

73

Berichte aus dem TFZ

Agri-Photovoltaik

Stand und offene Fragen



Agri-Photovoltaik Stand und offene Fragen



Agri-Photovoltaik

Stand und offene Fragen

Autoren

Johannes Scharf
Michael Grieb
Maendy Fritz

Berichte aus dem TFZ 73

Straubing, Mai 2021

Titel: Agri-Photovoltaik – Stand und offene Fragen
Projektleitung: Dr. Maendy Fritz
Autoren: Johannes Scharf, Michael Grieb, Maendy Fritz

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bayerischen Staatsministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten unter dem Förderkennzeichen G2/N/20/01 gefördert. Die Projektlaufzeit ging vom 01.08.2020 bis zum 28.02.2021. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

©2021
Technologie- und Förderzentrum
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), Straubing

Alle Rechte vorbehalten.
Kein Teil dieses Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Herausgebers in irgendeiner Form reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt, verbreitet oder archiviert werden.

Unter Verwendung mineralölfreier Druckfarben (Mineralölanteil <1 %) gedruckt auf chlorfreiem Papier aus nachhaltiger, zertifizierter Waldbewirtschaftung.

ISSN: 1614-1008
Hrsg.: Technologie- und Förderzentrum
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ)
Schulgasse 18, 94315 Straubing
E-Mail: poststelle@tfz.bayern.de
Internet: www.tfz.bayern.de

Redaktion: Johannes Scharf, Michael Grieb, Maendy Fritz, Anna Grundner, Ulrich Eidenschink
Gestaltung: Johannes Scharf, Michael Grieb
Auflage: 1., aktual. Auflage
Verlag: Eigenverlag
Erscheinungsort: Straubing
Erscheinungsjahr: 2021

Fotos: Christian Lasta, Georg Konrad (15)
TFZ, Johannes Scharf (16, 17, 18, 20, 21, 22, 24, 26, 33, 52, 53, 55, 62)
Hofgemeinschaft Heggelbach (28)
Thomas Rebitzer (31)
Agentur für Erneuerbare Energien (66, 67)

Abstract (deutsch)

Agri-Photovoltaik (Agri-PV) bietet die Möglichkeit, auf einer Fläche Landwirtschaft und Stromerzeugung zu kombinieren. Dieses Prinzip wurde bereits in den 1980er Jahren erstmals beschrieben, aber erst seit ungefähr 2013 in einigen Ländern angewandt. Da in Deutschland der Flächenverbrauch im europäischen Vergleich sehr hoch ist, stellt diese Art der Stromerzeugung grundlegend ein attraktives Modell dar. Bislang gibt es in Deutschland aber kaum verwirklichte Projekte. Eine wissenschaftliche Begleitung und Untersuchung des Einflusses der Anlagen auf die landwirtschaftlichen Erträge wurde bisher nur in einem Projekt durchgeführt. Dennoch wird die Agri-PV häufig mit diversen Vorteilen in Verbindung gebracht.

Dieser Bericht soll die genannten Vorteile anhand bereits bestehender Anlagen sowie verfügbarer Literatur und mithilfe von Expertengesprächen überprüfen und – soweit auf dieser Basis möglich – mit konkreten Zahlen hinterlegen und so einen Überblick über den aktuellen Stand des Wissens zum Thema Agri-PV vermitteln. Für weiterhin bestehende offene Fragen sollen Handlungsanweisungen und zielführende Versuchskonzepte entwickelt werden, um für bayerische Standortbedingungen, diverse Modulsysteme, den gültigen Rechtsrahmen sowie typische Nahrungs- und Rohstoffpflanzen in einem späteren Projekt eine entsprechende Datenbasis zu erarbeiten. Dabei wird in allen Fällen der Unterschied zu einer klassischen Photovoltaik-Freiflächenanlage (PV-FFA) betrachtet, um Vor- und auch Nachteile der verfügbaren Agri-PV-Systeme, z. B. hinsichtlich der Investitionskosten und Flächenerlöse, möglichst präzise beziffern zu können.

Agri-PV-Anlagen sind derzeit tendenziell teurer als konventionelle PV-FFA. Gleichzeitig kann in einer Agri-PV-Anlage weniger Leistung pro Fläche installiert werden als bei konventionellen PV-FFA. Zudem werden für die Montagesysteme Flächenanteile benötigt, welche die verfügbare landwirtschaftliche Nutzung reduzieren. Diese nicht mehr landwirtschaftlich nutzbaren Flächenanteile machen je nach Anlagendesign acht bis fünfzehn Prozent der Fläche der Agri-PV-Anlage aus. Aus wirtschaftlicher Sicht scheint es also sinnvoller, Photovoltaik-Freiflächenanlagen und landwirtschaftliche Flächen getrennt voneinander zu nutzen. Agri-PV soll aber nicht in erster Linie dort etabliert werden, wo andernfalls konventionelle Freiflächenanlagen installiert würden. Sie können vor allem dort eine sinnvolle Ergänzung bieten, wo die Errichtung konventioneller PV-FFA nicht möglich ist: Nach einem anfänglichen Boom der PV-FFA wurden in der Folge zunehmend restriktive Flächenregelungen eingeführt, um wertvolle landwirtschaftliche Flächen zu erhalten und Landwirte vor einem „Pachtpreiskampf“ mit Photovoltaikbetreibern zu bewahren. Aufgrund dieser Regelungen ist die derzeitige Flächenkulisse für PV-FFA recht eingeschränkt.

Hier bietet Agri-PV die Möglichkeit, landwirtschaftliche Flächen zu erschließen, ohne dabei die landwirtschaftliche Nutzung zu verhindern. Im besten Fall kann Agri-PV die Pflanzenproduktion durch Verschattungseffekte oder den mechanischen Schutz der angebauten (Sonder-)Kulturen sogar unterstützen.

Abstract (englisch)

Agrivoltaics offers the possibility to combine agriculture and electricity generation on one plot of land. This concept was first described in the 1980s but has only been applied in some countries since 2013. As land consumption in Germany is very high compared to other European countries, this type of power generation is basically an attractive solution. So far, however, there are hardly any projects that have been realized in Germany. A scientific monitoring and investigation on the influence such power plants can have on agricultural yields has only been carried out in one project so far. Nevertheless, agrivoltaics is often associated with various advantages.

This report is intended to verify the advantages stated on the basis of existing plants, available literature and expert interviews and – as far as possible on this basis – to back them up with concrete figures, thus providing an overview of the current state of knowledge on the subject of agrivoltaics. Guidelines for action and target-oriented experimental concepts are to be developed in order to establish a suitable database for Bavarian site conditions, various module systems, the valid legal framework as well as typical food and raw material crops in future projects. The difference to classical ground-mounted photovoltaic systems will be analyzed in order to be able to quantify advantages and disadvantages of the available agrivoltaic systems as precisely as possible, e. g. regarding investment costs and revenue per unit area.

Agrivoltaic systems currently tend to be more expensive than conventional ground-mounted photovoltaic (pv) systems. At the same time, less capacity per area can be installed in an agrivoltaic system than in conventional ground-mounted pv power plants. In addition, mounting systems require a certain percentage of land. This reduces available agricultural land. These portions of land that can no longer be used for agriculture account for between 8 and 15 percent of the area of the agrivoltaic system, depending on the system design. Thus, from an economic perspective, it seems to make more sense to use ground-mounted photovoltaic systems and agricultural land separately. However, agrivoltaics should not be implemented primarily where conventional ground-mounted systems would otherwise be installed. They can provide a useful addition in areas where the installation of conventional pv systems is not possible: After an initial boom in ground-mounted pv, increasingly restrictive land regulations were introduced to preserve valuable agricultural land and protect farmers from a “lease price war” with photovoltaic operators. Due to these policies, the current regulations for ground-mounted pv are quite restrictive.

Agrivoltaics offers the opportunity to develop agricultural land without hindering agricultural use. Agrivoltaics can even support crop production through shading effects or mechanical protection of (special) crops.

Inhaltsverzeichnis

Abstract (deutsch)	5
Abstract (englisch)	6
Abbildungsverzeichnis	9
Tabellenverzeichnis	11
1 Einleitung	13
2 Begriffserklärung und Definition	15
2.1 Hoch aufgeständerte Agri-PV-Anlagen	17
2.2 Vertikale Agri-PV	19
2.3 Nachgeführte Agri-Photovoltaik	22
3 Landnutzungsrate	25
3.1 Hoch aufgeständerte Anlagen am Beispiel Heggelbach	28
3.2 Nachgeführte Anlagen	31
3.3 Vertikal aufgeständerte Anlagen.....	33
3.4 Nutzen der Agri-PV in anderen Regionen der Welt.....	34
4 Vergleich der Anschaffungs- und Installationskosten	37
4.1 Konventionelle PV-FFA.....	40
4.1.1 Fest montierte PV-FFA.....	40
4.1.2 Nachgeführte PV-FFA	40
4.2 Agri-PV-Anlagen	41
4.2.1 Vertikal aufgeständerte Agri-PV-Anlagen.....	41
4.2.2 Hoch aufgeständerte Agri-PV-Anlagen	41
4.2.3 Nachgeführte Agri-PV-Anlagen	42
5 Wirtschaftliche Kurzbetrachtung	43
6 Rechtliche Lage	49
6.1 Überblick über die rechtliche Lage anderer Staaten	49
6.1.1 Japan	49
6.1.2 Südkorea	50
6.1.3 China	50
6.1.4 Frankreich.....	51
6.1.5 USA, Massachusetts	51
6.2 Derzeitige rechtliche Lage in Deutschland	51
6.2.1 Vergütungsanspruch nach dem EEG	51
6.2.2 EU-Direktzahlungen	54

6.2.3	Genehmigungsverfahren	55
7	Vor- und Nachteile von Agri-PV und gesellschaftliche Akzeptanz.....	57
7.1	Vorteile	57
7.1.1	Erhöhung der Resilienz.....	57
7.1.2	Schutz der Kulturen vor mechanischen Einflüssen.....	57
7.1.3	Schutz vor zu hoher Sonneneinstrahlung	58
7.1.4	Zugang zur Energiewende für Landwirte	59
7.1.5	Der zunehmenden Flächenkonkurrenz entgegenwirken	59
7.1.6	Abnahme der Verdunstung	60
7.1.7	Speicherung von Niederschlagswasser.....	60
7.1.8	Steigerung der Landnutzungsrate.....	61
7.1.9	Verzicht auf Zäune zur Sicherung der PV-Module.....	61
7.1.10	Schneeabwurf	62
7.2	Nachteile	63
7.2.1	Einkommensdiskrepanz zwischen Stromerzeugung und landwirtschaftlicher Produktion	63
7.2.2	Geringere Erlöse bei höheren Investitionskosten	63
7.2.3	Verschmutzung	64
7.2.4	Risiko der Beschädigung	64
7.2.5	Sichtbarkeit aufgeständerter Module	65
7.3	Gesellschaftliche Akzeptanz – erste Daten	65
8	Forschungsbedarf und Handlungsempfehlungen.....	69
8.1	Forschungs- und Demonstrationsbedarf	69
8.1.1	Modultechnik	69
8.1.2	Gesellschaftliche Akzeptanz der Agri-PV	69
8.1.3	Wissenschaftliche Überprüfung der landwirtschaftlichen Erträge.....	69
8.1.4	Ökonomische Modellbewertungen.....	70
8.1.5	Demonstrationsprojekte mit wissenschaftlicher Begleitung.....	70
8.2	Politische Handlungsempfehlungen.....	71
8.2.1	Ausgleichsflächen	71
8.2.2	EU-Agrarförderung.....	71
8.2.3	Weiterführung und Anpassung der Ausschreibungen	71
8.2.4	Bürgerbeteiligung und Kommunikation	72
8.2.5	Öffnung der Flächenkulisse	72
	Quellenverzeichnis	73

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Definition der Agri-PV nach Lasta und Konrad [34].....	15
Abbildung 2:	Beweidete PV-Flächen wie diese fallen derzeit nicht unter die Definition der Agri-PV (Foto: Johannes Scharf, TFZ, 30.10.2020).....	16
Abbildung 3:	Hoch aufgeständerte Agri-PV-Anlage im Ackerbau (Darstellung: Johannes Scharf, TFZ, 21.12.2020).....	17
Abbildung 4:	Hoch aufgeständerte Agri-PV-Anlage in Sonderkulturen (Darstellung: Johannes Scharf, TFZ, 21.12.2020)	18
Abbildung 5:	Vertikale Agri-PV-Anlage im Grünland (Darstellung: Johannes Scharf, TFZ, 21.12.2020).....	20
Abbildung 6:	Vertikale Agri-PV-Anlage mit Weizenanbau, wobei die vergleichsweise niedrigen Weizenpflanzen bereits einen Teil der unteren Modulreihe verschatten können (Darstellung: Johannes Scharf, TFZ, 21.12.2020).....	21
Abbildung 7:	Vertikale Agri-PV-Anlage mit Maisanbau mit weitgehender Verschattung der Module durch die hochwachsenden Pflanzen (Darstellung: Johannes Scharf, TFZ, 21.12.2020)	22
Abbildung 8:	Nachgeführte Agri-PV-Anlage mit Weizenanbau, grün markierte Bereiche unter den Modulen gelten als nicht landwirtschaftlich genutzte Fläche (Darstellung: Johannes Scharf, TFZ, 21.12.2020).....	22
Abbildung 9:	Nachgeführte Agri-PV-Anlage mit Maisanbau mit teilweiser Verschattung der Module gelten als nicht landwirtschaftlich genutzte Fläche (Darstellung: Johannes Scharf, TFZ, 21.12.2020).....	24
Abbildung 10:	Schematische Darstellung der LNR einer Agri-PV-Anlage (Darstellung: Johannes Scharf, TFZ, 03.02.2021)	26
Abbildung 11:	Mähdrescher bei der Weizenernte unter der hoch aufgeständerten Agri-PV-Anlage der Hofgemeinschaft Heggelbach (Foto: Hofgemeinschaft Heggelbach)	28
Abbildung 12:	Relative Veränderung der landwirtschaftlichen Erträge im Vergleich zur Referenzfläche (Darstellung: Johannes Scharf, TFZ, 17.02.2021, nach Trommsdorff et al. [61])	30
Abbildung 13:	Nachgeführte Agri-PV-Anlage in Althegegnenbergr (Foto: Thomas Rebitzer)	31
Abbildung 14:	Vertikal aufgeständerte Agri-PV-Anlage in Donaueschingen-Aasen (Foto: Johannes Scharf, TFZ, 09.09.2020)	33
Abbildung 15:	Investitionskosten pro kW _p verschiedener Agri-PV-Anlagendesigns im Vergleich zu Freiflächenanlagen, Größe der Kreisdiagramme an Höhe der Gesamtinvestition angepasst (Darstellung: Johannes Scharf, TFZ, 17.02.2021).....	38
Abbildung 16:	Schema einer Floating-PV-Anlage (Darstellung: Johannes Scharf, TFZ, 09.02.2021).....	52

Abbildung 17: Schema einer Parkplatz-PV-Anlage (Darstellung: Johannes Scharf, TFZ, 09.02.2021)..... 53

Abbildung 18: Genehmigungsverfahren für PV-FFA- und Agri-PV-Anlagen (Darstellung: Johannes Scharf, TFZ, 18.08.2020)..... 55

Abbildung 19: Verschneite Module einer PV-FFA (Foto: Johannes Scharf, TFZ, 31.01.2021) 62

Abbildung 20: Umfrage zur Unterstützung des Ausbaus erneuerbarer Energien in Deutschland (Darstellung: Agentur für Erneuerbare Energien e. V. [2]) 66

Abbildung 21: Zustimmung zu Erneuerbare-Energien-Anlagen in der Umgebung des eigenen Wohnorts (Darstellung: Agentur für Erneuerbare Energien e. V. [2]) 67

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Investitionskosten verschiedener Anlagentypen (in Euro pro kW _p).....	44
Tabelle 2:	Jährlicher landwirtschaftlicher Deckungsbeitrag einer Agri-PV-Anlage mit Winterweizen im bayerischen Durchschnitt pro Hektar, erzielbarer Ertrag 86,5 Prozent.....	45
Tabelle 3:	Jährlicher landwirtschaftlicher Deckungsbeitrag Winterweizen im bayerischen Durchschnitt pro Hektar.....	45
Tabelle 4:	Jährlicher Stromertrag einer PV-FFA-Anlage pro Hektar (ohne Betriebskosten).....	45
Tabelle 5:	Jährlicher Stromertrag einer vertikal aufgeständerten Agri-PV-Anlage pro Hektar (ohne Betriebskosten)	46
Tabelle 6:	Jährlicher Stromertrag einer hoch aufgeständerten Agri-PV-Anlage pro Hektar (ohne Betriebskosten).....	46

1 Einleitung

Das Tempo des Flächenneuverbrauchs geht in Deutschland zwar stetig zurück, dennoch liegt das in der Nationalen Nachhaltigkeitsstrategie vorgegebene Ziel von 30 Hektar Flächenverbrauch pro Tag noch in weiter Ferne [63]. Gleichzeitig versucht Deutschland, eine Energiewende zu vollziehen, welche die Treibhausgasneutralität bis 2050 anstrebt [62]. Tendenziell wird bei Anlagen zur Energieerzeugung aus Erneuerbaren, wie beispielsweise Photovoltaikanlagen, mehr Fläche benötigt, um die gleiche Leistung bereitzustellen, als bei fossilen Kraftwerken [27]. Da der Anteil der versiegelten Flächen in Deutschland im Vergleich zu anderen europäischen Ländern ohnehin sehr hoch ist [46], nutzen Kritiker der Energiewende diesen Fakt häufig als Argument gegen erneuerbare Energien.

Die Problematik der Flächenkonkurrenz wird auch bei Betrachtung der derzeitigen Flächennutzung auf landwirtschaftlichen Flächen deutlich. Beispielsweise werden bereits auf gut 14 Prozent der landwirtschaftlichen Fläche Deutschlands Energiepflanzen angebaut, die nicht für die Nahrungsmittelproduktion zur Verfügung stehen [31]. Mit zunehmendem Anteil erneuerbarer Energien im deutschen Strommix werden zwangsläufig auch die Flächen zunehmen, welche für die Produktion erneuerbarer Energien benötigt werden. Da sich in Deutschland ca. 47 Prozent der Fläche in landwirtschaftlicher Nutzung befinden, bietet sich hier das größte Flächenpotenzial. Beim Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland spielt neben Wind vor allem Photovoltaik (PV) eine entscheidende Rolle [65]. Vor allem in Bayern, wo in den letzten Jahren Windenergie nur eine geringe Bedeutung hatte und kaum neue Windenergie-Anlagen genehmigt wurden, wird Photovoltaik immer bedeutender [43]. Ein weiterer Grund für die zentrale Rolle der Photovoltaik im bayerischen Energiemix ist die im Vergleich zum Rest Deutschlands besonders hohe Sonneneinstrahlung in Süddeutschland [20]. Beim Bau neuer konventioneller PV-Freiflächenanlagen werden jedoch neue Flächen versiegelt. Eine weitere Versiegelung der Flächen widerspricht aber der Nationalen Nachhaltigkeitsstrategie. Alternativen zu herkömmlichen Anwendungsgebieten erneuerbarer Energien und allen voran der Photovoltaik sind daher gefragt, die einerseits einen entscheidenden Beitrag zur Energiewende leisten und andererseits die Flächenkonkurrenz in Deutschland entzerren können.

Die Problematik der Flächenkonkurrenz stellt jedoch nicht die einzige Herausforderung für den Landwirtschaftssektor dar. Gleichzeitig ist die Landwirtschaft schon heute zunehmend von den Auswirkungen des Klimawandels betroffen. Landwirte stehen daher vor der Herausforderung sich an sich ändernde klimatische Gegebenheiten anzupassen. Übermäßige Sonneneinstrahlung, langanhaltende Trockenperioden und zunehmende Wetterextreme gehören zu den Schwierigkeiten, denen sich Landwirte immer häufiger ausgesetzt sehen. Diese Entwicklungen gefährden vielerorts bereits heute die Ernten und damit die Existenz der Landwirte.

Anpassungsstrategien sind in diesem Zusammenhang zwar dringend notwendig, aber bislang nicht immer ökologisch und ökonomisch sinnvoll. So müssen beispielsweise Hagelnetze und Folientunnel, die bestimmte Sonderkulturen vor übermäßiger Sonneneinstrahlung schützen sollen, in einem definierten Intervall ausgetauscht werden, da sie relativ unbeständig sind. Dies ist einerseits mit enormen Kosten für die Landwirte verbunden und

stellt andererseits eine große Umweltbelastung dar. Auch schützen diese Vorrichtungen nicht immer zuverlässig und können beispielsweise durch Stürme zerstört werden [12].

Agri-Photovoltaik wird als eine Möglichkeit angesehen, Photovoltaik flächenschonend zu implementieren und gleichzeitig die Resilienz der Landwirte zu erhöhen. Als Agri-Photovoltaik (Agri-PV, APV) wird demnach die gleichzeitige Nutzung einer Fläche zur Stromproduktion mittels Photovoltaikmodulen (PV-Modulen) sowie für die Produktion von Nahrungs-, Futter- oder Rohstoffpflanzen bezeichnet. Hierbei steht die landwirtschaftliche Nutzung weiterhin im Vordergrund und darf durch die Stromerzeugung nicht beziehungsweise nur unwesentlich beeinflusst werden. Dazu werden die Module entweder vertikal zwischen den Feldfrüchten errichtet, oberhalb der landwirtschaftlichen Flächen als eine Art Dachkonstruktion installiert oder als nachgeführte Anlage auf beweglichen Modultischen zwischen den Ackerflächen angebracht.

Durch die Auswahl geeigneter Anlagendesigns kann mithilfe der Agri-PV die Landnutzungsrate auf landwirtschaftlichen Flächen zum Teil enorm gesteigert werden. Um sowohl landwirtschaftliche Erträge als auch die Stromproduktion zu maximieren, müssen neben dem richtigen Anlagendesign auch passende Kulturen gewählt werden. Die Erlöse aus der Stromproduktion stellen für Landwirte in Zeiten fluktuierender Agrarmärkte eine wichtige, verlässliche Einnahmequelle dar, ohne ihnen dabei wertvolle Flächen für die landwirtschaftliche Produktion zu entziehen.

2 Begriffserklärung und Definition

Agri-PV beschreibt die Doppelnutzung einer landwirtschaftlichen Fläche. Die Fläche dient dabei weiterhin der landwirtschaftlichen Hauptnutzung, gleichzeitig wird mithilfe von Photovoltaik-Modulen (PV-Modulen) Solarstrom erzeugt. Beschrieben wurde dieses Konzept bereits 1981 von Goetzberger und Zastrow [29]. Sie gingen damals davon aus, dass die Kombination aus zwei Systemen, die für sich allein genommen wirtschaftlich betrieben werden können, in Kombination mindestens ebenso wirtschaftlich sein müsste. Im Normalfall sollte die Kombination sogar noch höhere Gewinne ermöglichen. In ihrer Betrachtung gingen sie vereinfachend davon aus, dass bis auf die Kosten für die höhere Aufständigung keine Mehrkosten im Vergleich zur Einzelnutzung anfallen würden. In ihrem Artikel „Kartoffeln unter dem Kollektor“ beschrieben die Autoren somit bereits vor 40 Jahren diese Art der Agri-PV-Nutzung. Ein Name wird diesem System hier jedoch noch nicht gegeben.

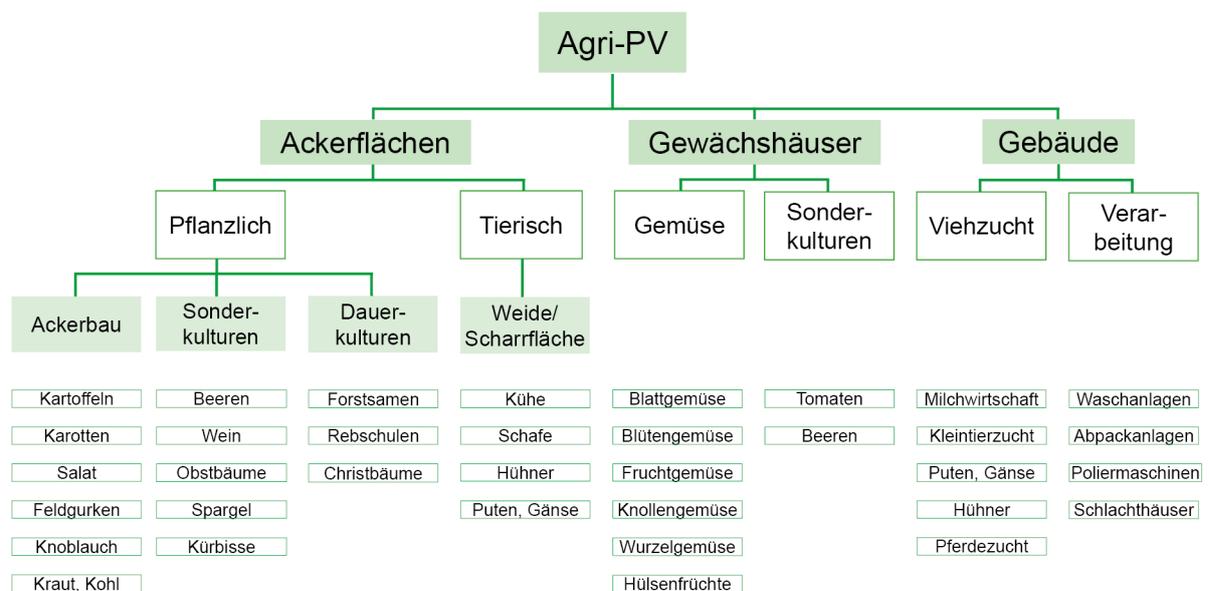


Abbildung 1: Definition der Agri-PV nach Lasta und Konrad [34]

Erst wesentlich später, im Jahr 2011, wurde der Name „Agro-Photovoltaik“ im Rahmen des „Doppel-Ernte“-Projekts des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme (ISE) entwickelt. Dieser Name, der sich aus dem altgriechischen Wort *Agrós* (Acker, Feld) und dem gebräuchlichen Begriff Photovoltaik zusammensetzt, ist an den Begriff Agroforst angelehnt, der die Kombination aus Landwirtschaft und Forstwirtschaft beschreibt [36]. Somit schien die Wahl des Namens gut geeignet. In diese Phase fällt auch die Definition von Lasta und Konrad [34]. Die Autoren definierten alle Dach- und Wandflächen von baulichen Anlagen, in denen landwirtschaftliche Produktion bzw. Verarbeitung stattfindet sowie zusätzlich landwirtschaftliche Flächen, die zur PV-Stromproduktion genutzt werden, als Agri-PV (Abbildung 1). Neuere Betrachtungen zählen PV-Anlagen, die an landwirtschaftlichen Gebäuden installiert werden, nicht zur Agri-PV. Ein DIN-Gremium, das sich mit einer

für den deutschsprachigen Raum einheitlichen Norm der Agri-PV befasst [21], wird voraussichtlich in seiner Norm nur Anlagen als Agri-PV definieren, die sich auf Acker- oder Grünlandflächen befinden. Ob jedoch vom Gesetzgeber die Definition der DIN-Norm übernommen wird oder weitere Nutzungsarten, wie beispielsweise die Beweidung von Flächen (siehe Abbildung 2) oder die Nutzung von Gewächshausflächen in Kombination mit PV, in die Definition übernommen werden, ist noch nicht geklärt.



Abbildung 2: Beweidete PV-Flächen wie diese fallen derzeit nicht unter die Definition der Agri-PV (Foto: Johannes Scharf, TFZ, 30.10.2020)

Von Beginn an stand der Name Agri-PV jedoch in der Kritik. Menschen, die sich noch nicht mit der Thematik auseinandergesetzt hätten, würden den Namen oft nicht verstehen und ihn mit dem Begriff ‚aggro‘, einer alltagssprachlichen Kurzform für ‚aggressiv‘, verbinden. Somit könnte der Name negative Assoziationen bewirken [36]. Dies könnte der neuen Art der PV-Anwendung von Beginn an Akzeptanzprobleme beschern. Aus diesem Grund wurden in der Folge neue mögliche Namen gesucht. Die italienischen und französischen Begriffe *Agrovoltaico* bzw. *Agrivoltaic* schienen deutschen Wissenschaftlern zu unspezifisch und so wurde zunächst der Begriff ‚Agrar-Photovoltaik‘ etabliert. Das oben genannte DIN-Gremium wählte in einem Abstimmungsprozess letztendlich jedoch den Namen Agri-Photovoltaik [25]. Dieser ist an den international gebräuchlichen Namen *agrivoltaic* angelehnt und soll künftig die endgültige einheitliche Bezeichnung darstellen, da von verschiedenen Beteiligten bis zuletzt die unterschiedlichen, in der Vergangenheit gebräuchlichen, Namen verwendet wurden.

Agri-PV kann nicht nur die landwirtschaftliche Erzeugung mit der Stromproduktion auf einer Fläche vereinen. Sie könnte in vielen Kulturen sogar eine Anpassung an den

Klimawandel darstellen und Kulturen vor zu starker Sonneneinstrahlung, Hagel und Starkregenereignissen sowie Stürmen schützen. Befürworter versprechen sich von dieser neuartigen Anwendungsweise von PV-Modulen erneuerbare Stromproduktion auf landwirtschaftlichen Flächen, welche die landwirtschaftliche Produktion nur minimal beeinflusst und sogar unterstützen kann.

