismus der Sonne nachgeführt werden. Bei der einachsigen Photovoltaik-Nachführung folgt das Modulfeld der Sonne nur horizontal nach dem Anstellwinkel 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 des Ackers gar nicht beschattet werden. Eine Nachführung der PV-Module wurde in Voruntersuchungen der Anlage in Heggelbach für den Standort Deutschland als nicht wirtschaftlich eingestuft. Ungeachtet der höheren Anschaffungs- und Wartungskosten kann das Tracking jedoch die Energieerträge und das Lichtmanagement für den Pflanzenbau optimieren [27] (Kap. 4.4). Durch ein flaches Überdachen haben zweiachsig nachgeführte Systeme das Potenzial zum Schutz der Pflanzen vor Hagel oder extremer Sonne, während in der Wachstumsperiode die Verschattung reduziert werden kann.

4.3.3 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 (Kap. 4.8.2. Installation und Betrieb). Um die wertvollen landwirtschaftlichen Böden zu erhalten, wird von einem permanenten Betonfundament abgeraten. Alternativen sind Rammfundamente oder spezielle Verankerungen mit Spinnankern. Dabei wird kein Beton in die Fläche eingebracht, was den rückstandslosen Abbau der Anlage ermöglicht.

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.

Bild 41: Einachsiges Trackersystem einer Demonstrationsanlage in Frankreich. © Sun'Agri

Bild 42: Spinnanker mit Ankerplatte und Gewindestäben fundamentieren das Montagesystem im Boden. © Spinnanker

Bild 43: Illustration verschiedener Anlagentypen mit Ost-West-, Süd- und Süd-Ost-Ausrichtung. © Fraunhofer ISE

4.4 Lichtmanagement

Durch den täglichen Lauf der Sonne und sich über das Jahr hinweg verändernde Sonnenstände wird die landwirtschaftliche Fläche jeweils unterschiedlich verschattet. Eine möglichst hohe Lichthomogenität ist jedoch wünschenswert, um gesundes Pflanzenwachstum, eine gleichmäßige Abreife und eine Maximierung der potenziellen Synergieeffekte zu erzielen. Dies kann auf verschiedene Weise erfolgen:

1). In Heggelbach wurde von einer nach Süden (0°) weisenden Ausrichtung abgesehen. Simulationen und Messungen ergaben, dass eine Orientierung nach Süd-Westen oder Süd-Osten mit einer Abweichung von Süden um jeweils 45° am besten geeignet ist. 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 wie beim Solar Sharing in Japan zu verwenden.

3). Gleichmäßige Lichtverhältnisse können auch durch eine Ost-West-Ausrichtung der Module erzielt werden. Die Schattenwanderung über den Tag hinweg ist bei dieser Orientierung 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 Durchfahrtshöhe 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 ja nach Grad der Lichtdurchlässigkeit (Verweis: 4.3.2 Nachführung).

4). Eine weitere Möglichkeit, für gezieltes Lichtmanagement und hohe Stromerträge ist eine ein- oder zweiachsige Nachführung von PV-Modulen. Wie bereits in Kapitel 4.3.2 beschrieben, ist diese Variante allerdings mit höheren Investitions- und Wartungskosten verbunden. Systeme, die mit großen Modultischen über zwei Achsen nachführen, sind für Kulturpflanzenanbau tendenziell weniger zu empfehlen, da es hinter den Modulen zu Kernschatten kommt. Andere Bereiche der Fläche sind dagegen permanent der vollen Sonnenstrahlung ausgesetzt.

In Heggelbach wurde bei einem Neigungswinkel der PV-Module von 20° der Reihenabstand der PV-Modulreihen gegenüber einer herkömmlichen PV-FFA um rund 60 Prozent vergrößert. Dadurch stehen den Pflanzen rund 69 Prozent der ursprünglichen Sonneneinstrahlung zur Verfügung.

Bild 44: Die Schattenstreifen der Solarmodule wandern mit dem Sonnenstand. © Universität Hohenheim

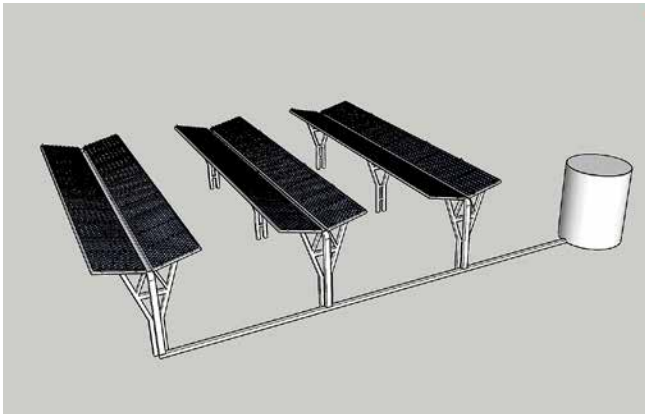


Bild 45: Konzept einer Regenauffangvorrichtung mit unterirdischem Speichertank. © Fraunhofer ISE

4.5 Wassermanagement

Bei Regen kann es durch das Abtropfen von Wasser von den Modulen zu einer Abtropfkante und damit verbunden zur Bodenerosion durch ein Abschwemmen des Bodens kommen.

Um bei gefährdeten Standorten und Anwendungen negative Folgen für das Pflanzenwachstum zu vermeiden, bieten sich beim Anlagendesign verschiedene Ansätze für das Wassermanagement an: So können, ähnlich wie beim Lichtmanagement, schmale PV-Module oder PV-Röhren die Ansammlung größerer Wassermengen unter der Modulkante verhindern. Soll durch die 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 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.

4.6 Größe der Photovoltaikanlage

Die durchschnittlichen Größen von Agri-PV-Anlagen weisen international große Unterschiede auf. Entscheidende Kriterien sind neben der Wirtschaftlichkeit, der Dezentralität und

Bild 46: Agri-PV-Anlage in Heggelbach mit einer Leistung von 194 kW_p. © BayWa r.e.

Bild 47: Solarpark Eppelborn-Dirmingen mit 2 MW_p mit vertikalen Solarzäunen von Next2Sun. © Next2Sun GmbH

CHECKLISTE FÜR TECHNISCHE ANPASSUNGSMÖGLICHKEITEN

- Welche lokalen Gegebenheiten, wie z. B. Ackerschlag, Fahrtrichtung, Vorgewende der Landmaschinen oder Bewässerungsanlagen beeinflussen die Ausrichtung der Module?
- Sind die Unterkonstruktion und die Maße der Stützen und Träger an die Arbeitsbreite der Landmaschinen angepasst? Sollte ein Rammschutz an der Unterkonstruktion angebracht werden?
- Welche Modultechnologie soll verwendet werden? Die Wahl sollte immer an die landwirtschaftliche Nutzung und die Erzeugnisse angepasst sein.
- Welches System zur Verankerung oder Fundamentierung soll verwendet werden, um einen rückstandslosen Abbau der Anlage zu gewährleisten?
- Welche Wind- und Schneelasten liegen vor und welche zusätzlichen Lasten ergeben sich durch die Aufständerungshöhe für die Unterkonstruktion?
- Leben Sie in einer Region mit sehr starken Niederschlägen? Gegebenenfalls ist die Installation von Regenwasserverteilern oder eines Auffangsystems nützlich.
- Ist der Einsatz von Batteriespeichern technisch und wirtschaftlich sinnvoll?
- In welchem Monat liegen für den Bau günstige trockene Bodenverhältnisse vor? Wann liegt das Feld brach und können Bodenplatten für die Maschinen verlegt werden? So können Sie einer Verdichtung des Bodens vorbeugen.
- Welche Maßnahmen können getroffen werden, um eine Beeinträchtigung der Kulturlandschaft zu verhindern?

Tabelle 4: Übersicht über Genehmigungsschritte für Agri-PV.

Prozessschritte	Institution	Anmerkungen
Baugenehmigung	Gemeinde	Flächennutzungsplan und Bebauungsplan
Erforderliche Gutachten	Zertifizierte Gutachter*innen	Umwelt-, Boden-, und Blendschutzgutachten. Zudem Windlastenprüfung
Eintragung der Grunddienstbarkeiten	Grundbuchamt	z. B. Wegerecht und Eigentumsverhältnisse Antragstellung erfolgt über Notar*in
Versicherung	Versicherungsgesellschaft	Eine Studie, die gemeinsam mit der Gothaer Versicherung durchgeführt wurde, hat ergeben, dass die Versicherungssumme einer Agri-PV-Anlage nicht wesentlich teurer sein sollte als die einer vergleichbaren herkömmlichen Solaranlage.

sozialen Aspekten vor allem Auswirkungen auf die Kulturlandschaft und damit auf die gesellschaftliche Akzeptanz. In Japan beispielsweise sind eher kleinere Anlagen von 30 bis 120 kW_p anzutreffen, während in China bereits Kraftwerke von mehreren hundert MW_p gebaut wurden. Welchen Pfad Deutschland beschreiten wird, ist offen und dürfte auch von Region zu Region unterschiedlich beurteilt werden. In eher kleinflächigen und ästhetisch sensibleren Regionen Süddeutschlands liegt die Umsetzung kleinerer Systeme nahe, typischerweise über Sonderkulturen. In großflächigen Regionen Nord- und Ostdeutschlands könnten hingegen größere Systeme auch im Ackerbau sinnvoll sein, auch, um eine geringere jährliche Sonneneinstrahlung wirtschaftlich durch Skaleneffekte zu kompensieren.

