

NACHHALTIGE LANDNUTZUNG

DANK DOPPELERNTE

EINE MEHRDIMENSIONALE POLITIKANALYSE DER AGRI-PHOTOVOLTAIK-DIFFUSION IN DEUTSCHLAND

DISSERTATION

zur Erlangung des Doktorgrades
der Wirtschafts- und Sozialwissenschaftlichen Fakultät
der Eberhard Karls Universität Tübingen

vorgelegt von
Stephan Schindele, MBA und Diplom-Betriebswirt (FH)

Tübingen, 2023

1. Betreuer: Prof. Dr. Josef Schmid
2. Betreuer: Prof. Dr. Daniel Buhr

Tag der mündlichen Prüfung 21.07.2023

Dekan: Prof. Dr. Ansgar Thiel

1. Gutachter: Prof. Dr. Josef Schmid
2. Gutachter: Prof. Dr. Daniel Buhr

In Dankbarkeit für meine Familie.

Für Erika und Reinhold.

Für Jil und unsere Kinder.

In Erinnerung an meine Mutter und an meine
Freunde Steffen und Thomas. Ihr seid zu früh
von uns gegangen. Ich vermisse euch.

DANKSAGUNG

Diese Dissertation wurde ermöglicht, weil mehrere Personen mich fachlich, menschlich, finanziell und beständig unterstützten. Ich möchte diesen Personen meinen tiefen Dank aussprechen, sie namentlich nennen und würdigen.

Prof. Dr. Josef Schmid (Dekan und Erstgutachter) und **Prof. Dr. Daniel Buhr** (Zweitgutachter), Fach Politikwissenschaften: für ihr Vertrauen, ihre Geduld und berechtigte Kritik sowie durchweg ausgezeichnete Betreuung.

Prof. Dr. Adolf Goetzberger, **Prof. Dr. Eicke R. Weber** und **Prof. Dr. Andreas Bett**, Fach Photovoltaik: für den Ursprung der „Doppelernte-Idee“ (1981), dass sie nie aufgehört haben, an die Idee und an mich zu glauben. Sie haben mich gefördert und waren mir exzellente Mentoren in der Forschung und der Energiewirtschaft. Ich danke auch all meinen Kolleg:innen, die meine Arbeit am Fraunhofer ISE unterstützt haben, insbesondere **Georg Bopp**, **Tabea Obergfell**, **Dr. Harry Wirth**, **Boris Farnung**, **Alexander Schies**, **Johannes Wüllner**, **Max Trommsdorff** und **Andreas Steinhüser**.

Prof. Dr. PD Petra Högy, **Dr. Sabine Zikeli** und **Prof. Dr. Iris Lewandowski**, Fach Agrarwissenschaften: für eure Aufgeschlossenheit, euer außerordentliches Engagement und für die Einblicke in die Landwirtschaft, die ihr mir ermöglicht habt.

Dr. Steffen Jenner^(†) und **Dr. Arndt Feuerbacher** für eure Inspiration, für unsere lehrreichen Gespräche und unsere Freundschaft.

Dr. Benedikt Ortmann, **Stefanie Wimmer**, **Philipp Wüst** und **Edgar Gimbel** für euren Mut, die Agri-PV (und mich) aus der Forschung in den Markt zu holen.

Thomas Schmid^(†) und **Florian Reyer** sowie der gesamten Hofgemeinschaft Heggelbach für euer Vertrauen, euer Engagement und euren Beitrag für eine besser Welt. Ihr seid echte Pioniere!

Der **Innovationsgruppe APV-RESOLA** für unsere sehr erfolgreiche Zusammenarbeit.

Dem **Projektbeirat zur Innovationsgruppe APV-RESOLA** unter dem Vorsitz von **Hans-Josef Fell** für die Anregungen, Diskussionen und Expertise, die Sie in das APV-RESOLA-Projekt und für meine Dissertation bereitgestellt haben.

Allen **Interviewpartner:innen** und **Teilnehmenden an Fachgesprächen** für ihre Zeit und Einschätzungen.

Dr. Jochen Luhmann für die stete Begleitung, ihre vielen Hinweise und Verbesserungsvorschläge an einigen inhaltlichen Stellen.

