



AgEcon SEARCH
RESEARCH IN AGRICULTURAL & APPLIED ECONOMICS

The World's Largest Open Access Agricultural & Applied Economics Digital Library

This document is discoverable and free to researchers across the globe due to the work of AgEcon Search.

Help ensure our sustainability.

Give to AgEcon Search

AgEcon Search

<http://ageconsearch.umn.edu>

aesearch@umn.edu

*Papers downloaded from **AgEcon Search** may be used for non-commercial purposes and personal study only. No other use, including posting to another Internet site, is permitted without permission from the copyright owner (not AgEcon Search), or as allowed under the provisions of Fair Use, U.S. Copyright Act, Title 17 U.S.C.*

No endorsement of AgEcon Search or its fundraising activities by the author(s) of the following work or their employer(s) is intended or implied.

ÖKONOMISCHE UND AGRONOMISCHE AUSWIRKUNGEN
VON AGRI-PHOTOVOLTAIK AUF DIE
LANDWIRTSCHAFTLICHE ACKERNUTZUNG AM BEISPIEL
DER REGION STUTTGART

Christian Sponagel, Arndt Feuerbacher, Daniela Bendel, Tobias
Karl David Weber, Enno Bahrs

Christian.Sponagel@Uni-Hohenheim.de

Fachgebiet für Landwirtschaftliche Betriebslehre 410b, Universität
Hohenheim, Schwerzstraße 44, 70593 Stuttgart



2022

Vortrag anlässlich der 62. Jahrestagung der GEWISOLA
(Gesellschaft für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften des Landbaues e.V.)

Resilienz von regionalen und globalen Wertschöpfungsketten
der Agrar- und Ernährungswirtschaft

07. bis 09. September 2022

ÖKONOMISCHE UND AGRONOMISCHE AUSWIRKUNGEN VON AGRI-PHOTOVOLTAIK AUF DIE LANDWIRTSCHAFTLICHE ACKERNUTZUNG AM BEISPIEL DER REGION STUTTGART

Christian Sponagel¹, Arndt Feuerbacher, Daniela Bendel, Tobias K. D. Weber, Enno Bahrs

Zusammenfassung

Um die angestrebte Klimaneutralität in Deutschland im Jahr 2045 zu erreichen, müssen erneuerbare Energien wie Photovoltaik und Windenergie erheblich ausgebaut werden. Gerade Freiflächen-Photovoltaikanlagen gehen häufig mit einer hohen Flächeninanspruchnahme einher, was zu Konflikten mit anderen Raumnutzungen wie der Landwirtschaft führt. Agri-Photovoltaikanlagen (Agri-PV) bieten das Potenzial die Flächeneffizienz durch gleichzeitige Stromerzeugung und landwirtschaftliche Nutzung bedeutsam zu steigern, weshalb sie explizit im politischen Fokus stehen. Bisherige Forschungsaktivitäten haben sich vor allem mit der Technologie an sich sowie potenziellen Ertragsveränderungen einzelner Kulturarten beschäftigt. Darauf aufbauend leistet diese Studie eine räumlich-explizite Analyse des Potenzials von Agri-PV am Beispiel von Ackerland in der Region Stuttgart, einer der bedeutendsten Ballungsräume in Deutschland. Der Fokus liegt auf den resultierenden agronomischen Auswirkungen in der Region sowie die damit verbundenen ökonomischen Effekte auf Seiten der Landwirtschaft, abseits der Rentabilität der Stromerzeugung. Die Analyse erfolgt mit einem integrierten Landnutzungsmodell, das die ackerbauliche Nutzung auf Schlagebene anhand von Deckungsbeiträgen optimiert. Rechtliche Rahmenbedingungen wie der Regionalplan als Nebenbedingungen werden berücksichtigt und vorhandene Studien zu den Ertragsauswirkungen unter Agri-PV genutzt. Die Ergebnisse zeigen, dass grundsätzlich Synergieeffekte zwischen Landwirtschaft und erneuerbaren Energien möglich sind. Aus der Perspektive der Landnutzung könnten, unter den gesetzten Annahmen, Synergieeffekte bis zu einem Ausmaß von Agri-PV in der Region auf bis zu etwa 4% der Ackerfläche erzielt werden. Bei Anteilen von über 10% sinken die Deckungsbeiträge im Ackerbau um etwa 270 € je ha Agri-PV. Bei der Wirtschaftlichkeit existieren räumliche Disparitäten basierend auf dem vorherrschenden Kulturartenspektrum. Eine hohe ökonomische Vorzüglichkeit ergibt sich für Betriebe bzw. Räume mit einem hohen Anteil an Sonderkulturen wie Erdbeeren. Dementgegen scheinen Regionen mit hohen Anteilen von Hackfrüchten in der Fruchtfolge eher weniger vorzüglich für die Errichtung von Agri-PV. Die landwirtschaftliche Flächennutzungsstruktur ist somit relevant für die ganzheitliche Bewertung der Flächennutzungseffizienz von Agri-PV-Anlagen. Unsere Ergebnisse helfen politischen Entscheidungsträgern, die Effekte von Agri-PV auf die Landnutzung noch besser einschätzen zu können und sind für die Identifikation prioritärer Umsetzungsräume, u. a. bei Regional- oder Flächennutzungsplänen nützlich.

Keywords

Agri-Photovoltaik, Energiewende, Ökonomisches Optimum, Agrarpolitik, Region Stuttgart

1 Einleitung

Nach den Zielen des Bundes-Klimaschutzgesetzes soll Deutschland bis zum Jahr 2045 klimaneutral sein, wofür vor allem der Anteil an erneuerbaren Energien erheblich gesteigert

¹ Universität Hohenheim, Fachgebiet Landwirtschaftliche Betriebslehre, Schwerzstr. 44, 70593 Stuttgart, Christian.Sponagel@Uni-Hohenheim.de

werden muss (UBA 2021). Um die Versorgungssicherheit dauerhaft gewährleisten zu können, müssen daher vor allem die Wind- und Solarenergie stark ausgedehnt werden, auch zur Reduktion der Abhängigkeit von fossilen Rohstoffen (PIETRONI et al. 2017). Bis zum Jahr 2030 schätzen PIETRONI et al. (2017) den erforderlichen Bedarf an Solarenergie auf fast 200 GW installierter Leistung, d. h. nahezu eine Vervielfachung der installierten Leistung im Vergleich zu 2021 (BUNDESNETZAGENTUR 2021). Erneuerbare Energien wie Wind und Solar sind aber in der Regel mit einer hohen Raumwirksamkeit verbunden, zumal die notwendige Solarkapazität wohl nicht allein auf Dachflächen realisiert werden kann (NITSCH und MAGOSCH 2021). Insbesondere Freiflächen-Photovoltaikanlagen führen zu einer hohen Flächeninanspruchnahme die dabei im Widerspruch zu anderen Nachhaltigkeitszielen steht (SCHINDELE 2021).