2.1 Hoch aufgeständerte Agri-PV-Anlagen

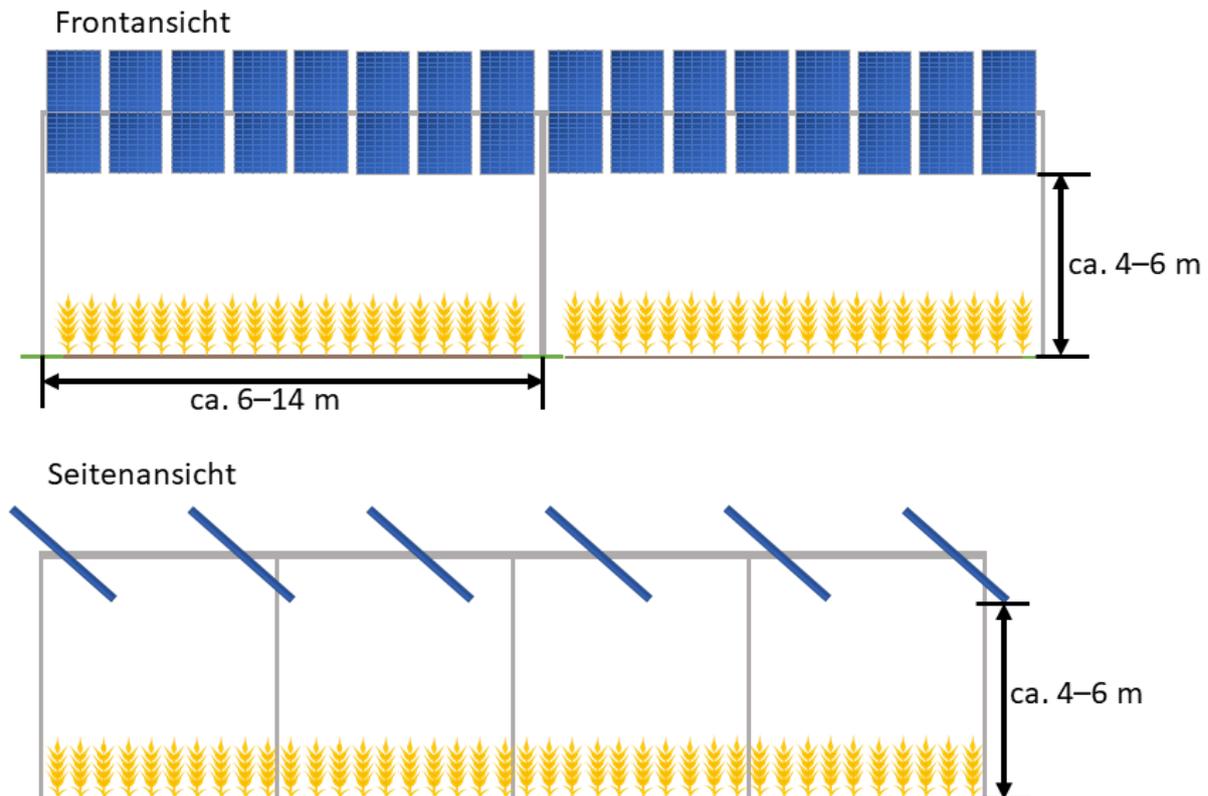


Abbildung 3: Hoch aufgeständerte Agri-PV-Anlage im Ackerbau (Darstellung: Johannes Scharf, TFZ, 21.12.2020)

Die erste Möglichkeit der Kombination von landwirtschaftlicher Nutzung und PV auf derselben Fläche stellt eine Aufständering der PV-Module oberhalb der landwirtschaftlich genutzten Fläche dar. Hierbei werden in einem frei wählbaren Abstand Reihen stabiler (Stahl-)Träger errichtet. Die Reihenabstände werden so gewählt, dass sich die Anlage in die jeweilige landwirtschaftliche Bewirtschaftungsweise integriert und diese minimal beeinflusst. Die Anlagenerrichtung erfolgt dabei mithilfe verschiedenster Fundamente, wie beispielsweise Schraubfundamente oder Rammfundamente, die so tief im Boden verankert werden, dass sie der Gesamtkonstruktion auch bei unterschiedlich starker Windlast ausreichend Stabilität verleihen. Auf Betonfundamente wird in diesem Fall verzichtet, da diese die Ökologie und Bearbeitbarkeit des Bodens langfristig stören können. Zusätzlich begünstigen Betonfundamente eine Bodenverdichtung, die das Eindringen von Wasser,

sowie die Durchlüftung des Bodens behindert und so die Aktivität von der Bodenflora- und -fauna, z. B. Regenwürmer, beeinträchtigt. Auch der Rückbau ist bei Schraub- und Rammfundamenten wesentlich weniger aufwendig als bei Betonfundamenten.

Die Höhe der Konstruktion und der Reihenabstand sind wesentlich von der gewählten Kultur und damit von den Maschinen abhängig, die später auf der Fläche zum Einsatz kommen sollen. Unter anderem wurden bereits erste Versuche auf Anbauflächen mit Kartoffeln, Weizen und anderen Feldfrüchten (Abbildung 3) in Deutschland durchgeführt. Bei dieser Art der Installation müssen große Reihenabstände und eine hohe Aufständering gewählt werden, um den ungehinderten Zugang für große landwirtschaftliche Maschinen zur Bearbeitung und Ernte zu gewährleisten. Die Durchfahrtshöhe ist theoretisch frei wählbar, entspricht im Regelfall aber mindestens vier Meter. Ähnlich verhält es sich beim Reihenabstand. Auch dieser kann frei gewählt werden und ist davon abhängig, wie breit die Maschinen zur Feldbearbeitung und Ernte sind. Die Anlagen sind für gewöhnlich Richtung Südosten, Süden oder Südwesten ausgerichtet. Die Wahl der Kulturen kann bei dieser Art der Anwendung relativ frei erfolgen, da eine Verschattung der Module durch die Kulturen aufgrund der hohen Aufständering ausgeschlossen ist. Es empfiehlt sich jedoch die Auswahl von Kulturen, die eine hohe Schattentoleranz haben und daher mit geringen Ertragsinbußen oder sogar Ertragszuwächsen auf Verschattung reagieren.

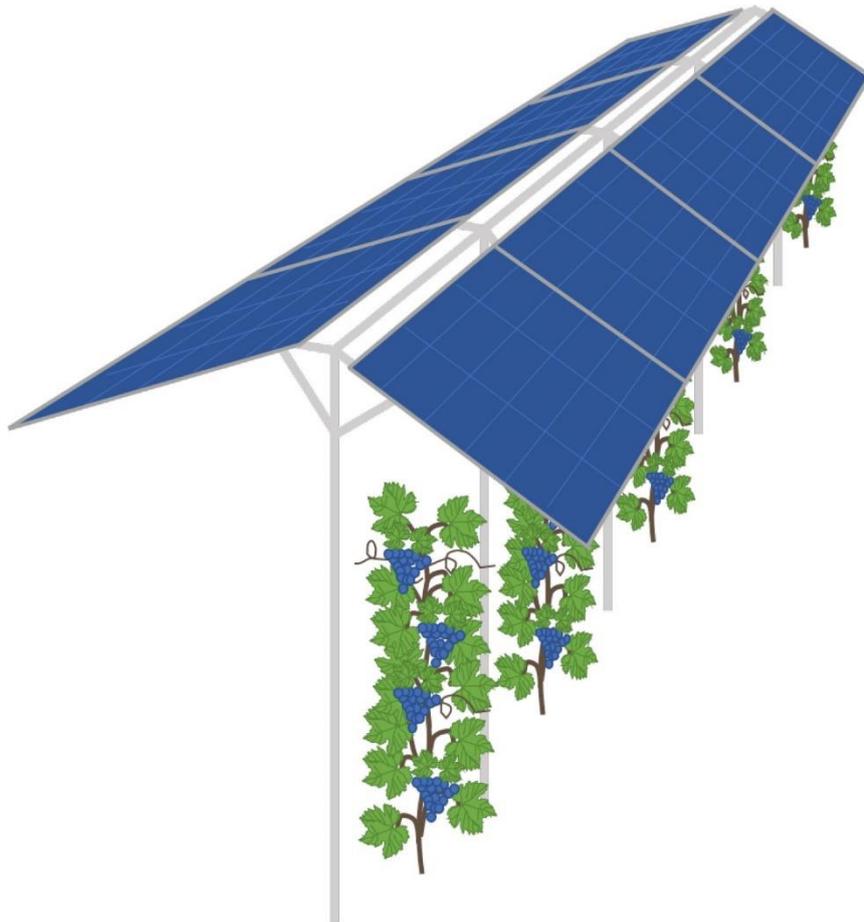


Abbildung 4: Hoch aufgeständerte Agri-PV-Anlage in Sonderkulturen (Darstellung: Johannes Scharf, TFZ, 21.12.2020)

In neuesten Versuchen werden nun zusätzlich Sonderkulturen untersucht, wie beispielsweise der Himbeeranbau in den Niederlanden [12] oder der Weinbau in Frankreich [45]. Hier kann die Aufständigung entweder in bestehende Stütz- und Schutzstrukturen integriert werden oder diese vollständig ersetzen [12]. Die Module werden oberhalb der jeweiligen Kultur angebracht und bilden somit ein Dach, das gegen Hagel, Starkregen und zu hohe Sonneneinstrahlung schützen kann (Abbildung 4). Um weiterhin ausreichende Einstrahlung für die darunterliegenden Pflanzen zu gewährleisten, wird entweder der Abstand zwischen den Modulen im Vergleich zu konventionellen PV-FFA vergrößert oder es werden Spezialmodule mit einer höheren Transparenz verwendet. Somit können nur in etwa 50 bis 80 Prozent der Leistung einer PV-FFA auf der Fläche installiert werden. Durch die Art der Aufständigung entsteht ein vorteilhaftes Mikroklima, das durch einen Kamineffekt tagsüber die Pflanzen kühlt und nachts höhere Temperaturen als in der Umgebung ermöglicht [57]. Diese Art der PV-Aufständigung schützt die Pflanzen somit nicht nur vor extremen Wetterereignissen und Hitze, sondern kann durch dieses vorteilhafte Mikroklima optimierte Wachstumsverhältnisse und bessere landwirtschaftliche Erträge begünstigen [61]. Außerdem kann auf kostenintensive und umweltbelastende Folien o. Ä., die im herkömmlichen Anbau für den Schutz der Kulturen genutzt werden und regelmäßig erneuert werden müssen, verzichtet werden.

2.2 Vertikale Agri-PV

Eine weitere Möglichkeit stellt die Errichtung der PV-Module in vertikaler Ausrichtung dar. Hierbei werden bifaciale Module über- und nebeneinander angebracht, wobei sich die Unterkante der unteren Modulreihe 20 bis 80 Zentimeter über dem Boden befindet. Die Reihen können dabei bis zu drei Meter hoch werden. Eine noch höhere Anbringung bietet eine zu große Angriffsfläche für Seitenwinde und wird aus Gründen der Statik nicht realisiert, da die Fundamente überproportional stark konstruiert werden müssten. In der Folge wäre ein wirtschaftlicher Betrieb aufgrund der steigenden Installationskosten unmöglich [52]. Für gewöhnlich werden daher zwei Module übereinander angebracht (Abbildung 5). Bei drei oder mehr Modulen erhöhen sich die Windlasten deutlich. Außerdem müsste der Reihenabstand zusätzlich sehr groß gewählt werden, um eine Selbstverschattung der Module zu verhindern. Dies würde zu einer verminderten Flächenleistung führen.

Um maximalen Stromertrag zu erzielen, werden für diese Anwendungsart immer bifaciale Module verwendet, die sowohl auf der Vorder- als auch auf der Rückseite Strom erzeugen können. Um ein gleichmäßiges Erzeugungsprofil zu gewährleisten, werden die Module im Wechsel angebracht. Die Module haben typischerweise eine Bifacialität von 80 bis 85 Prozent. Das heißt, die Rückseite der Module erbringt 80 bis 85 Prozent der Leistung der Vorderseite. Theoretisch ist eine höhere Bifacialität zwar möglich, derartige Module sind jedoch aktuell so teuer, dass die Mehrerträge die höheren Kosten nicht rechtfertigen [32].

Die Reihen verlaufen im Regelfall in Nord-Süd-Richtung. Da die Modulflächen somit nach Osten und Westen zeigen, ergeben sich Produktionsspitzen am Morgen und am Abend. Dies ist für die Erzeugung von PV-Strom ungewöhnlich, da herkömmliche PV-FFA für

gewöhnlich nach Süden ausgerichtet sind und somit ihre Erzeugungsspitze zur Mittagszeit bei maximaler Sonneneinstrahlung liegt. Aufgrund des untypischen Erzeugungsprofils können höhere Preise am Strommarkt erzielt werden, da zu diesen Zeiten der Verbrauch höher und die Stromerzeugung anderer PV-Anlantypen sehr niedrig ist.

Die Reihenabstände betragen typischerweise acht bis vierzehn Meter. Weniger als acht Meter führen bei tiefstehender Sonne zu häufig zur Selbstverschattung der PV-Module. Ein höherer Reihenabstand geht zulasten der Anlagenleistung. Mit sinkenden Reihenabständen nimmt wiederum die landwirtschaftliche Anbaufläche ab, da mit mehr Modulen auch mehr nicht landwirtschaftlich nutzbare Fläche pro Hektar entsteht, die für die Aufständigung der Module und als Sicherheitsabstand während der Bearbeitung benötigt wird. Zusätzlich wird mit abnehmendem Reihenabstand die landwirtschaftliche Bearbeitung immer aufwendiger, da kleinere Maschinen verwendet werden müssen.

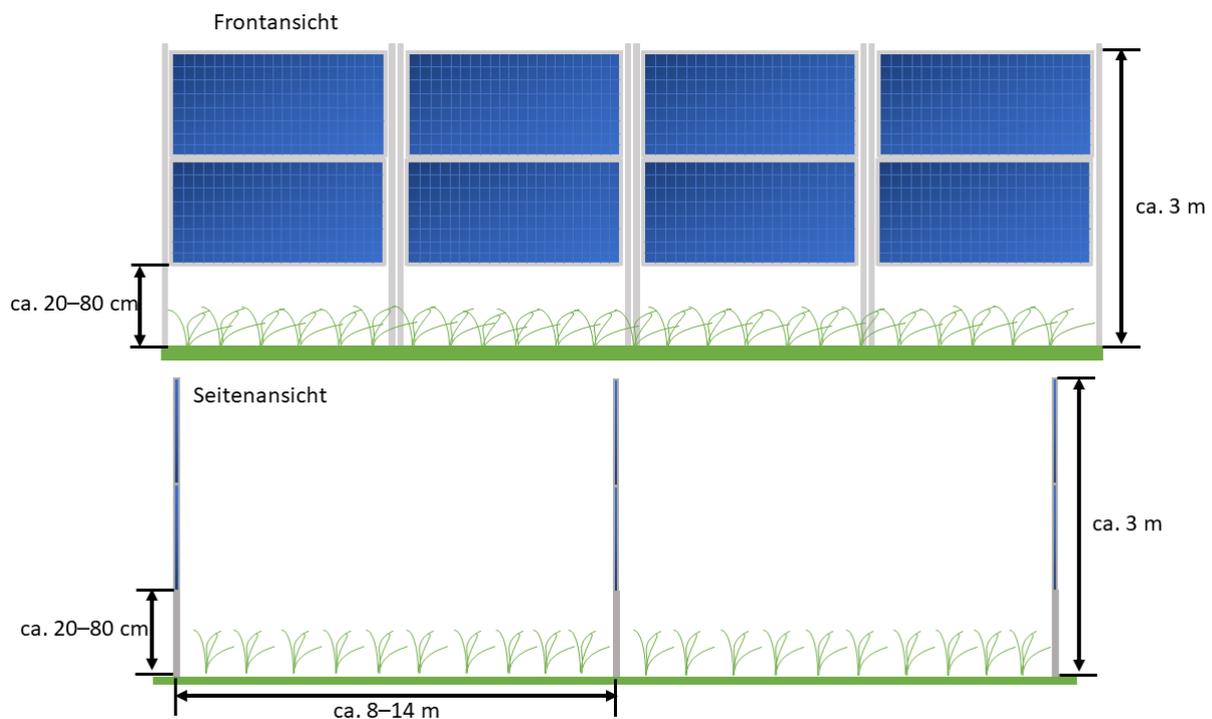


Abbildung 5: Vertikale Agri-PV-Anlage im Grünland (Darstellung: Johannes Scharf, TFZ, 21.12.2020)

Bislang wurden Anlagen des vertikal aufgeständerten Typs nur auf Grünlandflächen (Abbildung 5) errichtet. Grünland eignet sich hervorragend, da die PV-Module durch das niedrigstehende Gras nicht verschattet werden. In Zukunft sind erste Versuche auf Ackerflächen angedacht [52]. Beim Ackerbau muss darauf geachtet werden, besonders niedrig wachsende Kulturpflanzen zu wählen, da ansonsten die Gefahr einer Beschattung der PV-Module besteht. Dies würde zu enormen Ertragseinbußen in der Stromerzeugung führen. Abbildung 6 verdeutlicht das Problem, dass einige Zellenreihen der unteren Module bei der Auswahl beispielsweise ungeeigneter Getreidearten bzw. -sorten durch die Kultur verschattet werden können.

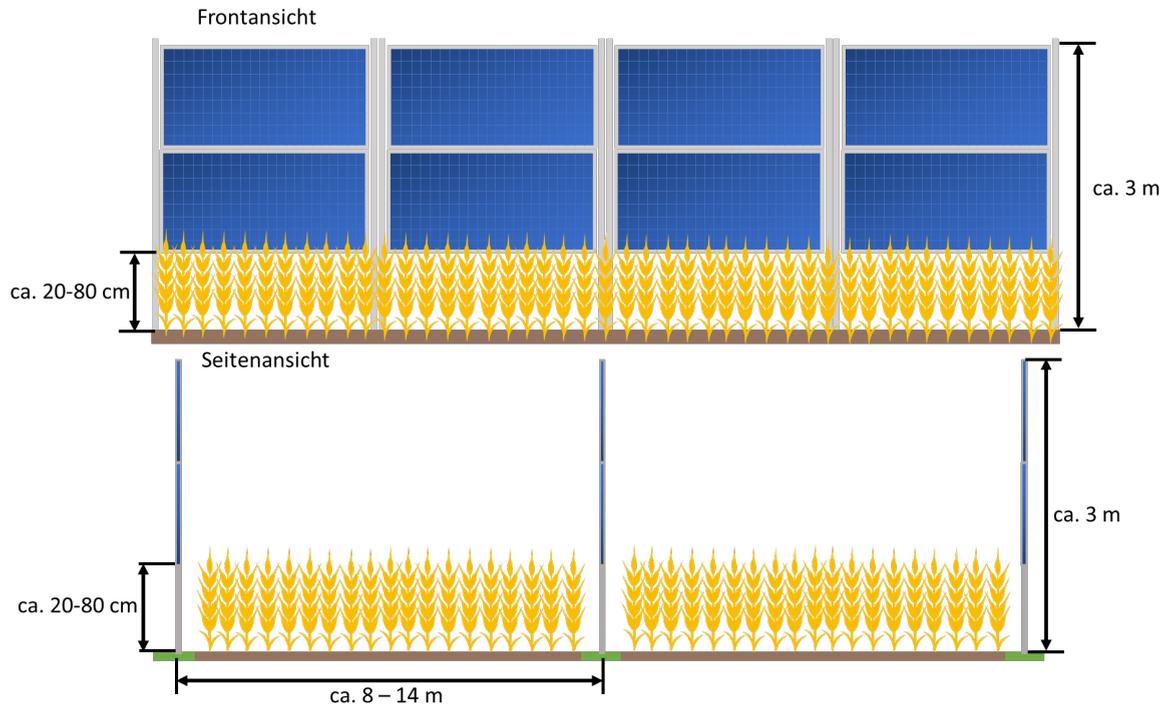


Abbildung 6: Vertikale Agri-PV-Anlage mit Weizenanbau, wobei die vergleichsweise niedrigen Weizenpflanzen bereits einen Teil der unteren Modulreihe verschatten können (Darstellung: Johannes Scharf, TFZ, 21.12.2020)

Noch deutlicher wird das Problem der Verschattung im Maisanbau. Die mit 2,5 Millionen Hektar Anbaufläche in Deutschland zweitwichtigste Kulturpflanze wird im Schnitt 1,5 bis 2,5 Meter hoch und würde damit die Module einer vertikalen Agri-PV-Anlage im Spätsommer und Herbst zu großen Teilen verschatten. Abbildung 7 verdeutlicht, dass diese Art der Agri-PV in hochwachsenden Kulturen, wie beispielsweise Mais oder Sorghum, ungeeignet ist.

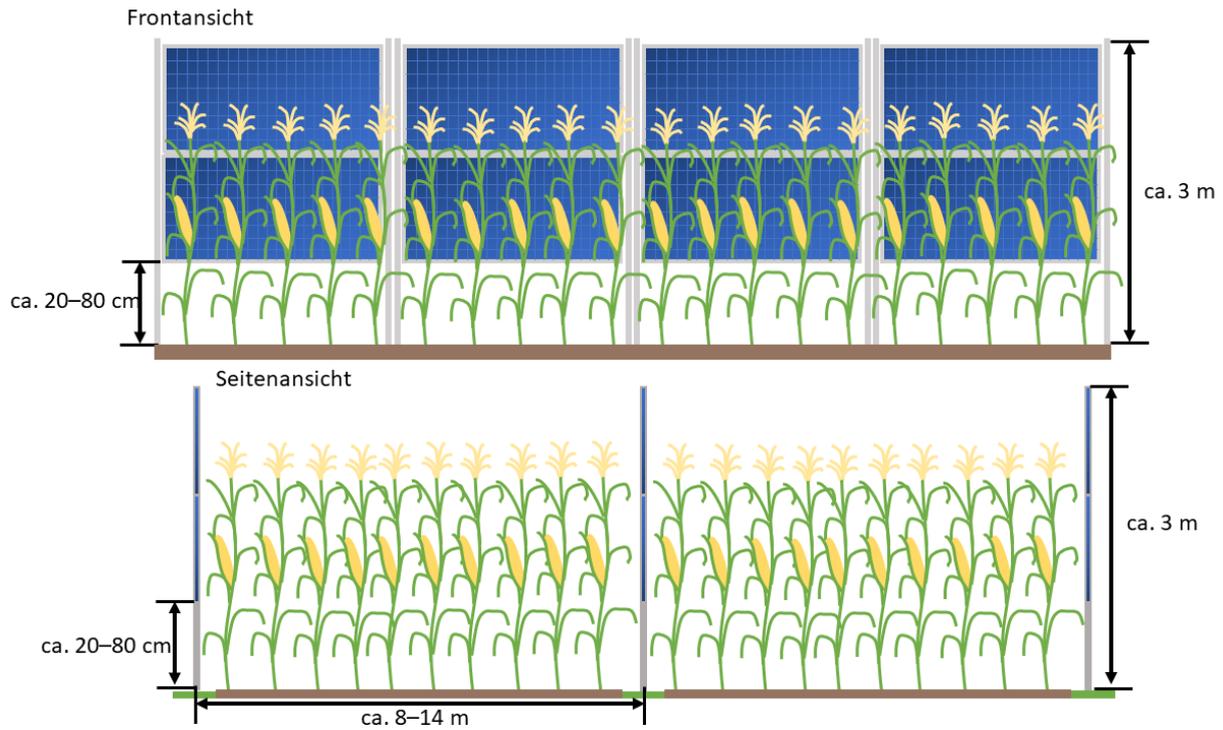


Abbildung 7: Vertikale Agri-PV-Anlage mit Maisanbau mit weitgehender Verschattung der Module durch die hochwachsenden Pflanzen (Darstellung: Johannes Scharf, TFZ, 21.12.2020)

2.3 Nachgeführte Agri-Photovoltaik



Abbildung 8: Nachgeführte Agri-PV-Anlage mit Weizenanbau, grün markierte Bereiche unter den Modulen gelten als nicht landwirtschaftlich genutzte Fläche (Darstellung: Johannes Scharf, TFZ, 21.12.2020)

Als dritte Möglichkeit kommt eine nachgeführte Anbringung der Photovoltaikmodule, ähnlich einer nachgeführten Freiflächenanlage, in Betracht. Dieses Anlagendesign wurde bislang nur einmal in Althegnenberg in Oberbayern verwirklicht. Bei dieser Anlage haben sich befreundete Privatleute mit dem die Fläche bewirtschaftenden Landwirt zusammengesprochen, um ein selbst entwickeltes Anlagendesign zu verwirklichen. Das Design wurde von einem der Betreiber, einem Lehrer, im Zuge eines Projekts mit seiner Klasse entwickelt. Die PV-Module wurden auf einachsige beweglichen Modultischen installiert, ähnlich einer einachsigen nachgeführten PV-FFA-Anlage. Die Reihenabstände sind mit 14 Metern jedoch im Vergleich zu einer herkömmlichen Anbringung deutlich größer, um eine maschinelle Bewirtschaftung der dazwischenliegenden landwirtschaftlichen Flächen zu ermöglichen. Zusätzlich ist die Aufständigung höher als bei herkömmlichen nachgeführten PV-Anlagen, um die Verschattung der Module durch die Kulturen zu minimieren.

Im normalen Betrieb wird die Trackingfunktion genutzt, um den Stromertrag zu optimieren und gleichzeitig das Wachstum der dazwischenliegenden Pflanzen minimal zu beeinflussen. Der optimale Stand zur Sonne kann dabei mithilfe von Lichtsensoren ermittelt werden oder die Anlage wird mittels Softwaresteuerung jahres- und tageszeitabhängig nachgeführt. Für die landwirtschaftliche Bewirtschaftung können die Module in diesem Fall um mehr als 60 Grad gedreht werden. In dieser fast vertikalen Ausrichtung bleibt für den Landwirt mehr Platz, um die Zwischenflächen ohne Beeinträchtigung anzusäen, zu pflanzen und zu ernten. Dieses Anlagendesign bietet sich somit für die Anwendung in vielen klassischen Marktfrüchten an. Jedoch ist auch bei diesem Anlagentyp die Auswahl passender Kulturen, die zwischen den Modulreihen angebaut werden, eingeschränkt. Wie in Abbildung 9 ersichtlich ist, können Kulturen mit einer zu hohen Wuchshöhe auch hier die Module verschatten. Eine höhere Aufständigung wäre zwar bis zu einem gewissen Grad möglich, erhöht den Materialaufwand aber erheblich und kann so die Gesamtwirtschaftlichkeit der Anlage verschlechtern.

Die Flächen, die sich unterhalb der Modultische befinden, können nicht landwirtschaftlich genutzt werden, da die Pflanzen unterhalb der Module weder genügend Licht noch genügend Wasser erhalten. Somit stehen sie beispielsweise als ökologisch wertvolle Brachflächen bzw. Offenlandflächen zur Verfügung. Eine weitere Möglichkeit, diese Flächen zu nutzen, kann die Pflanzung von Beerensträuchern, die einen niedrigen Lichtsättigungspunkt haben und somit von der Verschattung profitieren können, sein. Dieser Ansatz wird derzeit für die Anlage in Althegnenberg diskutiert. Die Beeren sollen in diesem Fall zum Selberpflücken für Kunden angeboten werden, was eine maschinelle Ernte überflüssig machen soll. Um ein Wachstum direkt unterhalb der Module zu ermöglichen, kann beispielsweise Regenwasser an der Ablaufkante der Module aufgefangen und mithilfe von Tröpfchenbewässerung verwendet werden. Eine weitere Möglichkeit können Abstände sein, die zwischen den Modulen freigelassen werden und somit einen gewissen Anteil des Niederschlags zu den Pflanzen durchlassen.

Seitenansicht



Abbildung 9: Nachgeführte Agri-PV-Anlage mit Maisanbau mit teilweiser Verschattung der Module gelten als nicht landwirtschaftlich genutzte Fläche (Darstellung: Johannes Scharf, TFZ, 21.12.2020)

3 Landnutzungsrate

Im Vergleich mit PV-FFA wird bei Agri-PV häufig über die Landnutzungsrate diskutiert, da auf den Agri-PV-Flächen sowohl Biomasse als auch Strom produziert wird. Diese Doppelnutzung kann mit der Landnutzungsrate dargestellt werden. Dabei muss beachtet werden, dass die Landnutzungsrate keine ökonomische Maßzahl, sondern ein theoretischer Wert für die Flächeneffizienz ist und demnach nicht zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Agri-PV herangezogen werden kann.