Der Flächenbedarf von Agri-PV-Systemen liegt typischerweise 20-40 Prozent über dem von PV-FFA. Ein Agri-PV-System hat aktuell eine Leistung von 500 bis 800 kW_p pro Hektar, eine konventionelle PV-Anlage je nach System dagegen 600 bis 1100 kW_p pro Hektar. Der Einsatz von bifazialen Modulen kann den Stromertrag erhöhen: Die Forschungslage in Heggelbach erzeugte im ersten Betriebsjahr 1284 kWh pro kW_p Leistung, während eine herkömmliche Solaranlage an diesem Standort lediglich 1209 kWh je kW_p erzeugt.

Bild 48: Baustraßen zur Vermeidung von Bodenverdichtung.
© BayWa r.e.

4.7 Genehmigung, Installation und Betrieb

4.7.1 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 den Technikpartnern erfolgen. Tabelle 4 gibt einen Überblick über die erforderlichen Genehmigungen, Gutachten und Dokumente.

Die Ackerfläche 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. Bisher wird die Agri-PV-Freiflächentechnologie außerdem weder über eine Förderberechtigung nach der Freiflächenausschreibungsverordnung noch über eine gesetzlich festgesetzte Zahlung gefördert. Weitere Informationen zu Genehmigungsverfahren sind in Kapitel 6.1 zu finden.

Bislang gibt es kein Zertifizierungssystem für Agri-PV-Anlagen in Deutschland. Das Fraunhofer ISE arbeitet derzeit mit Projektpartnern an der Erstellung einer DIN Spezifikation, um Qualitätsstandards zu definieren, die als Kriterien für Ausschreibungen, Fördertatbestände oder erleichterte Planungsprozesse dienen können. Hierzu gehört die Definition von Agri-PV-Messzahlen und entsprechende Prüfverfahren, die von Zertifizierern wie dem Verband für Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik (VDE) oder dem TÜV angewendet werden können.

4.7.2 Installation einer Agri-PV-Anlage am Beispiel Heggelbach

Eine Agri-PV-Anlage sollte an die jeweiligen Standortgegebenheiten und die landwirtschaftliche Bewirtschaftungsweise angepasst werden. Projektierung und Bauleitplanung werden in der Regel von einer Firma übernommen. Im Fall der Forschungsanlage in Heggelbach erfolgte dies durch BayWa r.e..

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

- Partnersuche zur Abnahme des überschüssigen Stroms und zur Netzeinspeisung
- Materialbeschaffung und Logistikplanung
- Baustelleneinrichtung und Bodenschutz
- Aufbau der Anlage
- Konzept für Verschaltung, Blitzschutz und Monitoring
- Netzanschluss
- Technische Instandhaltung und Rückbau

Nachdem am 13.10.2015 die erste Anhörung zum Bebauungsplan für die Forschungsanlage im Gemeinderat Herdwangen-Schönach stattfand, konnte nur sechs Monate später, am 6.04.2016, der Bauantrag eingereicht werden. Bereits am 24.07.2015 erhielt das Fraunhofer ISE die Bewilligung des Netzanschlusses von der Netze BW. Am 03.05.2016 wurde die Baugenehmigung erteilt. Die Baufreigabe wurde allerdings an die Überprüfung der Statik durch ein unabhängiges Prüfingenieursbüro geknüpft. Um die tatsächliche Haltekraft der Gründung zu berechnen und nachzuweisen, wurde zudem ein Bodengutachten erstellt. Die Ergebnisse dieses Gutachtens sowie die Rückmeldungen des Prüfingenieurs sind in die Überarbeitung der Agri-PV-Unterkonstruktion eingeflossen.

Aufträge für die Installation der Agri-PV-Forschungsanlage wurden gemäß Beschaffungsordnung an diverse Unternehmen vergeben und der Bauablauf in enger Absprache mit der Hofgemeinschaft Heggelbach detailliert koordiniert. Die Leistungselektronik und Verkabelung der Agri-PV-Anlage wurde installiert, sodass die Forschungsanlage nach der Fertigstellung zügig ans Netz angeschlossen werden konnte. Die Berechnungen zur Statik wurden durchgeführt und die Agri-PV-Anlage entsprechend angepasst. Unter anderem musste zusätzlich zu den Spinnankern noch ein Alpinanker zur Fundamentierung der Agri-PV-Anlage angebracht werden.

Gemäß der ursprünglichen Zeitplanung war der Baubeginn für Juli 2016 vorgesehen. Aufgrund diverser baurechtlicher Verzögerungen konnten die Vorarbeiten jedoch nicht rechtzeitig abgeschlossen werden, sodass sich der Baubeginn auf Anfang August 2016 verschob. Dennoch gelang es, die Anlage rechtzeitig zur Eröffnungsfeier am 18.09.2016 fertigzustellen.

4.7.3 Agri-PV im laufenden Betrieb

Durch den Anbau der Nutzpflanzen und die Aufständerungshöhe sind die Solarmodule nicht zu jeder Zeit voll erreichbar. Instandhaltungs- und Reparaturarbeiten sollten deshalb zu Brachezeiten vorgenommen werden. Dabei geht Sicherheit vor und nicht alle Wartungsfahrzeuge eignen sich zur Verwendung auf dem Acker. Künftig sollte ein anwendbares Wartungs- und Instandhaltungskonzept erarbeitet werden, bei dem Wartungsintervalle und der Umfang der Instandhaltungen festgelegt sowie mögliche Kosten kalkuliert werden.

Bild 49: Wartungsarbeiten an der Agri-PV-Anlage in Heggelbach.
© Fraunhofer ISE

5. GESELLSCHAFT

Neben technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Aspekten der Agri-PV ist die frühzeitige Einbindung und vertrauensvolle Zusammenarbeit mit verschiedenen Interessensgruppen und »betroffenen« Bürgerinnen und Bürgern – bereits während des Planungsprozesses – 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. Eine inter- und transdisziplinäre Vorgehensweise trägt dazu bei, die verschiedenen Interessen und Erwartungen, aber auch Präferenzen und Befürchtungen angemessen zu berücksichtigen, Akzeptanzprobleme zu verringern und mit lokalen Investoren die Energiewende vor Ort voranzutreiben. Damit werden die Akteursvielfalt auf Investorenseite und die lokale Wertschöpfung gesteigert und die Interessen der Bevölkerung bereits im Vorfeld der Entscheidung über den Bau einer Anlage berücksichtigt.

Bild 50: Bürgerinformationsveranstaltung im Projekt APV-RESOLA.
© ITAS

Ein verstärkter Ausbau der erneuerbaren Energieerzeugung findet in allen Bevölkerungsschichten breite generelle Zustimmung. Dies zeigen die Meinungsumfragen der letzten Jahre; die Zustimmungswerte liegen meist zwischen 70 und 90 Prozent. Auch Jugendbewegungen wie Fridays for Future engagieren sich für eine raschere und konsequentere Transformation des Energiesystems. Dennoch stockt der Ausbau der erneuerbaren Energieversorgung, wenn es darum geht, geeignete Standorte für den Bau von PV-FFA oder Windkraftanlagen zu finden oder konkrete Projekte zu realisieren, selbst wenn diese auf planungsrechtlich und kommunalpolitisch korrekte Weise zustande gekommen sind [29]. Die Gründe für das Auseinanderklaffen zwischen einer allgemeinen gesellschaftlichen Akzeptanz der Energiewende und einer sehr konkreten, ablehnenden Haltung beim Ausbau erneuerbarer Erzeugungsanlagen zur Umsetzung der Energiewende vor Ort sind vielfältig. Vor allem aber spielen subjektive Risiko- und Nutzenabwägungen eine bedeutende Rolle: Sie führen zu Befürchtungen über mögliche finanzielle, gesundheitliche und ästhetische Nachteile, die mit lokalen Veränderungen der Umwelt, insbesondere der Flächennutzung und des Landschaftsbildes, einhergehen würden [29].

Diese Beobachtungen treffen insbesondere auf den Bau von Solarparks zu, die inzwischen in Deutschland auch ohne Förderung durch das EEG großflächig errichtet werden. Ein prominentes Beispiel ist der ohne staatliche Vergütung geplante Solarpark Weesow-Willmersdorf in Brandenburg. Mit einer installierten Leistung von mehr als 180 MW auf einer Fläche von 164 Hektar bietet er eine nachhaltige Energieversorgung für rund 50.000 Haushalte. Der große Flächenbedarf von Solarparks erhöht die Nachfrage nach begrenzt verfügbaren landwirtschaftlichen Flächen. Dies kann regionale Flächennutzungskonkurrenzen verschärfen und zu höheren Pachtpreisen und gesellschaftlichen Kontroversen führen.