Agri-Photovoltaik (Agri-PV) ist ein Ansatz mit hoher Flächennutzungseffizienz, der eine Integration von landwirtschaftlicher Nutzung und Photovoltaik (PV) mit dem Ziel des Erhalts von Landwirtschaftsflächen ermöglicht (SCHINDELE 2021). Obwohl es weltweit bereits viele Anlagen gibt, spielt die Technologie in Deutschland bisher kaum eine Rolle (SCHINDELE 2021). Aus politischer Sicht steht Agri-PV als innovative Form der Solarenergie in Deutschland aktuell aber explizit im Fokus zur Erreichung der Klimaziele (KOALITIONSVERTRAG ZWISCHEN SPD, FDP UND GRÜNE 2021). Im Rahmen der aktuellen EEG Ausschreibung zum 01.04.2022 im Zuge der Innovationsausschreibungsverordnung (InnAusV) werden in § 15 InnAusV Solaranlagen seit dem 01.10.2021 auf Ackerland adressiert. Demnach muss ein gleichzeitiger Nutzpflanzenanbau auf derselben Fläche erfolgen bzw. eine Nutzung durch mehrjährige Kulturen. Dauergrünlandflächen sind dabei ausgeschlossen. Neben der Aufnahme im Rahmen der EEG Ausschreibung, werden Agri-PV-Anlagen auch in der GAP-Direktzahlungsverordnung vom 26.11.2021 (GAPDZV) explizit erwähnt. In der neuen GAP-Periode ab 2023 soll die Prämie für landwirtschaftlich nutzbare Flächen unter Agri-PV zu 85% gezahlt werden. Agri-PV-Anlagen unterliegen als bauliche Anlagen baurechtlichen Restriktionen. Eine Baugenehmigung kann unter Umständen als privilegiertes Vorhaben im Außenbereich nach § 35 Baugesetz (BauGB) erteilt werden bzw. im Rahmen eines vorhabenbezogenen Bebauungsplans (TROMMSDORFF et al. 2020). Nach § 1 Abs. 4 BauGB sind dabei die Ziele der Raumordnung zu berücksichtigen. Im Rahmen der Raumordnung können dann u. a. bestimmte Nutzungen in definierten Räumen explizit ausgeschlossen werden (§ 7 Raumordnungsgesetz).

Die grundsätzliche Idee von Agri-PV wurde bereits von GOETZBERGER und ZASTROW (1982) beschrieben. In Baden-Württemberg wurde im Jahr 2016 eine Pilotanlage errichtet und die Effekte der Verschattung durch die aufgeständerten Solarpaneele auf die Erträge von vier landwirtschaftlichen Kulturarten untersucht (TROMMSDORFF et al. 2020). Die Ergebnisse zeigen, dass Ertragsrückgänge zu erwarten sind, jedoch sind diese sehr kulturarten- und witterungsabhängig. So können sich bei Sonderkulturen wie Erdbeeren sogar positive Ertragseffekte durch die Beschattung ergeben (TANG et al. 2020). Dieses Ergebnis wird auch in der Meta-Analyse von LAUB et al. (2021) zu Ertragsauswirkungen landwirtschaftlicher Kulturen durch unterschiedliche Verschattungsgrade bestätigt. Eine ökonomische Betrachtung von Agri-PV erfolgt z. B. bei FEUERBACHER et al. (2021) oder TROMMSDORFF (2016). In den genannten Studien finden jedoch keine Betrachtungen der räumlichen Ebene statt. Nach unserem Kenntnisstand gibt es noch keine Studie, die die ökonomischen und agronomischen Auswirkungen von Agri-PV simultan auf die landwirtschaftliche Nutzung mit Hilfe eines räumlich hochaufgelösten integrierten Landnutzungsmodells untersucht. Vor diesem Hintergrund untersucht der vorliegende Beitrag Agri-PV auf Ackerland am Beispiel der Region Stuttgart aus Sicht der landwirtschaftlichen Flächennutzung, wobei eine grundsätzliche Rentabilität der Stromerzeugung durch Agri-PV vorausgesetzt wird. Die InnAusV fixiert Gebote bei Agri-PV derzeit auf 7,5 Cent je kWh. Die Stromgestehungskosten liegen aktuell noch bei ca. 9 Cent je kWh, jedoch könnten ähnlich wie bei Freiflächenanlagen die Kosten mit der Zeit sinken (TROMMSDORFF et al. 2020). Die Region Stuttgart ist einer der ökonomisch bedeutendsten Ballungsräume in Europa (DISPAN et al. 2021). In diesem Kontext werden

unterschiedliche Szenarien zur Deckung des Energiebedarfs in der Region durch Agri-PV betrachtet. Wesentliche Forschungsfragen sind inwiefern der Ausbau von Agri-PV agronomische und ökonomische Auswirkungen auf die ackerbauliche Nutzung hat und welche Standorte aus landwirtschaftlicher Sicht am ehesten ein Umsetzungspotenzial bieten. Aus den Ergebnissen werden Handlungsempfehlungen zur Entwicklung von Agri-PV am Beispiel der Region Stuttgart abgeleitet, mit dem Ziel einer Übertragbarkeit auf andere Metropolregionen in Deutschland und weltweit. Zu diesem Zweck nutzen wir ein geodatenbasiertes integriertes Landnutzungsmodell, wobei auch rechtliche Restriktionen hinsichtlich der Raumordnung Berücksichtigung finden.

2 Rahmenbedingungen für Agri-PV in der Region Stuttgart

Die Region Stuttgart besteht aus den Landkreisen Böblingen, Esslingen, Göppingen, Ludwigsburg, Rems-Murr-Kreis sowie dem Stadtkreis Stuttgart, deren ackerbauliche und rechtliche Rahmenbedingungen für Agri-PV nachfolgend skizziert werden.

2.1 Ackerbauliche Nutzung in der Region Stuttgart

Die Ackerfläche in der Region Stuttgart beträgt gemäß den Daten des Gemeinsamen Antrags 2021² etwa 72.120 ha. Dabei unterscheidet sich die Ackerlandnutzung deutlich zwischen den Landkreisen (Tabelle 1). Sonderkulturen nehmen in Stuttgart und Esslingen mit 10% bzw. 9% einen vergleichsweise hohen Anteil an der Ackerfläche ein. In den Landkreisen Böblingen und Göppingen dominiert vor allem der Anbau von Getreide mit Flächenanteilen von knapp 60%.