Die Landnutzungsrate (LNR) leitet sich aus dem Konzept der *land equivalent ratio* (LER) ab. Ursprünglich beschreibt dieses Konzept im Pflanzenbau das Verhältnis der Fläche, die im Einzelfruchtanbau (EFA) benötigt wird, um einen gewissen Ertrag aus zwei oder mehr Kulturen zu erhalten, zur Fläche, die im Mischfruchtanbau (ZFA) benötigt wird, um diesen Ertrag zu erhalten [39]. Mischfruchtanbau beschreibt den Anbau von zwei oder mehr Kulturen auf einer Fläche, wie beispielsweise das Landsberger Gemenge oder ein gemeinsamer Anbau von Leindotter und Erbsen. Die LNR bzw. LER wird wie folgt berechnet:

$$LNR = \frac{Ertrag_{Frucht1} (MFA)}{Ertrag_{Frucht1} (EFA)} + \frac{Ertrag_{Frucht2} (MFA)}{Ertrag_{Frucht2} (EFA)} \quad (3.1)$$

Entspricht die LNR beispielsweise 1,6, so werden mit Misch- und Zweitfruchtanbau zehn Hektar benötigt, um eine gewisse Menge an Erzeugnissen zu produzieren. Um die gleiche Menge im Einzelfruchtanbau zu produzieren, werden 16 Hektar benötigt.

Diese Berechnungsweise ist theoretisch auf Agri-PV-Systeme übertragbar. Hier werden die kombinierten Erträge aus Landwirtschaft und Stromproduktion einer Agri-PV-Anlage mit den Erträgen, die auf einer rein landwirtschaftlichen Nutzfläche bzw. einer reinen PV-FFA erwirtschaftet werden, ins Verhältnis gesetzt. In diesem Fall lautet die Formel also:

$$LNR = \frac{Ertrag_{Elektrisch} (AgriPV)}{Ertrag_{Elektrisch} (FFA)} + \frac{Ertrag_{Landwirtschaftlich} (AgriPV)}{Ertrag_{Landwirtschaftlich} (mono)} \quad (3.2)$$

Bei den jeweiligen Erträgen dieser Formel (3.2) handelt es sich um reale Erträge, die auf einer Versuchsfläche gemessen werden. Dabei steht $Ertrag_{Elektrisch} (AgriPV)$ für die tatsächlichen Stromerträge in kWh, die in einer Agri-PV-Anlage erwirtschaftet werden. Dem stehen die Erträge einer PV-FFA-Referenzanlage, $Ertrag_{Elektrisch} (FFA)$, gegenüber. Außerdem werden die tatsächlichen landwirtschaftlichen Erträge innerhalb der Agri-PV-Anlage, $Ertrag_{Landwirtschaftlich} (AgriPV)$, mit den Erträgen der landwirtschaftlichen Referenzfläche, $Ertrag_{Landwirtschaftlich} (mono)$, ins Verhältnis gesetzt.

Die Berechnung der LNR wird im Folgenden an einem Beispiel mit konkreten Zahlen verdeutlicht: Stehen zwei Hektar Land zur Verfügung, so könnte die Hälfte der Fläche

landwirtschaftlich, beispielsweise für den Anbau von Speisekartoffeln genutzt werden, und die andere Hälfte für die Installation einer PV-FFA (Abbildung 10). Bei Speisekartoffeln wurde in Bayern im Mittel der Jahre 2017 bis 2019 ein Ertrag von 412,5 Dezitonnen pro Hektar (dt/ha) erwirtschaftet. Der landwirtschaftliche Referenzertrag ($Ertrag_{Landwirtschaftlich} (mono)$) entspricht somit 412,5 Dezitonnen [6].

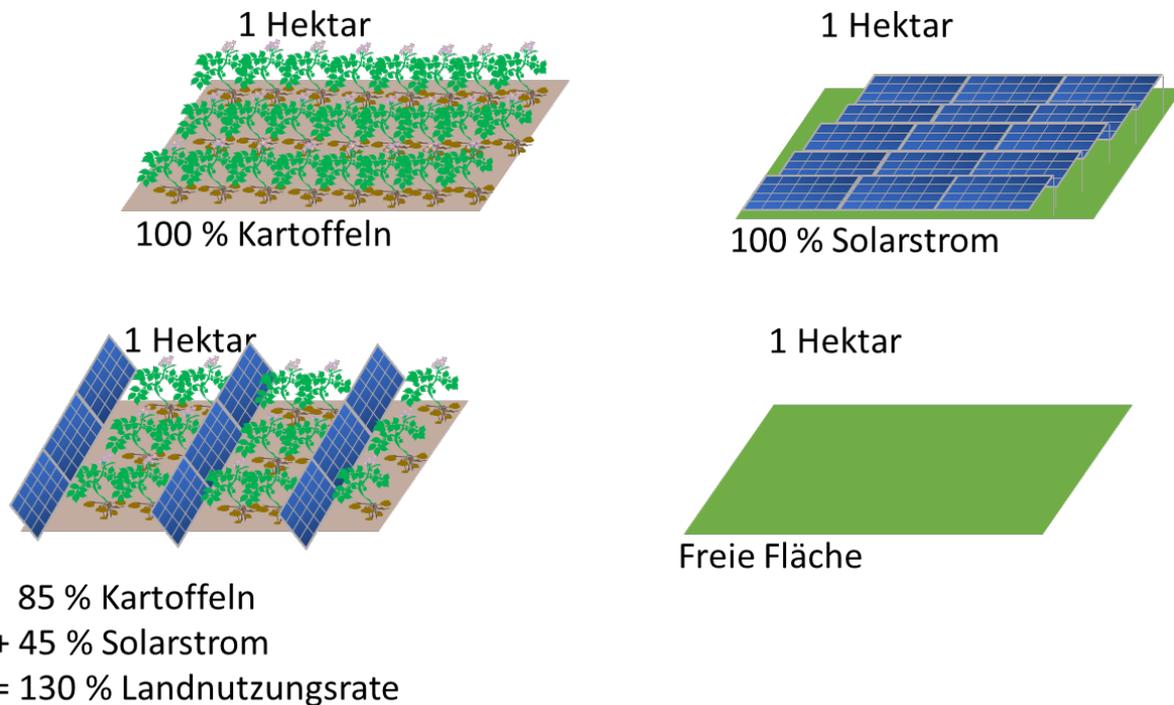


Abbildung 10: Schematische Darstellung der LNR einer Agri-PV-Anlage (Darstellung: Johannes Scharf, TFZ, 03.02.2021)

Der zweite Hektar der verfügbaren Fläche wird für die Errichtung einer PV-FFA genutzt. In diesem Fall könnte auf einer Fläche von einem Hektar bei einem Flächenbedarf von 1,4 Hektar pro Megawatt Peak [65] eine Anlage mit einer Leistung von 714 kW_p installiert werden. Da in Süddeutschland aufgrund der hohen Sonneneinstrahlungswerte der spezifische Ertrag von PV-Anlagen besonders hoch ist, kann in Bayern mit einem spezifischen Ertrag von 1100 bis 1250 kWh/kW_p gerechnet werden [40], im Durchschnitt also 1175 kWh/kW_p. Für eine Anlage mit einer Leistung von 714 kW_p ergibt sich so ein jährlicher Stromertrag ($Ertrag_{Elektrisch} (FFA)$) von ca. 838 MWh.

Statt einem Hektar Kartoffelanbau und einem Hektar PV-FFA ist auch die Errichtung einer Agri-PV-Anlage auf einem Hektar möglich, die beide Produktionsformen kombiniert. In oben dargestelltem Beispiel (Abbildung 10) entsteht dabei eine LNR von 130 Prozent auf dieser Agri-PV-Fläche. Diese ergibt sich aus dem Stromertrag vertikal aufgeständerter Module und dem Kartoffelanbau dazwischen. Im Beispiel wird davon ausgegangen, dass die Module durch den Anbau der niedrigwachsenden Kartoffeln nicht verschattet werden. Werden in vertikalen oder nachgeführten Agri-PV-Anlagen unpassende Kulturen gewählt,

können diese, falls sie zu hoch wachsen, die Modulflächen verschatten (siehe Abbildung 7 und Abbildung 9). In diesem Fall sinken der Stromertrag und damit die gesamte LNR. Der im Beispiel angenommene Kartoffelertrag wurde über die um geschätzte 15 Prozent verringerte Anbaufläche – für die Modulerrichtung und ein Trafohaus – bestimmt. Allerdings sind die landwirtschaftlichen Erträge erheblich vom Anlagentyp und der Schattentoleranz der gewählten Kultur abhängig. Wird beispielsweise ein Anlagendesign gewählt, das den Lichtzugang oder den Wasserzugang zu stark limitiert, kann es zu hohen Ertrags- einbußen im Pflanzenbau kommen. Andere (Sonder-)Kulturen, wie z. B. Himbeeren, könnten von einer Beschattung mit Ertrags- und Qualitätssteigerungen profitieren. In Abbildung 10 fällt auf, dass der zweite Hektar neben der Agri-PV-Anlage als „Freie Fläche“ definiert ist. Es sind verschiedene Arten der Flächennutzung möglich: Die Fläche kann wie bisher landwirtschaftlich oder ebenfalls für die Errichtung einer Agri-PV-Anlage genutzt werden.

Die Ermittlung der Stromerträge innerhalb der Anlage stellt bei Agri-PV-Anlagen kein Problem dar, da diese aufgrund der verbauten Messtechnik minutengenau überwacht werden können. Zur Ermittlung der landwirtschaftlichen Erträge dagegen ist eine exakte wissenschaftliche Begleitung der jeweiligen Projekte nötig. Mangels Daten zu landwirtschaftlichen Erträgen wird bei dieser Rechnung davon ausgegangen, dass die Erträge aufgrund der Verschattung durch die Anlage um 3,5 Prozent abnehmen. Diese Annahme wird aufgrund der Ergebnisse des Projekts APV-RESOLA getroffen, bei dem im Jahr 2017 die Kartoffelerträge der Agri-PV-Anlage im Vergleich zur Referenzfläche um achtzehn Prozent ab-, im sehr trockenen Jahr 2018 jedoch um elf Prozent zugenommen hatten. Im Mittel nahmen sie in diesem nicht statistisch abgesicherten Feldversuch also im Vergleich zur Referenzfläche um 3,5 Prozent ab. Betrachtet man eine vertikal aufgeständerte Agri-PV-Anlage, geht bei einem Reihenabstand von zehn Metern im Vergleich zur Referenzfläche eine Anbaufläche von ca. zehn Prozent verloren, was ebenfalls zu Ertragseinbußen führt. Die landwirtschaftlichen Erträge innerhalb der Agri-PV-Anlage ($Ertrag_{Landwirtschaftlich}(AgriPV)$) entsprechen somit 356,8 Dezitonnen (entsprechen um 13,5 Prozent verringerten Erträgen gegenüber der reinen Kartoffelfläche).

Eine Agri-PV-Anlage dieses Typs könnte zusätzlich zu den Kartoffeln auf einem Hektar einen Stromertrag ($Ertrag_{Elektrisch}(AgriPV)$) von ca. 382 MWh produzieren. Setzt man diese Werte in die oben genannte Formel der LNR (3.2) ein, ergibt sich Folgendes:

$$\begin{aligned}
 LNR_{Beispielanlage} &= \frac{382.000 \text{ kWh}}{714 \text{ kW}_p * 1175 \frac{\text{kWh}}{\text{kW}_p}} + \frac{412,5 \text{ dt} * (1 - 0,135)}{412,5 \text{ dt}} \\
 &= 0,455 + 0,865 = 1,32 = 132 \%
 \end{aligned}
 \tag{3.3}$$

Für das geschilderte Beispiel errechnet sich also eine LNR von 132 Prozent, was eine Steigerung von 32 Prozent gegenüber der getrennten Erzeugung von Kartoffeln (100 Prozent) und einer PV-FFA (ebenfalls 100 Prozent) auf zwei Flächen bedeutet.

Die LNR stellt lediglich die Flächeneffizienz dar und lässt bei ihrer Interpretation keinerlei Rückschlüsse auf wirtschaftliche Erfolgsfaktoren zu. Für eine ökonomische Bewertung muss den Erträgen auch der Aufwand gegenübergestellt werden (Kapitel 5).

Zur LNR bestehender Agri-PV-Anlagen gibt es bislang nur eine sehr eingeschränkte Datenlage. Eine wissenschaftliche Begleitung des Betriebs und eine Überprüfung der landwirtschaftlichen Erträge von Agri-PV-Versuchsprojekten wurden in Deutschland bisher nur bei hoch aufgeständerten Anlagen, wie der Versuchsanlage in Heggelbach, durchgeführt.

Zu den beiden anderen beschriebenen Anlagendesigns gibt es mangels wissenschaftlicher Begleitung der Projekte bislang keine Daten zur Landnutzungsrate [52] [54]. Eine erste Bewertung der landwirtschaftlichen Erträge innerhalb der nachgeführten Agri-PV-Anlage in Altheggenberg soll im Lauf des Jahres 2021 erfolgen, auch hierbei handelt es sich allerdings nicht um agrarwissenschaftliche Exaktversuche [54]. Eine wissenschaftliche Begleitung eines Agri-PV-Projekts im vertikalen Design soll auf einer Ackerfläche im Jahr 2022 erfolgen [52]. Aus diesem Grund werden in diesem Kapitel zunächst die Ergebnisse der Pilotanlage in Heggelbach diskutiert, bevor die beiden anderen beschriebenen Systeme schematisch erörtert werden.

3.1 Hoch aufgeständerte Anlagen am Beispiel Heggelbach



Abbildung 11: Mähdrescher bei der Weizenernte unter der hoch aufgeständerten Agri-PV-Anlage der Hofgemeinschaft Heggelbach (Foto: Hofgemeinschaft Heggelbach)

Die Agri-PV-Anlage wurde im Zuge des Projekts APV-RESOLA auf Flächen der Hofgemeinschaft Heggelbach in der Nähe des Bodensees errichtet [61]. Dieses Projekt wurde unter Leitung des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme (ISE) gemeinsam mit den Projektpartnern BayWa r. e., Solar Projects GmbH, Elektrizitätswerke Schönau, Vertriebs GmbH, der Hofgemeinschaft Heggelbach, dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT), dem Regionalverband Bodensee-Oberschwaben und der Universität Hohenheim im März 2015 ins Leben gerufen und durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert [60]. Da die Hofgemeinschaft Heggelbach nach Demeter-Richtlinien wirtschaftet, erfolgte die Beikrautkontrolle auf der Anlagenfläche rein mechanisch. Über einer 0,3 Hektar großen Fläche wurde eine hoch aufgeständerte Agri-PV-Anlage in sechs Metern Höhe installiert. Die Anlage hat eine Leistung von 194 kW_p. Ein landwirtschaftlicher Feldversuch wurde in einer mehrgliedrigen Fruchtfolge aus Sellerie, Kartoffeln, Weizen und Klee gras durchgeführt [61]. Der Reihenabstand zwischen den PV-Modulen wurde im Vergleich zu einer herkömmlichen PV-FFA um rund sechzig Prozent vergrößert [61], um zu gewährleisten, dass genügend Licht für die landwirtschaftliche Nutzung der darunterliegenden Flächen zum Boden durchdringen kann. Um zusätzlich eine möglichst gleichmäßige Lichtverteilung zu gewährleisten, wurde eine Ausrichtung nach Südwesten gewählt [61]. Die jeweiligen Landwirtschafts- bzw. Stromerträge innerhalb der Anlage wurden bei diesem Projekt direkt mit den Erträgen der Referenzflächen in unmittelbarer Umgebung der Anlage verglichen. Zudem gab es Untersuchungen zur photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) unter der Anlage, zur Niederschlagsverteilung sowie zur Bodentemperatur und -feuchtigkeit [26]. Diese Parameter wirken sich direkt auf das Pflanzenwachstum aus und können somit die Erträge maßgeblich beeinflussen.

Bereits 2017 lieferte die 2016 in Betrieb genommene Anlage erste vielversprechende Ergebnisse. So wurde in diesem Jahr eine Landnutzungsrate von 160 Prozent ermittelt. Die Landnutzungsrate wurde hierbei mithilfe der oben genannten Formel (3.2) ermittelt, indem die landwirtschaftlichen bzw. die Stromerträge der Agri-PV-Anlage ins Verhältnis zu den jeweiligen Erträgen der Referenzflächen gesetzt wurden. Die landwirtschaftlichen Erträge variieren im Vergleich zu den Referenzerträgen je nach Witterung. Die Stromerträge dagegen können zwar absolut schwanken, im Vergleich zur Referenzanlage erzeugt die Anlage aufgrund ihres höheren Reihenabstands relativ konstant achtzig Prozent des Stromertrags. Da die landwirtschaftlichen Erträge für alle Kulturen bis auf Klee gras ebenfalls ca. 80 Prozent der Erträge der Referenzflächen ausmachten, wies die Agri-PV-Anlage somit im Jahr 2017 eine Landnutzungsrate von ca. 160 Prozent auf [26].

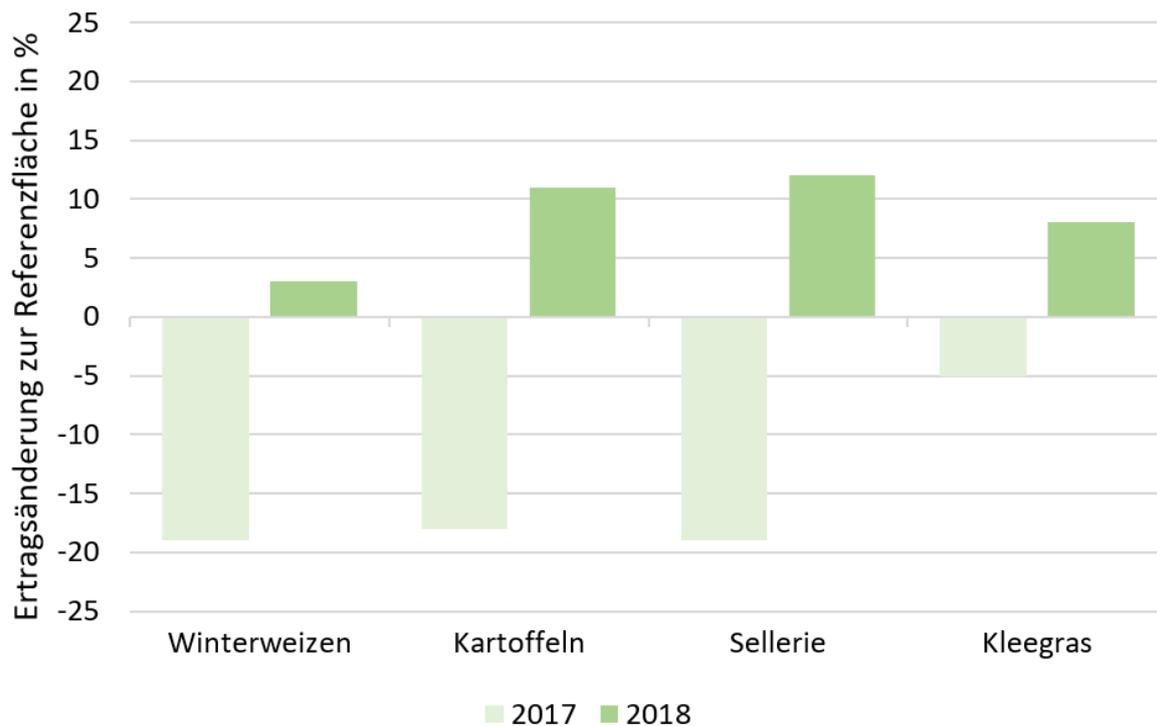


Abbildung 12: Relative Veränderung der landwirtschaftlichen Erträge im Vergleich zur Referenzfläche (Darstellung: Johannes Scharf, TFZ, 17.02.2021, nach Trommsdorff et al. [61])

Im Jahr 2018 war der Sommer besonders heiß und trocken, was zu einer Landnutzungsrate von, im günstigsten Fall, 186 Prozent führte. Hierbei gab es jedoch zum Teil sehr große Unterschiede zwischen den einzelnen Kulturen (Abbildung 12). Während bei Klee gras Ertragseinbußen von acht Prozent zu verzeichnen waren, war der Ertrag aller anderen Kulturen höher als der auf den Referenzflächen. Bei Winterweizen fiel der Ertrag um drei, bei Kartoffeln und Sellerie sogar über zehn Prozent höher aus [26]. Diese Unterschiede können darauf zurückgeführt werden, dass die Pflanzen unterschiedlich stark auf Verschattung reagieren. Besonders Schatten liebende Pflanzen können zum Teil mit starken Ertragszuwächsen auf Verschattung reagieren, bei extremer Sonneneinstrahlung können aber auch fotophile Pflanzen, sofern ihr Lichtsättigungspunkt weit überschritten wird, mit Ertragszuwächsen auf Verschattung reagieren [59]. Die Erträge der jeweiligen Kulturen waren über den Versuchszeitraum sehr instabil und variierten aufgrund der unterschiedlichen Witterungsverhältnisse zum Teil beträchtlich. So wurden beim Sellerie beispielsweise im Jahr 2017 Ertragsverluste von ca. achtzehn Prozent festgestellt, während der Ertrag im besonders heißen Jahr 2018 um zwölf Prozent zunahm.

3.2 Nachgeführte Anlagen



Abbildung 13: Nachgeführte Agri-PV-Anlage in Althegnenberg (Foto: Thomas Rebitzer)

Anders als bei hoch aufgeständerten Agri-PV-Anlagen gibt es sowohl zu vertikal aufgeständerten als auch zu nachgeführten Anlagen noch keine Versuche mit wissenschaftlicher Analyse der landwirtschaftlichen Erträge. Aus diesem Grund können bislang nur grobe Annahmen getroffen werden.

Bei der in Unterkapitel 2.3 beschriebenen nachgeführten Anlage in Althegnenberg (Abbildung 13) ergibt sich durch die Nord-Süd-Nachführung im Vergleich zu fest installierten PV-FFA mit Südausrichtung ein höherer Stromertrag pro kW_p installierter Leistung von fünfzehn bis zwanzig Prozent. Aufgrund der im Vergleich zu konventionellen PV-FFA deutlich erhöhten Reihenabstände von ca. 14 Metern konnten hier jedoch auf einer Fläche von 2,4 Hektar nur 750 kW_p installiert werden. Dies entspricht einer Flächenleistung von $312,5 \text{ kW}_p/\text{ha}$. Herkömmliche FFA kommen auf Werte von ca. $714 \text{ kW}_p/\text{ha}$ [65]. Bei einer durchschnittlichen Stromproduktion in Süddeutschland von 1100 bis 1250 kWh/kW_p [40] ergibt dies für eine Anlage in der Größe der Agri-PV-Anlage Althegnenberg eine Stromproduktion von 50 bis 52 Prozent einer Referenzanlage.

Für die Fundamente der Anlage werden pro Reihe Streifen mit einer Breite von zwei Metern freigelassen, die bei der Feldbearbeitung mit Maschinen nicht bearbeitet werden können. Somit gehen 14,28 Prozent der Anbaufläche verloren. Diese verlorenen Flächen können jedoch in Zukunft als ökologisch wertvolle Brachflächen oder, wie von den Betreibern aktuell angedacht, zur Pflanzung von beispielsweise Erdbeeren zum Selberpflücken

verwendet werden. Geht man also von 85,72 Prozent landwirtschaftlich nutzbarer Fläche aus, so ergäbe sich bei gleichbleibenden landwirtschaftlichen Erträgen zwischen den Modulreihen für diesen Anlagentyp eine LNR von 136 bis 138 Prozent. Diese Zahlen sind bislang aber hochspekulativ und nicht abgesichert.

Mangels landwirtschaftlicher Ertragsdaten kann bislang keine Annahme über eventuelle Ertragseinbußen oder -zuwächse getroffen, die LNR somit bislang nicht berechnet werden. Genaue Zahlen stehen bislang weder für die Strom- noch für die landwirtschaftlichen Erträge zur Verfügung, da die Anlage erst Ende April 2020 ans Netz ging. Somit können bislang nur ungefähre Erfahrungswerte für den Stromertrag der ersten Betriebsmonate herangezogen werden. Des Weiteren wurde bislang keine wissenschaftliche Überprüfung der landwirtschaftlichen Erträge durchgeführt. Aufgrund der späten Inbetriebnahme der Anlage wurde außerdem eine früh abreifende Körnermaissorte gewählt, die trotz des späten Aussaatzeitpunkts noch ausreichende Erträge versprach. Dieser Anbau war ursprünglich nicht vorgesehen und wurde nur behelfsweise gewählt.

Bei Mais handelt es sich um eine C4-Pflanze, die einen hohen Lichtsättigungspunkt besitzt. Sie reagiert daher erwartungsgemäß recht empfindlich auf Verschattung. Jedoch konnte bereits gezeigt werden, dass Mais unter bestimmten Voraussetzungen, wie sehr hohe Sonneneinstrahlung und Trockenheit, sogar mit höheren Erträgen auf geringe Verschattung reagieren kann [59]. Aufgrund schlechter Wuchsbedingungen blieben jeweils die beiden Maisreihen, die direkt neben den Modultischen gepflanzt wurden, im Wachstum deutlich zurück. Aufgrund der späten Fertigstellung der Anlage wurde außerdem bis zuletzt schweres Gerät auf der Fläche verwendet, was zu Überfahrtsschäden, vor allem im Bereich des Einfahrtstors führte (Abbildung 13). In einem ersten Vergleich mit einer neben der Anlage befindlichen Fläche, die gleichzeitig mit derselben Sorte bepflanzt wurde, wurden durch den Landwirt kaum Einbußen verzeichnet. Da es jedoch keine wissenschaftliche Erhebung der landwirtschaftlichen Erträge gab, können die Werte hierzu bislang nur geschätzt werden. Langfristig soll auf der gesamten Fläche eine siebenjährige Fruchtfolge etabliert werden, die für das Jahr 2021 eine Getreidesorte vorsieht.

3.3 Vertikal aufgeständerte Anlagen



Abbildung 14: Vertikal aufgeständerte Agri-PV-Anlage in Donaueschingen-Aasen (Foto: Johannes Scharf, TFZ, 09.09.2020)

Bei vertikal aufgeständerten Anlagen, die bislang ausschließlich im Grünland erprobt wurden, geht kaum landwirtschaftlich nutzbare Fläche verloren. Aufgrund der Art der Aufständigung kann bei der Mahd besonders nah an die Modulreihen herangefahren werden. Diese sind senkrecht übereinander ab ca. 20 bis 80 Zentimetern Höhe über dem Boden angebracht. Bei der Mahd verbleiben so nur ca. 50 Zentimeter breite Streifen auf beiden Seiten der Modulreihen, die nicht mit großen Maschinen gemäht werden können. Diese können zukünftig beispielsweise mit Mährobotern oder Balkenmähern gemäht werden. Alternativ bietet sich eine Beweidung der Flächen mit Kühen, Schafen oder Alpakas an.

In Zukunft sind aber auch vertikal aufgeständerte Anlagen in anderen Kulturen angedacht. Der Betreiber der bisherigen Anlagen plant beispielsweise, im Sommer 2021 eine erste 5-MW_p-Anlage auf einer Ackerfläche im Saarland in Betrieb zu nehmen. Diese soll als Versuchsstandort für verschiedene Kulturen dienen. Eventuell können erste Kulturen schon im Sommer 2021 etabliert werden. Ab dem Jahr 2022 sollen dort die Erträge mehrerer Fruchtfolgen unter wissenschaftlicher Begleitung untersucht werden. Im Ackerbau geht der Betreiber von einem Reihenabstand von mindestens zwölf Metern aus, um eine optimale Bewirtschaftung zu ermöglichen.

Die LNR ist stark vom Reihenabstand abhängig. Für gewöhnlich beträgt dieser acht bis vierzehn Meter. Je höher der Reihenabstand gewählt wird, desto geringer ist die

Anlagenleistung pro Hektar. Geringere Reihenabstände wiederum gehen zulasten der landwirtschaftlichen Anbaufläche, da mit mehr Modulen auch mehr nicht landwirtschaftlich nutzbare Fläche pro Hektar entsteht.

Eine der neuesten Anlagen, die in diesem Design verwirklicht wurde, ist die 2020 ans Netz gegangene Agri-PV-Anlage in Donaueschingen-Aasen (Abbildung 14). Das Projekt wurde in zwei Phasen auf einer Fläche von zwölf Hektar verwirklicht und erhielt Zuschläge in den EEG-Ausschreibungsrunden der Jahre 2018 und 2019. Auch dieses Projekt wurde von der Firma Next2Sun im Grünland verwirklicht. Bei diesem Projekt wurde mit einem Reihenabstand von zehn Metern ein Mittelmaß aus hoher Anlagenleistung und ausreichend landwirtschaftlicher Fläche gewählt. Da die Streifen für die Aufständigung, die nicht herkömmlich gemäht werden können, ca. einen Meter breit sind, gehen lediglich ca. zehn Prozent der Fläche verloren. Gleichzeitig hat die Anlage eine Leistung von 4,15 MW_p auf einer Fläche von zwölf Hektar. Die Anlage erwirtschaftet damit einen Jahresenergieertrag von 4850 MWh [32]. Bei einem Flächenbedarf von 1,4 Hektar pro Megawatt Peak [65] und einem durchschnittlichen jährlichen Ertrag in dieser Gegend von 1100 bis 1250 kWh/kW_p [40] würde eine konventionelle PV-FFA an diesem Standort auf der gleichen Fläche im Jahr zwischen 9428 und 10714 MWh erzeugen. Somit produziert diese Anlage 45 bis 51 Prozent des Stroms, den eine konventionelle Anlage an diesem Standort erzeugen könnte. Geht man auch hier von gleichbleibenden landwirtschaftlichen Erträgen aus, ergibt dies eine theoretische LNR von 135 bis 141 Prozent. Auch diese Zahlen sind jedoch spekulativ und können erst nach einer wissenschaftlichen Überprüfung der Erträge verlässlich bestimmt werden.