5.1 Einbindung von Bürgerinnen und Bürgern sowie Interessensgruppen

Um Konflikten vorzubeugen, sollten Bürgerinnen und Bürger sowie andere Interessensgruppen frühzeitig in Infrastrukturprojekte eingebunden werden. Im Rahmen des Forschungsprojekts APV-RESOLA hat deshalb das Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) die regionalen Interessensgruppen sowie die lokal ansässigen Bürgerinnen und Bürger in das Projekt eingebunden und ihre Erwartungen und Befürchtungen analysiert [30]. So wurden unterschiedliche gesellschaftliche Sichtweisen und Perspektiven erfasst.

Der Fokus im Projekt lag auf der anwendungsbezogenen Identifizierung und Analyse von Meinungsbildern und normativen Wertemustern, möglichen Hindernissen und Treibern [31]. Die Intenion dabei war, Erfolgsfaktoren zu erarbeiten und gesellschaftlich relevante Zukunftsfragen der nachhaltigen, dezentralen Energieversorgung zu beantworten. Demzufolge war dieser Forschungstyp im konkreten Technikentwicklungsprojekt darauf ausgelegt, die Erkenntnisse, Erfahrungen, Perspektiven und Präferenzen von Bürgerinnen und Bürgern sowie Interessensgruppen zu erfassen, Gemeinsamkeiten und Unterschiede in der individuellen Wahrnehmung, Einschätzung und Bewertung der Agri-PV-Technologie zu analysieren und mögliche Konfliktlinien frühzeitig zu erkennen. Hierauf aufbauend sollten im Technologieentwicklungsprozess und bei der Anlagenplanung für Bürgerinnen und Bürger und weitere Akteurinnen und Akteure geeignete Rahmenbedingungen und Regelungen für akzeptierbare Agri-PV-Anlagen erarbeitet werden.

Da es sich bei einer Agri-PV-Anlage um eine interdisziplinäre, d. h. sektorenübergreifende Unternehmung zwischen Landwirtschaft und Energieversorgung handelt, ist die Kommunikation mit allen Beteiligten von herausragender Bedeutung. Das Forschungsprojekt hat gezeigt, wie wichtig es ist, Landwirtschaft, Energiewirtschaft, Netzbetreiber, Kommunen und Bürgerinnen und Bürger an einen Tisch zu bekommen, um ein gegenseitiges Verständnis für Interessen, Präferenzen und Befürchtungen zu schaffen und eine gemeinsame Vision der Energiewende zu entwickeln, die Erfolgsbedingungen zu erarbeiten und geeignete Standort zu identifizieren. Dies hilft, eine konkrete Planung zur Gestaltung der dezentralen erneuerbaren Energieversorgung und zum Erhalt der wertvollen Ackerböden und der Biodiversität sowie »unberührter« Erholungslandschaften zu erarbeiten.

5.2 Ansätze und Methoden zur Einbindung

Die Einbindung von Bürgerinnen und Bürgern sowie Interessensgruppen in den Forschungsprozess bedarf einer klaren Rahmung der Beteiligung und sollte auf einem geteilten Problemverständnis, wie dem anthropogen erzeugten Klimawandel, und einer gemeinsam entwickelten Vision, wie der dezentralen Energiewende aufbauen. Die Forschungs- und Projektziele sollten klar und offen kommuniziert werden, um Missverständnisse über die Rolle und den Prozess der Bürger- und Interessensgruppenbeteiligung zu vermeiden und keine falschen Hoffnungen zu wecken [29]. Sind diese Bedingungen nicht erfüllt, kann es zu Enttäuschungen und Konflikten aufgrund unterschiedlicher, nicht erfüllter Erwartungen kommen und das zuvor aufgebaute Vertrauensverhältnis zwischen den Akteuren beeinträchtigt oder gar zerstört werden. Der Verständigungsprozess sollte ermöglichen, dass die Eigenlogiken und -interessen der Beteiligten überwunden werden: zum einen die der Wissenschaft, die nach skalierbaren Lösungen sucht und an Veröffentlichungen nach wissenschaftlichen Standards interessiert ist, und zum anderen der Praxis, die nach maßgeschneiderten, einfach umsetzbaren, wirksamen und marktfähigen Lösungen sucht [29].

Die transdisziplinäre Forschung baut auf Methoden und Instrumenten der empirischen Sozialwissenschaften auf und nutzt je nach Problem- und Fragestellung ein breites Spektrum an Ansätzen, das von sogenannten Bürgerforen bis zu Interessensgruppen-Workshops reicht. Charakteristisch für den Co-Design-Ansatz in der Technologieentwicklung ist das transdisziplinäre Forschungsformat zur gemeinsamen Bearbeitung praxisrelevanter Fragestellungen durch Wissenschaft, Wirtschaft und Industrie, Politik und Administration

Bild 51: Modell der Heggelbach-Anlage für Informationsveranstaltungen. © Fraunhofer ISE

sowie der Gesellschaft. Wenn diese Entwicklungen vor ihrer Markteinführung »vor Ort« erprobt und im kleinen Maßstab getestet werden, können Konfliktlinien frühzeitig identifiziert und die Akzeptanzkriterien von neuen Technologien und Investitionsentscheidungen ausgelotet werden.

Im Projekt APV-RESOLA wurde am Standort der Pilotanlage auf einer Fläche 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 forderte das Institut für Technologiefolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) alle Bürgerinnen und Bürger zwischen 18 und 80 Jahren im direkten Umfeld der geplanten Pilotanlage auf, ihr Interesse an einer Prozessbeteiligung zu bekunden. Mit den Interessierten fand dann ein ergebnisoffenes Brainstorming zu Chancen und Herausforderungen der Agri-PV statt. Ein Jahr nach dem Bau der Anlage wurden die Teilnehmerinnen und Teilnehmer der ersten Veranstaltung erneut eingeladen. Ziel der zweiten Bürgerwerkstatt war, mögliche Veränderungen im Meinungsbild sowie in den Bewertungsmustern zu analysieren. Zudem wurde ein Planspiel zur Entwicklung von Kriterien für die Standortsuche entwickelt und angewendet. Noch vor der zweiten Bürgerwerkstatt führten die Forschenden eine Umfrage durch, um die Ergebnisse der ersten Bürgerwerkstatt, die auf dem Konzept der Agri-PV beruhten, mit Eindrücken der Bevölkerung nach der ersten persönlichen Begutachtung der Pilotanlage abzugleichen.

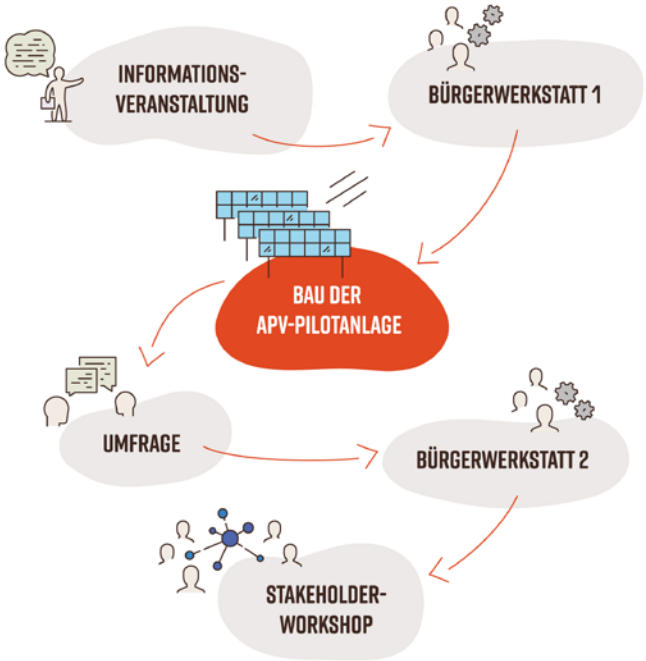


Bild 52: Mehrstufiger transdisziplinärer Agri-PV-Forschungsansatz.
© ITAS

Anschließend diskutierten Interessensgruppen aus Technologieentwicklung, Vermarktungsunternehmen, Politik, Kommunal-, Regional- und Landesverwaltung, Landwirtschaft, Naturschutz, Energiewirtschaft, Energiegenossenschaften, Tourismus und Bürgerschaft die Ergebnisse der Bürgerwerkstatt sowie die Anregungen und Ideen der Bürgerinnen und Bürger zur nachhaltigeren Gestaltung der Agri-PV-Technologie und ihre Rahmung. 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.