Tabelle 1: Überblick über den Umfang sowie Nutzung des Ackerlands in den Landkreisen der Region Stuttgart im Jahr 2021

Landkreis	Ackerland in ha	Anbauanteile von Feldfrüchten in den Landkreisen im Jahr 2021 in %					
		Ackerfutter und Mais	Hack- früchte	Getreide	Ölsaaten	Gemüse & Beeren	Sonstiges
Böblingen	14.661	19,1	6,5	59,0	8,8	1,4	5,1
Esslingen	9.572	27,4	2,1	50,6	3,1	9,2	4,8
Göppingen	11.955	32,0	0,3	55,8	7,6	0,2	2,2
Ludwigsburg	23.418	29,4	12,0	52,4	1,7	2,4	5,1
Rems-Murr-Kreis	11.116	36,8	3,0	47,9	2,8	3,0	3,9
Stuttgart	1.398	21,3	7,1	41,7	1,3	10,2	11,1
Region Stuttgart	72.120	28,7	6,2	53,2	4,3	3,0	4,5

2.2 Rechtliche Rahmenbedingungen für Agri-PV in der Region Stuttgart

Bei der Aufstellung eines vorhabenbezogenen Bebauungsplans sind nach dem Baurecht die Ziele der Raumordnung zu berücksichtigen. Deshalb wurde seitens des Verbandes Region Stuttgart der aktuelle Regionalplan zur Verfügung gestellt, der u. a. Festlegungen zu den Grünzäsuren, Flächen für den Rohstoffabbau bzw. –sicherung enthält. Diese sind nach Auskunft des Verbandes Region Stuttgart (Mündliche Auskunft von Frau Jahnz, 15.03.2021) ein grundsätzliches Ausschlusskriterium für Agri-PV. Regionale Grünzüge wurden nicht als Restriktion berücksichtigt, da innerhalb der Grünzüge in der Praxis dennoch eine Errichtung von PV-Anlagen gestattet werden kann (siehe z. B. REGIONALVERBAND HEILBRONN-FRANKEN (2020)). In Anlehnung an den Kriterienkatalog für die Errichtung von Freiflächen-PV-Anlagen nach LUBW (2021b) wurden Restriktionen hinsichtlich des Umwelt- und Naturschutzes festgelegt. Zudem wurde angenommen, dass Agri-PV auf Flächen mit einer mittleren Hangneigung von über 7% nicht möglich ist (Mündliche Auskunft von Herrn Schindele,

² Die Daten wurden vom MLR Baden-Württemberg zur Verfügung gestellt.

BayWa AG, 15.11.2021). Nach Berücksichtigung aller Restriktionen (Tabelle 2) ist Agri-PV grundsätzlich auf 45.495 ha bzw. 63% der Ackerfläche in der Region Stuttgart möglich.

Tabelle 2: Restriktionen hinsichtlich der Errichtung von Agri-PV-Anlagen

Restriktion	Datenquelle
Grünzäsuren	Regionalplan des Verbandes Region Stuttgart
Gebiet für den Abbau oberflächennaher Rohstoffe	Regionalplan des Verbandes Region Stuttgart
Gebiete zur Sicherung von Rohstoffvorkommen	Regionalplan des Verbandes Region Stuttgart
Naturschutzgebiete	LUBW (2021a)
Biotope	LUBW (2021a)
Biosphärengebiete	LUBW (2021a)
Flächenhafte Naturdenkmale	LUBW (2021a)
Wasserschutzgebiete (Zone 1 und 2)	LUBW (2021a)
Überschwemmungsgebiete HQ 100	LUBW (2021a)
Nähe zum Waldrand (< 30 m)	BKG (2021a)
Mittlere Hangneigung (> 7 %)	BKG (2021b)

3 Material und Methoden

Das folgende Kapitel gibt zunächst einen Überblick über das verwendete integrierte Landnutzungsmodell sowie die Annahmen hinsichtlich der Auswirkungen von Agri-PV auf landwirtschaftliche Deckungsbeiträge unter der Anlage.

3.1 Übersicht über das integrierte Landnutzungsmodell

Abbildung 1 zeigt schematisch das integrierte Landnutzungsmodell mit den gekoppelten Modellen CropRota (SCHÖNHART et al. 2011), Expert-N (PRIESACK 2006) sowie PALUD (SPONAGEL et al. 2022). Alle Modellkomponenten werden nachfolgend ausführlich erläutert.

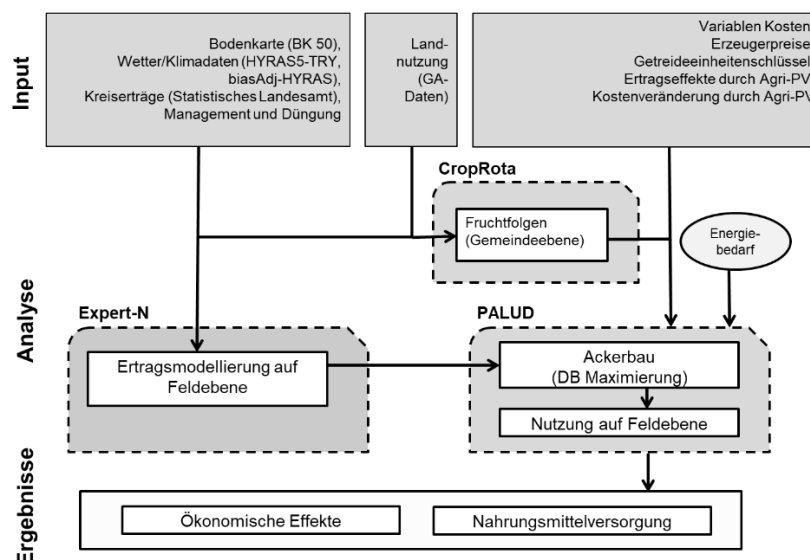


Abbildung 1: Schematische Übersicht über das integrierte Landnutzungsmodell.

3.2 Ertragssimulationen mit Expert-N

Projektionen der Ertragsentwicklungen bis 2050 wurden für sieben ausgewählte Kulturen (Silomais, Körnermais, Zuckerrüben, Kartoffeln, Winterweizen, Sommergerste, Winterraps) mit dem biophysikalischen Agrarökosystemmodell Expert-N (PRIESACK 2006) auf

Schlagebene auf Basis des Szenarios RCP8.5 (*business-as-usual*) mit einem Klimaensemble simuliert. Die durchschnittlichen Erträge der simulierten Feldfrüchte zwischen 2020 und 2050 sind als exogene Daten ins Modell PALUD eingeflossen. Winterweizen wurde dabei als Indikator für den relativen Ertrag weiterer Wintergetreidearten wie Wintergerste herangezogen. Diese sieben Feldfrüchte machen insgesamt mehr als 75% der Ackerfläche in der Region Stuttgart im Jahr 2021 aus. Für alle weiteren Kulturarten wie Gemüse und Beeren wurden gemäß der natürlichen Bodenfruchtbarkeit aus der Bodenkarte 50 (LGRB 2015) jeweils drei Ertragsstufen gebildet.

3.3 CropRota

CropRota ist ein Fruchtfolgenmodell auf Grundlage linearer Programmierung, das zur Ableitung typischer Fruchtfolgen auf Basis der beobachteten Landnutzung sowie einer agronomischen Experteneinschätzung genutzt wird (SCHÖNHART et al. 2011). Mit Hilfe von CropRota wurden auf Ebene der 179 Kommunen in der Region Stuttgart drei- bzw. vierjährige Fruchtfolgen inkl. Sonderkulturen auf Basis der Anteile der einzelnen Kulturarten im Jahr 2021 gemäß den Daten des Gemeinsamen Antrags abgeleitet. Im Durchschnitt wurden je Kommune etwa 15 Fruchtfolgen simuliert. Die Fruchtfolgen wurden anschließend in PALUD integriert.