3.4 Nutzen der Agri-PV in anderen Regionen der Welt

In Europa werden Agri-PV-Anlagen bislang verwendet, um die LNR einer Fläche zu steigern und Sonderkulturen vor extremen Wetterereignissen und zum Teil zu hoher Sonneneinstrahlung zu schützen. In Japan und Südkorea dagegen werden die Anlagen hauptsächlich gefördert, um kleinbäuerliche Strukturen zu erhalten, indem neue Einkommensquellen für Landwirte generiert werden. All diesen Anwendungen ist gemein, dass landwirtschaftlicher Anbau auch ohne Agri-PV betrieben werden soll. Agri-PV stellt im besten Fall eine Unterstützung für den landwirtschaftlichen Anbau dar, indem die Module beispielsweise Hagelnetze in Sonder- und Dauerkulturen ersetzen. Sie kann die landwirtschaftliche Bearbeitung aber auch erschweren, wie es teilweise im Ackerbau der Fall ist. In solchen Fällen wird der Mehraufwand für die Bewirtschaftung in Kauf genommen, da er den Landwirten mittels landwirtschaftlicher Mehrerträge, besserer Qualitäten bzw. durch Stromerlöse oder zusätzliche Pachteinahmen Vorteile beschert.

In anderen Regionen der Welt ermöglicht Agri-PV aber erst den landwirtschaftlichen Anbau. So werden die weltweit größten Agri-PV-Anlagen in China im Kampf gegen die vorschreitende Desertifikation eingesetzt. In der Provinz Ningxia wurde 2014 damit begonnen, verödete Flächen vorzubereiten, indem man zunächst mithilfe von Tröpfchenbewässerung Luzerne anpflanzte, um die Bodenbeschaffenheit zu verbessern [11].

Anschließend wurde die Vegetation wieder entfernt und auf der gesamten Fläche von 107 Quadratkilometern Solarmodule in einer Höhe von 2,9 Metern installiert. Unter den Anlagen wurden Goji-Sträucher gepflanzt, die nun mithilfe von Tröpfchenbewässerung kultiviert werden. Ein wirtschaftlicher Betrieb dieser Plantage wäre aufgrund des erhöhten Wasserverbrauchs ohne die Verschattung durch die Module wohl nicht möglich. Die Evaporation nahm durch die Verschattung laut Betreiber der Anlage um dreißig bis vierzig Prozent ab. Zusätzlich stellt das trockene und sonnige Klima in der Region einen idealen Standort für ein derart großes PV-Kraftwerk dar. Die Vegetationsdecke innerhalb der Anlage wurde um 85 Prozent gesteigert, was dazu beiträgt, dass Sandstürme abnehmen und die Module daher weniger oft gereinigt werden müssen. Neben den landwirtschaftlichen Erträgen und der erneuerbaren Stromproduktion, die den Menschen zugutekommt, hat sich auch das Ökosystem der Region deutlich verbessert. In die vormals „tote“ Wüstenlandschaft sind nach Inbetriebnahme der Anlage unzählige kleine Tierarten zurückgekehrt [11].

4 Vergleich der Anschaffungs- und Installationskosten

Die Investitionskosten machen sowohl bei herkömmlichen PV-FFA als auch bei Agri-PV-Anlagen den größten Teil der Gesamtkosten aus im Vergleich zu den nachfolgenden Betriebskosten. Aufgrund der im Vergleich zur konventionellen PV-FFA höheren Kosten für die Montagesysteme der Agri-PV fallen die gesamten Investitionskosten bei Letzterer zu meist höher aus. Da die Auswahl der Anlagenkomponenten nicht nur Auswirkungen auf die Kosten zu Beginn des Projekts, sondern auch auf die Wartungsanfälligkeit und die Erträge über die gesamte Laufzeit der Anlage hat, muss bei der Planung der Anlage zwischen Kosten und möglichen Erlösen genauestens abgewogen werden.

Um eine fundierte Entscheidung darüber treffen zu können, welche Komponenten im speziellen Fall verwendet werden, spielt bei Agri-PV-Anlagen neben den klassischen Kriterien, wie Beschaffenheit des Untergrunds, Sonneneinstrahlung vor Ort und Beschaffenheit des Geländes, auch die Art der landwirtschaftlichen Nutzung der Fläche eine entscheidende Rolle bei der Auswahl des Anlagendesigns.

So haben sich beispielsweise aufgeständerte Anlagen bereits als passend für die Anwendung in vielen Sonderkulturen erwiesen [12], während vertikal errichtete Anlagen bislang ausschließlich im Grünland und zukünftig auch auf Ackerflächen Anwendung finden [52].

Im Folgenden werden zunächst die Anschaffungs- und Installationskosten in ihre wichtigsten Kostenblöcke untergliedert. Anschließend werden Kostenblöcke diskutiert, die zu unterschiedlichen Kosten bei konventionellen PV-FFA und Agri-PV-Anlagen führen (Abbildung 15). Exakte Zahlen können nicht pauschal für die einzelnen Anlagentypen genannt werden, da sie anlagenspezifisch beträchtlich variieren und unter anderem vom Standort und damit den örtlichen Gegebenheiten, der installierten Leistung, der Art der Anbringung sowie der gewählten Modultechnik abhängen. Bei Agri-PV-Anlagen sind die Kosten zusätzlich noch von der jeweiligen landwirtschaftlichen Bewirtschaftung abhängig, da diese gewisse Anforderungen an das Anlagendesign mit sich bringen kann. In Abbildung 15 werden daher ungefähre Werte genannt.

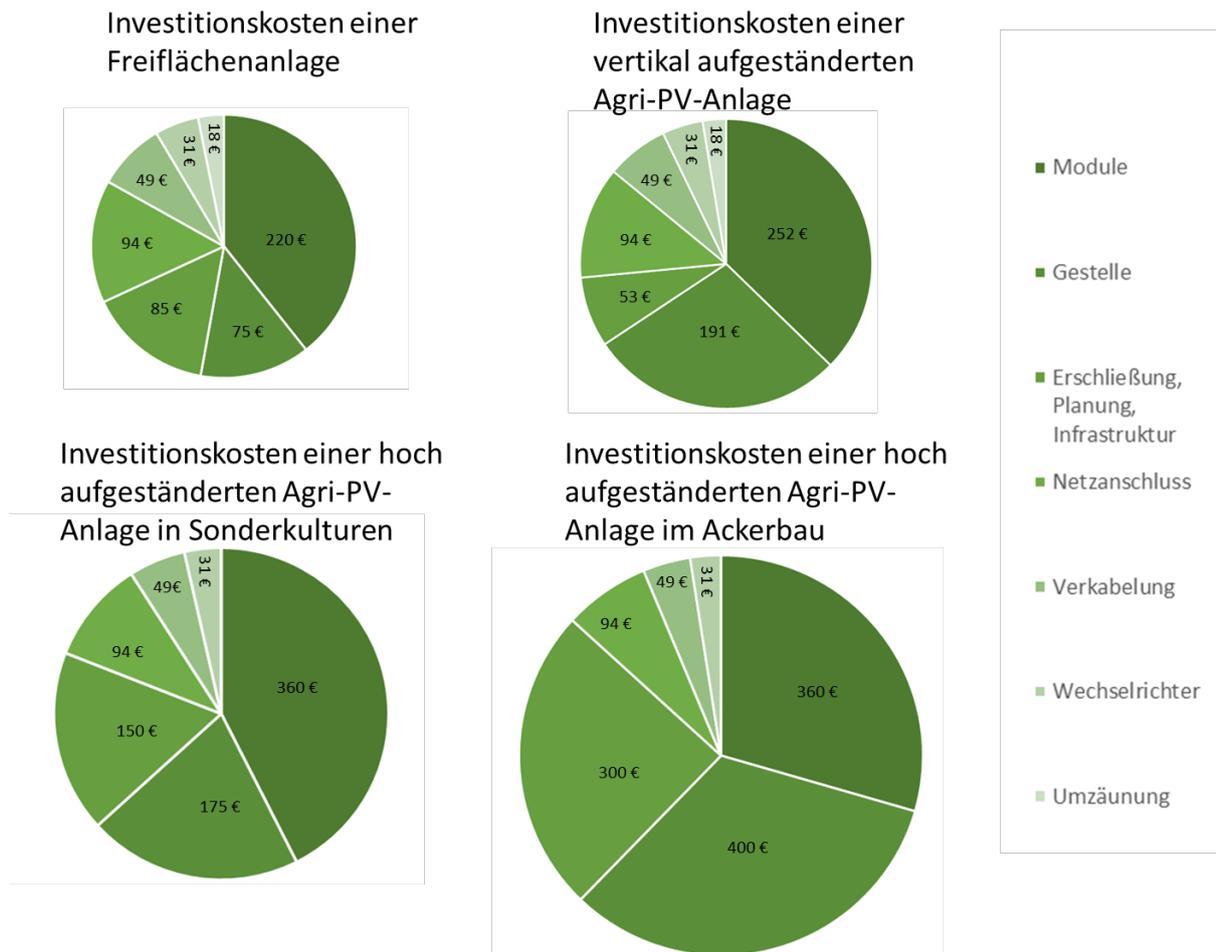


Abbildung 15: Investitionskosten pro kW_p verschiedener Agri-PV-Anlagendesigns im Vergleich zu Freiflächenanlagen, Größe der Kreisdiagramme an Höhe der Gesamtinvestition angepasst (Darstellung: Johannes Scharf, TFZ, 17.02.2021)

Die Kosten unterteilen sich in die folgenden Blöcke nach [40]:

- Planung und Genehmigung,
- Vorbereitung der Fläche,
- Anlagenkomponenten,
- Installation und elektrische Anbindung,
- Monitoring und Messtechnik,
- Netzanschluss,
- Sonstiges (z. B. zusätzliche Verwaltungskosten).

Planung und Genehmigung

Dieser Kostenpunkt erfasst sämtliche Kosten von der Standortsuche über die Planung bis zur Einreichung des Genehmigungsantrags. Während der Planung fallen im Normalfall Kosten für Planungsbüros an. Hinzukommen können je nach Standort die Kosten für Boden- und Umweltgutachten sowie Anwaltskosten. Im Regelfall muss ein vorhabenbezogener Bebauungsplan erstellt werden, auch hierfür können Kosten anfallen.

Vorbereitung der Fläche

Diese Kosten erfassen die Zuwegung und Einfriedung des Geländes. Im Fall von konventionellen PV-FFA können noch Kosten für die Beseitigung vorhandener Bebauung, Altlasten und Bewuchs hinzukommen, falls nicht eine vormals landwirtschaftlich genutzte Fläche ausgewählt wurde. Diese Kosten entfallen bei Agri-Photovoltaik zumeist, da eine bereits landwirtschaftlich genutzte Fläche ohne Änderung der Nutzung weiterbewirtschaftet werden soll. Bei Letzterer können jedoch Kosten für die Erstattung entstandener Ernteauffälle anfallen, falls der Betreiber der Anlage nicht der Landwirt selbst ist. Hier empfiehlt sich eine Errichtung der Anlage im Winter und die Wahl einer Kultur, die erst im Frühling ausgesät wird, um Ernteauffälle weitgehend zu vermeiden. In beiden Fällen werden darüber hinaus Schaltkästen für Steuer- und Messtechnik benötigt.

Anlagenkomponenten

Die Anlagenkomponenten fallen in den meisten Fällen bei Agri-PV deutlich teurer aus als bei konventionellen Freiflächen, da oft Spezialmodule, wie beispielsweise bifaciale Module oder Module mit einer höheren Transparenz, verwendet werden. So bieten sich im Fall hoch aufgeständerter Anlagen Module an, die transparenter sind als herkömmliche PV-Module aus Massenproduktion, um den darunterliegenden Kulturen ausreichenden Zugang zu photosynthetisch aktiver Strahlung zu gewähren. Aufgrund der neuartigen Bauweise und einer bislang fehlenden Massenproduktion sind diese transparenteren Module bislang teurer. Im Fall vertikal aufgeständerter Anlagen werden zwingend bifaciale Module verbaut, um bei Ost-West-Ausrichtung die Sonnenenergie sowohl abends als auch morgens optimal nutzen zu können.

Hinzu kommen für alle Agri-PV-Anlagen zum Teil deutlich höhere Kosten für die Aufständigung, da diese oft höher und zusätzlich aufgrund höherer Windlasten stabiler dimensioniert werden müssen. Die Kosten der übrigen Komponenten, wie Kabel, Wechselrichter und Trafostationen, unterscheiden sich nicht, da diese unverändert in PV-FFA- wie auch Agri-PV-Anlagen Verwendung finden.

Installation, elektrische Anbindung und Monitoring

Bei der Installation einer Agri-PV-Anlage können die Kosten für Erdarbeiten höher ausfallen als bei herkömmlichen PV-FFA. Da bei konventionellen PV-FFA der Boden innerhalb der Anlage nach Inbetriebnahme für gewöhnlich nicht weiter genutzt wird, können Kabel bodennah verlegt werden. Bei Agri-PV-Anlagen darf die landwirtschaftliche Nutzung der Fläche möglichst nicht beeinträchtigt werden. Aus diesem Grund müssen Kabel in einer sicheren Tiefe von mindestens einem Meter verlegt werden, um eine störungsfreie Bearbeitung beispielsweise durch Bewirtschaftungsmaßnahmen der Flächen zu gewährleisten.

Kosten für die Netzanbindung und die Montage der Komponenten unterscheiden sich im Regelfall kaum. Um einen reibungslosen Ablauf und möglichst störungsfreies Arbeiten der Anlage zu gewährleisten, wird Technik zur Fernüberwachung und für das Monitoring benötigt. Die Kosten hierfür sind nicht abhängig von der Größe der Anlage, weshalb sie bei kleinen Anlagen proportional stärker ins Gewicht fallen.

4.1 Konventionelle PV-FFA

Über die letzten zwei Jahrzehnte sanken die Preise für PV-Module signifikant. 2008 bis 2012 sank der durchschnittliche Preis von PV-Modulen beispielsweise um ca. achtzig Prozent [64]. Diese Preisentwicklungen sind zum einen auf Entwicklungen am Siliziummarkt zurückzuführen. Durch die hohe Nachfrage wurden ab 2009 die Produktionskapazitäten für Silizium, den wichtigsten Rohstoff für PV-Module, enorm ausgebaut, sodass sich ein Angebotsüberschuss am Markt einstellte, der zu einem rasanten Preissturz führte [22]. Über die letzten Jahrzehnte hinweg waren jedoch Lern- und Skaleneffekte bei der Produktion von PV-Modulen deutlich ausschlaggebender als derartige Entwicklungen. Mit zunehmendem Marktvolumen konnten Prozesse verbessert und der Materialeinsatz optimiert werden. PV-Module weisen eine Lernkurve von ca. zwanzig Prozent auf. Dies bedeutet, dass jedes Mal, wenn sich das Handelsvolumen auf dem Weltmarkt verdoppelt, der Marktpreis im Schnitt um zwanzig Prozent fällt [64]. Diese Preisentwicklung bei PV-Modulen führte dazu, dass heute der Modulpreis nur noch zwischen einem Drittel und der Hälfte der gesamten Anlagenkosten ausmacht [33].

4.1.1 Fest montierte PV-FFA

Das einfachste und häufigste Anlagendesign ist eine fest installierte PV-FFA. Hierbei werden die Module für gewöhnlich mit einem Neigungswinkel von ca. dreißig Grad angebracht. Die typische Ausrichtung der Anlage variiert je nach Standort von Südost über Süd bis Südwest. Für diese Art der Anlagen werden zumeist monokristalline Standardmodule verwendet, die ein gutes Preis-Leistungs-Verhältnis bieten. Der Anteil der einzelnen Kostenblöcke an den Gesamtkosten ist zum Teil stark von der Anlagengröße abhängig. So erhöhen sich Kosten für Planung und Genehmigung kaum mit wachsender Anlagengröße, fallen also tendenziell bei kleinen Anlagen stärker ins Gewicht.

4.1.2 Nachgeführte PV-FFA

Nachgeführte Anlagen bieten den Vorteil, dass die Module im Tagesverlauf dem Stand der Sonne nachgeführt werden können und somit immer optimal zur Sonne ausgerichtet sind. Dies ermöglicht um bis zu dreißig Prozent höhere Stromerträge bei einachsiger Nachführung im Vergleich zu festinstallierten Anlagen [18]. Die Nachführung erfolgt entweder mithilfe eines Computerprogramms oder es wird mithilfe eines Lichtsensors die optimale Ausrichtung ermittelt. Nachgeführte Anlagen sind in Anschaffung und Planung jedoch

wesentlich teurer [66], da das Montagesystem komplizierter und kostspieliger ist. Des Weiteren sind die beweglichen Teile störungsanfällig und erhöhen so den Wartungsaufwand.

4.2 Agri-PV-Anlagen

Die Investitionskosten bei einer Agri-PV sind im Vergleich mit konventionellen PV-FFA in der Regel höher (Abbildung 15) [61]. Die Anschaffungs- und Installationskosten hängen intensiv vom jeweiligen Agri-PV-System und damit von der Modultechnologie, der Art der Aufständigung und der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung ab. Agri-PV-Anlagen sind auf dem vielseitigen Markt verschiedener PV-Anwendungen noch eine relativ neue Entwicklung. Aus diesem Grund gibt es noch wenig belastbare Daten. Folglich sind Anlagen meist noch kostenintensiver als konventionelle PV-FFA. Hinzu kommt, dass oft nicht nur spezielle Montagesysteme, sondern auch Spezialmodule verbaut werden, die optimal an den jeweiligen Einsatz angepasst sind. Diese sind meist deutlich teurer als herkömmliche Standardmodule. Auch die Kosten für die Erschließung der Flächen kann im Fall einer Agri-PV-Anlage höher sein, da die landwirtschaftlichen Flächen besonders geschont werden müssen. Die übrigen Kostenblöcke unterscheiden sich in der Regel kaum von denen einer PV-FFA [61].

4.2.1 Vertikal aufgeständerte Agri-PV-Anlagen

Vertikal errichtete Anlagen werden für gewöhnlich in Ost-West-Richtung ausgerichtet. Folglich können sie die Sonneneinstrahlung besonders effizient in den Morgen- und Abendstunden in Strom umwandeln. Um einen möglichst hohen Ertrag zu erzielen, werden für diese Art der Anwendung bifaciale Module verwendet. Diese sind teurer als herkömmliche Standardmodule, erbringen aber auf der Modulrückseite zusätzlich eine Leistung, die ca. 80 bis 95 Prozent der Nennleistung entspricht. In der Praxis werden aber zumeist Module verwendet deren Bifacialität 80 bis 85 Prozent beträgt, da Module mit einer höheren Bifacialität nicht genug Mehrertrag generieren, um die dann überproportional steigenden Kosten zu rechtfertigen. Auch die Gestelle für vertikale Anlagen sind noch nicht in großer Serie produzierte Spezialanfertigungen. Aus diesem Grund sind sie noch teurer als Standardmontagesysteme. Somit sind die Anlagenkomponenten für diesen Anlagentyp insgesamt teurer als für konventionelle PV-FFA. Die Kosten für derartige bifaciale Module steigen von durchschnittlich 220 € pro kW_p für Standardmodule [61] auf derzeit durchschnittlich 250 € pro kW_p [32]. Für die Gestelle steigen die Kosten von durchschnittlich 75 € [61] pro kW_p auf 180 bis 200 € pro kW_p [32].

4.2.2 Hoch aufgeständerte Agri-PV-Anlagen

Hoch aufgeständerte Anlagen stellen aufgrund ihrer Bauart besondere Anforderungen an die Statik. Da sie in einer Höhe von bis zu sechs Metern eine große Windangriffsfläche bieten, müssen sowohl die Fundamente als auch die gesamte Unterkonstruktion der Module sehr stabil konstruiert werden. Aufgrund dieses erhöhten Materialaufwands und der

neuen Anbringungsweise sind bei hoch aufgeständerten Anlagen vor allem die Montagesysteme deutlich teurer als bei konventionellen Anlagen. So werden für die gesamte Aufständigung inklusive der Fundamente Kosten von durchschnittlich 400 €/kW_p [61] veranschlagt. In Sonder- und Dauerkulturen können Montagesysteme deutlich niedriger dimensioniert werden und kosten daher nur zwischen 130 und 220 €/kW_p [61].

Die Kosten für die Module sind jeweils abhängig von dem Verwendungszweck der Anlage. Werden Spezialmodule verbaut, die beispielsweise eine höhere Transparenz aufweisen als herkömmliche Standardmodule, so steigen die Kosten für diese schnell auf bis zu 330 €/kW_p. Auch die Kosten für die Standortvorbereitung und die Installation sind bei dieser Art der Agri-PV mit 250 bis 350 €/kW_p deutlich höher als bei herkömmlichen PV-FFA. Diese Kosten sind im Vergleich zum Ackerbau in Sonder- und Dauerkulturen mit 120 bis 180 €/kW_p deutlich niedriger. Die übrigen Kosten, wie beispielsweise für Wechselrichter, Projektierung und sämtliche elektrische Komponenten, sind vergleichbar mit den Kosten bei konventionellen PV-FFA, da keine teuren Sonderkomponenten verwendet werden müssen und sich die Planungs- und Genehmigungsprozesse nicht sonderlich voneinander unterscheiden.

4.2.3 Nachgeführte Agri-PV-Anlagen

Dieses Anlagendesign unterscheidet sich grundsätzlich kaum von nachgeführten PV-FFA. Je nach gewünschter Kultur müssen lediglich die Montagesysteme höher errichtet werden als bei PV-FFA. Dies kann zu höheren Kosten für die Aufständigung führen. Für die übrigen Komponenten fallen ähnliche Kosten an wie bei konventionellen PV-FFA. Die Kosten für die Gesamtanlage in Althegegnenbergrain beispielsweise beliefen sich laut Aussagen der Projektierer auf ca. 850 €/kW_p.

5 Wirtschaftliche Kurzbetrachtung

Die in Kapitel 3 diskutierte Landnutzungsrate ist eine rein rechnerische relative Größe, die ausschließlich die Erträge einer Agri-PV-Anlage mit den Erträgen, die im reinen landwirtschaftlichen Anbau bzw. in einer PV-FFA erzielbar sind, ins Verhältnis setzt. Für eine wirtschaftliche Bewertung einer Agri-PV-Anlage muss den Erträgen und den daraus folgenden Erlösen der dafür notwendige Aufwand gegenübergestellt werden. Für die Pflanzenproduktion innerhalb einer Agri-PV-Anlage können sich Bewirtschaftungseinschränkungen, vor allem in Bezug auf den mechanischen und chemischen Pflanzenschutz und die Düngung, ergeben. Des Weiteren werden Maßnahmen wie Bodenbearbeitung, Aussaat und Beerntung durch die Modulordnung erschwert, sodass sich Arbeitszeitbedarf und ggf. Kraftstoffverbrauch erhöhen. Der erzielbare pflanzenbauliche Ertrag verringert sich durch die um die Modulfläche bzw. -aufständigung verkleinerte landwirtschaftliche Fläche und muss mit höherem Aufwand erzeugt werden.

Zusätzlich können die Kosten für Module und Montagesysteme in Agri-PV-Anlagen im Vergleich zu konventionellen PV-FFA höher ausfallen (siehe Kapitel 4), da es sich hier zum Großteil um noch nicht serienmäßig produzierte Spezialanfertigungen handelt. Bei einer herkömmlichen PV-FFA ist mit Kosten in Höhe von ca. 220 €/kW_p für Standardmodule und ca. 75 €/kW_p für die Montagesysteme zu rechnen. Für vertikal aufgeständerte Systeme erhöhen sich die Kosten aufgrund der verwendeten bifacialen Module auf bis zu 260 €/kW_p. Für die aufwendigeren Montagesysteme ist außerdem mit Kosten in Höhe von 180 bis 200 €/kW_p zu rechnen [52]. Für hoch aufgeständerte Systeme werden für die teureren Spezialmodule Kosten in Höhe von ca. 360 €/kW_p veranschlagt. Die Kosten für die Aufständigung sind von der gewünschten Anwendung und damit von der Höhe der Gestelle abhängig. Über Ackerflächen, wo die Anlagen besonders hoch aufgeständert werden, kann mit Kosten von ca. 400 €/kW_p gerechnet werden. Bei der deutlich niedrigeren Anbringung in Sonder- und Dauerkulturen können ca. 130 bis 220 €/kW_p veranschlagt werden [61].

Grundsätzlich lässt sich die Aussage treffen, dass die installierte elektrische Leistung pro Fläche mit zunehmenden Reihenabständen zwischen den PV-Modulen abnimmt. Gleichzeitig nimmt die Fläche zu, die landwirtschaftlich bewirtschaftet werden kann, da weniger Platz für Montagestrukturen benötigt wird. Die Verschattung der unter beziehungsweise zwischen den Modulen befindlichen Flächen nimmt mit steigendem Reihenabstand ab. Die Auswahl eines Anlagendesigns und geeigneter Reihenabstände ist somit hauptsächlich davon abhängig, welche Kulturen später auf der Fläche etabliert werden sollen oder bereits dort etabliert sind und wie hoch die Schattentoleranz der gewählten Kulturen ist. Darüber hinaus ist ausschlaggebend, welche landwirtschaftlichen Maschinen auf der Projektfläche verwendet werden, da die Höhe der Maschinen und die Bearbeitungsbreite in die Auswahl des Anlagendesigns einbezogen werden müssen.

Zur Veranschaulichung wird auch in diesem Kapitel wie in Kapitel 3 mit einer Ackerfläche von zwei Hektar gerechnet. Zur Nutzung dieser Fläche werden fünf mögliche Szenarien näherungsweise eruiert:

- Szenario 1: ein Hektar landwirtschaftlich genutzt und ein Hektar PV-FFA,
- Szenario 2: zwei Hektar PV-FFA,
- Szenario 3: zwei Hektar ausschließlich landwirtschaftliche Nutzung,
- Szenario 4: ein Hektar landwirtschaftlich genutzt und ein Hektar Agri-PV,
- Szenario 5: zwei Hektar Agri-PV.

Da sich die Kosten für Anlagenkomponenten zwischen den einzelnen Anlagendesigns zum Teil erheblich unterscheiden, werden in diesem Beispiel hoch aufgeständerte und vertikale Agri-PV-Anlagen betrachtet.

Tabelle 1: Investitionskosten verschiedener Anlagentypen (in Euro pro kW_p)

Kostenpunkt	PV-FFA	Agri-PV vertikal	Agri-PV hoch aufgeständert
Module	220 [61]	252 [32]	360 [61]
Gestelle	75 [61]	191 [32]	400 [61]
Erschließung, Planung, Infrastruktur	85 [61]	53 [32]	300 [61]
Netzanschluss	94 [32]	94 [32]	94 [32]
Verkabelung	49 [32]	49 [32]	49 [32]
Wechselrichter	31 [32]	31 [32]	31 [32]
Umzäunung	18 [32]	18 [32]	0 [61]
Summe	572	688	1.234

Bei den Werten aus Tabelle 1 handelt es sich um grobe Richtwerte. Die exakten Kosten sind unter anderem von der Größe der Anlage, dem Standort, der Entfernung zum Netzanschlusspunkt und aktuellen Entwicklungen am PV-Modulmarkt abhängig. Die angegebenen Werte sollen lediglich einen groben Überblick über die Größenverhältnisse der einzelnen Kostenpunkte geben und einen ungefähren Vergleich der Wirtschaftlichkeit verschiedener Anlagendesigns ermöglichen. Für diesen Vergleich wurde als Vergütung der Wert angelegt, der bei der letzten EEG-Ausschreibungsrunde der Bundesnetzagentur für PV-FFA zustande kam, 0,051 €/kWh [14].

Vertikale Agri-PV-Anlagen sind aufgrund der verwendeten bifacialen Module und der tendenziell teureren Aufständering kostenintensiver in der Anschaffung als konventionelle PV-FFA. Hoch aufgeständerte Agri-PV-Anlagen dagegen sind aufgrund der besonders hohen und stabilen Unterkonstruktion sowie der verwendeten Spezialmodule deutlich teurer.