5.3 Erfolgsfaktoren

Die transdisziplinäre Forschung im Agri-PV-Projekt hat die folgenden zehn wesentlichen Erfolgsfaktoren für die Technologie der Agri-PV identifiziert:

1). Das vorhandene PV-Potenzial an Dachflächen, Industriegebäuden und Parkplätzen sollte prioritär genutzt werden, bevor Standorte für Agri-PV-Anlagen gesucht werden.
2). Die Agri-PV-Anlagen sollten in die dezentrale Energieversorgung integriert werden, um den Solarstrom zur Eigenversorgung oder für Prozesse mit höherer Wertschöpfung, z. B. zur Bewässerung, zur Kühlung oder Verarbeitung landwirtschaftlicher Erzeugnisse, zu nutzen.
3). Die Agri-PV-Anlagen sollten mit einem Energiespeichersystem zur Erhöhung der Ressourceneffizienz kombiniert werden, um Stromangebot und -nachfrage lokal zusammenzubringen.
4). 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 unterbinden.
5). Die Agri-PV-Anlagen sollten an Standorten errichtet werden, an denen durch die Doppelnutzung der Fläche Synergien entstehen können, z. B. durch die Schattenwirkung zur Minderung von Hitzestress bei Kulturpflanzen oder die Strombereitstellung für eine Bewässerung der Kulturen oder digitale Landbewirtschaftung mit elektrifizierten und zukünftig autonomen Systemen.
6). Die Größe und Konzentrierung der Agri-PV-Anlagen sollten begrenzt und analog zu Windkraftanlagen Mindestabstände zu Wohngebieten unter Berücksichtigung lokaler Standorteigenschaften und gesellschaftlicher Präferenzen festgelegt werden.

7). Agri-PV-Anlagen dürfen die Qualität der Nah- und Fernerholungsfunktionen und des attraktiven Landschaftsbilds nicht negativ verändern. Standorte mit natürlichem Sichtschutz (z. B. am Waldrand) oder flache Standorte sollen bevorzugt ausgewählt werden, um die Anlagen bestmöglich in das Landschaftsbild zu integrieren und »unsichtbar« zu machen.
8). Die Genehmigung von Agri-PV-Anlagen sollte anhand strenger rechtlicher Regularien und mit Bürgerbeteiligung erfolgen, um einen »Wildwuchs an Agri-PV-Anlagen« zu vermeiden, wie dies bei Biogasanlagen durch das privilegierte Baurecht der Landwirtschaft der Fall war. Bei der Identifizierung von Standorten für Agri-PV-Anlagen sollten die Kommunen und Bürgerinnen und Bürger ein Mitbestimmungsrecht haben.
9). Die Errichtung und der Betrieb von Agri-PV-Anlagen sollten bevorzugt durch ortsansässige Landwirtschaftsbetriebe, Energiegenossenschaften oder regionale Investoren erfolgen.
10). Die nicht landwirtschaftlich nutzbaren Zwischenstreifen der Agri-PV-Anlagen sollten als Erosionsschutzstreifen und als Korridorbiotope zum Erhalt der Biodiversität in der Agrarlandschaft dienen.

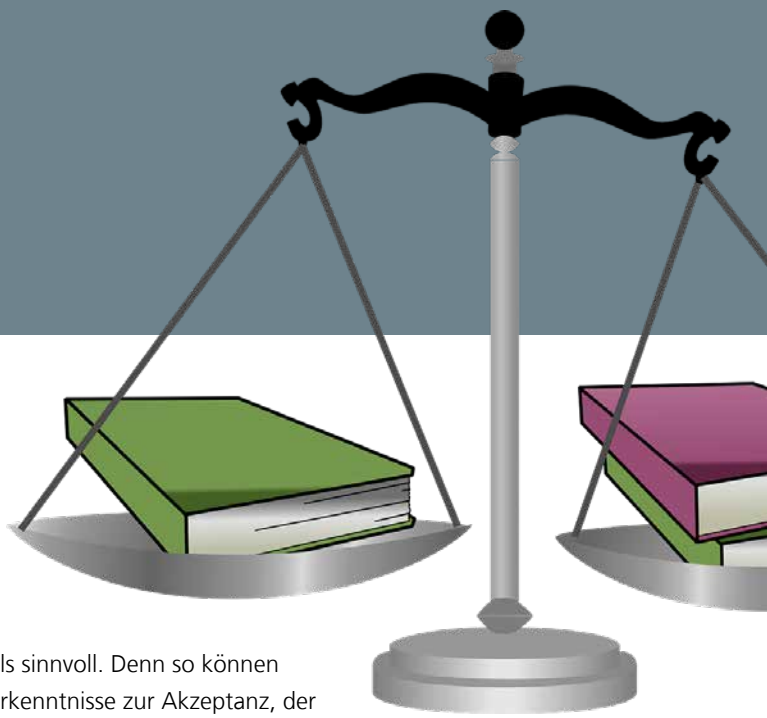
Unterschiede der Akzeptanz hinsichtlich verschiedener landwirtschaftlicher Anwendungen

Bei Sonder- und Dauerkulturen ist tendenziell eine höhere gesellschaftliche Akzeptanz als im Ackerbau zu erwarten. Denn zum einen ist die optische Beeinträchtigung durch eine niedrigere Durchfahrtshöhe geringer. Zum anderen gibt es hier durch Folientunnel oder Hagelschutznetze auch ohne Agri-PV 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 Akzeptanzfähigkeit in der Bevölkerung und auch bei den potentiellen Anwenderinnen und Anwendern. Der landwirtschaftliche Mehrwert kann sich aus verschiedenen Vorteilen der Agri-PV-Anlage speisen, bspw. durch Verringerung des Hitzestresses für die Kulturpflanzen durch Beschattung, Erosionsschutz, Bewässerung mit regenerativ erzeugtem Strom, höhere Biodiversität oder stabile Erträge auch unter den erschwerten Bedingungen des Klimawandels. Der Nachweis und die Realisierung dieser Vorteile dürften eine entscheidende Rolle dabei spielen, die Akzeptanzfähigkeit der Agri-PV-Analgen in der Bevölkerung zu verbessern und die mit der Integration von Photovoltaik in die Landwirtschaft verbundenen Potenziale zu erschließen.

Die Schlaggrößen von Sonder- und Dauerkulturen sind meist kleiner als die im Ackerbau. Damit dürfte typischerweise eine geringere Anlagengröße einhergehen. Somit könnten die Agri-PV-Anlagen möglicherweise besser in das Landschaftsbild integriert und der PV-Strom zum Eigenverbrauch herangezogen werden, was sich wiederum positiv auf die Akzeptanz auswirken würde.

Bild 53: 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

6. POLITIK UND RECHT



Die deutsche Bundesregierung hat sich zum Ziel gesetzt, den Anteil des aus erneuerbaren Energien erzeugten Stroms am Bruttostromverbrauch bis zum Jahr 2025 auf 40 bis 45 Prozent, bis zum Jahr 2035 auf 55 bis 60 Prozent und bis zum Jahr 2050 auf mindestens 80 Prozent zu steigern. Um diese Ziele zu erreichen, gehen Szenarien von einem notwendigen Ausbau der PV auf bis zu 500 GW aus. Dies entspricht ungefähr einer Verzehnfachung der momentanen PV-Kapazitäten. Ein nennenswerter Teil des Photovoltaik-Ausbaus wird voraussichtlich auf der freien Fläche stattfinden – hier ist Photovoltaik 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 u. a. fruchtbare Böden für die Nahrungsmittelproduktion erhalten bleiben. Aktuell werden in Deutschland täglich rund 56 Hektar als Siedlungsflächen und Verkehrsflächen neu ausgewiesen. Dies entspricht einem Flächenverbrauch von circa 79 Fußballfeldern. Neben Photovoltaikanlagen auf Dächern, an Fassaden, auf versiegelten Flächen und Tagebau-Seen könnte auch die Agri-PV zu einer flächenneutralen und gleichzeitig klimafreundlichen Stromerzeugung beitragen.

Ohne eine Einbettung in die rechtlichen 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 für neue Technologien, die selbst noch keine Lern- und Skaleneffekte realisieren konnten, aber dennoch mit etablierten Technologien konkurrieren müssen.

Soll die Agri-PV weiter untersucht und deren Potenzial gehoben werden, erscheint deswegen neben weiteren Forschungsprojekten eine marktnahe Umsetzung von Praxisanlagen als 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 zu lernen und mit geeigneten Förderinstrumenten den Weg für eine Weiterentwicklung der Technologie zu ebnen. Ein logischer nächster Schritt könnte eine EEG-Sonderausschreibung und eine entsprechende Erweiterung der Flächenkulisse für Agri-PV sein.

6.1 Gesetzliche Rahmenbedingungen

Im Folgenden werden die wichtigsten gesetzlichen Rahmenbedingungen überblicksartig dargestellt. Dabei kann hier nicht auf alle rechtlichen Aspekte und Fallkonstellationen eingegangen werden. Letztlich muss jeder Einzelfall individuell betrachtet und gewürdigt werden.

6.1.1 EU-Direktzahlungen

Im Rahmen ihrer Agrarpolitik gewährt die EU Direktzahlungen für Flächen, die primär landwirtschaftlich genutzt werden. Eine wichtige Frage ist nun, ob eine landwirtschaftliche Fläche aufgrund der Nutzung von Agri-PV ihre Beihilfefähigkeit verliert. Interessant ist in diesem Zusammenhang ein Urteil des Bundesverwaltungsgerichts (BVerwG) zu einem sog. Maislabyrinth[1]. Nach Auffassung des BVerwG steht ein solches Maislabyrinth der Beihilfefähigkeit nicht entgegen, weil es – verkürzt gesagt – die landwirtschaftliche Nutzung der Fläche nicht stark einschränkt. Was lässt sich aus dem Urteil für Agri-PV ableiten?