3.4 PALUD

PALUD (SPONAGEL et al. 2022) ist ein ökonomisches geodatenbasiertes Landnutzungsmodell auf Basis linearer Programmierung. In der Zielfunktion wird die Landnutzung auf Ebene der Ackerschläge ($n=76.280$) anhand der Summe der Deckungsbeiträge (DB) aller Ackerschläge unter Restriktionen optimiert. Die Landnutzung eines Ackerschlagel ergibt sich dabei aus den mit CropRota generierten verfügbaren möglichen Fruchtfolgeoptionen in der jeweiligen Kommune und den damit verbundenen Deckungsbeiträgen. Diese wurden anhand der räumlich-differenzierten Erträge (siehe Kapitel 3.2) sowie Standardkalkulationsdaten berechnet (LEL 2021; LFL 2021; KTBL 2021). Dies erfolgte modellendogen, wobei die Düngungskosten in Anlehnung an die Erträge und Nährstoffgehalte in Anlage 7 der Düngeverordnung berücksichtigt wurden. Bei Ackerfutter inkl. Silomais wurde zudem von einer überwiegend organischen Düngung ausgegangen (ca. 30% Stickstoff mineralisch). Ackerfutter wurde in Anlehnung an Maissilage mit 0,22 € je 10 MJ NEL bewertet (AMI 2019, 2020, 2021). Zudem wurden anlehnend an die GAPDZV Flächenprämien von 150 € je ha angesetzt bzw. 127,50 € bei Agri-PV-Nutzung. Die Optimierung der Zielfunktion oblag dabei der Bedingung, die Menge an Ackerfutter im Status Quo 2021 in MJ NEL auf kommunaler Ebene zu decken. Ferner musste der Anteil stillgelegter Ackerfläche im Vergleich zum Jahr 2021 auf kommunaler Ebene konstant bleiben. Zudem wurde angenommen, dass die Anbaufläche von Futtergetreide wie Wintergerste in der Region bei mind. 60% verbleiben muss, um den Bedarf der Tierhaltung zu decken (BLE 2020). Um im Modell eine Flexibilität hinsichtlich des künftiges Anbaus zu ermöglichen, wurde angenommen, dass eine Flächenausdehnung der Kulturarten um 25% bzw. 20% auf kommunaler bzw. Regionsebene möglich ist (HAB et al. 2020). Zur Antizipation der Nahrungsmittelversorgung in der Region, als Nebenziel, wurde die Getreideeinheit als standardisierter Indikator verwendet und modellendogen kalkuliert (MÖNKING et al. 2010).

3.5 Annahmen zur Agri-PV-Anlage sowie deren Auswirkungen auf den Ackerbau

In Anlehnung an die in SCHINDELE et al. (2020) betrachtete Pilotanlage in Baden-Württemberg wurde je Hektar Agri-PV eine installierte elektrische Leistung von 0,52 MWp angesetzt. Die PV-Module sind aufgeständert und fest installiert mit Süd-West-Ausrichtung. Dies erlaubt eine Durchfahrtsbreite von ca. 5 m und eine Durchfahrtsbreite zwischen den Stützreihen von etwa 19 m mit landwirtschaftlichen Maschinen (SCHINDELE et al. 2020). Bei den betrachteten

Kulturarten bzw. Fruchtfolgen in PALUD kann somit die gleiche Flexibilität bei Anbauentscheidungen als bei einer Fläche ohne Agri-PV unterstellt werden, da es sich z. B. nicht um ein spezielles Agri-PV-Design für Obstplantagen etc, handelt. Durch die Aufständerung wurde eine Reduktion der landwirtschaftlich nutzbaren Fläche unter Agri-PV von 8% angenommen (TROMMSDORFF et al. 2020). Außerdem ergaben sich durch die Aufständerung Auswirkungen auf die Bewirtschaftungskosten der nutzbaren Fläche unter der Anlage (TROMMSDORFF 2016). So wurden eine Erhöhung der variablen Maschinenkosten um 2% bzw. bei Kosten für Lohnmaschinen um 5% angenommen (TROMMSDORFF 2016). Dementgegen kann die Anlage den darunter angebauten Kulturen einen Schutz vor Hagelschäden bieten, sodass bei der Hagelversicherung eine Kostenreduktion um 10% angenommen wurde (TROMMSDORFF 2016). Außerdem wurde von einer Verringerung der nutzbaren Sonneneinstrahlung durch die Kulturen unter Agri-PV von 35% ausgegangen (TROMMSDORFF et al. 2020). Tabelle 3 gibt eine Übersicht über die angenommenen relativen Ertragsverluste durch Agri-PV basierend auf Studien von LAUB et al. (2022), ARTRU et al. (2018), ZHANG UND FLOTTMANN (2015) und TROMMSDORFF et al. (2020). Demnach wird z. B. bei Weizen ein Ertragsverlust von 30% angesetzt, bei Mais ist dieser mit ca. 50% noch höher.

Tabelle 3: Auswirkung der Beschattung durch Agri-PV auf die Kulturarten

Kulturart	Ackerfütter	Mais	Gemüse	Kartoffeln	Körnerleguminosen	Ölsaaten	C3 Getreide	Zuckerrüben	Beeren
Relativer Ertrag bei Agri-PV in %	95	51,5	90,1	66,6	56,6	80	67,7	70	115,6

3.6 Entwicklungsszenarien für Agri-PV in der Region

NITSCH und MAGOSCH (2021) beschreiben einen Ausbaupfad für erneuerbare Energien, der für die Erreichung des Klimaneutralitätsziel von Baden-Württemberg bis 2040 nötig ist. Hiervon wurden die Agri-PV Entwicklungsszenarien für die Region Stuttgart abgeleitet. Die in 2020 geschätzte installierte Leistung und Stromerzeugung nach Energieträger sowie der Stromverbrauch wurde für das Land Baden-Württemberg von NITSCH und MAGOSCH (2021) übernommen. Demnach liegt der notwendige Bedarf an PV im Jahr 2040 bei etwa 38,66 GWp installierter Leistung in Baden-Württemberg. Im Jahr 2017 hatte die Region Stuttgart basierend auf STEIDLE (2021) einen Anteil von etwa 21% am Stromverbrauch in Baden-Württemberg. Bei Übertragung des projizierten Ausbaubedarfs von PV in Baden-Württemberg auf die Region Stuttgart ergibt sich somit ein Bedarf von knapp 8,3 GWp bis 2040. Dies umfasst alle Arten von PV einschließlich Anlagen auf Dachflächen. Im Jahr 2018 betrug die Summe der installierten PV-Leistung in der Region Stuttgart etwa 0,8 GWp, davon knapp 99% auf Dachflächen (LUBW 2022). Darauf aufbauend wurden drei Ausbauszenarien für Agri-PV erstellt (Tabelle 4). Szenario 1 („geringer Ausbau“) basiert auf der Annahme, dass 1 GWp durch Agri-PV gedeckt wird, d. h. ein Anteil von knapp 12% des PV-Bedarfs. Szenario 2 („mittlerer Ausbau“) geht davon aus, dass 3 GWp durch Agri-PV bereitgestellt werden und Szenario 3 („hoher Ausbau“) nimmt einen Agri-PV-Ausbau von 5 GWp an. Die Ackerflächenanteile unter Agri-PV variieren somit stark zwischen 2,7% und 13,3% in der Region Stuttgart.