Tabelle 2: Jährlicher landwirtschaftlicher Deckungsbeitrag einer Agri-PV-Anlage mit Winterweizen im bayerischen Durchschnitt pro Hektar, erzielbarer Ertrag 86,5 Prozent

	Menge	Betrag	Summe
Marktleistung	64,62 dt [5]	17,64 €/dt [5]	1.140 €
EU-Direktzahlungen			
Variable Kosten		903,60 € [5]	904 €
Deckungsbeitrag			236 €

Tabelle 3: Jährlicher landwirtschaftlicher Deckungsbeitrag Winterweizen im bayerischen Durchschnitt pro Hektar

	Menge	Betrag	Summe
Marktleistung	74,70 dt [5]	17,64 €/dt [5]	1.318 €
EU-Direktzahlungen		280,00 € [5]	280 €
Variable Kosten		903,60 € [5]	904 €
Deckungsbeitrag			694 €

Bei einer angenommenen Leistung der PV-FFA von 850 kW_p [61] und durchschnittlichen Kosten von 572 €/kW_p ergeben sich Investitionskosten von 486.200 € pro Hektar. Diese sowie die folgenden Investitionssummen und Anlagenleistungen dienen in Tabelle 4, Tabelle 5 und Tabelle 6 als Berechnungsgrundlage für die Marktleistung, den angenommenen Darlehenszins und die Abschreibung. Mangels Datengrundlage konnten laufende Betriebskosten, wie beispielsweise Versicherung, oder eventuelle Ertragsausfälle durch Störungen nicht in die Kalkulation einfließen.

Tabelle 4: Jährlicher Stromertrag einer PV-FFA-Anlage pro Hektar (ohne Betriebskosten)

	Menge	Betrag	Summe
Marktleistung bei 1.100 kWh/kW _p [40]	935.000 kWh	5,1 ct/kWh [14]	47.685 €
Zins	1 %		4.862 €
Abschreibung	5 %		24.310 €
Ertrag			18.513 €

Betrachtet man eine vertikal aufgeständerte Agri-PV-Anlage mit einer angenommenen Anlagenleistung von 345,8 kW_p [32] und durchschnittlichen Kosten von 688 €/kW_p, ergeben sich Investitionskosten von 237.760 € pro Hektar.

Tabelle 5: Jährlicher Stromertrag einer vertikal aufgeständerten Agri-PV-Anlage pro Hektar (ohne Betriebskosten)

	Menge	Betrag	Summe
Marktleistung bei 1.100 kWh/kW _p [40]	380.380 kWh	5,1 ct/kWh [14]	19.401 €
Zins	1 %		2.378 €
Abschreibung	5 %		11.888 €
Ertrag			5.136 €

Bei einer hoch aufgeständerten Agri-PV Anlage mit einer angenommenen Anlagengröße von 650 kW_p (durchschnittlicher Wert für hoch aufgeständerte Agri-PV-Systeme) [61] und durchschnittlichen Kosten von 1.234 €/kW_p ergeben sich Investitionskosten von 802.100 € pro Hektar.

Tabelle 6: Jährlicher Stromertrag einer hoch aufgeständerten Agri-PV-Anlage pro Hektar (ohne Betriebskosten)

	Menge	Betrag	Summe
Marktleistung bei 1.100 kWh/kW _p [40]	715.000 kWh	5,1 ct/kWh [14]	36.465 €
Zins	1 %		8.021 €
Abschreibung	5 %		40.105 €
Ertrag			-11.661 €

Aus Tabelle 6 wird bereits ersichtlich, dass eine hoch aufgeständerte Agri-PV-Anlage im Ackerbau aufgrund der hohen Investitionskosten unter den derzeitigen Förderbedingungen wohl nicht wirtschaftlich betrieben werden kann. Eine weitere wirtschaftliche Betrachtung von Agri-PV-Anlagen dieses Typs wird daher hier nicht durchgeführt.

Insgesamt fällt auf, dass die landwirtschaftlichen Deckungsbeiträge im Vergleich zu den Stromerlösen sehr gering ausfallen. Je nach Anlagendesign machen sie nur zwischen zwei und drei Prozent aus.

Szenario 1 (Tabelle 3 und Tabelle 4): Wird die Fläche von zwei Hektar geteilt und für einen Hektar PV-FFA und einen Hektar Weizenanbau verwendet, so ergeben sich aufsummiert Erlöse von insgesamt **19.207 €**. Hierbei betragen die landwirtschaftlichen Deckungsbeiträge nur circa vier Prozent der Gesamterlöse. Da die Stromerlöse im Vergleich zu den landwirtschaftlichen Deckungsbeiträgen sehr hoch ausfallen, wurden mit Blick auf die Wirtschaftlichkeit vor allem in der Anfangszeit des EEG viele landwirtschaftliche Flächen für die Errichtung von PV-FFA verwendet. Um diesem Trend entgegenzuwirken, wurde im

EEG eine Flächenkulisse geschaffen, die seither den Ausbau von PV-Freiflächenanlagen nur auf bestimmten Flächen zulässt.

Szenario 2 (zweimal Tabelle 4): Mit Gesamterlösen von **37.026 €** stellt diese Konfiguration aus wirtschaftlicher Sicht die beste Option dar. Um den ungebremsten Zubau von PV-FFA auf landwirtschaftlichen Flächen zu stoppen, wurden im EEG daher Regelungen eingeführt, die eine Förderung der Anlagen nur auf bestimmten Flächen erlauben. Diese Konfiguration kann also nur innerhalb einer sehr starren Flächenkulisse, die das EEG vorgibt, umgesetzt werden.

Szenario 3 (Tabelle 3): Diese Option bildet die reine landwirtschaftliche Nutzung der Fläche ab. In diesem Fall werden die Gesamterlöse ausschließlich durch landwirtschaftliche Deckungsbeiträge erzielt. Sie fallen mit **1.388 €** im Vergleich zu allen anderen Konfigurationen sehr gering aus.

Szenario 4 (Tabelle 3, Tabelle 2 und Tabelle 5): Wird die Fläche zur Hälfte für den Anbau von Winterweizen und zur anderen Hälfte für die Errichtung einer vertikalen Agri-PV-Anlage verwendet, ergeben sich Gesamterlöse von **6.066 €**. Diese sind deutlich geringer als bei der Anwendung von PV-Freiflächenanlagen (Konfigurationen 1 und 2), jedoch immer noch deutlich höher, als würde die gesamte Fläche ausschließlich für den Anbau von Winterweizen (Konfiguration 3) verwendet.

Szenario 5 (zweimal Tabelle 2 und Tabelle 5): Die letzte Konfiguration ist die Etablierung von zwei Agri-PV-Anlagen. In diesem Fall liegen die Gesamterlöse bei **10.744 €** und damit noch immer deutlich unter den Gesamterlösen der Konfigurationen 1 und 2.

Aus rein wirtschaftlicher Betrachtung wäre nach diesem Vergleich die Wahl des Szenarios 2 optimal. Dies würde auf Dauer jedoch zum Verlust sämtlicher landwirtschaftlicher Flächen führen, da eine landwirtschaftliche Nutzung über ein gewisses Minimum hinaus (beispielsweise Schafbeweidung) mit konventionellen Freiflächenanlagen nicht möglich ist. Agri-PV-Anlagen dagegen erhalten bei richtiger Planung landwirtschaftliche Flächen und bieten Landwirten im optimalen Anlagendesign dennoch hohe Erlöse. Bislang ist jedoch auch für Agri-PV-Anlagen keine Öffnung der Flächenkulisse des EEG vorgesehen. Aus diesem Grund müssen sie weiterhin mit konventionellen Freiflächenanlagen konkurrieren. In einem direkten wirtschaftlichen Vergleich sind sie bei gleicher Flächenkulisse aufgrund höherer Investitionskosten und geringerer Leistung pro Fläche also den PV-FFA unterlegen. Gerade bei einer Öffnung der Flächenkulisse für Agri-PV könnte dieses Konzept für Landwirte eine sinnvolle Ergänzung zur rein landwirtschaftlichen Flächennutzung darstellen und eine Option zur Einkommensdiversifikation bieten.

6 Rechtliche Lage

Die rechtliche Lage der Agri-PV in Deutschland ist noch nicht endgültig geklärt. Mittlerweile wurde ein DIN SPEC-Vorschlag erarbeitet, welche Anlagenformen in welchen Kategorien unter den Begriff der Agri-Photovoltaik fallen, und dass der auf der Agri-PV-Gesamtprojekfläche erzielbare Ertrag mindestens 66 Prozent betragen muss [21]. Die Anwendung dieser Definition ist für den deutschen Raum noch nicht abschließend geklärt.

Bis zur EEG-Novelle von 2021 gab es keine gesonderte Förderkulisse für Agri-PV-Anlagen. Anreize zum Bau dieser im Vergleich zu konventionellen PV-FFA tendenziell teureren Anlagen fehlten bislang fast völlig. Daher wurden Anlagen bislang zumeist mittels Finanzierung aus Fördermitteln zum Zwecke der Forschung errichtet. Aufgrund der meist aufwendigeren Aufständigung als in PV-FFA und vieler Unsicherheiten sind derartige Projekte oft um ein Vielfaches teurer als später errichtete Anlagen im Realbetrieb [55]. Einige Projekte sind bereits mit Vergütungen, wie sie das EEG für PV-FFA vorsieht, wirtschaftlich realisiert worden. Dies ist bislang vor allem bei vertikal errichteten Anlagen möglich, da hierbei die zusätzlichen Kosten für eine sehr hohe Aufständigung entfallen. Auch eine nachgeführte Agri-PV-Anlage in Althegegnenbergr, die 2020 ans Netz ging, kam ohne gesonderte Zuschüsse aus.

Da die rechtliche Lage in Bayern und Deutschland derzeit noch ungeklärt ist, werden in diesem Kapitel zunächst Beispiele einer erfolgreichen Einführung der Agri-PV in anderen Ländern aufgezeigt. Anschließend wird die derzeitige rechtliche Lage in Bayern und Deutschland dargelegt.

6.1 Überblick über die rechtliche Lage anderer Staaten

Einige Staaten haben bereits eine mehr oder weniger umfassende Gesetzgebung zu Agri-PV eingeführt, wobei zum Teil sehr unterschiedliche Definitionen von Agri-PV zur Anwendung kommen. Auch die Vorgaben, unter denen Agri-PV gefördert wird, und die Förderhöhen divergieren teils erheblich.

6.1.1 Japan

Nach der Reaktorkatastrophe von Fukushima war Japan das erste Land, das 2013, im Zuge einer umfassenden Neuausrichtung des Stromsektors eine eigene Gesetzgebung für Agri-PV, in Japan „solar-sharing“ genannt, implementierte [41]. Die Förderung wurde jedoch nicht ausschließlich eingeführt, um erneuerbare Energien zu fördern, sondern auch, um Landwirten ein zusätzliches Einkommen zu ermöglichen und somit einer voranschreitenden Landflucht entgegenzuwirken. Landwirtschaftliche Kleinbetriebe sterben in Japan zunehmend aus und bisherige Fördermaßnahmen konnten diesen Trend nur bedingt stoppen. Mithilfe einer gesonderten Förderkulisse für Agri-PV, die unabhängig von anderen Photovoltaikanwendungen ist, soll das Einkommen von Landwirten diversifiziert werden, ohne wesentlich Anbauflächen zu verlieren. Um die Einbußen in der Lebens- und

Futtermittelproduktion möglichst gering zu halten, werden nur Projekte gefördert, die nach Errichtung der Agri-PV-Anlage mindestens noch achtzig Prozent des vorigen landwirtschaftlichen Ertrags auf der landwirtschaftlich nutzbaren Fläche erwirtschaften. Die Landwirte müssen ihre Erträge jährlich an eine staatliche Stelle melden. Wird bei der Überprüfung dieser Daten festgestellt, dass nach Errichtung der Agri-PV-Anlage ein Rückgang um mehr als zwanzig Prozent im Vergleich zum langjährigen Ertragsmittel zu verzeichnen ist, so muss die PV-Anlage wieder rückgebaut werden [41].

Im Jahr 2018 wurden im Zuge dieser Fördermaßnahme bereits 1.700 überwiegend recht kleine Projekte gefördert. Die durchschnittliche Anlagengröße beträgt 0,2 Hektar, die durchschnittliche Anlagenleistung 90,7 kW_p. Im Jahr 2018 kam Japan so auf eine installierte Leistung von ca. 150 MW_p aus Agri-PV [58].

6.1.2 Südkorea

Die nutzbare landwirtschaftliche Fläche pro Einwohner ist in Südkorea noch knapper als in Japan. Auch in Südkorea stellt die Landflucht ein gravierendes Problem dar. Um diesem Trend entgegenzuwirken, wird auch in Südkorea versucht, Landwirten neue Einkommensmöglichkeiten zu bieten. Agri-PV spielt daher eine wichtige Rolle in der Strategie, zwanzig Prozent der Stromproduktion des Landes bis zum Jahr 2030 mit erneuerbaren Energien zu realisieren. Von den insgesamt vier Photovoltaik-Ausbaupfaden – a) private PV-Aufdachanlagen für Eigenverbrauch, b) kleine PV-Aufdachanlagen, c) große PV-FFA sowie schwimmende PV, d) Agri-PV – soll die Agri-PV mit 10 GW_p ein Drittel des gesamten PV-Zubaus ausmachen [58]. Um kleine landwirtschaftliche Betriebe zu fördern, werden hauptsächlich Anlagen mit einer Größe bis zu 100 kW_p gefördert. Außerdem werden nur landwirtschaftliche Betriebe berücksichtigt, die Feldfrüchte anbauen, die einen Exportüberschuss aufweisen. So versucht die Regierung, die Nahrungsmittelsicherheit im Land zu gewährleisten [58].

6.1.3 China

In China gibt es mit Abstand die größten Projekte und die höchste installierte Leistung im Sektor Agri-PV. Das bislang größte Projekt ist eine Gojibeerenfarm in der Provinz Ningxia. Mit 1 GW_p gehört dieses Projekt zu den größten Solarparks weltweit [11]. In China werden Agri-PV-Großprojekte hauptsächlich im Kampf gegen die voranschreitende Desertifikation eingesetzt. Hierbei werden die Pflanzen mit sparsamer Tröpfchenbewässerung bewässert, während die Module darüber genutzt werden, um die selten auftretenden Niederschläge aufzufangen, umzuleiten und für diese sparsame Bewässerung zu speichern. Zusätzlich sollen die Module dabei helfen, die hohe Sonneneinstrahlung für die Pflanzen abzuschwächen und somit die Verdunstung am Boden zu minimieren. Da die Sonneneinstrahlung in ariden Gebieten, die in China hauptsächlich für Agri-PV genutzt werden, besonders hoch ist und zusätzlich sehr viel ungenutzte Fläche zur Verfügung steht, wird hier auch zunehmend an konzentrierender Solarthermie geforscht. Diese Art der Anwendung bietet den Vorteil, dass die Kollektorspiegel ohnehin häufig mit mehr Abstand zum Boden installiert werden als bei einer herkömmlichen PV-FFA. Aus diesem Grund müssen

konzentrierende Solarthermieanlagen kaum modifiziert werden, um Raum für eine landwirtschaftliche Nutzung darunter zu bieten [67].

6.1.4 Frankreich

Frankreich begann im September 2017 europaweit als erstes Land damit, Agri-PV zu fördern. Zunächst wurden drei Ausschreibungsrunden mit je 15 MW_p in den Jahren 2017 bis 2019 unter dem „Code de l'énergie“ (Energie-Gesetzbuch) geplant [58]. Grund für die Einführung von Agri-PV waren in Frankreich der zunehmende Verlust landwirtschaftlicher Flächen, die Notwendigkeit zur Anpassung an den Klimawandel sowie der Versuch, die Energieversorgung nachhaltiger zu gestalten und gleichzeitig die Nahrungsmittelsicherheit nicht zu gefährden. Bei der Ausschreibung 2018 erhielten die Projekte, denen der Zuschlag erteilt wurde, im Schnitt 0,0807 €/kWh [35] und 0,0828 €/kWh im Jahr 2019 [44]. Im Vergleich dazu erhielten in den jeweiligen Jahren Betreiber von PV-FFA im Schnitt 0,0582 €/kWh bzw. 0,05494 €/kWh in 2018 [35] und 0,0632 €/kWh im Jahr 2019 [49].

6.1.5 USA, Massachusetts

Massachusetts ist der einzige Bundesstaat der USA, der eine Gesetzgebung für Agri-PV implementiert hat. Hier wird davon ausgegangen, dass die landwirtschaftliche und/oder die Stromproduktion individuell einen schlechteren Ertrag erzielen werden, kombiniert wird aber von einem Zugewinn für die Gesellschaft ausgegangen. Anlagen mit einer Leistung nicht über 2 MW_p und einer Höhe über 8 feet (2,44 m) werden gefördert. Bei nachgeführten Anlagen muss die Höhe im waagrechten Zustand mindestens 10 feet (3,05 m) betragen. Außerdem muss anhand einer vom Staat bereitgestellten Beschattungssimulation nachgewiesen werden, dass der Beschattungsgrad maximal 50 % beträgt. Als Kompensation erhält der Betreiber 0,06 \$/kWh zusätzlich zu den je nach Größe der Anlage gezahlten 0,14 bis 0,26 \$/kWh Grundvergütung für eine herkömmliche PV-Anlage [17].

6.2 Derzeitige rechtliche Lage in Deutschland

6.2.1 Vergütungsanspruch nach dem EEG

Im Gegensatz zu den unter 6.1 genannten Ländern existiert in Deutschland erst seit der Gesetzesnovelle des EEG im Jahr 2021 eine eigens auf Agri-PV abgestimmte Gesetzgebung. In einer Ausschussempfehlung zum Entwurf der EEG-Novelle 2021 [15] hatte der Bundesrat zuvor von der Bundesregierung eine eigene Gesetzgebung und Förderkulisse für Photovoltaikanlagen des dritten und vierten Segments gefordert. Dieser Begriff umschreibt unter anderem die Agri-PV. In dieser Empfehlung forderten die Bundesländer ein Ausschreibungsvolumen für Agri-PV von 50 Megawatt in den Jahren 2021 und 2022 und 150 Megawatt in den Jahren 2023 und 2024. Für das Jahr 2025 wurde ein Ausschreibungsvolumen von 500 Megawatt gefordert. Als maximalen Vergütungssatz forderte der Bundesrat 0,08 €/kWh [15] und begründete diese Forderung damit, dass PV-FFA in den vergangenen Jahren zwar die Kosten für Solarstrom gesenkt hätten, gleichzeitig aber

einen starken Eingriff ins Landschaftsbild darstellten und die Flächenkonkurrenz erhöhen würden. PV-Anlagen, die über einer landwirtschaftlichen Fläche installiert würden, könnten diese Flächenkonkurrenz entzerren und somit die Akzeptanz bei der Bevölkerung erhöhen [23]. Ein eigenes Ausschreibungssegment wäre daher nötig, um das enorme Flächenpotenzial erschließen zu können. Die Bundesregierung hatte zunächst nahezu alle Vorschläge abgelehnt [24]. In der EEG-Novelle 2021 [19] wurde letztendlich aber ein Teil der Forderungen umgesetzt. Zunächst sollen im Jahr 2022 nach § 28c EEG 2021 [19] innerhalb des Ausschreibungsvolumens für innovative Anlagenkonzepte, das in 2022 600 Megawatt betragen soll, 50 Megawatt speziell für besondere Solaranlagen ausgeschrieben werden. Zu diesen werden neben Agri-PV auch schwimmende PV-Anlagen (Floating-PV) und Überdachungen von Parkplätzen (Carport-PV) gezählt.

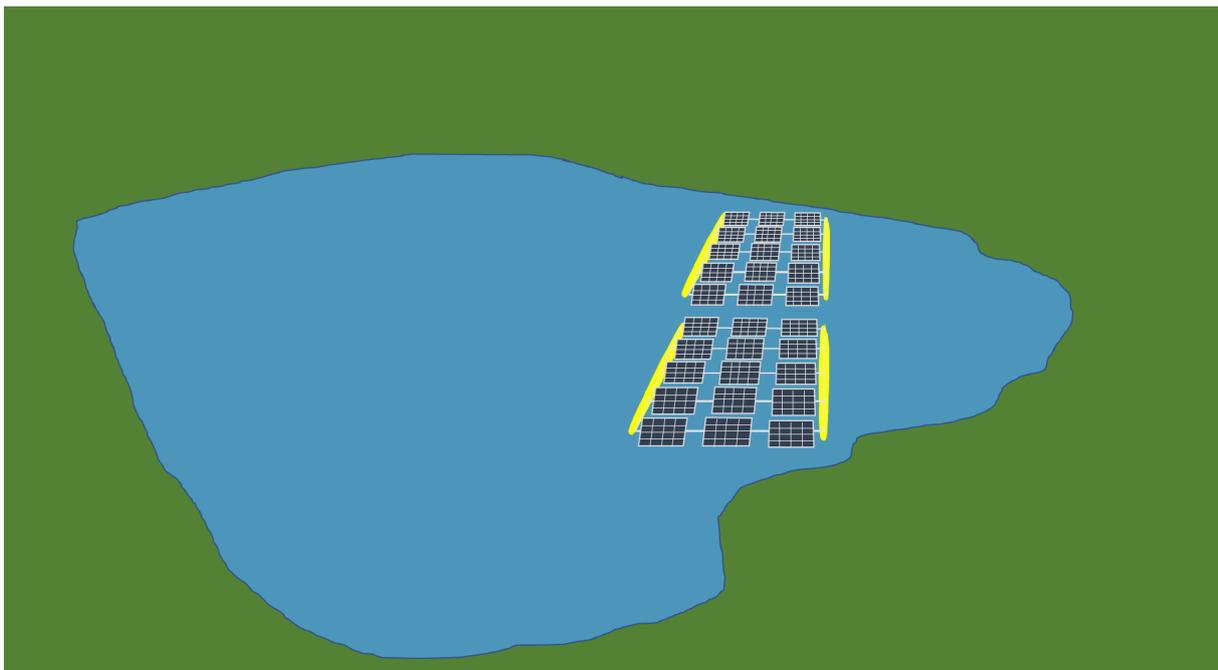


Abbildung 16: Schema einer Floating-PV-Anlage (Darstellung: Johannes Scharf, TFZ, 09.02.2021)

Der Begriff Floating-PV beschreibt Anlagen, die auf Schwimmkörpern angebracht und auf großen Wasserkörpern, meist künstlich entstandenen Seen, errichtet werden (siehe Abbildung 16). Für diesen Zweck bieten sich besonders Stauseen, alte Kiesgruben oder alte Tagebaugruben, nachdem sie geflutet wurden, an, da diese in den meisten Fällen schon über Infrastruktur verfügen und somit oft ein Netzanschlusspunkt bereits verfügbar ist. Auch die Kosten für eine Zuwegung können so geringgehalten werden. Diese Art der Anbringung hat den Vorteil, dass weder landwirtschaftlich noch ökologisch wertvolle Flächen versiegelt, sondern lediglich durch den Menschen im Normalfall nicht genutzte Wasserflächen teilweise verbaut werden.

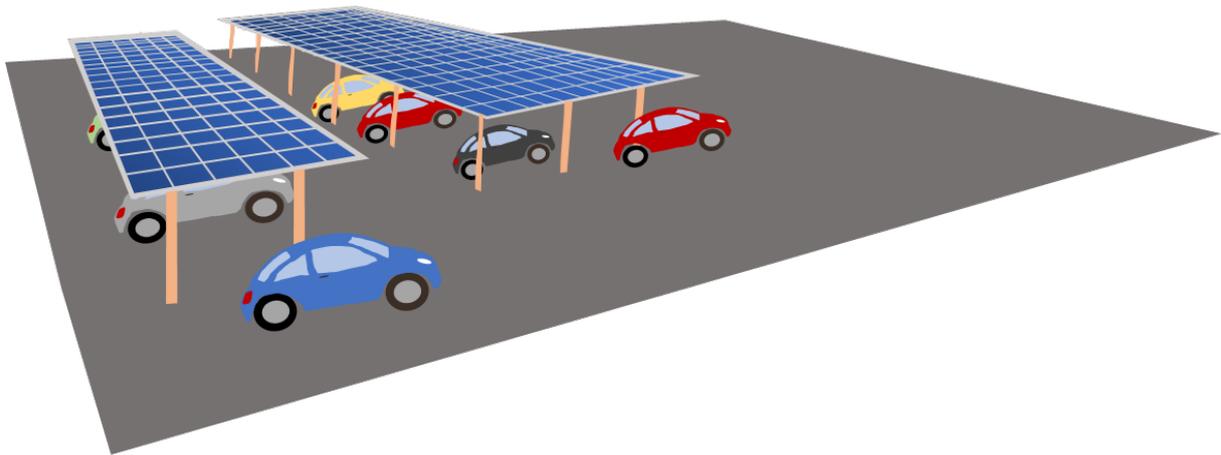


Abbildung 17: Schema einer Parkplatz-PV-Anlage (Darstellung: Johannes Scharf, TFZ, 09.02.2021)

Carport-PV-Module (Abbildung 17) werden in die Überdachung von Parkplätzen integriert. Sie haben den Vorteil, dass die Flächen, auf denen sie errichtet werden, ohnehin bereits versiegelt sind und durch die Anbringung von PV-Modulen zusätzlich einen zweiten Nutzen erhalten.

Da diese Innovationsausschreibung jedoch erst für das Jahr 2022 gilt und vorerst auch nur auf dieses Jahr beschränkt ist, kann zunächst nur eine Förderung nach den Förderbedingungen für klassische PV-FFA oder ein Power-Purchase-Agreement (PPA) gewählt werden. Bei Letzterem handelt es sich um Lieferverträge für den erzeugten Strom, die zwischen dem Betreiber der Anlage und einem Abnehmer, wie beispielsweise einem Unternehmen oder einem Stromversorger, geschlossen werden. Diese Verträge werden für gewöhnlich auf eine Dauer von fünf bis zehn Jahren geschlossen. Meist fallen die Vergütungen geringer aus als bei Anlagen, die nach den Regelungen des EEG vergütet werden, allerdings gelten hier die einschränkenden Gebietskulissen des EEG nicht, weshalb mehr Flächen zur Verfügung stehen.

Im Gegensatz dazu bietet das EEG mit einer zwanzigjährigen Vergütungsgarantie deutlich mehr Planungssicherheit. Hier haben jedoch nur Projekte, die der Flächenkulisse nach EEG 2021 § 48 Abs. 1 Nr. 3c [19] entsprechen, einen Vergütungsanspruch. Hierzu zählen vor allem kleine Anlagen bis 750 kW_p in einem 200 Meter breiten Streifen entlang von Autobahnen und Schienenwegen, wenn innerhalb dieser Entfernung ein fünfzehn Meter breiter Streifen längs zur Fahrbahn freigehalten wird (§ 37 EEG). Diese werden derzeit (Stand Februar 2021) mit 5,93 ct/kWh im Marktprämienmodell vergütet (§ 48 Abs. 1 EEG 2021). Größere Anlagen bis 20 MW_p müssen dagegen an einem Ausschreibungsverfahren der Bundesnetzagentur (BNetzA) teilnehmen, um einen Vergütungsanspruch zu erhalten. Hierbei ist der Vorteil, dass auch Projekte im sogenannten benachteiligten Gebiet einen Förderanspruch haben, sofern das jeweilige Bundesland dies in der Flächenverordnung geregelt hat. In Bayern können aufgrund dieser Regelung 200 Projekte je Kalenderjahr gefördert werden. Bei der letzten Ausschreibungsrunde im Dezember 2020 erhielten Gebote mit durchschnittlich 5,10 ct/kWh den Zuschlag [14].

6.2.2 EU-Direktzahlungen

Auch die Einordnung der landwirtschaftlich genutzten Flächen innerhalb einer Agri-PV-Anlage ist bislang unklar. In Deutschland werden sämtliche Flächen unter bzw. in PV-Anlagen derzeit als versiegelt betrachtet. Für diese Flächen können daher nach der Direktzahlungen-Durchführungs-Verordnung (DirektZahlDurchfV) keine EU-Subventionen erhalten werden. Dieser Auslegung steht ein Urteil des Bundesverwaltungsgerichts (BVerwG) gegenüber. Dieses urteilte im Jahr 2019, dass dem Betreiber eines Maislabyrinths Zahlungen nach DirektZahlDurchfV zustünden, da die Verwendung als Labyrinth die landwirtschaftliche Nutzung nicht wesentlich einschränke [16]. Diese Auslegung könnte auch auf Agri-PV-Flächen zutreffen. Zwar besagt § 12 Abs. 3 Nr. 3 DirektZahlDurchfV, dass Flächen, auf denen sich Anlagen zur Nutzung solarer Strahlungsenergie befinden, hauptsächlich für eine nicht landwirtschaftliche Tätigkeit genutzt werden [61], jedoch bezog sich diese Einschränkung bislang auf konventionelle PV-FFA. Da Agri-PV-Anlagen die landwirtschaftliche Nutzung der Flächen, die sich zwischen bzw. unter den Anlagen befinden, bei richtiger Planung nicht oder nur wenig einschränken, dürfte hier keine hauptsächlich nicht landwirtschaftliche Tätigkeit vorliegen. So entschied das Verwaltungsgericht Regensburg im Jahr 2018 [9], dass ein Landwirt, der seine Schafe unter einer PV-FFA weiden ließ, berechtigt sei, für diese Flächen Zahlungen nach DirektZahlDurchfV zu erhalten. Nur wenn der Betrieb tatsächliche und erhebliche Einschränkungen oder Hindernisse bei der Ausübung der landwirtschaftlichen Tätigkeiten durch die Anbringung der PV-Anlage hinnehmen müsse, wären Zahlungen nach DirektZahlDurchfV zu versagen. Eine differenzierte Einordnung von Agri-PV-Flächen in der nationalen DirektZahlDurchfV, ähnlich der Einordnung in anderen europäischen Ländern, wäre wünschenswert. Hier wird betrachtet, inwiefern PV-Anlagen die jeweilige landwirtschaftliche Nutzung einschränken [10]. Zahlungen von EU-Agrarsubventionen sind abhängig von dieser Einschätzung.