Sowohl vertikal als auch horizontal aufgeständerte Agri-PV-Anlagen ermöglichen eine gemischte Nutzung solarer Stromproduktion und landwirtschaftlicher Nutzung auf derselben Fläche. Während die landwirtschaftliche Nutzung bei vertikalen PV-Agri-Anlagen in den Reihenzwischenräumen erfolgt, wird bei horizontal ausgerichteten Anlagen die Fläche unterhalb der Module bewirtschaftet. Entscheidend ist dann, ob die Fläche weit überwiegend für landwirtschaftliche Zwecke genutzt wird. Zwar wird in § 12 Abs. 3 Nr. 3 DirektZahlDurchfV bestimmt, dass Flächen, auf denen sich Anlagen zur Nutzung von solarer Strahlungsenergie befinden, hauptsächlich für eine nicht-landwirtschaftliche Tätigkeit genutzt werden. Folgt man der Sichtweise 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 das Verwaltungsgericht Regensburg in einem Fall, in dem Schafe unter einer PV-Anlage weideten[2]. 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, weil parallel eine anderweitige Tätigkeit ausgeübt wird. Das war in dem zu entscheidenden Fall nicht gegeben. Daher waren die Beihilfen nach Auffassung des Gerichts zu gewähren[3].

Da bei einer sachgemäßen Planung und Installation einer Agri-PV-Anlage die landwirtschaftliche Nutzung einer Fläche nicht oder nur in sehr geringem Maß beeinträchtigt wird (z. B. durch die Verankerung des PV-Befestigungssystems), sprechen gute Argumente dafür, dass Landwirtschaftsbetriebe im Einklang mit den EU-rechtlichen Vorgaben für Direktzahlungen stehen und diese für die Bewirtschaftung der Fläche trotz der Agri-PV-Anlage erhalten können sollten. Eine Konkretisierung der nationalen Direktzahlungen-Durchführungsverordnung könnte für die Betreiber Planungssicherheit schaffen. Solange dies nicht der Fall ist, bietet es sich grundsätzlich an, frühzeitig das Gespräch mit der Behörde zu suchen und diese von dem Vorliegen der Voraussetzungen zu überzeugen.

6.1.2 Öffentliches Recht

Bei Agri-PV handelt es sich üblicherweise um bauliche Anlagen im Sinne des Bauordnungsrechts. Für deren Errichtung ist üblicherweise eine Baugenehmigung[4] erforderlich. Sie wird erteilt, wenn öffentlich-rechtliche Vorschriften nicht dagegen sprechen. Zu den öffentlich-rechtlichen Vorschriften zählen u. a. bauordnungsrechtliche Vorgaben (bestimmt sich nach den Bauordnungen der Länder) und bauplanungsrechtlichen Vorgaben (bestimmt 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 (vgl. §§ 30, 31, 33 BauGB). Auf einem unbeplanten Grundstück hängt die bauplanungsrechtliche Zulässigkeit davon ab, ob sich das Vorhaben im Innenbereich (vgl. § 34 BauGB) oder im Außenbereich (vgl. § 35 BauGB) befindet.

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 ausnahmsweise unzulässig, wenn ihnen öffentliche Belange entgegenstehen. Sonstige Vorhaben sind dagegen nach § 35 Abs. 2 BauGB im Außenbereich grundsätzlich 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 beispielsweise ein Vorhaben, wenn es u. a.

- 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

---

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

2 Vgl. Urt. v. 15.11.2018, Az. RO 5 K 17.1331.

3 Weiterführend auch EuGH, Urt. v. 02.07.2015, Az. C-684/13 (sog. Demmer-Urteil); VGH München, Urt. v. 19.04.2016, Az. 21 B 15-2391.

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

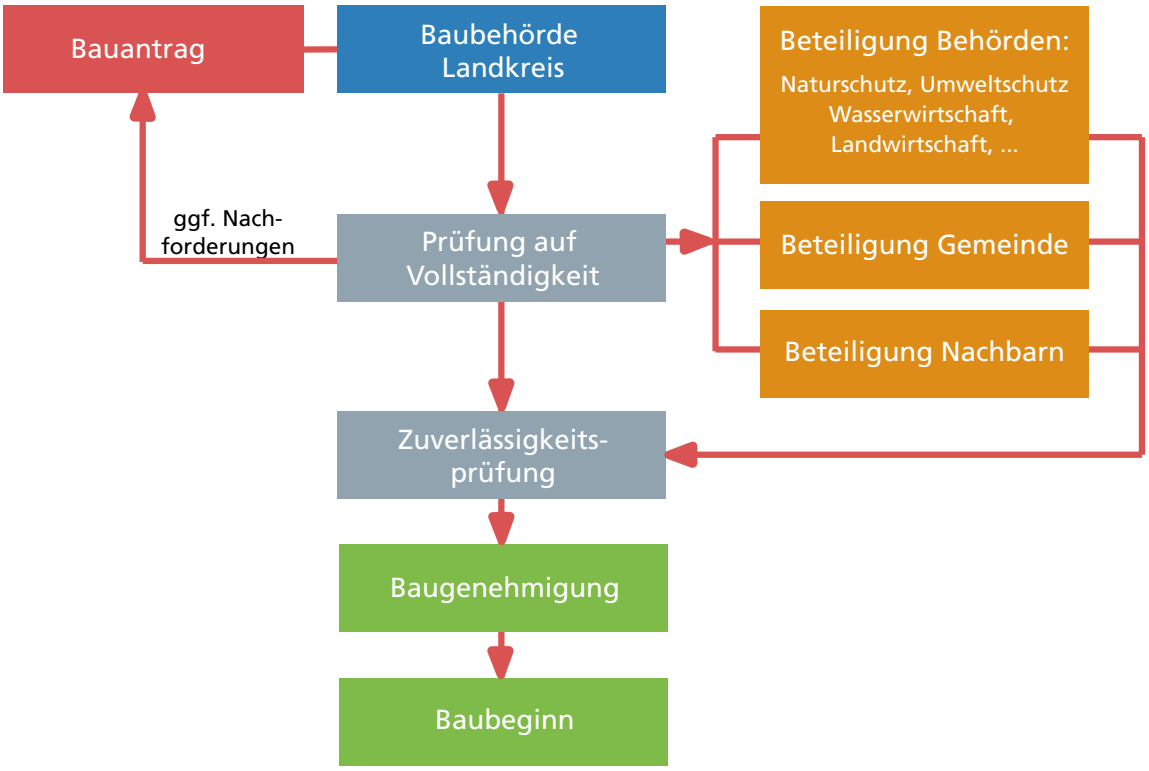


Bild 54: Beispiel für den Ablauf eines Baugenehmigungsverfahrens.

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«[5]. 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 hat die Verwendung von ca. zwei Drittel des in einer Windkraftanlage erzeugten Stroms in einem landwirtschaftlichen Betrieb als ausreichend erachtet[6]. 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.

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 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. Mit dem Erlass eines sogenannten vorhabenbezogenen Bebauungsplans könnten planungsrechtliche Spielräume genutzt werden, da die Gemeinde das Vorhaben hier ohne Berücksichtigung von § 9 BauGB[7] 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 werden[8].

Regelmäßig 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 erheb-

[5] BVerwG, Urt. v. 03.11.1972, Az. 4 C 9.70.

[6] BVerwG, Beschl. v. 04.11.2008, Az. 4 B 44.08.

[7] Insb. § 9 BauGB.

[8] BVerwG, NVwZ 2003, 98.

liche Beeinträchtigungen sind zu kompensieren[9]. Hier besteht jedoch das Privileg, dass eine Nutzung nach den Regeln der guten landwirtschaftlichen Praxis keinen Eingriff darstellt[10]. Wird eine Fläche zur Erzeugung von Strom genutzt, stellt dies derzeit in der Regel einen Eingriff im Sinne des § 14 Abs. 1 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 erhebliche Vorteile bringen kann, könnte zumindest überlegt werden, ob die Flächennutzung den Regeln der guten landwirtschaftlichen Praxis zugeordnet wird und damit keinen Eingriff im Sinne des Bundesnaturschutzgesetzes (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.

6.1.3 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, schaut man, wer welche Kosten zu tragen hat. Dabei gilt grundsätzlich: Die Netzausbaukosten trägt der Netzbetreiber, die Netzanschlusskosten die Anlagenbetreiberin oder der Anlagenbetreiber.

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 nutzen[11] oder »vor« dem Netz an einen Dritten liefern[12].

Komplizierter wird es bei der Einspeisevergütung für den eingespeisten Strom. Zunächst ist zu berücksichtigen, dass Betreiberinnen und Betreiber von Anlagen mit einer installierten Leistung von mehr als 100 kW verpflichtet sind, den Strom an einen Dritten zu vermarkten. Der Netzbetreiber steht damit als Käufer des Stroms nur noch in Ausnahmefällen zur Verfügung[13]. 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 seinen gelieferten Strom.