Tabelle 4: Übersicht über die Agri-PV Ausbauszenarien

Szenario		Ausbau von Agri-PV in GWp	Fläche Agri-PV in ha	Anteil an Ackerfläche in %	Anteil Agri-PV am PV-Bedarf bis 2040 in %
1	Geringer Ausbau	1	1.923	2,7	12
2	Mittlerer Ausbau	3	5.769	8,0	36
3	Hoher Ausbau	5	9.615	13,3	60

4 Ergebnisse

Hinsichtlich der Vorzüglichkeit von Agri-PV-Anlagen auf Ackerland zeigen sich deutliche Disparitäten in der Region Stuttgart (Tabelle 5). Bei einem moderaten Ausbau von Agri-PV in Szenario 1 von 1 GWp sind mehr als 50% der Agri-PV-Flächen in den Landkreisen Ludwigsburg mit hohem Hackfruchtanteil und Böblingen mit dem höchsten Getreideanteil der Region am Ackerland lokalisiert. Im Verhältnis zum Anteil am Ackerland befindet sich zudem ein Großteil der Agri-PV-Flächen in den Landkreisen Stuttgart und Esslingen, welche durch einen besonders hohen Anteil an Sonderkulturen wie Erdbeeren charakterisiert sind. Nur 1% der Agri-PV-Fläche wäre demnach im Landkreis Göppingen etabliert, in dem kaum Sonderkulturen angebaut werden. Mit zunehmender Ausdehnung von Agri-PV in der Region ändern sich allerdings die Flächenverhältnisse zwischen den Landkreisen. So sind in Szenario 3 (5 GWp) nur noch etwa 39,5% der Agri-PV-Flächen in den Landkreisen Ludwigsburg und Böblingen umgesetzt. In Stuttgart kann in Szenario 3 im Vergleich zu Szenario 2 (3 GWp) nur noch eine geringe Ausdehnung der Agri-PV-Flächen beobachtet werden. Dies ist anders im Landkreis Göppingen, der in Szenario 3 etwa 23% der gesamten Agri-PV-Fläche in der Region ausmacht.

Tabelle 5: Verteilung der Agri-PV-Flächen in den Szenarien nach Landkreis

Landkreis	Ackerland unter Agri-PV in ha nach Szenario			Anteil der gesamten Agri-PV-Fläche in der Region nach Szenario in %		
	1	2	3	1	2	3
Böblingen	362	1.253	2.300	18,8	21,7	23,9
Esslingen	260	950	1.497	13,5	16,5	15,6
Göppingen	19	773	2.218	1,0	13,4	23,1
Ludwigsburg	628	1.186	1.502	32,7	20,5	15,6
Rems-Murr-Kreis	420	1.314	1.774	21,8	22,8	18,5
Stuttgart	235	293	324	12,2	5,1	3,4

Auch innerhalb der einzelnen Landkreise gibt es räumliche Disparitäten (Abbildung 2). So weisen z. B. die Kommunen Stuttgart, Herrenberg, Geislingen an der Steige und Nürtingen vergleichsweise hohe Flächenumfänge für Agri-PV auf. Während sich die Agri-PV-Fläche in Szenario 1 vor allem auf den westlichen Teil der Region konzentriert, kann in Szenario 3 auch eine zunehmende Flächenausdehnung im östlichen Teil der Region beobachtet werden.

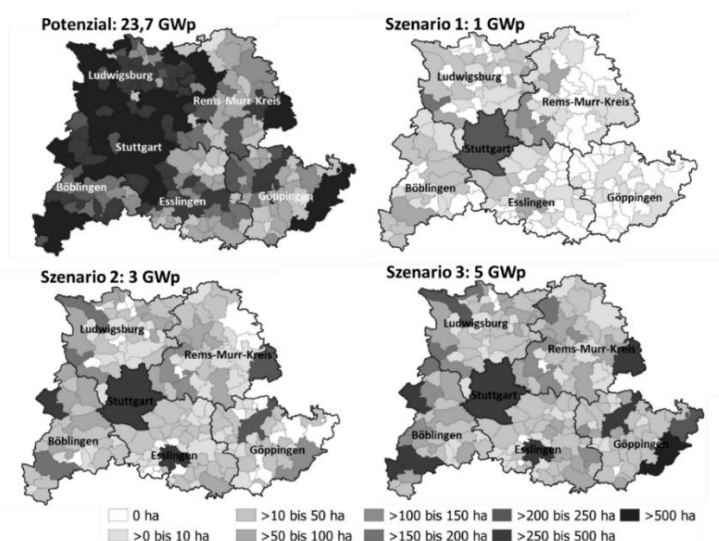


Abbildung 2: Gesamtpotenzial bzw. Flächenumfänge von Agri-PV gemäß eigener Berechnung in den einzelnen Szenarien nach Kommune (BKG 2018)

Tabelle 6 gibt eine Übersicht über die Flächennutzung unter Agri-PV-Anlagen in den Szenarien. In Szenario 1 (1 GWp) werden mit knapp 30% ein erheblicher Anteil von Sonderkulturen wie Gemüse und Erdbeeren unter Agri-PV angebaut. Weitere etwa 50% der Nutzung machen Sommer- und Wintergetreide aus. Ackerfutter und Ölsaaten werden unter diesen Annahmen nahezu gar nicht unter Agri-PV-Anlagen kultiviert. Im mittleren Szenario 2 (3 GWp) ändert sich allerdings das Anbauspektrum unter Agri-PV. Der Anteil an Gemüse und Beeren nimmt auf etwa 13% ab, wohingegen das Ackerfutter nun mit über 40% einen erheblichen Umfang der Flächennutzung ausmacht. Auch der Anteil von Wintergetreide geht zurück. Lediglich im Stadtkreis Stuttgart machen Gemüse und Beeren mit etwa einem Drittel an der Landnutzung unter Agri-PV noch einen erheblichen Anteil aus. In Szenario 3 (5 GWp) werden auch Ölsaaten in größerem Flächenumfang mit einem Anteil von ca. 9% an der gesamten Agri-PV-Fläche kultiviert. Im Gegenzug kommt es zur Reduktion des Anteils an Ackerfutter, wobei Wintergetreide wiederum auf einen Anteil von etwa 30% zunimmt. Kartoffeln werden in keinem Szenario unter Agri-PV kultiviert. Zuckerrüben machen in Szenario 3 mit ca. 1,7% der Fläche unter Agri-PV ebenfalls nur einen geringen Anteil aus.