6.2.3 Genehmigungsverfahren

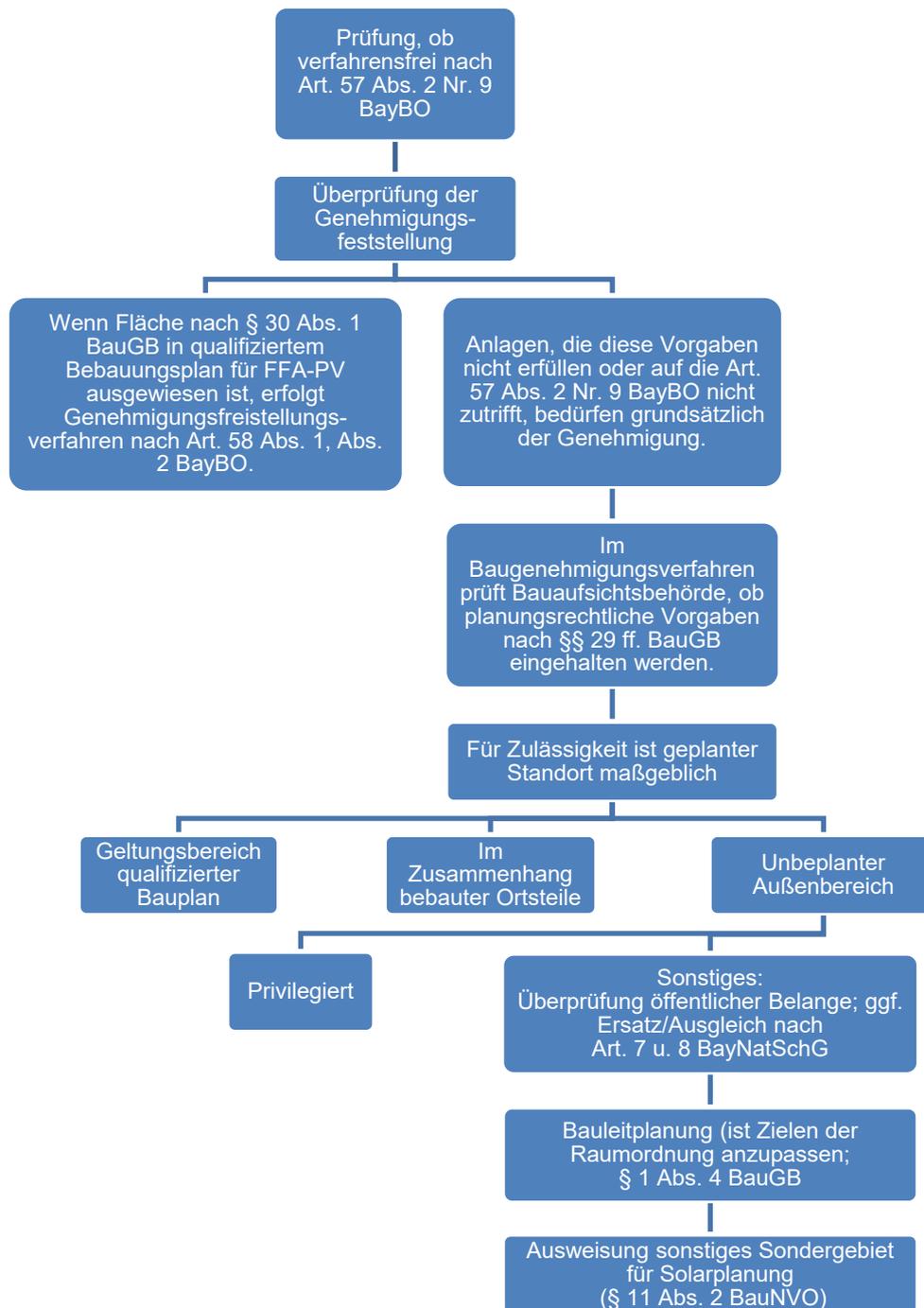


Abbildung 18: Genehmigungsverfahren für PV-FFA- und Agri-PV-Anlagen (Darstellung: Johannes Scharf, TFZ, 18.08.2020)

Für Agri-PV-Anlagen besteht kein gesondertes Genehmigungsrecht. Aus diesem Grund werden die gleichen Verfahren (Abbildung 18) angewendet wie bei konventionellen PV-FFA. Als bauliche Anlagen, zu denen PV-Anlagen zählen, bedürfen sie üblicherweise einer Genehmigung. Diese wird erteilt, wenn öffentlich-rechtliche Vorschriften nicht dagegensprechen, das heißt, wenn planungsrechtliche Vorgaben eingehalten werden.

Für die bauplanungsrechtliche Zulässigkeit ist der Standort der geplanten Anlage maßgeblich. Sollte das Grundstück im Geltungsbereich eines Bebauungsplans liegen, müssen die Vorgaben dieses Bebauungsplans eingehalten werden. Auf einem unbeplanten Grundstück hängt die Zulässigkeit wiederum davon ab, ob das Projekt innerhalb bebauter Ortsteile oder im Außenbereich liegt. Für gewöhnlich liegen Projektflächen im unbeplanten Außenbereich. Dieser soll grundsätzlich nicht bebaut werden. Die Bebauung ist unter gewissen Voraussetzungen jedoch zulässig. Im Außenbereich wird zwischen privilegierten und sonstigen Vorhaben unterschieden. Privilegierte Vorhaben sind nach § 35 Abs. 1 BauGB beispielsweise Anlagen, die forst- und landwirtschaftlichen oder gartenbaulichen Betrieben oder der Nutzung solarer Strahlungsenergie in, an und auf Dach- und Außenwandflächen von zulässigerweise genutzten Gebäuden dienen, wenn die Anlage dem Gebäude baulich untergeordnet ist. Derartige Projekte sind dann zulässig, wenn die Erschließung gesichert ist und sie öffentlichen Belangen nicht entgegenstehen. Agri-PV-Anlagen werden hier bislang nicht explizit erwähnt. Für eine Einordnung in diese Kategorie müsste daher gut argumentiert werden, was den planungsrechtlichen Aufwand enorm erhöht. Da der erzeugte Strom im Normalfall nicht dem Eigenverbrauch des landwirtschaftlichen Betriebs dient, sondern über das EEG vergütet wird, dient die Stromerzeugung im Regelfall nicht der landwirtschaftlichen Erzeugung. Aus diesem Gesichtspunkt müsste eine Agri-PV-Anlage also als sonstiges Bauvorhaben eingeordnet werden. Jedoch können Agri-PV-Anlagen bei richtiger Planung die landwirtschaftliche Erzeugung beispielsweise durch den Schutz der Kulturen direkt unterstützen, wie in den Abschnitten 7.1.2, 7.1.3, 7.1.6 und 7.1.7 genauer herausgearbeitet wird. Vor allem im Hinblick auf zunehmende Wetterextreme im Zuge des Klimawandels könnte dieser Punkt in Zukunft weiter an Bedeutung gewinnen. Betrachtet man Agri-PV-Anlagen also beispielsweise als Schutzstrukturen für landwirtschaftliche Kulturen, so sind die Anlagen der landwirtschaftlichen Erzeugung dienlich und sollten daher als privilegiertes Vorhaben betrachtet werden. Wird die Anlage jedoch als sonstiges Bauvorhaben eingestuft, so darf das Projekt öffentliche Belange nicht beeinträchtigen, um zulässig zu sein.

Zu öffentlichen Belangen gehören hier beispielsweise naturschutzrechtliche Vorschriften. Hierbei muss also geklärt werden, ob es sich bei der Errichtung von Agri-PV-Anlagen um einen Eingriff in den Naturhaushalt handelt. Diese Eingriffe sind vorrangig zu vermeiden. Sollten sie nicht vermeidbar sein, sind erhebliche Eingriffe nach § 13 Abs. 1 BNatSchG und Art. 7f BayNatSchG auszugleichen. Nutzungen nach den Regeln der guten landwirtschaftlichen Praxis stellen jedoch nach § 13 Abs. 2 BNatSchG keinen Eingriff dar [61].

Bisherige Agri-PV-Projekte waren von dieser Regel nicht betroffen, weshalb ein Ausgleich für den jeweiligen Eingriff geleistet werden musste. Da optimal geplante Agri-PV-Anlagen negative Auswirkungen minimieren oder sogar Vorteile für die landwirtschaftliche Nutzung darstellen können, könnte hier möglicherweise auf einen Ausgleich verzichtet werden [61].

7 Vor- und Nachteile von Agri-PV und gesellschaftliche Akzeptanz

Agri-PV bietet im Vergleich mit anderen Arten der Photovoltaikanwendung einige Vorteile, die bereits belegt werden konnten. Andere Vorteile werden in der Wissenschaft zwar bereits diskutiert, konnten zum Teil jedoch mangels Daten noch nicht belegt werden. Um einen Überblick über die häufigsten bislang beschriebenen Vor- und Nachteile der Agri-PV gegenüber herkömmlichen PV-FFA und anderen Arten der Stromerzeugung zu erhalten, werden diese hier zusammengefasst und anhand verfügbarer Literatur und Expertenmeinungen diskutiert.

7.1 Vorteile

7.1.1 Erhöhung der Resilienz

Agri-PV kann die Resilienz der Landwirte in zweierlei Hinsicht erhöhen.

Zum einen schafft sie eine sichere Einkommensquelle für Landwirte und stellt eine Diversifizierung im Einkommen dar. Wie in Abschnitt 7.1.4 weiter erläutert wird, schwanken die Preise für landwirtschaftliche Erzeugnisse auf den globalen Agrarmärkten enorm [7]. Zusätzlich werden Ernten zunehmend durch Wetterextreme bedroht. Die Agri-PV bietet die Möglichkeit, weiterhin Landwirtschaft zu betreiben und gleichzeitig Strom zu erzeugen, bei dem die Einspeisevergütung nach dem EEG für zwanzig Jahre garantiert wird. Somit ist dieses Einkommen für den Landwirt verlässlich und kann ihn in Zeiten schlechter Agrarerlöse, sei es durch Ernteaufälle oder niedrige Absatzpreise, monetär unterstützen.

Zum anderen können vor allem hoch aufgeständerte Agri-PV-Anlagen die darunter befindlichen Kulturen vor extremen Wetterereignissen oder zu starker Sonneneinstrahlung schützen. Vor allem in Dauer- und Sonderkulturen können so Ernteaufälle oder Ertragsminderungen verhindert werden (siehe Abschnitte 7.1.2 und 7.1.3).

Bei einer flächendeckenden Implementierung der Agri-PV kann diese durch die Substitution fossil erzeugten elektrischen Stroms zudem einen wichtigen Beitrag zur Energiewende und somit letztlich im Kampf gegen den Klimawandel leisten.

7.1.2 Schutz der Kulturen vor mechanischen Einflüssen

Eines der häufigsten Argumente für Agri-PV ist der Schutz der Pflanzen vor mechanischen Einflüssen, wie Hagel oder Starkregen. Dies ist in einigen Kulturen ein gut nachvollziehbarer und belegbarer Vorteil, da Agri-PV-Anlagen, wenn diese über den Feldfrüchten installiert werden, herkömmliche Schutzvorrichtungen ersetzen oder zusätzliche schaffen können. Derartige Schutzvorrichtungen werden üblicherweise in mehrjährigen Sonderkulturen, wie beispielsweise Himbeeren, genutzt. Die fest installierten PV-Module bieten gegenüber herkömmlichen Anwendungen, wie Hagelnetzen oder Folientunneln, den Vorteil, dass sie wesentlich robuster sind und durch die längere Lebensdauer längerfristig

installiert werden. Folientunnel, wie sie häufig im Beerenanbau zu finden sind, sind sehr anfällig für Starkwinde und werden durch diese häufig zerstört. Doch auch im besten Fall, ohne den Einfluss starker Winde, müssen sie nach spätestens sechs Jahren ausgetauscht werden. Dies ist erstens nicht nachhaltig und stellt Landwirte außerdem vor das Problem, dass sie im Falle von Gewittern ihre Felder oft engmaschig überwachen müssen, um schnell eingreifen zu können, falls Schutzvorrichtungen zerstört werden [12]. Die Schutzvorrichtungen versagen also häufig in Situationen, in denen sie am meisten benötigt werden, wenn Hagel und Starkwind gleichzeitig auftreten. Agri-PV-Anlagen werden dagegen für mindestens zwanzig Jahre installiert und können im Normalfall sogar über diese Dauer hinweg betrieben werden. Die harte Glasoberfläche der Module wurde mittlerweile über Jahrzehnte an widrigste Witterungsbedingungen angepasst und widersteht starke Winden ebenso wie Hagel. Schutz können die Module jedoch nur dann bieten, wenn sie oberhalb und möglichst auch über die jeweiligen Kulturpflanzenreihen seitlich herausragend angebracht werden und somit ein schützendes Dach über den Pflanzen bilden. Vertikal angebrachte Module und Modulreihen, die lediglich zwischen den Feldfrüchten angebracht werden, können diesen Schutz nicht bieten. Auf großflächigen Getreidefeldern mit vertikalen Modulreihen bietet Agri-Photovoltaik somit einen Schutz als Windbrecher oder vor Winderosion, gegen Starkregen und Hagel dagegen nicht. Einen belegbaren Vorteil bietet die Agri-Photovoltaik aus dieser Sicht also vor allem in Sonderkulturen, in denen die jeweiligen Pflanzen komplett überdacht werden, wie beispielsweise im Fall von Wein oder Himbeeren, wo sie bereits bestehende Stütz- oder Schutzstrukturen ersetzen kann [12]. Auch bei Feldgemüse oder Kartoffeln ist eine derartige Anwendung denkbar.

7.1.3 Schutz vor zu hoher Sonneneinstrahlung

Neben mechanischen Einflüssen können die angebrachten PV-Module auch vor zu hoher Sonneneinstrahlung schützen. Zu hohe UV-Einstrahlung kann Pflanzen ebenso wie uns Menschen schaden [59]. Überschreitet die Sonneneinstrahlung also den Lichtsättigungspunkt, so wird das Pflanzenwachstum nicht weiter gefördert. Zusätzliche UV-Strahlung kann das Wachstum sogar hemmen. Eine gewisse Verschattung kann also für die darunter angebauten Pflanzen unter bestimmten Voraussetzungen sogar von Vorteil sein, da sie die Feldfrüchte vor zu hoher UV-Einstrahlung schützt und so Verbrennungen der Pflanzen vorbeugt [12]. Davon profitieren hauptsächlich Pflanzen, die schattigere Standorte bevorzugen. Auch hier kann das Beispiel von Himbeerplantagen herangezogen werden. Viele Dauerkulturen, wie beispielsweise Himbeeren oder Wein, sind sehr anfällig für verschiedene Witterungseinflüsse, zu denen auch zu hohe Sonneneinstrahlung gehört. Die Pflanzen bzw. die Früchte bekommen einen Sonnenbrand, der zu Qualitätseinbußen oder im schlimmsten Fall Ernteaussfällen führt [30]. So werden auch aus diesem Grund erste Versuche mit Agri-PV-Anlagen in Himbeer- und Weinkulturen in den Niederlanden [12] und Frankreich [45] durchgeführt, um eine nachhaltige Alternative zu Folienbögen, die häufig erneuert werden müssen, zu erproben.

7.1.4 Zugang zur Energiewende für Landwirte

Für viele Landwirte sind erneuerbare Energien, allen voran die PV, ein wichtiges zweites wirtschaftliches Standbein geworden. Sie bieten eine verlässliche Einkommensquelle, die aufgrund fluktuierender Marktpreise für landwirtschaftliche Erzeugnisse immer wichtiger wird. Nicht zuletzt deshalb befürwortet der Bayerische Bauernverband (BBV) einen weiteren Ausbau der PV-FFA in landwirtschaftlicher und Bürgerhand [7]. Für heimische Landwirte bietet die Agri-PV vor allem einen Vorteil, da sie ihnen den Zugang zur Energiewende ermöglicht, ohne ihnen dabei die Möglichkeit zu nehmen, ihre Felder weiter zu bestellen [36]. Notwendige Futterflächen sowie auch Flächen für die organische Düngung bleiben weitgehend erhalten. Die Stromerzeugung mithilfe von Agri-Photovoltaik stellt für Landwirte also eine zusätzliche Einnahmequelle dar und ermöglicht somit eine Diversifizierung des Einkommens. Gleichzeitig wird die Bewirtschaftung der Felder bei passender Installation kaum bzw. nur wenig beeinflusst [58]. Da die Stromerzeugung auf einer Fläche jedoch wesentlich höhere Erlöse ermöglicht als die landwirtschaftliche Erzeugung, müssen präzise rechtliche Vorgaben geschaffen werden, um Formen der Pseudo-Agri-Photovoltaik zu verhindern. Bei Pseudo-Agri-PV handelt es sich um Anlagen, die als Agri-PV errichtet werden, um beispielsweise höhere Förderungen zu erzielen als bei herkömmlichen PV-FFA. Anschließend wird die Anlage jedoch dahingehend ausgelegt, dass die installierte Leistung und damit die Stromerlöse maximiert werden, während die landwirtschaftliche Erzeugung vernachlässigt wird.

7.1.5 Der zunehmenden Flächenkonkurrenz entgegenwirken

Eine der zentralen Forderungen des BBV in seiner Stellungnahme [7] ist die flächige Verteilung von PV-Anlagen. Vor allem in Regionen, die aufgrund hoher Sonneneinstrahlung hohe Stromerträge erwarten lassen, gäbe es eine hohe Konzentration von PV-FFA, was eine Flächenkonkurrenz zwischen landwirtschaftlicher Erzeugung und Stromerzeugung hervorrufe. Dies führe dazu, dass sich gerade Landwirte in Franken und der Oberpfalz, wo die Konzentration von PV-FFA besonders hoch ist, Sorgen um ihre Acker- und Grünlandflächen machen würden, da die Pachtkosten steigen. Agri-Photovoltaik kann hier einen wichtigen Beitrag liefern, dieser Flächenkonkurrenz entgegenzuwirken. Sie ermöglicht Landwirten, auf einer Fläche Strom und landwirtschaftliche Erzeugnisse zu produzieren. Bei Auswahl eines geeigneten Anlagendesigns kann Agri-PV in einigen Kulturen implementiert werden, ohne dabei wesentlich Flächen zum Anbau von Nahrungs- bzw. Futterpflanzen zu verlieren [36]. Durch die Agri-PV kann also die zunehmende Flächenkonkurrenz zwischen Landwirtschaft und Energieerzeugung entschärft werden [58].

Betrachtet man jedoch die Fläche, die theoretisch notwendig wäre, um den weltweiten Strombedarf durch PV zu decken, so erscheint dieser Punkt eher unbedeutend, da bereits ein Prozent der derzeit landwirtschaftlich genutzten Fläche ausreichen könnte [1]. Hier stellt sich die Frage, ob eher unproduktive Standorte mit niedrigem landwirtschaftlichen Ertrag nicht besser als herkömmliche PV-FFA genutzt werden sollten, als die PV in die breite Landwirtschaft zu integrieren. Somit würden diese Flächen nicht weiterhin intensiv bewirtschaftet, sondern könnten extensiviert werden und beispielsweise als ökologisch

wertvolle Blühflächen einen wichtigen Beitrag im Kampf gegen das Artensterben leisten [53].

7.1.6 Abnahme der Verdunstung

In besonders trockenen Gegenden haben Landwirte seit jeher mit Trockenheit zu kämpfen und versuchen beispielsweise, sich durch besonders sparsame Bewässerungstechniken an widrige Bedingungen anzupassen. Infolge des Klimawandels haben auch immer mehr Landwirte in Bayern mit Trockenheit zu kämpfen. Vor allem trockenes, warmes Wetter im Frühjahr und Frühsommer macht den Landwirten zu schaffen. In einigen Regionen Bayerns haben die Niederschläge im Zeitraum von 1931 bis 2015 um 19 bis 23 Prozent abgenommen [37]. Gerade besonders trockene Jahre wie das Jahr 2018 sind dabei für Landwirte fatal. Die zunehmende Trockenheit trifft Landwirte hierzulande auch deshalb so hart, weil historisch gesehen zwar immer wieder trockene Jahre zu verzeichnen waren, im Allgemeinen jedoch selten Wassermangel herrschte. Aus diesem Grund ist die Landwirtschaft noch nicht ausreichend an die zunehmende Trockenheit angepasst. Zwar gab es beispielsweise im besonders heißen und trockenen Sommer 2018 finanzielle Unterstützung für von der Trockenheit sehr betroffene Landwirte in Form des Bayerischen Hilfsprogramms „Grundfutterzukauf Dürre 2018“ [8]. Derartige Hilfsprogramme können jedoch nur eine kurzfristige und zeitweise Überbrückung in Ausnahmesituationen sein. Längerfristig müssen Wege gefunden werden, die Landwirtschaft an die zunehmende Trockenheit anzupassen. Vor dem Hintergrund zunehmender Hitzewellen in Mitteleuropa [4] kann dieser Punkt also in Form einer Anpassung an wärmere und trockenere Sommer an Bedeutung gewinnen. Auch hier kann Agri-PV einen wichtigen Beitrag leisten. Die Module beschatten bei richtiger Anbringung die darunterliegenden Flächen gleichmäßig und verringern somit die Sonneneinstrahlung. Damit wird die Verdunstung auf den darunterliegenden Flächen ebenfalls verringert. So konnten Marrou et al. 2013 [38] in Salat- und Gurkenkulturen zeigen, dass Agri-PV-Systeme die Evapotranspiration auf den darunterliegenden Flächen um 14 bis 29 Prozent verringern und somit den Wasserbedarf signifikant senken. Die Minderung des Wasserbedarfs ist dabei vom Grad der Verschattung ebenso abhängig wie von der gewählten Kultur.

7.1.7 Speicherung von Niederschlagswasser

Gerade bei Anlagen, bei denen die Module über den Kulturen installiert sind, kann es im Fall von Starkregenereignissen unterhalb der Ablaufkante zu vermehrter Bodenerosion kommen. Der Regen der gesamten Modulfläche sammelt sich hier und läuft an der Ablaufkante gebündelt ab. Unterhalb trifft eine derart große Menge Wasser auf, dass der Boden an dieser Stelle ausgewaschen werden kann, vor allem wenn die Erde nicht von Vegetation bedeckt ist. Um dies zu verhindern, können bei betroffenen Anlagen zusätzlich an der Ablaufkante der Module Rinnen angebracht werden, die das Regenwasser sammeln und über ein Leitungssystem zu einem Speicher weiterleiten. Das gesammelte Wasser kann in Trockenperioden für die Bewässerung der Kulturen verwendet werden [50]. Solche Anlagensysteme sind in Europa bislang noch nicht im Einsatz.

7.1.8 Steigerung der Landnutzungsrate

Eines der wichtigsten Argumente für die Agri-PV ist jedoch eine Steigerung der Landnutzungsrate. Das Projekt APV-RESOLA konnte beispielsweise für das Jahr 2017 eine Steigerung der LNR auf 160 Prozent nachweisen. Jedoch bestanden starke Schwankungen der landwirtschaftlichen Erträge sowohl zwischen einzelnen Kulturen als auch zwischen den Versuchsjahren. So wurden beispielsweise bei den Kartoffeln im Jahr 2017 im Vergleich zur Referenzfläche Mindererträge in Höhe von zwanzig Prozent festgestellt, während im besonders trockenen und heißen Jahr 2018 die Erträge im Vergleich zur Referenzfläche um elf Prozent höher ausfielen [61]. Andererseits ist die LNR eine rein rechnerische Größe, die für sich allein keine Aussagekraft hinsichtlich der Ökonomie einer Agri-PV-Anlage entfaltet.

7.1.9 Verzicht auf Zäune zur Sicherung der PV-Module

Bei einigen Arten der Agri-PV profitieren vor allem größere Säugetiere, da der Lebensraum unter einer Agri-PV ohne Zaun für sie erhalten bleibt. Bei herkömmlichen Freiflächenanlagen und vertikal errichteten Anlagen müssen Zäune errichtet werden, um die teuren Module vor Diebstahl zu schützen. Dies sorgt dafür, dass die meisten Tiere die Flächen nicht oder nur unter großem Aufwand betreten können. Bei aufgeständerten Modulen kann auf diesen Schutzzaun verzichtet werden, da die Anbringung in mehreren Metern Höhe an sich bereits einen guten Diebstahlschutz darstellt. Dieser Vorteil wird jedoch kontrovers diskutiert. Eingezäunte Flächen, wie beispielsweise PV-FFA, die nicht landwirtschaftlich genutzt werden, stellen eine gute Brutstätte für Bodenbrüter dar. Diese können hier ohne Störung durch landwirtschaftliche Maschinen oder Fressfeinde brüten. Jedoch sind Schutzzäune auch für größere Säugetiere keine unüberwindbare Barriere. So können vor allem Hasen oder Füchse Mulden unter den Zäunen graben, die im Anschluss zum Teil von Rehen vergrößert werden, um die guten Futtergründe zu erschließen. Der oft genannte Vorteil der hoch aufgeständerten, zaunlosen Agri-PV gegenüber herkömmlichen Freiflächenanlagen ist also sehr von der Fauna vor Ort abhängig.

7.1.10 Schneeabwurf



Abbildung 19: Verschneite Module einer PV-FFA (Foto: Johannes Scharf, TFZ, 31.01.2021)

Gerade in höheren Lagen kann Schnee, der auf PV-Modulen mit geringer Neigung über längere Zeit liegen bleiben kann, die Stromerträge im Winter deutlich mindern [42]. Dies stellt bei Freiflächenanlagen vor allem in höheren Lagen in Bayern ein Problem dar und dürfte bei fest installierten, hoch aufgeständerten Agri-PV-Anlagen ebenso zu Mindererträgen führen. Dabei bieten im Winter vor allem jene Zeiten, in denen Schnee liegt, hohe Ertragspotenziale. Tiefe Temperaturen erhöhen den Wirkungsgrad der Module und die starke Reflexion der Sonne auf beschneiten Flächen sorgt für hohe Einstrahlungswerte [42]. Mit bifacialen Modulen, die in Agri-PV-Anlagen häufig Anwendung finden, kann der Ertrag durch die hohen Rückstrahlungswerte enorm gesteigert werden [3]. Vertikal aufgeständerte Anlagen bieten den Vorteil, dass aufgrund der Anbringung kein Schnee auf den Modulflächen liegenbleiben kann. Vor allem aus diesem Grund werden in der Schweiz in hohen Lagen Module häufig senkrecht an Fassaden angebracht, um trotz der verhältnismäßig hohen Schneemengen hohe PV-Erträge erzielen zu können [42]. Diesen Vorteil bieten auch vertikal aufgeständerte Agri-PV-Anlagen.

Nachgeführte Agri-PV-Anlagen können nach Schneefällen einfach vom Schnee befreit werden und somit die guten Einstrahlungswerte optimal nutzen. Auf Knopfdruck können die Module, wie zur landwirtschaftlichen Bearbeitung, in eine 60-Grad-Position gebracht werden. Dies sorgt dafür, dass der meiste Schnee abgeworfen wird, und legt damit nahezu die gesamte Modulfläche frei. Dieser Vorgang kann durch Anbringung von Schneesensoren auch automatisiert werden.

7.2 Nachteile

7.2.1 Einkommensdiskrepanz zwischen Stromerzeugung und landwirtschaftlicher Produktion

Ein Aspekt, der besonders bei der rechtlichen Einordnung der Agri-Photovoltaik wichtig ist, ist die Diskrepanz der Einnahmen aus der Stromerzeugung und der landwirtschaftlichen Erzeugung. Durchschnittlich kann derzeit auf einem Hektar eine Freiflächenanlage mit einer Leistung von 714 kW_p installiert werden [65]. Bei einer durchschnittlichen Erzeugung von 1.100 bis 1.250 kWh/kW_p in Süddeutschland [40] produziert eine derartige Anlage also pro Hektar mindestens 785.400 kWh Strom. Bei einem Vergütungssatz von zuletzt 5,10 ct/kWh, der in der Ausschreibungsrunde 12/2020 ermittelt wurde [14], können pro Hektar also Erlöse in Höhe von etwa 40.000 €/a erwirtschaftet werden. In einer Agri-PV-Anlage können je nach Anlagendesign zwischen fünfzig und achtzig Prozent dieser Erträge erwirtschaftet werden, also 20.000 bis 32.000 €/a. Beim Anbau von Winterweizen steht dieser Summe beispielsweise eine Marktleistung von ca. 1.320 €/a gegenüber [6], die durchschnittlich auf einem Hektar erwirtschaftet werden kann. Beim Weizenanbau in einer Agri-PV-Anlage kann davon ausgegangen werden, dass die Marktleistung aufgrund der Verschattung durch die Module, den Verlust von Anbaufläche für die Aufständigung der Module um weitere ca. 15 Prozent sinkt. Somit steht Stromerlösen von 20.000 bis 32.000 Euro pro Jahr eine landwirtschaftliche Marktleistung von gut 1.120 Euro gegenüber. Hier stellt sich für einen Landwirt berechtigterweise die Frage, warum er also weiter Landwirtschaft auf dieser Fläche betreiben sollte, wenn dadurch die maximale installierte PV-Leistung auf der Fläche und mit ihr der Stromertrag auf etwa die Hälfte sinkt. Natürlich ist aber bei der Produktion von Sonderkulturen in Agri-PV-Anlagen der anteilige landwirtschaftliche Erlös deutlich höher und kann diese Diskrepanz verringern.