Betreiberinnen und Betreiber von Anlagen mit einer installierten Leistung von mehr als 750 kW müssen erfolgreich an einer Ausschreibung teilnehmen. Ohne einen Zuschlag und eine sogenannte Zahlungsberechtigung können sie vom Netzbetreiber keine Einspeisevergütung nach dem EEG beanspruchen[14]. Wichtig ist hier auch § 27a EEG: Grundsätzlich darf der Strom aus »Ausschreibungsanlagen« nicht zur Eigenversorgung genutzt werden. Sind die Anlagen nicht größer als 750 kW, gelten die in § 48 EEG gesetzlich festgelegten anzulegenden Werte, wobei hier immer auch die Degression zu beachten ist.

Bei Freiflächenanlagen ist zudem die u. a. in § 38a Abs. 1 Nr. 5 EEG verankerte »10-MW-Grenze« zu beachten: Ist die Anlage größer, kann insoweit keine finanzielle Förderung beansprucht werden.

Die Einspeisevergütung 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 Einspeisevergütung nach dem EEG sind insbesondere die weiteren speziellen Vorgaben bei der Solarenergie zu beachten, die im Folgenden allerdings nur skizzenhaft und damit nicht abschließend dargestellt werden können:

Wie sich § 48 EEG entnehmen lässt, besteht ein Anspruch auf die finanzielle Förderung, wenn die Anlage auf, an oder in einem Gebäude oder einer sonstigen baulichen Anlage angebracht ist und diese vorrangig zu anderen Zwecken als

---

9 Vgl. § 13 Abs. 1 BNatSchG.

10 Vgl. § 13 Abs. 2 BNatSchG.

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

12 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 (z. B. KWK-Umlage, § 19 Abs. 2 StromNEV-Umlage, Offshore-Netzumlage, Konzessionsabgabe). Deshalb kann der Anlagenbetreiber z. B. dem Belieferten einen günstigen Preis für den Strom anbieten.

13 Vgl. § 21 Abs. 1 Nr. 2 EEG.

14 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.

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 sein[15]. 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 kein Gewächshaus benötigen. Hier ist im Ergebnis eine genaue Prüfung des Einzelfalls erforderlich. Bei »Nichtwohngebäuden« im unbeplanten Außenbereich nach § 35 BauGB – wie z. B. Gewächshäusern – ist allerdings die Einschränkung nach Absatz 3 des § 48 EEG zu beachten.

Werden diese Vorgaben nicht erfüllt, könnte sich dennoch die Förderfähigkeit u. a. 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 01.09.2003 mit dem Zweck der Errichtung einer Solaranlage aufgestellt oder geändert worden ist, müssen sich die Agrar-PV-Anlagen auf bestimmten Flächen befinden, z. B. längs von Autobahnen oder Schienenwegen innerhalb eines Korridors von 110 Metern, gemessen vom äußeren Rand der befestigten Fahrbahn oder auf einer sogenannten Konversionsfläche.

Eine Erweiterung dieser Flächenkulisse ergibt sich nur für Anlagen, die an Ausschreibungen teilnehmen müssen. Eine Einspeisevergütung kommt dann auch bei Flächen in Betracht, deren Flurstücke zum Zeitpunkt des Beschlusses über die Aufstellung oder Änderung des Bebauungsplans als Ackerland oder als Grünland genutzt worden sind, – verkürzt gesagt – keiner anderen als der in § 37 Abs. 1 EEG genannten Flächenkategorie zugeordnet werden können und in einem benachteiligten Gebiet lagen[16]. Dies gilt jedoch nur, wenn und soweit die Landesregierung für Gebote auf den entsprechenden Flächen eine Rechtsverordnung erlassen hat. Dies ist bisher nur in Bayern, Baden-Württemberg, Hessen, Saarland und Rheinland-Pfalz erfolgt.

6.2 Politische Handlungsempfehlungen

6.2.1 Explizite Privilegierung von Agri-PV-Anlagen

Eine explizite Privilegierung von Agri-PV-Anlagen gemäß § 35 Abs. 1 BauGB erscheint grundsätzlich sinnvoll, da sie 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 markanter Landschaftsbilder sind daher zu bevorzugen, z. B. Flächen entlang eines Waldrandes.

Praxisbeispiel Himbeerplantage: Zum Schutz von Himbeeren vor Hagel und starker Sonnenbestrahlung kann eine PV-Modulreihe über dem Spalierobst einen doppelten Nutzen erzielen. Trotzdem steht in der Wertschöpfungskette die Himbeerkultivierung über der PV-Ebene.

6.2.2 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.

6.2.3 Mögliche Förderkriterien und -szenarien

Im Zusammenspiel von EU, Bund und Land/Kommune können jeweils unterschiedliche Rahmenbedingungen für die Verbreitung von Agri-PV vorbereitet werden. Ein mögliches Förderszenario ist ein **30-Äcker-Programm/100-Äcker-Programm**: Entsprechend dem 1000-Dächer-Programm für PV-Anlagen in den 1990er-Jahren könnte ein Äcker-Programm für den Anschub der Agri-PV sorgen. Die Forschung und Entwicklung der Agri-PV-Technologie ließen sich dadurch stark beschleunigen. Beim 1000-Dächer-Programm gewährten Bund und Länder eine Förderung der Anlagen- und Installationskosten.

Auch die **Aufnahme von Agri-PV ins EEG** stellt ein mögliches Förderinstrument dar: So ließen sich der Erhalt von Ackerböden und die positiven Auswirkungen auf die landwirtschaftlichen Produkte honorieren. Dabei sollte es sich um eine möglichst »minimalintensive« Änderung des EEG handeln. Da bei Agri-PV eine Doppelnutzung vorliegt – landwirtschaftlich und energetisch – ist dieser Sachverhalt vergleichbar mit der Doppelnutzung bei Gebäuden bzw. baulichen Anlagen[17]. 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-

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

[16] Vgl. § 37 Abs. 1 S. 1 lit. h.) und i.) EEG.

[17] Vgl. dazu oben zu § 48 Abs. 1 S. 1 Nr. 1 EEG.

[18] Vgl. dazu oben zur DirektZahlDurchfV.

Direktzahlungen zurückgegriffen werden. Dies erhöht zudem die Rechtssicherheit. Denn die dazu ergangene Rechtsprechung[18] könnte dann auf die »neue« Regelung im EEG übertragen werden. Wie könnte die Umsetzung aussehen?

U. a. 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 […] Cent pro kWh, wenn die Anlage*
[…]
Nr. 2 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 u. a. 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 kWh) 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-Spezifikation sein, welche derzeit vom Fraunhofer ISE zusammen mit einem breiten Konsortium für Deutschland erarbeitet wird.

7. AGRI-PHOTOVOLTAIK VORANBRINGEN

Klimawandel, Wasserknappheit und der stetig ansteigende Bedarf an Energie und Nahrungsmittel 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 Entwicklungs- und Schwellenländern verbessert werden soll, dann müssen wir Wege finden, um scheinbar gegenläufige Ziele zu erreichen. Es gilt, Wohlstand zu sichern, Entwicklung und eine lebenswerte Zukunft zu ermöglichen sowie 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 sowie deren Potential und vielfältige 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 7 und 12 Eurocent pro kWh ist Agri-PV heute schon wettbewerbsfähig mit anderen erneuerbaren Energiequellen. Eine wirtschaftliche Umsetzung von Agri-PV ist in Deutschland jedoch aufgrund des fehlenden gesetzlichen Regelrahmens nur in den seltensten Fällen möglich. Eine Anpassung des Regelrahmens an die technischen Entwicklungen der Agri-PV könnte beispielsweise umfassen:

- eine Anerkennung der Agri-PV in der DirektZahlDurchfV um Flächenprämien für landwirtschaftliche Betriebe zu erhalten, z. B. als Ausnahmetatbestand in § 12 Abs. 3 Nr. 3
- 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, z. B. in Form von Sonderausschreibungen für 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 der Kulturpflanzen, die geringeren Kosten der Aufständerung sowie die relativ leichte Integration in die Bewirtschaftungsweisen von Dauerkulturen. Auch in Bezug auf die Genehmigung ist mit Vorteilen zu rechnen.

Im Gartenbau ist die Einstufung von Agri-PV als privilegiertes Bauvorhaben nach § 35 Abs. 1 Nr. 2 BauGB möglicherweise einfacher zu erreichen. Eine räumliche Nähe zum Hof dürfte sich ebenfalls positiv auf eine Genehmigung auswirken. Ein weiterer Vorteil im Gartenbau könnte in einer allgemeinen

© BayWa r.e.