Tabelle 6: Fläche der Kulturarten unter Agri-PV nach Landkreis und Szenario in ha

Landkreis	Anbauumfang der Kulturarten unter Agri-PV in ha								
	Acker- futter	Körner- leguminosen	Mais	Öl- saaten	Sommer- getreide	Gemüse & Beeren	Sonstige Kulturen	Winter- getreide	Zucker- rüben
Szenario 1									
Böblingen	4	5	4	3	138	95	13	74	25
Esslingen	1	3	36	0	21	86	8	105	0
Göppingen	0	0	3	0	4	5	0	7	0
Ludwigsburg	0	48	29	0	76	160	6	246	64
Rems-Murr-Kreis	0	0	43	0	63	121	1	138	53
Stuttgart	0	0	78	0	0	78	0	78	0
Summe in ha	5	56	194	3	303	545	28	648	143
Anteil Region	0,3%	3,0%	10,6%	0,2%	16,6%	29,8%	1,5%	35,4%	7,4%
Szenario 2									
Böblingen	722	5	2	3	273	106	34	70	38
Esslingen	422	7	85	0	92	134	24	186	0
Göppingen	526	0	73	0	44	5	16	108	0
Ludwigsburg	277	76	68	8	73	203	62	359	60
Rems-Murr-Kreis	511	3	116	0	93	197	34	304	57
Stuttgart	36	22	56	0	22	78	0	78	0
Summe in ha	2.493	113	400	11	598	724	171	1105	156
Anteil Region	43,2%	2,0%	6,9%	0,2%	10,4%	12,5%	3,0%	19,1%	2,7%
Szenario 3									
Böblingen	888	5	2	232	436	106	71	517	41
Esslingen	497	7	89	94	206	134	36	434	0
Göppingen	525	2	87	406	242	5	21	931	0
Ludwigsburg	376	76	74	48	95	203	138	430	62
Rems-Murr-Kreis	573	3	129	86	172	197	46	511	57
Stuttgart	41	26	52	0	26	78	22	78	0
Summe in ha	2.899	118	432	867	1.178	724	335	2.902	161
Anteil Region	30,2%	1,2%	4,5%	9,0%	12,2%	7,5%	3,5%	30,2%	1,7%

Betrachtet man die gesamte Ackerfläche in der Region, dann gibt es in Szenario 1 im Vergleich zur Referenz keine Veränderungen bei den Anteilen der einzelnen Kulturarten. Lediglich in Szenario 3 sind im Vergleich zur Referenz Tendenzen einer Auswirkung von Agri-PV auf das Anbauspektrum in der Region erkennbar. So sinkt der Anteil von Wintergetreide an der

Ackerfläche um 0,6%, wobei der Anteil von Sommergetreide um etwa 0,1% zulegt. Ebenso kann bei Mais eine Zunahme um etwa 0,1% der Ackerfläche in der Region beobachtet werden. Zudem nimmt die Anbaufläche von Eiweißpflanzen um etwa 6% ab bzw. um ca. 0,1% der gesamten Ackerfläche. Außerdem nimmt die Anbaufläche von Zuckerrüben um etwa 3% ab. Bei Kartoffeln und Ölsaaten können hingegen auch in Szenario 3 keine Auswirkungen durch Agri-PV festgestellt werden.

Abbildung 3 zeigt die marginalen Veränderungen des gesamten landwirtschaftlichen DB der Ackernutzung in der Region in Abhängigkeit der installierten elektrischen Leistung von Agri-PV. Unter den Annahmen hinsichtlich der Ertragsauswirkungen gemäß Kapitel 3.5 können bis zu einer Installation von etwa 1.500 MWp, d. h. zwischen Szenario 1 und 2, positive Auswirkungen auf den Deckungsbeitrag bzw. marginale Erträge in der Region verzeichnet werden. Dies trifft auch in Bezug auf den DB in jedem einzelnen Landkreis zu. Ab etwa 3.500 MWp steigen die marginalen Kosten von Agri-PV nur noch geringfügig und liegen bei 5.500 MWp bei etwa 520 € je MWp bzw. ca. 270 € je ha. Jedoch gibt es hinsichtlich der ökonomischen Auswirkungen regionale Disparitäten. So beträgt der Mehrerlös in Bezug auf den DB durch Agri-PV in Szenario 3 in Stuttgart durchschnittlich knapp 650 € je ha Agri-PV, wobei im Landkreis Göppingen Kosten von durchschnittlich etwa 210 € je ha Agri-PV entstehen. Im Landkreis Böblingen würde der durchschnittliche Mehrerlös je ha Agri-PV noch bei etwa 10 € liegen. Abweichend von den Ertragsannahmen in Kapitel 3.5 wurde zudem eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. D. h. es wurden 90% des Ertrages unter Agri-PV in Relation zu 3.5 angenommen. Unter diesen Bedingungen können nur bis zu einer installierten Gesamtleistung von etwa 500 MWp positive Auswirkungen auf den DB in der Region beobachtet werden. D. h. in Szenario 1 betragen die marginalen Kosten etwa 120 € je MWp Agri-PV. Jedoch kann beobachtet werden, dass sich die Verläufe der Kosten bei einer größeren Ausdehnung von Agri-PV annähern. Bei 5.500 MWp liegen die Kosten etwa 100 € je MWp auseinander. Die Ausdehnung von Agri-PV reduziert die Nahrungsmittelversorgung in Szenario 1 (1 GWp) von etwa 0,7% bis zu ca. 2,7% in Szenario 3 (5 GWp) in Getreideeinheiten.

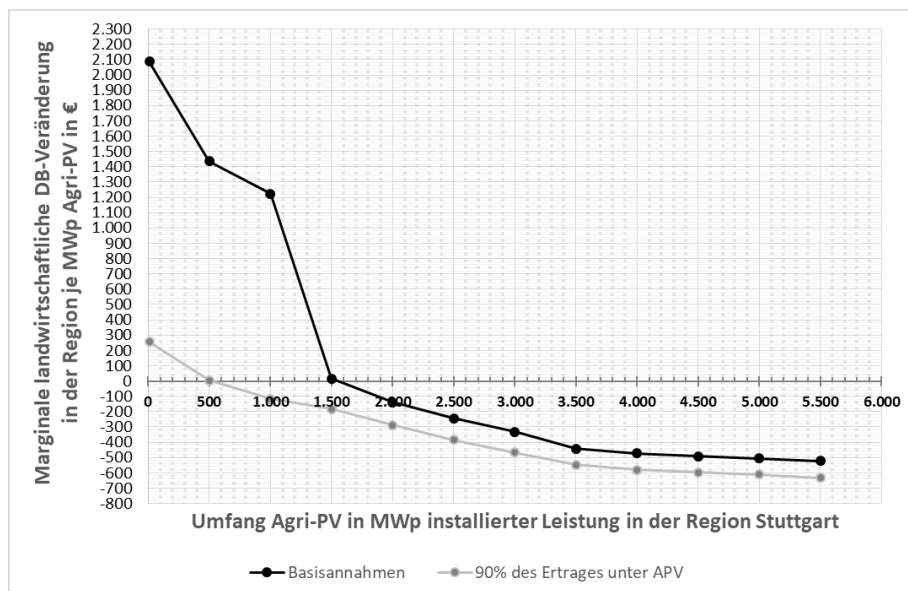


Abbildung 3: Marginale landwirtschaftliche DB-Veränderung je MWp installierter Agri-PV Leistung in der Region Stuttgart

5 Diskussion

Die Ergebnisse zeigen generell, dass in Abhängigkeit des Ausbaus von Agri-PV auf Ackerland durchaus Synergieeffekte zwischen Landwirtschaft und der Erzeugung von erneuerbaren Energien möglich sind. Dies steht im Einklang mit anderen Studien (z. B. Dinesh und Pearce

(2016)). In Bezug auf den Gesamtdeckungsbeitrag in der Region können bis zu einem Ausbau von Agri-PV auf etwa 1.500 MWp installierter Leistung marginale Erträge erzielt werden. Das bedeutet, dass bis zu diesem Punkt Synergieeffekte zwischen Landwirtschaft und Stromerzeugung generiert werden können. Dies würde knapp 2.900 ha Ackerland bzw. knapp 4% der Ackerfläche in der Region entsprechen. Eine darüber hinausgehende Ausdehnung würde mit höheren Kosten einhergehen. In Szenario 3 (5 GWp) liegen die Kosten in einem Bereich zwischen 260 € und 320 € je ha Agri-PV. Gemessen am Stromertrag der Agri-PV-Anlage machen diese DB-Veränderungen in der Landwirtschaft allerdings weniger als 0,1 Cent der Stromgestehungskosten je KWh aus (TROMMSDORFF et al. 2020). Gemäß der InnAusV ist die landwirtschaftliche Nutzung unter der Anlage jedoch verpflichtend, sodass aus Sicht der Landwirtschaft DB-Veränderungen in dieser Größenordnung dennoch relevant sind, auch bezüglich der Art und des Umfangs einzelner Fruchtfolgeglieder unter Agri-PV.