7.2.2 Geringere Erlöse bei höheren Investitionskosten

Im Vergleich zu herkömmlichen PV-FFA sind die Investitionskosten für Agri-PV-Anlagen tendenziell höher, im Fall hoch aufgeständerter Module steigen die Kosten aufgrund aufwendiger Aufständigung und teurerer Spezialmodule sogar enorm an. Dennoch sind die Stromerlöse auf der gleichen Fläche aufgrund der höheren Reihenabstände und geringerer installierter Leistung deutlich niedriger als im Fall herkömmlicher PV-FFA. Gleichzeitig ist die landwirtschaftliche Bearbeitung im Vergleich zu einem Feld ohne Agri-PV erschwert. Da somit bei tendenziell erhöhten Investitionskosten geringere Stromerträge und eine erschwerte Bearbeitung der Anbauflächen zu erwarten sind, stellt die Agri-PV für den

Landwirt bei klassischem Marktfrucht- oder Futterbau zunächst keine erstrebenswerte Anlagenform dar. Um Landwirten einen Anreiz zu bieten, geringere Stromerträge und eine erschwerte Bearbeitung hinzunehmen, müssen rechtliche Rahmenbedingungen so gewählt werden, dass dieser Mehraufwand angemessen vergütet wird oder durch die Kombination wie bei bestimmten Sonderkulturen Synergien entstehen.

7.2.3 Verschmutzung

Werden Agri-PV-Anlagen auf Ackerflächen installiert, stehen sie damit auf einer Fläche, die im Regelfall häufig bearbeitet wird. Vor allem bei der Bodenbearbeitung und der Ernte führt dies zu enormer Staubentwicklung. Dies erhöht den Reinigungsbedarf bei modernen Modulen im Normalfall nur geringfügig, da moderne Module in der Regel selbstreinigend sind. Das heißt sie werden beispielsweise mit speziellen Nanobeschichtungen versehen, um sie schmutz- und staubabweisend zu machen [51]. Eventueller Staubniederschlag wird somit beim nächsten Regen abgewaschen. In konventionellen Freiflächenanlagen ist die Staubbelastung durch den räumlichen Abstand zur Verschmutzungsquelle für gewöhnlich nicht allzu hoch, weshalb es nur zu geringer Verschmutzung der Module kommt. Auch während längerer Schönwetterperioden nimmt die Verschmutzung der Module in der Regel daher nicht in einem Maße zu, das größere Ertragsverlusten bewirkt. Im Gegensatz dazu befinden sich Agri-PV-Anlagen direkt dort, wo der Staub freigesetzt wird. Werden die darin befindlichen Ackerflächen während Schönwetterperioden bearbeitet oder beerntet, so wird viel Staub aufgewirbelt, der sich auf den Modulen niederschlägt. Kommt es in der Folge längere Zeit nicht zu Regenfällen, bleiben die Module über diesen Zeitraum stark verschmutzt, sodass mit enormen Mindererträgen bei der Stromproduktion zu rechnen ist.

Neben Staub kann auch die Abdrift von Pflanzenschutzmitteln eine Verschmutzung der Module auslösen. Gerade Fungizide sind in ihrer Formulierung oft so konzipiert, dass das Gemisch eine hohe Benetzung, gute Haftung und oft auch eine Art Sonnenschutz für die Blätter bewirkt. Dieser Film kann auf den Modulen haften und zu Leistungseinbußen führen. Möglicherweise ist eine Selbstreinigung der Module in diesem Fall durch Niederschlag nicht ausreichend. Um dem entgegenzuwirken, kann in manchen Fällen eine Reinigung der Module sinnvoll sein. Je nach Anlagendesign ist dann mit einer Erhöhung der Betriebskosten der Anlage [56] zu rechnen.

7.2.4 Risiko der Beschädigung

Durch die Errichtung einer Agri-PV-Anlage werden Komponenten auf einer landwirtschaftlichen Fläche verbaut, die statisch wie auch elektronisch höchst sensibel abgestimmt und dadurch auch mit hohen Anschaffungskosten versehen sind. Um eine lange Lebensdauer und zuverlässige Funktion zu gewährleisten, ist darauf zu achten, den schadhafte Einfluss von Gefahren möglichst gering zu halten. Analog verhält es sich mit landwirtschaftlichen Maschinen, wie zum Beispiel Traktoren oder Erntemaschinen, deren Anschaffungskosten mehrere Hunderttausend Euro betragen.

Bei der Produktion von Strom und landwirtschaftlichen Erzeugnissen durch Agri-PV ist nun allerdings vorausgesetzt, dass eben diese kostenintensiven Posten auf nächstem Raum zueinander betrieben werden. Diese räumliche Situation kann zu einem deutlichen Anstieg des Risikos für eine Karambolage und folglich eine Beschädigung führen und ein großes Hemmnis für landwirtschaftliche Betriebe darstellen.

7.2.5 Sichtbarkeit aufgeständerter Module

Der Ausbau der Biogasproduktion durch die Förderung von Biogasanlagen hat im Landschaftsbild örtlich zu einer wahrnehmbaren Zunahme von Maisflächen geführt. Man sprach von der „Vermaisung“ der Kulturlandschaft, was zu einem starken Imageverlust der Biogasbranche in der Gesellschaft führte. Auch der Ausbau von PV-FFA entlang von Autobahnen und Bahnschienen prägt mancherorts das Landschaftsbild und wird von der Bevölkerung vor allem dann als störend empfunden, wenn die Module gut sichtbar sind und das Sichtfeld stören oder aufgrund der reflektierenden Oberfläche vorbeifahrende Autofahrer blenden [13] [28]. Deshalb wurde in den vergangenen Jahren zunehmend Wert auf eine gute Integration von PV-FFA ins Landschaftsbild gelegt. Hierfür können beispielsweise natürliche Senken verwendet werden, um Anlagen möglichst dem Sichtfeld zu entziehen. Eine weitere Möglichkeit, Freiflächenanlagen gut ins Landschaftsbild zu integrieren, bieten um die Anlagen angelegte Hecken [40]. Diese werten zudem die Flächen ökologisch auf. Im krassen Gegensatz zu derartigen Bemühungen, PV-Anlagen möglichst zu verbergen, stehen hoch aufgeständerte Agri-PV-Anlagen. Diese sind bei einer Höhe von bis zu sechs Metern weithin sichtbar und können kaum durch Hecken oder in natürlichen Senken verborgen werden. Aus Blickrichtung direkt auf die Modulreihe kann bei dieser Art der Anbringung der Eindruck einer Halle oder einer kompletten Überdachung entstehen, die einen beträchtlichen optischen Eingriff in das Landschaftsbild bedeutet und so deutlich den Charakter einer Bebauung besitzt.

7.3 Gesellschaftliche Akzeptanz – erste Daten

Grundsätzlich genießen erneuerbare Energien einen sehr guten Ruf in der deutschen Bevölkerung. Laut einer Befragung von YouGov im Auftrag der Agentur für erneuerbare Energien vom Dezember 2020 stimmt ein Großteil von 86 Prozent der Deutschen der Aussage zu, der Ausbau erneuerbarer Energien sei wichtig oder außerordentlich wichtig [2]. Lediglich vier Prozent sehen den Ausbau als überhaupt nicht wichtig an (Abbildung 20).

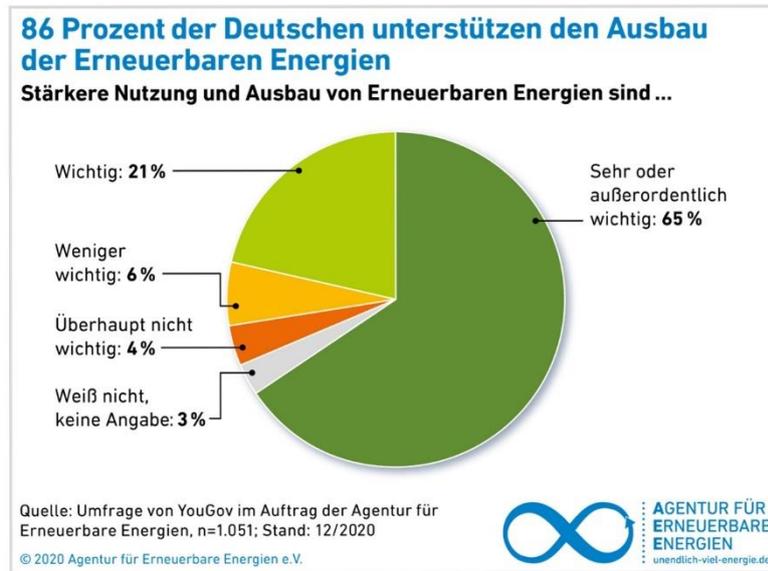


Abbildung 20: Umfrage zur Unterstützung des Ausbaus erneuerbarer Energien in Deutschland (Darstellung: Agentur für Erneuerbare Energien e. V. [2])

PV ist in diesem Kontext bei deutschen Bürgern besonders beliebt. 62 Prozent der Befragten gaben an, sie fänden einen Solarpark in der Nachbarschaft gut oder sehr gut. Bei Personen mit Solarpark in der unmittelbaren Nachbarschaft liegt die Zustimmung sogar bei 76 Prozent (Abbildung 21). Diese Daten beziehen sich jedoch auf konventionelle Freiflächenanlagen. Zu Agri-PV gibt es bislang keine umfassenden Erhebungen.

Erste Befragungen von Teilnehmern eines Bürger-Workshops im Rahmen des Projekts APV-RESOLA ließen aber erkennen, dass die Agri-PV unter gewissen Bedingungen auf noch höhere Akzeptanz stoßen könnte als herkömmliche Freiflächenanlagen und andere Arten der regenerativen Stromerzeugung. Hierfür ist es jedoch dringend notwendig, einige Punkte zu beachten. So ergab die Umfrage, dass die Agri-PV auf Ablehnung stoßen kann, wenn sie in bislang von der Energiewende wenig betroffenen Gebieten oder an besonders exponierten Standorten umgesetzt wird [47]. Hier kann also aus den Fehlern gelernt werden, die bei der Einführung anderer erneuerbarer Energien gemacht wurden. So ist ein „Wildwuchs“, wie er zwischenzeitlich bei Biogasanlagen vorkam, dringend zu vermeiden, um zu verhindern, dass ganze Landstriche aufgrund der aufgeständerten Anbringungsweise überdacht wirken.

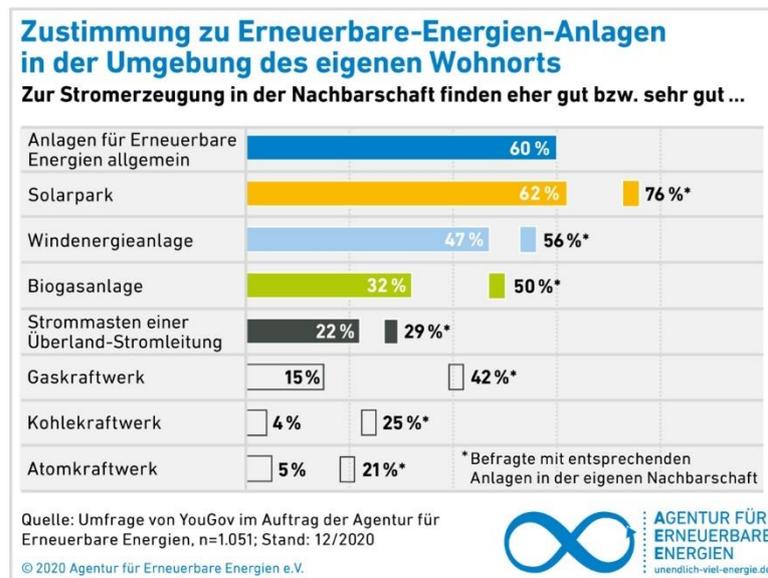


Abbildung 21: Zustimmung zu Erneuerbare-Energien-Anlagen in der Umgebung des eigenen Wohnorts (Darstellung: Agentur für Erneuerbare Energien e. V. [2])

Um diesem Effekt entgegenzuwirken, ist es ratsam vor allem Kulturen zu verwenden, bei denen die Anbringung der PV-Module in bestehende Strukturen integriert werden oder diese ersetzen kann [40]. Grundsätzlich erfreute sich die Agri-PV bei den ersten Befragten vor allem aufgrund ihres Doppelertragscharakters einer höheren Akzeptanz als andere Arten der Energieerzeugung aus Erneuerbaren [48] [47]. Um diesen Vorteil zu erhalten, ist es Befragten zufolge jedoch sehr wichtig, die Doppelnutzung auch sicher zu erbringen. Hierfür sind rechtliche Regelungen sinnvoll, die beispielsweise einen gewissen Biomasseertrag (Prozentwert im Vergleich zum vorherigen Ertragsniveau) vorschreiben, um Entwicklungen wie der sogenannten Pseudo-Agri-Photovoltaik vorzubeugen. Dies berücksichtigt allerdings nicht, dass auch Brache, Blühflächen oder Ähnliches eine landwirtschaftliche Nutzung darstellen, die keinen quantifizierbaren Biomasseertrag liefern, da eine Beerntung ausgeschlossen ist.

8 Forschungsbedarf und Handlungsempfehlungen

8.1 Forschungs- und Demonstrationsbedarf

8.1.1 Modultechnik

Die PV-Modultechnik ist ein Forschungsfeld, in dem seit vielen Jahren große Anstrengung betrieben wird. Vor allem seit der Einführung des EEG entwickelte sich die Technik rasant weiter, wodurch einerseits immer leistungsfähigere Module und höhere Wirkungsgrade erzielt werden können. Andererseits sinken die Preise für Module stetig [64]. Für verschiedene Agri-PV-Anwendungen werden jedoch häufig Spezialmodule verwendet, die zum Teil noch nicht serienmäßig produziert werden. Um die Investitionskosten für Agri-PV-Anlagen zu senken und sie somit im Wettbewerb mit anderen Arten der PV-Anwendung konkurrenzfähig zu machen, besteht weiterer Forschungsbedarf auf diesem Feld.

8.1.2 Gesellschaftliche Akzeptanz der Agri-PV

Erste Befragungen in einem Bürger-Workshop im Zuge des Projekts APV-RESOLA ergaben, dass unter gewissen Voraussetzungen die Akzeptanz für Agri-PV noch höher sein könnte als für andere Arten der erneuerbaren Energien [48]. Diese Befragung wurde allerdings nicht mit einer zufälligen Stichprobe durchgeführt, sondern nur unter den Teilnehmern des Workshops. Diese Gruppe dürfte sich zum Großteil aus Personen zusammengesetzt haben, die sich bereits für die Thematik interessierten und damit Agri-PV gegenüber tendenziell positiver eingestimmt waren als der Durchschnitt der Bevölkerung.

Um die Akzeptanzsituation innerhalb der Bevölkerung einschätzen zu können und auf dieser Grundlage einen detaillierten Vorgehensplan zur großflächigen Aufnahme der Agri-PV in den deutschen Strommix erarbeiten zu können, sind umfassende Studien notwendig.

8.1.3 Wissenschaftliche Überprüfung der landwirtschaftlichen Erträge

Bislang gab es in Deutschland nur ein Projekt, bei dem Auswirkungen einer hoch aufgeständerten Agri-PV-Anlage auf die landwirtschaftlichen Erträge wissenschaftlich untersucht wurden. Für andere Anlagendesigns liegen bislang keine Daten vor. Um also in Zukunft wissenschaftlich fundiert beurteilen zu können, welche Auswirkungen die Errichtung einer Agri-PV-Anlage haben wird, sind umfassende wissenschaftliche Untersuchungen nötig. Hierbei muss vor allem eine breite Datengrundlage hinsichtlich der Frage erzeugt werden, wie sich Verschattung und gegebenenfalls weitere klimatische Veränderungen, wie veränderte Temperaturen, unter beziehungsweise zwischen den Modulen oder ein veränderter Zugang zu Niederschlägen auf verschiedene Kulturen auswirken. Auf Grundlage dieser Ergebnisse können dann Empfehlungen ausgesprochen werden, welche Konstellationen aus Standorten, Anlagendesigns und Kulturen sich am besten eignen und verwendet werden sollten.

8.1.4 Ökonomische Modellbewertungen

Bislang gestalten sich ökonomische Bewertungen sehr schwierig, da einerseits verlässliche Daten fehlen und andererseits rechtliche Rahmenbedingungen nicht abschließend geklärt sind. Um für Landwirte und Projektierer eine sichere Planung von Agri-PV-Anlagen zu gewährleisten, müssen also zunächst rechtliche Unsicherheiten aus dem Weg geräumt werden. Bestehende Agri-PV-Anlagen sind meist Einzellösungen und mit gesondert angefertigten Komponenten errichtet. Dies lässt eine Übertragung der Kostenstruktur auf standardisierte Anlagentypen kaum zu. Um die Rentabilität von Agri-PV-Anlagen zu kalkulieren, sind Modellrechnungen nötig, damit Unternehmern, Privatleuten und Investoren die wirtschaftlichen Chancen und Risiken dargelegt werden können.

8.1.5 Demonstrationsprojekte mit wissenschaftlicher Begleitung

Es gibt bereits erste Agri-PV-Projekte, die unter den derzeitigen rechtlichen Rahmenbedingungen wirtschaftlich realisiert werden konnten. Diese Projekte werden jedoch bislang nicht wissenschaftlich begleitet. Für Landwirte ist es zwar durchaus interessant zu wissen, wie sich Anbaukulturen in verschiedenen Anlagendesigns verhalten, die landwirtschaftlichen Deckungsbeiträge machen aber bei klassischer Bewirtschaftung nur einen Bruchteil der Stromerlöse aus, weshalb sie in der wirtschaftlichen Gesamtbetrachtung zu vernachlässigen sind. Zusätzlich bedeuten wissenschaftliche Untersuchungen auf den Anbauflächen sowie Untersuchungen der Erträge einen enormen Mehraufwand für Landwirte. Dieser Mehraufwand kann im Zweifelsfall dazu führen, dass das Gesamtkonzept einer Anlage unwirtschaftlich wird. Um also eine möglichst breite Datenbasis zu erzeugen und Landwirte dabei zu unterstützen, wissenschaftliche Untersuchungen innerhalb neu errichteter oder bereits bestehender Agri-PV-Anlagen durchzuführen, kann ein Förderprogramm die geeignete Unterstützung bieten. Ein derartiges Programm kann den finanziellen Mehraufwand vergüten und so einen Anreiz schaffen, Agri-PV-Projekte wissenschaftlich begleiten zu lassen.

Demonstrationsanlagen sind aber nicht nur als wissenschaftliche Versuchsanlagen von Bedeutung. Sie können auch aufzeigen, wie Auswirkungen auf Landschaftsbild und landwirtschaftliche Bearbeitung minimiert werden können. Die Akzeptanz erneuerbarer Energien leidet häufig unter der Fehlplanung einzelner Projekte [13]. Wenn PV-Anlagen beispielsweise weithin sichtbar errichtet werden, stört dies das Landschaftsbild. Um Projektierer bei der Planung von PV-FFA zu unterstützen, haben in den vergangenen Jahren Ministerien und Produzenten Leitfäden verfasst. Diese beschreiben unter anderem, wie Anlagen besonders gut ins Landschaftsbild integriert werden können. Gut geplante Demonstrationsanlagen können zusätzlich helfen, die richtige Errichtung zu veranschaulichen.

8.2 Politische Handlungsempfehlungen

8.2.1 Ausgleichsflächen

Bei Agri-PV-Anlagen können aufgrund des Platzbedarfs für die Aufständigung der Modulreihen lediglich acht [61] bis fünfzehn Prozent [54] der gesamten Anlagenfläche nicht weiter landwirtschaftlich verwendet werden. Für die Aufständigung und die Fundamente wird dabei nur ca. ein Prozent der Fläche tatsächlich verbaut, also versiegelt [61]. Da aber Sicherheitsabstände freigelassen werden müssen und eine landwirtschaftliche Nutzung der Bereiche zwischen der Aufständigung zu aufwendig wäre, erhöht sich dieser Wert je nach Anlagendesign um sieben bis vierzehn Prozentpunkte. Aus diesem Grund stellt auch nur dieser Anteil eine Versiegelung der Fläche, für die ein Ausgleich geschaffen werden müsste, dar. Schon heute wird für aktuelle Projekte ein Faktor von 0,1 und damit der derzeit geringste mögliche Faktor für Ausgleichsmaßnahmen angesetzt. Da Agri-PV-Anlagen bei optimaler Planung und Umsetzung die Landwirtschaft unterstützen können und darüber hinaus ein Großteil der landwirtschaftlichen Nutzfläche erhalten bleibt, sollte in Zukunft ein Faktor von weniger als 0,1 möglich sein. Die genaue Bewertung sollte aber immer anlagenspezifisch stattfinden und sich daran orientieren, wie groß der Anteil der nicht mehr landwirtschaftlich nutzbaren Fläche und der Eingriff ins Landschaftsbild sind und welche (negativen) Einflüsse auf die Umwelt von der Anlage ausgehen.

8.2.2 EU-Agrarförderung

Die EU-Agrarförderungen, die in Deutschland durch die Direktzahlungen-Durchführungsverordnung geregelt sind, werden bislang nicht für PV-Flächen bezahlt, da PV-FFA nicht als landwirtschaftlich genutzte Flächen gelten und deshalb keine Subventionen vom Landwirt beantragt werden können. Im Gegensatz zu dieser rechtlichen Auslegung steht ein Gerichtsurteil, das bereits in Abschnitt 6.2.2 behandelt wurde. Hier wurden einem Landwirt Zahlungen nach der DirektZahlDurchfV gerichtlich zugesprochen, da er die Fläche einer PV-Anlage auch weiterhin zur Beweidung durch Schafe nutzte. Ist nun aber aufgrund des PV-Anlagendesigns eine landwirtschaftliche Nutzung nach wie vor möglich, sollten für die Fläche auch die bestehenden Förderkriterien gelten. Ähnlich dürfte es sich also bei Agri-PV-Anlagen verhalten. Um rechtliche Unsicherheiten seitens der Landwirte zu beseitigen, sollte hier eine klare und verlässliche Regelung getroffen werden.

8.2.3 Weiterführung und Anpassung der Ausschreibungen

Im neuen EEG 2021 wurde erstmals eine eigene Ausschreibungskategorie für besondere Solaranlagen beschlossen. Zu diesen werden neben Agri-PV auch Floating-PV und Carport-PV gezählt. Das Gesetz sieht vor, dass zunächst probeweise im Jahr 2022 50 MW innerhalb des Ausschreibungsvolumens für innovative Anlagenkonzepte für besondere Solaranlagen ausgeschrieben werden sollen. Dies ist ein richtiger Schritt. Jedoch werden bei einer gemeinsamen Ausschreibung mit den beiden anderen genannten Kategorien Agri-PV-Projekte tendenziell zu teuer sein, um einen Zuschlag zu erhalten. Vor allem Floating-PV-Anlagen sollten deutlich niedrigere Anschaffungs- und Betriebskosten haben.

Aufgrund der Chancen, die Agri-PV für bestimmte landwirtschaftliche Situationen bietet, sollte sie weiterhin zusätzlich gefördert werden. Eine Weiterführung dieser Ausschreibung in angepasster Form ist also ratsam. Künftig könnte es für die einzelnen Unterkategorien der besonderen Solaranlagen gesonderte Ausschreibungen geben.

8.2.4 Bürgerbeteiligung und Kommunikation

Um für eine gute Akzeptanz in der Bevölkerung zu sorgen oder diese zu verbessern, sind eine offene Kommunikation und eine möglichst hohe Bürgerbeteiligung nötig. Tendenziell werden Projekte positiver aufgenommen, wenn es zu einer lokalen Wertschöpfung kommt. Bürger sollten also beispielsweise die Möglichkeit haben, sich an lokalen Projekten zu beteiligen. Auch die umfassende Information der Bürger über die Chancen, Vor- und Nachteile derartiger Energiesysteme muss gewährleistet werden. Informationen könnten beispielsweise in Form von (Online-)Seminaren und Flyern durch das TFZ an Bürger und interessierte Landwirte vermittelt werden.

8.2.5 Öffnung der Flächenkulisse

Die Flächenkulisse des EEG lässt eine Förderung von Freiflächenanlagen bislang nur dann zu, wenn sie entweder auf Konversionsflächen oder 200 Meter breiten Streifen entlang von Autobahnen und Schienenwegen installiert werden, wenn innerhalb dieser Entfernung ein 15 Meter breiter Streifen längs zur Fahrbahn freigehalten wird. Zusätzlich ermöglicht die bayerische Flächenverordnung, dass auch im sogenannten benachteiligten Gebiet Projekte bis zu einer Anlagengröße von 20 MW_p einen Förderanspruch haben. Diese recht restriktiven Regelungen wurden hauptsächlich erlassen, um die Anzahl besonders großer Projekte nicht weiter zu steigern und außerdem PV-FFA von wertvollen landwirtschaftlichen Flächen fernzuhalten und die landwirtschaftliche Nutzung dieser Flächen somit zu erhalten [40]. Sollte diese Flächenkulisse auch weiterhin für Agri-PV gelten, so stünde sie in direkter Konkurrenz zu konventionellen PV-FFA. In rein wirtschaftlicher Betrachtung erscheint bei diesem Vergleich die Wahl einer PV-FFA als vorteilhaft, da für konventionelle PV-FFA die Investitionskosten geringer sind, gleichzeitig mehr Leistung pro Fläche installiert werden kann und somit eine höhere Rentabilität vorhanden ist. Das heißt, die Stromerlöse sind bei niedrigeren Investitionskosten höher. Da die Agri-PV jedoch Stromproduktion und landwirtschaftliche Nutzung auf einer Fläche vereint, sollten Agri-PV-Anlagen künftig auch außerhalb der starren Flächenkulisse für PV-FFA realisiert werden können. Eine Öffnung der Flächenkulisse des EEG ausschließlich für Agri-PV ist deshalb wünschenswert.