© Next2Sun GmbH

Steigerung der landwirtschaftlichen Wertschöpfung liegen. Denn viele gartenbauliche Anwendungen sind hochproduktiv: mit nur rund 1,3 % der landwirtschaftlichen Fläche trägt der Gartenbau über 10 % der Wertschöpfung in der Landwirtschaft bei [Aus: Der Gartenbau in Deutschland. Auswertung des Gartenbaumoduls der Agrarstrukturerhebung 2016, BMEL]. Würde somit 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 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 wird, und das nicht nur aufgrund ihrer Dezentralität und Flächenneutralität. Doch sprechen gute Gründe dafür, auch Agar-PV ergänzend zu den bisherigen erneuerbaren Stromerzeugungstechnologien zu verfolgen. Denn zum einen kann Agri-PV – vor allem im Falle größerer Systeme – aufgrund von Skaleneffekten im Durchschnitt günstiger realisiert werden als Dachanlagen und können 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 allermeisten 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, darunter die zunehmenden Dürreperioden in Deutschland. Auch die Tatsache, dass durch den Klimawandel die Durchschnittstemperatur, die Wetterextreme, und im Falle von Zentraleuropa auch die Sonneneinstrahlung ansteigen wird, legt nahe, dass die Möglichkeit einer Schutzfunktion durch PV-Module für Pflanzen in Zukunft größer wird.

Zukünftige Forschungsfelder der Agri-PV könnte die Kombination mit Energiespeichern, organischer PV-Folie und solarer Wasseraufbereitung und –verteilung betreffen. Auch der Einsatz von elektrischen Landmaschinen und intelligente und automatische Feldbearbeitung ist ein vielversprechender Forschungsbereich. Eine Zukunftsvision ist das »Swarm-farming«, wo kleinere, solar elektrifizierte Landmaschinen automatisiert unter der Agri-PV-Anlage arbeiten und die Energie hierzu direkt vom Acker ernten. 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 Ackerfläche von 1,2 × 3 Meter getestet.

Die Photovoltaik wird langfristig zur wichtigsten Säule der Energieversorgung. Der Klimawandel 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 Technologie der Agri-PV eine Möglichkeit, die PV-Leistung auszubauen, während gleichzeitig Ackerboden 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 gezeigt, dass die Technologie funktioniert. Wird sie von Forschung, Industrie und Politik künftig weiterentwickelt, könnte das enorme Potenzial der Agri-PV erschlossen werden. Nicht nur für das Klima wäre dies eine gute Entwicklung.

© Christian Dupraz, INRAé

© BayWa r.e.

© BayWa r.e.

8. LITERATUR UND QUELLEN

8.1 Quellen

[1] P. Sterchele, J. Brandes, J. Heilig, D. Wrede, C. Kost, T. Schlegl, A. Bett, and H.-M. Henning, Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem – Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen (2020).

[2] A. Goetzberger and A. Zastrow, Sonnenenergie 3/81 (1981).

[3] Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS), APV-RESOLA – Innovationsgruppe Agrophotovoltaik: Beitrag zur ressourceneffizienten Landnutzung (o. J.).

[4] S. Schindele, M. Trommsdorff, A. Schlaak, T. Obergfell, G. Bopp, C. Reise, C. Braun, A. Weselek, A. Bauerle, P. Högy, A. Goetzberger, and E. Weber, Applied Energy 265 (2020).

[5] T. Kelm, J. Metzger, H. Jachmann, D. Günnewig, P. Michael, S. Schicketanz, K. Pascal, T. Miron, and N. Venus, Vorbereitung und Begleitung bei der Erstellung eines Erfahrungsberichts gemäß § 97 Erneuerbare-Energien-Gesetz: Teilvorhaben II c: Solare Strahlungsenergie (2019). https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/bmwi_de/zsv-boschundpartner-vorbereitung-begleitung-eeg.pdf?__blob=publicationFile&v=7.

[6] D. Ketzer, Dissertations in Physical Geography, Vol. 4: Land Use Conflicts between Agriculture and Energy Production. Systems Approaches to Allocate Potentials for Bioenergy and Agrophotovoltaics (Department of Physical Geography, Stockholm University, 2020) [english].

[7] D. H.-J. Luhmann, P. D. M. Fischedick, and S. Schindele, Stellungnahme zur BMWi-Konsultation »Eckpunkte für ein Ausschreibungsdesign für Photovoltaik-Freiflächenanlagen«: Agrophotovoltaik (APV) als ressourceneffiziente Landnutzung (2014).

[8] Y. Elamri, B. Cheviron, J.-M. Lopez, C. Dejean, and G. Belaud, Agricultural Water Management 208 (2018).

[9] Bundesverband Solarwirtschaft e.V. (BSW-Solar), Entwicklung des deutschen PV-Marktes: Auswertung und grafische Darstellung der Meldedaten der Bundesnetzagentur (2020).

[10] A. Weselek, A. Ehmann, S. Zikeli, I. Lewandowski, S. Schindele, and P. Högy, Agronomy for Sustainable Development 39, 4 (2019).

[11] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), Anbau und Verwendung nachwachsender Rohstoffe in Deutschland: Stand: März 2019 (2019).

[12] 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.

[13] M. Trommsdorff, S. Schindele, M. Vorast, N. Durga, S. M. Patwardhan, K. Baltins, A. Söthe-Garnier, and G. Grifi, Feasibility and Economic Viability of Horticulture Photovoltaics in Paras, Maharashtra, India (2019).

[14] K. Schneider: Agrophotovoltaik: hohe Ernteerträge im Hitzesommer (Freiburg, 2019).

[15] K. Schneider: Agrophotovoltaik goes global: von Chile bis Vietnam (Freiburg, 2018).

[16] G. P. Brasseur, D. Jacob, and S. Schuck-Zöller, Klimawandel in Deutschland (Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2017).

[17] J. Ballester, X. Rodó, and F. Giorgi, Clim Dyn 35, 7-8 (2010).
[18] G. A. Barron-Gafford, M. A. Pavao-Zuckerman, R. L. Minor, L. F. Sutter, I. Barnett-Moreno, D. T. Blackett, M. Thompson, K. Dimond, A. K. Gerlak, G. P. Nabhan, and J. E. Macknick, Nat Sustain 2, 9 (2019).
[19] H. Marrou, J. Wery, L. Dufour, and C. Dupraz, European Journal of Agronomy 44 (2013).
[20] S. K. Abeysinghe, D. H. Greer, and S. Y. Rogiers, VITIS - Journal of Grapevine Research 58/1 (2019).
[21] M. Büchele, Lucas' Anleitung zum Obstbau (Libreka GmbH; Verlag Eugen Ulmer, 2018).
[22] International Renewable Energy Agency (IRENA), The Power to Change: Solar and Wind Cost Reduction Potential to 2025 (2016).
[23] E.ON Energie Deutschland GmbH, Solaranlage Kosten »Was kostet Photovoltaik 2020? (o. J.). https://www.eon.de/de/pk/solar/photovoltaik-kosten.html. Accessed 7 August 2020.
[24] Solaranlage Ratgeber, Anschaffungskosten für Photovoltaik-Anlagen (o. J.). https://www.solaranlage-ratgeber.de/photovoltaik/photovoltaik-wirtschaftlichkeit/photovoltaik-anschaffungskosten Accessed 7 August 2020.
[25] K. Grave, M. Hazart, S. Boeve, F. von Blücher, C. Bourgault, N. Bader, B. Breitschopf, N. Friedrichsen, M. Arens, A. Aydemir, M. Pudlik, V. Duscha, and J. Ordonez, Stromkosten der energieintensiven Industrie: Ein internationaler Vergleich (2015).
[26] A. Tietz, Wertermittlungsforum 36(2) (2018).
[27] B. Valle, T. Simonneau, F. Sourd, P. Pechier, P. Hamard, T. Frisson, M. Ryckewaert, and A. Christophe, Applied Energy 206 (2017).
[28] Y. Elamri, B. Cheviron, A. Mange, C. Dejean, F. Liron, and G. Belaud, Hydrol. Earth Syst. Sci. 22, 2 (2018).
[29] 29. C. Rösch, S. Gölz, J. Hildebrand, S. Venghaus, and K. Witte, Energy Research for Future – Forschung für die Herausforderungen der Energiewende (2019).
[30] D. Ketzer, N. Weinberger, C. Rösch, and S. B. Seitz, Journal of Responsible Innovation 7, 2 (2020).
[31] D. Ketzer, P. Schlyter, N. Weinberger, and C. Rösch, Journal of environmental management 270 (2020).