Vor allem in Kommunen mit hohen Anteilen an Sonderkulturen wie Erdbeeren in Verbindung mit Getreideanbau kann Agri-PV zu einer besonders hohen Flächeneffizienz beitragen. Dies schließt auch Kommunen mit vergleichsweise hoher durchschnittlicher Bodengüte gemäß LGRB (2015) ein, was sich am Beispiel Stuttgart zeigte. Gerade für Freiflächen-PV sollen gemäß der Freiflächenöffnungsverordnung (FFÖ-VO) besonders geeignete landwirtschaftliche Nutzfläche möglichst nicht in Anspruch genommen werden. Nach den Ergebnissen kann sich eine optimale Flächenkulisse für Agri-PV somit von derer für Freiflächen-PV unterscheiden. Die Vorzüglichkeit von Agri-PV in Kommunen bzw. landwirtschaftlichen Betrieben mit hohen Anteilen an Hackfrüchten sowie Mais in der Fruchtfolge kann vergleichsweise geringer sein. Dementgegen schließen SCHINDELE et al. (2020) auf eine ökonomische Vorzüglichkeit des Kartoffelanbaus unter Agri-PV, was nicht bestätigt werden konnte. Denn gerade bei Kartoffeln können auch geringe Ertragseinbußen eine hohe Reduktion des Erlöses bedeuten. Auch bei einem hohen Agri-PV-Flächenumfang in Szenario 3 (knapp 13% der Ackerfläche) konnten nur marginale Auswirkungen auf das Anbauspektrum in der Region festgestellt werden.

In dieser Studie lag der Fokus gemäß der aktuellen Rahmenbedingungen hinsichtlich dem EEG auf Ackerland. Jedoch existiert möglicherweise auch auf Grünlandflächen ein Potenzial für Agri-PV, das künftig ebenfalls betrachtet werden sollte. Hinsichtlich der technischen Rahmenbedingungen wurde eine einheitliche Spezifikation gewählt, jedoch können z. B. durch einen geänderten Abstand der Module oder deren Ausrichtung andere Verschattungseffekte und damit andere Auswirkungen auf die Erträge auftreten (TROMMSDORFF et al. 2020). Zudem zeigte sich eine hohe Sensitivität der marginalen landwirtschaftlichen Kosten von Agri-PV im Hinblick auf die Ertragsauswirkungen der Beschattung. Dies ist vor allem durch den Einfluss der Ertragsauswirkungen auf die Deckungsbeiträge bei Beeren bedingt.

In Bezug auf die methodische Vorgehensweise müssen Unsicherheiten hinsichtlich der Modellierung erwähnt werden. Dies betrifft die Ertragssimulation mit Expert-N, insbesondere da die Auswirkungen der am Tage zeitweise auftretenden Verschattung durch die Agri-PV Module auf die Photosyntheseleistung noch nicht vollständig bekannt sind. Die daraus resultierenden Effekte auf die Ertragsbildung würden vor allem die absoluten Kosten der Ackernutzung unter Agri-PV betreffen. Die Fruchtfolgen aus CropRota stellen typische Fruchtfolgen dar, die jedoch von der Realität abweichen können (SCHÖNHART et al. 2011). Weitere Modellunsicherheiten betreffen Restriktionen in PALUD wie z. B. Ackerfutterrestriktionen oder Stilllegungsflächen, die sich durch die GAP-Reform ändern können. Im Rahmen dieser Studie lag der Fokus ausschließlich auf den Auswirkungen von Agri-PV auf landwirtschaftliche Ackernutzung abseits der Profitabilität der Stromerzeugung. In diesem Kontext wurden auch Faktoren wie ein potenzieller Netzanschluss oder Mindestflächengrößen nicht betrachtet (TROMMSDORFF et al. 2020). Außerdem spielt für den Ausbau von Agri-PV auch die gesellschaftliche Akzeptanz eine Rolle wie z. B. die Effekte von Agri-PV auf das Landschaftsbild (KETZER et al. 2020). Dies sollte in darauf aufbauenden Studien mit betrachtet werden. Ein weiteres Forschungsfeld ist die Analyse des Beitrags von

Agri-PV zur Erhöhung der Resilienz von Anbausystemen im Kontext des Klimawandels, da z. B. die Erträge bei Winterweizen unter Agri-PV in trockenen Jahren auch höher als auf Flächen ohne Agri-PV liegen können (TROMMSDORFF et al. 2020). Insgesamt wurde deutlich, dass Agri-PV vor dem Hintergrund von Synergieeffekten bzw. der vermutlich höheren Akzeptanz seitens der Landwirtschaft ein Potenzial für die Region Stuttgart bzw. für ähnlich strukturierte Regionen bieten kann. Unsere Studie kann politischen Entscheidungsträgern die Auswirkungen von Agri-PV aufzeigen sowie bei der Identifikation von Räumen (z. B. in Regionalplänen) mit besonderer Priorität für Agri-PV, auch unter Berücksichtigung regionaler Energie- und Nahrungsmittelautarkie oder auch ökologischer Parameter sachdienlich sein.