Quellenverzeichnis

- [1] ADEH, E. H.; GOOD, S. P.; CALAF, M.; HIGGINS, C. W. (2019): Solar PV Power Potential is Greatest Over Croplands. *Scientific Reports*, Bd. 9, Nr. 1, S. 11442
- [2] AGENTUR FÜR ERNEUERBARE ENERGIEN E. V. (2021): Zustimmung für den Ausbau der Erneuerbaren Energien bleibt hoch. Berlin. URL: <https://www.unendlich-viel-energie.de/themen/akzeptanz-erneuerbarer/akzeptanz-umfrage/zustimmung-fuer-den-ausbau-der-erneuerbaren-energien-bleibt-hoch> (Stand: 05.02.2021)
- [3] ANDEREGG, D.; STREBEL, S.; ROHRER, J. (2020): Photovoltaik Versuchsanlage Davos Totalp. Messergebnisse Sommerhalbjahr 2019. Überarb. Version vom 20.05.2020. ZHAW Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften; IUNR Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen; Forschungsgruppe Erneuerbare Energien. Wädenswil, 33 Seiten
- [4] BALLESTER, J.; RODÓ, X.; GIORGI, F. (2010): Future changes in Central Europe heat waves expected to mostly follow summer mean warming. *Climate Dynamics*, Bd. 35, Nr. 7–8, S. 1191–1205
- [5] BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (LFL); INSTITUT FÜR AGRARÖKONOMIE (2021): LfL-Deckungsbeiträge und Kalkulationsdaten – Winterweizen – A. Grundlegende Angaben – Übersicht. München: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), 1 Seite
- [6] BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (LFL); INSTITUT FÜR AGRARÖKONOMIE (2021): LfL-Deckungsbeiträge und Kalkulationsdaten – Speisekartoffeln. Grundlegende Angaben – Übersicht. Ausdruck vom 03.02.2021. München: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), 1 Seite
- [7] BAYERISCHER BAUERNVERBAND (BBV) (2020): PV-Freiflächenanlagen mit Maß und Rahmenbedingungen ausbauen. Stellungnahme der Präsidentenkonferenz zum Evaluationsbericht zur 2. Verordnung über Gebote für Freiflächenanlagen sowie dem Entwurf einer 3. Verordnung. 22. Mai 2020. München: Bayerischer Bauernverband (BBV), 3 Seiten
- [8] BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (StMELF) (2018): Bayerisches Hilfsprogramm Grundfutterzukauf Dürre 2018. Merkblatt. Stand: 09/2018. München: Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (StMELF), 3 Seiten
- [9] BAYERISCHES VERWALTUNGSGERICHT REGENSBURG (2018): Gewährung der beantragten Zuweisung von Zahlungsansprüchen, der Zahlung der Basisprämie durch Aktivierung der Zahlungsansprüche (Greeningprämie), sowie die Umverteilungsprämie für aktivierte Zahlungsansprüche im Jahr 2015 für die vom Kläger landwirtschaftlich genutzte Flächen eines Solarparks. Urteil vom 15. November 2018, Aktenzeichen: RO 5 K 17.1331, 21 Seiten
- [10] BAYWA AG (2020): Agri Insight 2020: Keine Energiewende ohne Landwirte. Präsentation Pressegespräch vom 11.09.2020 – Thema: Agri-Photovoltaik (Agri-PV). München, 10 Seiten (Stand: 10.02.2021)
- [11] BELLINI, E. (2020): Giant agrivoltaic project in China. URL: <https://www.pv-magazine.com/2020/09/03/giant-agrivoltaic-project-in-china/> (Stand: 19.11.2020), 2 Seiten

- [12] BELLINI, E. (2020): Spezielle Module für Agro-Photovoltaik. URL: <https://www.pv-magazine.de/2020/07/23/spezielle-module-fuer-agro-photovoltaik/> (Stand: 19.11.2020), 5 Seiten
- [13] BRANDL, T. (2014): Töging – Abbau der Photovoltaik-Anlage an der A 94 hat begonnen. Passauer Neue Presse, Website. Letzte Aktualisierung: 29.07.2014. Passau. URL: <https://www.pnp.de/lokales/landkreis-altoetting/neuoetting-toeing/Abbau-der-Photovoltaik-Anlage-an-der-A-94-hat-begonnen-1379291.html> (Stand 18.02.2021), 1 Seite
- [14] BUNDESNETZAGENTUR (2020): Statistiken Solar-Anlagen – Ausschreibungen 2020 – Ergebnisse der Ausschreibungsrunden für Solar-Anlagen 2020. Beendete Ausschreibungen. URL: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/Ausschreibungen/Solaranlagen/BeendeteAusschreibungen/BeendeteAusschreibungen_node.html (Stand: 09.02.2021), 4 Seiten
- [15] BUNDES RAT, WIRTSCHAFTSSAUSSCHUSS; BUNDES RAT, AUSSCHUSS FÜR AGRARPOLITIK UND VERBRAUCHERSCHUTZ; BUNDES RAT, AUSSCHUSS FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND NUKLEARE SICHERHEIT (2020): Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften. Empfehlungen der Ausschüsse zu Punkt 33 der 995. Sitzung des Bundesrates am 6. November 2020. 28.10.20 (Wi – AV – U). Berlin, Bundesrat-Drucksache, 569/1/20, 113 Seiten
- [16] BUNDES VERWALTUNGSGERICHT (2019): Beihilfefähigkeit eines Maislabyrinths. Urteil vom 4. Juli 2019, Aktenzeichen: BVerwG 3 C 11.17 – OVG 10 LB 81/16 – VG 2 A 70/16, 14 Seiten
- [17] COMMONWEALTH OF MASSACHUSETTS, EXECUTIVE OFFICE OF ENERGY AND ENVIRONMENTAL AFFAIRS, DEPARTMENT OF ENERGY RESOURCES, DEPARTMENT OF AGRICULTURAL RESOURCES (2018): Solar Massachusetts Renewable Target Program (225 CMR 20.00). Guideline Regarding the Definition of Agricultural Solar Tariff Generation Units. Effective Date: April 26, 2018. Boston, 4 Seiten
- [18] DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR SONNENENERGIE E. V. (DGS) (Hrsg.) (2016): Photovoltaik. PV und Wirtschaftlichkeit, EE-Strom-Direktverbrauch, Wafer versus Dünnschicht, PV und Stromspeicher. Der solare CO₂-Fußabdruck. Sonnenenergie (1, Februar–März). Berlin, Heusenstamm: Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e. V. (DGS), 76 Seiten
- [19] DEUTSCHER BUNDESTAG (2020): Gesetz zur Änderung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften. EEG 2021, in der Fassung vom 21. Dezember 2020. Bundesgesetzblatt, Teil I, Bd. 71, Nr. 65, vom 28.12.2020, S. 3138–3205
- [20] DEUTSCHER WETTERDIENST (DWD): Globalstrahlung in der Bundesrepublik Deutschland. Mittlere Jahressummen, Zeitraum 1981–2010. URL: https://www.dwd.de/DE/leistungen/solarenergie/lstrahlungskarten_mi.html (Stand: 02.02.2021)
- [21] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2020): DIN SPEC 91434. Agri-Photovoltaik-Anlagen – Anforderungen an die landwirtschaftliche Hauptnutzung. Mai 2021. Berlin: Beuth, 26 Seiten

- [22] ELSHURAF, A. M.; FARAG, H. M.; HOBBS, D. A. (2019): Blind spots in energy transition policy. Case studies from Germany and USA. Energy Reports, Bd. 5, S. 20–28
- [23] ENKHARDT, S. (2020): Bundesrat fordert eigene Ausschreibungen für schwimmende und Agro-Photovoltaik-Anlagen im EEG. URL: <https://www.pv-magazine.de/2020/10/28/bundesrat-fordert-eigene-ausschreibungen-fuer-schwimmende-und-agro-photo-voltaik-anlagen-im-eeeg/> (Stand: 19.11.2020)
- [24] ENKHARDT, S. (2020): EEG-Entwurf: Bundesregierung lässt Bundesrat abblitzen – Werteunion fordert Einfrieren des EEG. URL: <https://www.pv-magazine.de/2020/11/12/eeg-entwurf-bundesregierung-laesst-bundesrat-abblitzen-werteunion-fordert-einfrieren-des-eeeg/> (Stand: 19.11.2020)
- [25] FRAUNHOFER INSTITUT FÜR SOLARE STRAHLUNGSENERGIE (ISE) (2020): Newsletter Agri-Photovoltaik. URL: <https://newsletter.fraunhofer.de/-viewonline2/17114/921/317/HysPtsWr/Tw6OJ66xiR/1> (Stand: 29.01.2021)
- [26] FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SOLARE ENERGIESYSTEME (ISE) (12.04.2019): Agrophotovoltaik: hohe Ernteerträge im Hitzesommer. Presseinformation. Freiburg, 4 Seiten
- [27] FRITSCH, U. R.; BERND, G.; COWIE, A. L.; DALE, V. H.; KLINE, K. L.; JOHNSON, F. X.; LANGEVELD, H.; SHARMA, N.; WATSON, H.; WOODS, J. (2017): Energy and land use. Global Land Outlook. Working Paper September 2017. Hrsg. v. M. Peters-Fawcett. International Renewable Energy Agency (IRENA); United Nations, Convention to Combat Desertification. Masdar City, Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency (IRENA); United Nations, Convention to Combat Desertification, 59 Seiten
- [28] GEMEINDE SINZING (2019): Vorhabenbezogener Bebauungsplan mit integriertem Grünordnungsplan – Nr. 73. Sondergebiet Sonnenenergienutzung „Sinzing – Osterberg“, Teil A: Planzeichnung (Lageplan) mit Festsetzungen, Hinweisen und nachrichtlichen Übernahmen (zeichnerisch), Verfahrensvermerken; Teil B: Textliche Festsetzungen; Teil C: Hinweise und Empfehlungen (textlich); Teil D: Begründung mit Umweltbericht; Anlagen: SolPEG Blendgutachten, Solarpark Sinzing Analyse d. potentiellen Blendwirkung einer geplanten PV Anlage in d. Nähe von Sinzing in der Oberpfalz (Bayern), Stand: 03.07.2019; Projektbeschreibung des Vorhabenträgers; Zusammenfassende Erklärung gem. § 10a sowie § 6a BauGB zur Öffentlichkeits- und Behördenbeteiligung. Fassung vom 16.10.2019. Unter Mitarbeit von P. GROSSMANN. Gemeinde Sinzing (Hrsg.), Sinzing, 86 Seiten
- [29] GOETZBERGER, A.; TASTROW, A. (1981): Kartoffeln unter dem Kollektor. Neuer Vorschlag der Fraunhofer-Gesellschaft. Sonnenenergie, Bd. 6, Nr. 3, S. 19–22
- [30] HÄSELI, A. (2017): Wirtschaftlicher Beerenanbau dank neuen Anbaumethoden. Bio aktuell: das Magazin der Biobewegung, Bd. 26, Nr. 5, S. 20–21
- [31] HIDDEMANN, D.; PAUL, N. (2018): Nachwachsende Rohstoffe. Natürliche Alternativen. Stand: August 2018. 1. Aufl. Hrsg. v. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR). Gülzow-Prüzen. URL: https://fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/Web_FNR_Nachwachsende_Rohstoffe.pdf (Stand: 01.02.2021)
- [32] HILDEBRANDT, H. (2020): Anlagendaten vertikaler Agri-PV Anlagen an Empfänger: J. Scharf. Regensburg, 04.12.2020

- [33] JÄGER-WALDAU, A. (2019): PV Status Report 2019. European Commission, Joint Research Centre (Hrsg.). Luxembourg: Publications Office of the European Union. JRC Science for Policy Report, Nr. JRC118058 – EUR 29938 EN, 85 Seiten, ISBN 978-92-76-12608-9, ISSN 1831-9424
- [34] LASTA, C.; KONRAD, G. (2018): Agro-Photovoltaik. Agrophotovoltaik: Doppelnutzung von Böden bei Flächenfraß als Gebot der Stunde. In: TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ, INSTITUT FÜR ELEKTRIZITÄTSWIRTSCHAFT UND ENERGIEINNOVATION (Hrsg.): *EnInnov2018. Neue Energie für unser bewegtes Europa. Kurzfassungen. 15. Symposium Energieinnovation*, Graz, 14.02.–16.02. Graz: Verlag der Technische Universität Graz, S. 249–250, ISBN 978-3-85125-586-7
- [35] L'EPINE, M.; SERVICE DE LA DONNEE ET DES ETUDES STATISTIQUES; COMMISSARIAT AU DEVELOPPEMENT DURABLE; MINISTRY FOR THE ECOLOGICAL AND INCLUSIVE TRANSITION; COMMISSION DE REGULATION DE L'ENERGIE; ENEDIS OPEN DATA (2020): National Survey Report of PV Power Applications in France 2018. Prepared for French Environment and Energy Management Agency (ADEME). Contract n° 18MAR000316. (Mitarb.) Kaaijk, P.; Mehl, C.; Carrere, T. Lyon: Association Hespul; Photovoltaic Power Systems – Technology Collaboration Programme (PVPS); International Energy Agency (IEA), Task 1 Strategic Analysis and Outreach, 37 Seiten
- [36] LICHNER, C. (2017): Agro-Photovoltaik: Ein falscher Name kann viel kaputt machen. URL: <https://www.pv-magazine.de/2017/10/23/agro-photovoltaik-ein-falscher-name-kann-viel-kaputt-machen/> (Stand: 19.11.2020)
- [37] LOHMANN, D. (2018): Wasserversorgung in Gefahr. Durch den Klimawandel ist es in Bayern trocken wie nie – drohen künftig Bewässerungsverbote? Bayerische Staatszeitung, Online, Landtag, Website vom 25.05.2018. Verlag Bayerische Staatszeitung GmbH. München. URL: <https://www.bayerische-staatszeitung.de/staatszeitung/landtag/detailansicht-landtag/artikel/wasserversorgung-in-gefahr.html#topPosition> (Stand: 26.01.2021)
- [38] MARROU, H.; DUFOUR, L.; WERY, J. (2013): How does a shelter of solar panels influence water flows in a soil-crop system? *European Journal of Agronomy*, Bd. 50, Nr. 10 (October), S. 38–51
- [39] MEAD, R.; WILLEY, R. W. (1980): The Concept of a 'Land Equivalent Ratio' and Advantages in Yields from Intercropping. *Experimental Agriculture*, Bd. 16, Nr. 3, S. 217–228
- [40] MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT BADEN-WÜRTTEMBERG (2019): Freiflächensolaranlagen. Handlungsleitfaden. Stand: September 2019. 1. Aufl. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (Hrsg.). (Mitarb.) Carius, R.; Hess, S.; Kelm, T.; Keßler, A.; Jörß, T.; Lorinser, B.; Maass, I.; Maaß, C.; Miedaner, O.; Pauschinger, T.; Pöter, F.; Tschamber, C.; Walter, D.; Wolny, E. Stuttgart: Solarcluster Baden-Württemberg e. V.; Arbeitskreis Handlungsleitfaden Freiflächensolaranlagen, 80 Seiten
- [41] MOVELLAN, J. (2013): Japan Next-Generation Farmers Cultivate Crops and Solar Energy – Renewable Energy World. URL: <https://www.renewableenergyworld.com/2013/10/10/japan-next-generation-farmers-cultivate-agriculture-and-solar-energy/#gref> (Stand: 19.11.2020)

- [42] MUNTWYLER, U.; SCHOTT, T.; KUONEN, F.; LANZ, M.; SCHÜPBACH, E. (2019): PV and Snow: Maximierung des Winterstromes bei PV-Anlagen. Burgdorf, Schweiz: Berner Fachhochschule BFH, Institut für Energie und Mobilität, Photovoltaik Labor (PV LAB), 7 Seiten
- [43] NEUMANN, H. (2019): Energiewende. Solar toppt Wind. URL: <https://www.topagrar.com/energie/news/solar-toppt-wind-11593485.html> (Stand: 13.01.2021)
- [44] PETROVA, V. (2020): France gives nod to 1.7 GW of wind, solar projects. URL: <https://renewablesnow.com/news/france-gives-nod-to-17-gw-of-wind-solar-projects-693435/> (Stand: 19.11.2020)
- [45] ROLLET, C. (2020): A good year for solar: Agrivoltaics in vineyards. URL: <https://www.pv-magazine.com/2020/03/31/a-good-year-for-solar-agrivoltaics-in-vineyards/> (Stand: 19.11.2020)
- [46] RÖPKE, L.; LIPPELT, J. (2014): Kurz zum Klima: Bodenversiegelung in Deutschland und EUROPA. Ifo-Schnelldienst, Bd. 67, Nr. 3, S. 60–63
- [47] RÖSCH, C. (2016): Agrophotovoltaik – die Energiewende in der Landwirtschaft. GAIA – Ecological Perspectives for Science and Society, Bd. 25, Nr. 4, S. 242–246
- [48] RÖSCH, C.; KETZER, D.; WEINBERGER, N. (2019): APV-RESOLA – Technologieentwicklung mit Bürger- und Stakeholderbeteiligung. In: FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SOLARE ENERGIESYSTEME (ISE) (Hrsg.): APV-RESOLA – Agrophotovoltaik – Ressourceneffiziente Landnutzung. Agenda. Abschlusskonferenz. Kalkscheune, Berlin, 6. Mai. Freiburg: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE), S. 1–14
- [49] SALEL, D.; DELPIT, F.; SERVICE DE LA DONNEE ET DES ETUDES STATISTIQUES; COMMISSARIAT AU DEVELOPPEMENT DURABLE; MINISTRY FOR THE ECOLOGICAL AND INCLUSIVE TRANSITION; COMMISSION DE REGULATION DE L'ENERGIE; ENEDIS OPEN DATA (2020): National Survey Report of PV Power Applications in France 2019 – IEA Photovoltaic Power Systems Programme (IEA PVPS), IEA Technology Collaboration Programme. Prepared for French Environment and Energy Management Agency (ADEME). Contract n° 19MAR001227. (Mitarb.) Kaaijk, P. Lyon: Association Hespul, International Energy Agency (IEA), Task 1 (Strategic Analysis and Outreach), 39 Seiten
- [50] SANTRA, P.; SINGH, R. K.; MEENA, H. M.; KUMAWAT, R. N.; MISHRA, D.; JAIN, D.; YADAV, O. P. (2018): Agri-voltaic system: crop production and photovoltaic-based electricity generation from a single land unit. Indian Farming, Bd. 68, Nr. 1 (January), S. 20–23
- [51] SARKIN, A. S.; EKREN, N.; SAĞLAM, Ş. (2020): A review of anti-reflection and self-cleaning coatings on photovoltaic panels. Solar Energy, Bd. 199, S. 63–73
- [52] SCHARF, J. (2020): Besichtigung der Agri-PV Anlage Donaueschingen-Aasen. Interview mit H. Hildebrandt. Donaueschingen (Stand: 09.09.2020)
- [53] SCHARF, J. (2020): Gesellschaftliche Fragen Agri-PV. Interview mit C. Garnhartner. Straubing (Stand: 11.11.2020)
- [54] SCHARF, J. (2020): Nachgeführte Agri-PV Anlage in Althegegnenberg. Interview mit T. Rebitzer. Regensburg (Stand: 03.12.2020)
- [55] SCHARF, J. (2020): Wirtschaftlichkeit von Agri-PV Anlagen. Interview mit U. Bodmer. Regensburg/Freising (Stand: 10.11.2020)

- [56] SCHARF, J. (2021): Wirtschaftlichkeit von Agri-PV-Anlagen. Interview mit M. Strobl. Regensburg (Stand: 12.01.2021)
- [57] SCHINDELE, S. (2020): Agri-Photovoltaik (Agri-PV). Synergien zweier Sektoren nutzen: Landwirtschaft und Energie von einer Fläche. In: BAYERISCHER BAUERNVERBAND (BBV) (HRSG.): 50. Woche der Erzeuger und Vermarkter – digital. Web-Seminar, 23.–27. November. München: Bayerischer Bauernverband (BBV), S. 1–24
- [58] SCHINDELE, S.; TROMMSDORFF, M.; SCHLAAK, A.; OBERGFELL, T.; BOPP, G.; REISE, C. ET AL. (2020): Implementation of agrophotovoltaics. Techno-economic analysis of the price-performance ratio and its policy implications. Applied Energy, Bd. 265, Nr. 114737, S. 1–19
- [59] SEKIYAMA, T.; NAGASHIMA, A. (2019): Solar Sharing for Both Food and Clean Energy Production. Performance of Agrivoltaic Systems for Corn, A Typical Shade-Intolerant Crop. Environments, Bd. 6, Nr. 6, S. 65–79
- [60] TROMMSDORFF, M. (2020): APV-RESOLA – Agrophotovoltaik – Ein Beitrag zur ressourceneffizienten Landnutzung. Projektinformation. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE). Freiburg. URL: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/apv-resola.html> (Stand: 19.12.2020)
- [61] TROMMSDORFF, M.; GRUBER, S.; KEINATH, T.; HOPF, M.; HERMANN, C.; SCHÖNBERGER, F.; HÖGY, P.; ZIKELI, S.; EHMANN, A.; WESELEK, A.; BODMER, U.; RÖSCH, C.; KETZER, D.; WEINBERGER, N.; SCHINDELE, S.; VOLLPRECHT, J. (2020): Agri-Photovoltaik: Chance für Landwirtschaft und Energiewende. Ein Leitfaden für Deutschland. Oktober 2020. 1. Aufl. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) (Hrsg.). Freiburg, 56 Seiten
- [62] UMWELTBUNDESAMT (UBA) (2020): RESCUE – Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität. Rohstoffkonsum verursacht Treibhausgase – aber auch klimafreundliche Techniken benötigen Rohstoffe. 14.10.2020. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/szenarien-konzepte-fuer-die-klimaschutz/rescue-wege-in-eine-ressourcenschonen-de#Ergebnisse> (Stand: 20.11.2020)
- [63] UMWELTBUNDESAMT (UBA) (2020): Siedlungs- und Verkehrsfläche. 19.06.2020. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/flaeche-boden-land-oekosysteme/flaeche/siedlungs-verkehrsflaeche> (Stand: 20.11.2020)
- [64] VARTIAINEN, E.; MASSON, G.; BREYER, C. (2015): PV LCOE in Europe 2014-30. Final Report 23 June 2015. European PV Technology Platform Steering Committee, PV LCOE Working Group (Hrsg.). (Mitarb.) Agostinelli, G.; Alet, J.-P.; Dimmler, B.; Glunz, S.; Perezagua, E.; Sinke, W.; Vandesande, J.; Wohlfahrt, P.; Arrowsmith, G.; Jäger-Waldau, A.; Bonemazzi, F.; Chiantore, P. V.; Ferrazza, F.; Francia, G. d.; Mints, P.; Moser, D.; Park, J. E.; Philipps, S.; Protogeropoulos, C.; Medina, E. R.; Simonot, E.; Zdanowicz, T. München: Secretariat of the European Photovoltaik Technology Platform, 15 Seiten
- [65] WIRTH, H. (2020): Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Stand: Fassung vom 25.11.2020. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) (Hrsg.). Freiburg, 99 Seiten

-
- [66] WOHLFAHRT, D. (2010): Mit Nachführsystemen zu höheren Photovoltaik-Erträgen. Einachsige Tracker überzeugen durch geringen Wartungsaufwand. Fach.Journal – Fachzeitschrift für Erneuerbare Energien & Technische Gebäudeausrüstung, Bd. 13, Nr. 1, S. 52–57
- [67] WU, Z.; HOU, A.; CHANG, C.; HUANG, X.; SHI, D.; WANG, Z. (2014): Environmental impacts of large-scale CSP plants in north western China. Processes & impacts, Bd. 16, Nr. 10, S. 2432–2441

Berichte aus dem TFZ

Bisher erschienene Ausgaben der Schriftenreihe des Technologie- und Förderzentrums:

- 1 Qualitätssicherung bei der dezentralen Pflanzenölerzeugung für den Nicht-Nahrungsbereich – Projektphase 1: Erhebung der Ölqualität und Umfrage in der Praxis
- 2 Erprobung der Brennwerttechnik bei häuslichen Holzhackschnitzelheizungen mit Sekundärwärmetauscher
- 3 Daten und Fakten zur dezentralen Ölgewinnung in Deutschland
- 4 Untersuchungen zum Feinstaubausstoß von Holzzentralheizungsanlagen kleiner Leistung
- 5 Qualität von kaltgepresstem Rapsöl als Speiseöl und Festlegung eines Qualitätsstandards
- 6 Entwicklung einer Prüfmethode zur Bestimmung der Cetanzahl von Rapsölkraftstoff
- 7 Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Rapsöl als Kraftstoff und dem Motorenöl in pflanzenöлтаuglichen Motoren
- 8 Wärmegewinnung aus Biomasse – Begleitmaterialien zur Informationsveranstaltung
- 9 Maize as Energy Crop for Combustion – Agricultural Optimisation of Fuel Supply
- 10 Staubemissionen aus Holzfeuerungen – Einflussfaktoren und Bestimmungsmethoden
- 11 Rationelle Scheitholzbereitstellungsverfahren
- 12 Qualitätssicherung bei der dezentralen Pflanzenölerzeugung für den Nicht-Nahrungsbereich – Technologische Untersuchungen und Erarbeitung von Qualitätssicherungsmaßnahmen
- 13 Getreidekörner als Brennstoff für Kleinfeuerungen – Technische Möglichkeiten und Umwelteffekte
- 14 Mutagenität der Partikelemissionen eines mit Rapsöl- und Dieselmotoren betriebenen Traktors
- 15 Befragung von Betreibern dezentraler Ölsaatenverarbeitungsanlagen
- 16 Schnellbestimmung des Wassergehalts im Holzsplit
- 17 Untersuchungen zum Einsatz rapsölbetriebener Traktoren beim Lehr-, Versuchs- und Fachzentrum für Ökologischen Landbau und Tierhaltung Kringell
- 18 Miscanthus als nachwachsender Rohstoff – Ergebnisse als bayerischen Forschungsarbeiten
- 19 Miscanthus: Anbau und Nutzung – Informationen für die Praxis

- 20 Prüfung der Eignung von Verfahren zur Reduktion ablagerungs- und aschebildender Elemente in Rapsölkraftstoff bei der dezentralen Erzeugung
- 21 Kleine Biomassefeuerungen – Markt Betrachtungen, Betriebsdaten, Kosten und Wirtschaftlichkeit
- 22 Partikelemissionen aus Kleinfeuerungen für Holz und Ansätze für Minderungsmaßnahmen
- 23 Bewertung kostengünstiger Staubabscheider für Einzelfeuerstätten und Zentralheizungskessel
- 24 Charakterisierung von Holzbriketts
- 25 Additivierung von Rapsölkraftstoff – Auswahl der Additive und Überprüfung der Wirksamkeit
- 26 Status quo der dezentralen Ölgewinnung – bundesweite Befragung
- 27 Entwicklung einer Siloabdeckung aus nachwachsenden Rohstoffen
- 28 Sorghumhirse als nachwachsender Rohstoff – Sortenscreening und Anbauszenarien
- 29 Sorghum als Energiepflanze – Optimierung der Produktionstechnik
- 30 Ethanol aus Zuckerhirse – Gesamtkonzept zur nachhaltigen Nutzung von Zuckerhirse als Rohstoff für die Ethanolherstellung
- 31 Langzeiterfahrungen zum Einsatz von Rapsölkraftstoff in Traktoren der Abgasstufen I und II
- 32 Pflanzenöлтаugliche Traktoren der Abgasstufe IIIA – Prüfstandsuntersuchungen und Feldeinsatz auf Betrieben der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft
- 33 Betriebs- und Emissionsverhalten eines pflanzenöлтаuglichen Traktors mit Rapsöl, Sojaöl und Sonnenblumenöl
- 34 Dezentrale Ölsaatenverarbeitung 2012/2013 – eine bundesweite Befragung
- 35 Additivierung von Rapsölkraftstoff – Projektphase 2: Langzeit- und Prüfstandsuntersuchungen
- 36 Nutzer- und Brennstoffeinflüsse auf Feinstaubemissionen aus Kleinfeuerungsanlagen
- 37 Screening und Selektion von Amarantsorten und -linien als spurenelementreiches Biogassubstrat
- 38 Untersuchung der Praxistauglichkeit eines Elektrofilters für Kleinfeuerungsanlagen
- 39 Eignung von Buchweizen und Quinoa als späte Zweitfrüchte für die Biogasnutzung
- 40 Optimale Bereitstellungsverfahren für Holzhackschnitzel
- 41 Qualitätssicherung bei der dezentralen Herstellung von Rapsölkraftstoff nach DIN 51605

- 42 Weiterentwicklung einer Siloabdeckung auf Basis Nachwachsender Rohstoffe
- 43 Brennstoffqualität von Holzpellets
- 44 Herstellung und Demonstration der Praxistauglichkeit von Traktoren mit Motoren der Abgasstufe IV im Betrieb mit Pflanzenöl
- 45 ExpRessBio – Methoden
- 46 Qualität von Holz hackschnitzeln in Bayern
- 47 Pflanzenöлтаugliche Traktoren der Abgasstufen I bis IIIB
- 48 Sorghum als Biogassubstrat – Präzisierung der Anbauempfehlungen für bayerische Anbaubedingungen
- 49 Zünd- und Verbrennungsverhalten alternativer Kraftstoffe
- 50 Rapsölkraftstoffproduktion in Bayern – Analyse und Bewertung ökologischer und ökonomischer Wirkungen nach der ExpRessBio-Methode
- 51 Emissions- und Betriebsverhalten eines Biomethantraktors mit Zündstrahlmotor
- 52 Schnellbestimmung des Wassergehalts von Holz hackschnitzeln
- 53 Bioenergieträger mit Blühaspekt: Leguminosen-Getreide-Gemenge
- 54 Dauerkulturen – Aufzeigen der bayernweiten Anbaueignung
- 55 Lagerung von Holz hackschnitzeln
- 56 Holz hackschnitzel aus dem Kurzumtrieb
- 57 Optimierungspotenziale bei Kaminöfen – Emissionen, Wirkungsgrad und Wärmeverluste
- 58 Überführung einer Siloabdeckung auf Basis Nachwachsender Rohstoffe in die Praxisreife
- 59 Regionalspezifische Treibhausgasemissionen der Raps erzeugung in Bayern
- 60 Langzeitmonitoring pflanzenöлтаuglicher Traktoren der Abgasstufen I bis IV
- 61 Nutzereinflüsse auf die Emissionen aus Kaminöfen
- 62 Abgasverhalten von Fahrzeugen im realen Betrieb mit alternativen Kraftstoffen – Bestimmung mit einem portablen Emissionsmesssystem (PEMS)
- 63 Rapsölkraftstoff als Energieträger für den Betrieb eines forstwirtschaftlichen Vollernters (Harvester)
- 64 Amaranth als Biogassubstrat – Selektion zur Erarbeitung praxistauglicher Amaranthlinien für bayerische Standorte
- 65 Schwierige Pelletbrennstoffe für Kleinfeuerungsanlagen – Verbrennungstechnische Optimierung durch Additivierung und Mischung
- 66 Einflussfaktoren auf die NO_x-Emissionen in Hackschnitzelheizwerken zwischen 1 und 5 Megawatt

- 67 Gärrestversuch Bayern – Prüfung der langfristigen Nachhaltigkeit der Nutzungspfade Biogas und BtL
- 68 Hanf zur stofflichen Nutzung: Stand und Entwicklungen
- 69 Zünd- und Brennverhalten von Pflanzenölkraftstoff und Übertragung auf einen Motor der Abgasstufe V
- 70 Effiziente Lagerungs- und Aufbereitungsverfahren für Holzhackschnitzel
- 71 Ertragsstabilität, Etablierung und Umweltparameter mehrjähriger Energiepflanzen – Dauerkulturen II
- 72 Stoffliche Nutzung von Biomasseaschen als Baustein der Bioökonomie
- 73 Agri-Photovoltaik – Stand und offene Fragen