8.2 Abbildungsverzeichnis

Bild 1: Illustration eines Agri-PV-Systems. © Fraunhofer ISE 4
Bild 2: Projektpartner von APV-RESOLA. 5
Bild 3: Agri-PV-Forschungsanlage des Fraunhofer ISE am Bodensee. © Fraunhofer ISE 5
Bild 4: Entwicklung der Agri-PV von 2010 bis heute. © Fraunhofer ISE 6
Bild 5: Flächeninanspruchnahme von PV-FFA seit 2004 in Deutschland, Gesamtanlagenbestand und jährlicher Zubau. [5] © BMWi 7
Bild 6: Anwendungen für die Integration von Photovoltaik. © Fraunhofer ISE 8
Bild 7: Freiflächen-PV-Anlage. © Fraunhofer ISE 9
Bild 8: Flächennutzung in Deutschland. © Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. [11] 10
Bild 9: Querschnitt der Agri-PV-Anlage in Weihenstephan. © 2020 B. Ehrmaier, M. Beck, U. Bodmer 11
Bild 10: Schaden an Kohlpflanzen. © 2020 B. Ehrmaier, M. Beck, U. Bodmer 11
Bild 11: Skizze der Agri-PV-Referenzanlage in Heggelbach. © Hilber Solar 12
Bild 12: Die Hofgemeinschaft Heggelbach konnte im Sommer 2017 ihren Strombedarf fast vollständig durch den auf der Agri-PV-Anlage erzeugten Strom decken. © BayWa r.e. 13
Bild 13: Durch die kombinierte Flächennutzung beträgt die Flächennutzungseffizienz mit Agri-PV auf dem Testgelände in Heggelbach bis zu 186 Prozent. (Illustration Kartoffeln © HappyPictures / shutterstock.com) 14
Bild 14: Modulreihe mit bifazialen Modulen der Agri-PV-Anlage in Heggelbach. © Fraunhofer ISE 14
Bild 15: Pilotanlagen des Fraunhofer Chile Research Instituts in Curacavi und Lampa, Chile untersuchen, welche Kulturpflanzen von einer weniger starken Sonneneinstrahlung profitieren. © Fraunhofer Chile 15
Bild 16: Studie mit verschiedenen Salatsorten in der Agri-PV-Forschungsanlage der Universität von Montpellier, Frankreich. © Christian Dupraz 16
Bild 17: Untersuchte Kulturen in Heggelbach (Weizen, Sellerie, Kartoffeln, Kleegras). © Universität Hohenheim 17
Bild 18: Feldplan des Versuchsaufbaus 2017 mit Messstationen. © BayWa, verändert durch Universität Hohenheim 18
Bild 19: Ertragsunterschiede der Kulturen unter Agri-PV gegenüber Referenzflächen 2017 (blau) und 2018 (rot) in Heggelbach (ohne Flächenverluste durch Stützen). Daten: Universität Hohenheim 18
Bild 20: Rammschutz der Aufständerung der Anlage in Heggelbach vor der Beschädigung durch Landmaschinen. © Hilber Solar 19
Bild 21: Illustration einer Agri-PV-Apfelplantage.© Fraunhofer ISE 19
Bild 22: Agri-PV mit nachgeführten Modulen in Frankreich. © Sun'Agri 20
Bild 23: Witterungsschutz für Himbeeren durch Agri-PV, 300 kW_p Testanlage von BayWa. r.e in den Niederlanden. © BayWa r.e. 20
Bild 24: Demoprojekt im Beerenbau zeigt sehr hohe Wertschöpfung in der Landwirtschaft. © BayWa r.e. 20
Bild 25: Weizenernte mit Mähdrescher. © Fraunhofer ISE 21
Bild 26: Schematisch: Photosyntheserate in Abhängigkeit der Beleuchtungsstärke bei Sonnen- und Schattenpflanzen. (Quelle: verändert nach [21]) 21
Bild 27: Vertikal errichtete bifaziale Module im Solarpark in Eppelborn-Dirmingen, Saarland mit 2 MW Leistung, errichtet von Next2Sun. © Next2Sun GmbH 21
Bild 28: Investitionsausgaben (CAPEX) für PV-Freiflächenanlagen und Agri-PV. Daten aus [4, 22] 22
Bild 29: CAPEX / OPEX von PV-FFA und Agri-PV im Vergleich. Daten aus [4, 22] 23
Bild 30: Geschätzte durchschnittliche Stromgestehungskosten (LCOE) für PV-FFA und Agri-PV. Daten aus [3, 4, 23, 24] 24
Bild 31: Interessensgruppen und Vertragsmodell. 26
Bild 32: Thomas Schmid und Florian Reyer. © AMA Film 27
Bild 33: PV-Module mit erweiterten Zellzwischenräumen und Schutzfunktion in den Niederlanden. © BayWa r.e. 28
Bild 34: Hoch aufgeständerte Anlage mit Möglichkeit zur Bewirtschaftung mit dem Kartoffelvollernter. © Hofgemeinschaft Heggelbach 28
Bild 35: Bifaziale, senkrecht aufgestellte Module von Next2Sun, Donaueschingen. © Next2Sun GmbH 29
Bild 36: PV-Module über einem Folientunnel. © BayWa r.e. 29
Bild 37: Spezielle Dünnschicht-Module in Röhrenform der Firma TubeSolar. © TubeSolar AG 29
Bild 38: Halbschatten durch Solarröhren, eingehängt zwischen Spannseilen der Firma TubeSolar. © sbp sonne gmbh 29

Bild 39: Hoch aufgeständerte Anlagen mit schmalen PV-Modulen. © REM Tec 29
Bild 40: Hoch aufgeständerte Anlage mit durchgängigen Modulreihen. © Sun'Agri 30
Bild 41: Einachsiges Trackersystem einer Demonstrationsanlage in Frankreich. © Sun'Agri 31
Bild 42: Spinnanker mit Ankerplatte und Gewindestäben fundamentieren das Montagesystem im Boden. © Spinnanker 31
Bild 43: Illustration verschiedener Anlagentypen mit Ost-West-, Süd- und Süd-Ost-Ausrichtung. © Fraunhofer ISE 32
Bild 44: Die Schattenstreifen der Solarmodule wandern mit dem Sonnenstand. © Universität Hohenheim 32
Bild 45: Konzept einer Regenauffangvorrichtung mit unterirdischem Speichertank. © Fraunhofer ISE 32
Bild 46: Agri-PV-Anlage in Heggelbach mit einer Leistung von 194 kW_p. © BayWa r.e. 33
Bild 47: Solarpark Eppelborn-Dirmingen mit 2 MW_p mit vertikalen Solarzäunen von Next2Sun. © Next2Sun GmbH 33
Bild 48: Baustraßen zur Vermeidung von Bodenverdichtung. © BayWa r.e. 34
Bild 49: Wartungsarbeiten an der Agri-PV-Anlage in Heggelbach. © Fraunhofer ISE 35
Bild 50: Bürgerinformationsveranstaltung im Projekt APV-RESOLA. © ITAS 36
Bild 51: Modell der Heggelbach-Anlage für Informationsveranstaltungen. © Fraunhofer ISE 37
Bild 52: Mehrstufiger transdisziplinärer Agri-PV-Forschungsansatz. © ITAS 38
Bild 53: 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 39
Bild 54: Beispiel für den Ablauf eines Baugenehmigungsverfahrens. 42

8.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verschiedene Kategorien der Agri-PV und ihre Anwendungen. 10
Tabelle 2: Beispiel für den Pflanzenertrag unter SPV und im Freiland. © 2020 B. Ehrmaier, M. Beck, U. Bodmer 11
Tabelle 3: Konstellationen verschiedener Agri-PV-Geschäftsmodelle (in Anlehnung an [3]) 25
Tabelle 4: Übersicht über Genehmigungsschritte für Agar-PV. 34

8.4 Abkürzungen

APV	Agri-Photovoltaik
RESOLA	Agrophotovoltaik-Ressourceneffiziente Landnutzung
W_p	Watt peak, Leistung gemessen nach Standard Test Bedingungen
kW_p	Kilowatt peak, gemessen nach Standard Test Bedingungen
kWh	Kilowattstunde
Wh	Wattstunden
GW	Gigawatt
GW_p	Gigawatt peak. Leistung in Gigawatt, gemessen nach Standard Test Bedingungen
GWh	Gigawattstunde
TWh	Terrawattstunde
MW	Megawatt
MW_p	Megawatt peak, gemessen nach Standard Test Bedingungen
CAPEX	Investitionsausgaben (capital expenditure)
OPEX	Betriebskosten (operational expenditure)
LCOE	Stromgestehungskosten (Levelized Cost of Electricity
PV-FFA	PV Freiflächenanlage
STC	Standard Test Bedingungen
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 Silicium
µ-Si	Mikrokristallines Silicium
OPV	Organische Photovoltaik
CPV	Konzentrierende Photovoltaik

8.5 Links zu weiterführenden Informationen

Webseite Agri-Photovoltaik (Fraunhofer ISE)
https://www.agri-pv.org

Kurzfilm über die APV-Forschungsanlage in Heggelbach:
https://www.youtube.com/watch?v=BlXPf-e1a0U

Handlungsleitfaden Freiflächensolaranlagen, Link zur Webseite des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg:
https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/2_Presse_und_Service/Publikationen/Energie/Handlungsleitfaden_Freiflaechensolaranlagen.pdf

Agri-Photovoltaik, Link zur Webseite des Fraunhofer ISE:
https://www.ise.fraunhofer.de/de/geschaeftsfelder/photovoltaik/photovoltaische-module-und-kraftwerke/integrierte-pv/agrar-photovoltaik.html

Projektseite APV-Obstbau, Link zur Webseite des Fraunhofer ISE:
https://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/apv-obstbau.html

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SOLARE ENERGIESYSTEME ISE

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

Bereichsleiter Photovoltaische Module und Kraftwerke
Dr. Harry Wirth

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

Projekte gefördert durch:

Bundesministerium für Bildung und Forschung

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft

FSC www.fsc.org
MIX
Papier aus verantwortungsvollen Quellen
FSC® C106855