Literatur

- AMI (2019, 2020, 2021): Verkaufspreise für Grundfutter. In: *Bauernzeitung* 60, 61, 62 (mehrere Ausgaben).
- ARTRU, S.; LASSOIS, L.; VANCUTSEM, F.; REUBENS, B.; GARRÉ, S. (2018): Sugar beet development under dynamic shade environments in temperate conditions. In: *European Journal of Agronomy* 97, S. 38–47. DOI: 10.1016/j.eja.2018.04.011.
- BKG (2018): NUTS regions. URL: bit.ly/3sNyHw7, zuletzt geprüft am 25.03.2020.
- BKG (2021a): CORINE Land Cover 5 ha, Stand 2018. Bundesamt für Kartographie und Geodäsie. URL: bit.ly/3oRR8yG, zuletzt geprüft am 31.01.2022.
- BKG (2021b): Digitales Geländemodell Gitterweite 200 m. Bundesamt für Kartographie und Geodäsie. URL: <https://bit.ly/3sJnzAC>, zuletzt geprüft am 31.01.2022.
- BLE (2020): 2020. Bericht zur Markt- und Versorgungslage Getreide 2020. Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung. Bonn. URL: bit.ly/3rSrCv9, zuletzt geprüft am 31.05.2021.
- DISPAN, J.; KOCH, A.; KÖNIG, T.; SEIBOLD, B. (2021): Strukturbericht Region Stuttgart 2021. Stuttgart/Tübingen. URL: bit.ly/3gPDIVa, zuletzt geprüft am 28.01.2022.
- Dinesh, H.; Pearce, J. M. (2016): The potential of agrivoltaic systems. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 54, S. 299-308. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.024>.
- FEUERBACHER, A.; LAUB, M.; HÖGY, P.; LIPPERT, C.; PATACZEK, L.; SCHINDELE, S. et al. (2021): An analytical framework to estimate the economics and adoption potential of dual land-use systems: The case of agrivoltaics. In: *Agricultural Systems* 192, S. 103193. DOI: 10.1016/j.agsy.2021.103193.
- GOETZBERGER, A.; ZASTROW, A. (1982): On the Coexistence of Solar-Energy Conversion and Plant Cultivation. In: *International Journal of Solar Energy* 1 (1), S. 55–69. DOI: 10.1080/01425918208909875.
- HAB, M.; BANSE, M.; DEBLITZ, C.; FREUND, F.; GEIBEL, I.; GOCHT, A. et al. (2020): Thünen-Baseline. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut. DOI: 10.3220/REP1601889632000.
- KETZER, D.; SCHLYTER, P.; WEINBERGER, N.; RÖSCH, C. (2020): Driving and restraining forces for the implementation of the Agrophotovoltaics system technology - A system dynamics analysis. In: *Journal of environmental management* 270, S. 110864. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110864.
- KOALITIONSVERTRAG ZWISCHEN SPD, FDP UND GRÜNE (2021): Mehr Fortschritt wagen. URL: bit.ly/34JGfIs, geprüft am 27.01.2022.
- KTBL (2021): Leistungs-Kostenrechnung-Pflanzenbau. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. URL: bit.ly/3rSMwKx, geprüft am 31.01.2022.
- LAUB, M.; PATACZEK, L.; FEUERBACHER, A.; ZIKELI, S.; HÖGY, P. (2022): Contrasting yield responses at varying levels of shade suggest different suitability of crops for dual land-use systems. A meta-analysis. In: *Agronomy for Sustainable Development* 43, S. 51. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00783-7>.
- LEL (2021): Kalkulationsdaten Marktfrüchte - konventioneller und Ökologischer Landbau. Landesanstalt für Landwirtschaft, Ernährung und Ländlichen Raum. Schwäbisch Gmünd. URL: bit.ly/3rSPNJW, geprüft am 28.01.2022.

- LFL (2021): LfL Deckungsbeiträge und Kalkulationsdaten. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft. URL: bit.ly/3HODQdP, geprüft am 31.01.2022.
- LGRB (2015): Bodenkarte von Baden-Württemberg 1 : 50 000 (GeoLa), blattschnittfreie Vektordaten. URL: <https://bit.ly/3LBvOap>, geprüft am 24.01.2021.
- LUBW (2021a): Daten- und Kartendienst. Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg. URL: <https://bit.ly/34OOAdP>, geprüft am 31.01.2022.
- LUBW (2021b): Kriterienkatalog für die Potenzialerhebung für Freiflächen-Photovoltaikanlagen. URL: <https://bit.ly/33uyUfm>, geprüft am 31.01.2022.
- LUBW (2022): Erneuerbare Energien. Energieatlas. Solarenergie in Baden-Württemberg. URL: <https://www.energieatlas-bw.de/sonne>, zuletzt geprüft am 08.03.2022.
- MÖNKING, S. S.; KLAPP, C.; ABEL, H.; THEUVSEN, L. (2010): Überarbeitung des Getreide- und Vieheinheitenschlüssels. Endbericht zum Forschungsprojekt 06HS030. Göttingen. URL: <https://bit.ly/34TR2fF>, geprüft am 07.06.2021.
- NITSCH, J.; MAGOSCH, M. (2021): Baden-Württemberg klimaneutral 2040: Erforderlicher Ausbau der erneuerbaren Energien. URL: bit.ly/3sNYepc, geprüft am 18.02.2022.
- PIETRONI, A.; FERNAHI, A.; PEREZ LINKENHEIL, C.; NIGGEMAIER, M., HUNEKE, F. (2017): Klimaschutz durch Kohleausstieg. URL: bit.ly/3rSPZZG, zuletzt geprüft am 27.01.2022.
- PRIESACK, E. (2006): Expert-N Dokumentation der Modellbibliothek. Zugl.: Göttingen, Univ., Habil.-Schr., 2006. München: Hieronymus (FAM-Bericht, 60).
- REGIONALVERBAND HEILBRONN-FRANKEN (2020): Teilfortschreibung Fotovoltaik des Regionalplans. URL: bit.ly/3rOT50J, geprüft am 31.01.2022.
- SCHINDELE, S. (2021): Feldfrüchte und Strom von Agrarflächen: Was ist Agri-Photovoltaik und was kann sie leisten? In: *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society* 30 (2), S. 87–95. DOI: 10.14512/gaia.30.2.6.
- 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. In: *Applied Energy* 265, S. 114737. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.114737.
- SCHÖNHART, M.; SCHMID, E.; SCHNEIDER, U. A. (2011): CropRota – A crop rotation model to support integrated land use assessments. In: *European Journal of Agronomy* 34 (4), S. 263–277. DOI: 10.1016/j.eja.2011.02.004.
- SPONAGEL, C.; BENDEL, D.; ANGENENDT, E.; WEBER, T. K. D.; GAYLER, S.; STRECK, T.; BAHR, E. (2022): Integrated assessment of regional approaches for biodiversity offsets in urban-rural areas – a future based case study from Germany using arable land as an example. In: *Land Use Policy* 117, S. 106085. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2022.106085>.
- STEIDLE, T. (2021): Persönliche Email Korrespondenz mit Thomas Steidle, KEA Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg GmbH am 03.11.2021.
- TANG, Y.; MA, X.; LI, M.; WANG, Y. (2020): The effect of temperature and light on strawberry production in a solar greenhouse. In: *Solar Energy* 195, S. 318–328. DOI: 10.1016/j.solener.2019.11.070.
- TROMMSDORFF, M. (2016): An economic analysis of agrophotovoltaics: Opportunities, risks and strategies towards a more efficient land use. URL: bit.ly/3BwPc3L, geprüft am 28.01.2022.
- TROMMSDORFF, M.; GRUBER, S.; KEINATH, T.; HOPF, M.; HERMANN, C.; SCHÖNBERGER, F. et al. (2020): Agri-Photovoltaik: Chance für Landwirtschaft und Energiewende. URL: <https://bit.ly/3uQmytb>, geprüft am 31.01.2022.
- UBA (2021): Indikator: Erneuerbare Energien. Umweltbundesamt. URL: <https://bit.ly/3LFFJ11Q>, geprüft am 27.01.2022.
- ZHANG, H.; FLOTTMANN, S. (2015): Source-sink manipulation in canola (*Brassica napus* L.) indicates that yield is source limited. In: *Building Productive, Diverse and Sustainable Landscapes, 17th* URL: bit.ly/3uUGcnG, geprüft am 31.01.2022.