Christian Bodensteiner, Projektträger Jülich (PTJ) und dem **Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)** für die Förderung von inter- und transdisziplinären Innovationsgruppen für ein Nachhaltiges Landmanagement und hierin das APV-RESOLA-Projekt sowie **Dr. Susanne Schön** von **Inter3** und **Prof. Dr. Klaus Müller** vom **Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF)** für ihre wissenschaftlichen Begleitvorgaben.

Erika und **Reinhold**, dafür, dass ihr immer und wirklich immer für mich da seid.

Zu guter Letzt meiner lieben Frau **Jil**, dass Du mir den Rücken freigehalten hast. Für Deine Geduld, Dein Mitgefühl und Deine Liebe. Ich danke meinen Kindern **Yael, Noam** und **Neema** für all die schönen Stunden, die ich mit euch verbringen darf. Euer Lächeln hat mich immer wieder aufs Neue ermutigt, weiter an meiner Promotion zu arbeiten. Euch gehört die Zukunft.

Danksagung für finanzielle Unterstützung

Diese Dissertation und die darin enthaltenen Publikationen wurden im Rahmen des APV-RESOLA-Projektes erarbeitet und durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) Deutschland gefördert (Förderkennzeichen: 033L098AN).

Zusammenfassung

Seit 2015 erfährt die Agri-Photovoltaik (Agri-PV) vermehrt globale Aufmerksamkeit in der Wissenschaft, Land- und Energiewirtschaft. In der überwiegenden Anzahl an wissenschaftlichen Publikationen zum Thema wird sich mit pflanzenphysiologischen und technischen Fragestellungen beschäftigt. Nur wenige Studien behandeln wirtschaftspolitische Aspekte dieser noch jungen Innovation. Die vorgelegte kumulative Dissertation wurde im Rahmen des inter- und transdisziplinären „APV-RESOLA“-Projekts umgesetzt. Im Arbeitsschwerpunkt „Politik und Ökonomie“ wurden für den Zeitraum 01.03.2015 bis 30.06.2022 gesetzliche Rahmenbedingungen, Verantwortungen und Prozesse als Ist-Zustand festgehalten, die für eine Agri-PV-Diffusion in Deutschland relevant sind. Hierzu wurde als Fallstudie im Jahr 2016 eine Agri-PV-Forschungsanlage in Süddeutschland installiert sowie als Begleitforschung eine Politikfeld- und Mehr-Ebenen-Policy-Analyse durchgeführt. Anschließend wurden für die Bewertung, ob und inwiefern eine Agri-PV-Diffusion in Deutschland unterstützt werden sollte und mit welchen Markteinführungsbarrieren sich die Agri-PV konfrontiert sieht, Experteninterviews und Gruppenfachgespräche durchgeführt. Aus diesen Ergebnissen und in Zusammenhang mit einer umfangreichen Literaturrecherche wurden Annahmen zum Agri-PV-Innovationsprozess und den hierfür notwendigen Anpassungen des ordnungspolitischen Rahmens sowie Ressortzuschnitts festgelegt. Für den Innovationsschritt aus der APV-RESOLA-Fallstudie hin zur Übertragung der Forschungsergebnisse in den nationalen Kontext wurde in einem trans- und interdisziplinären Konsortium eine DIN SPEC zu Agri-PV erarbeitet. Die DIN SPEC 91434 ist eine qualitätssichernde Maßnahme zur Agri-PV-Markteinführung. Sie liefert einen Standard für landwirtschaftliche Anforderungen im Agri-PV-System, ermöglichte die Abgrenzung zu herkömmlichen Photovoltaik-Freiflächenanlagen (PV-FFA), dient der Vermeidung von Pseudo-Agri-PV-Anlagen und wurde mittlerweile in mehreren Gesetzgebungen in Deutschland verankert. Abschließend wurden im Mai 2021 die Agri-PV-Diffusion und deren Auswirkungen auf den absoluten und täglichen Agrarflächenerhalt in Deutschland bis Jahresende 2050 simuliert, indem der Ausbau von PV-FFA teilweise durch Agri-PV-Anlagen substituiert wird.

Die Agri-PV ist ein trans- und interdisziplinäres Querschnittsthema. In ihrem Innovationsprozess tangiert die Agri-PV seit Veröffentlichung der Idee vor über 40 Jahren durch Adolf Goetzberger und Armin Zastrow (Goetzberger und Zastrow 1981) mehrere Kompetenzfelder. Im Zeitverlauf und durch die Ontogenese mehrerer Reifegrade im

Innovationsprozess sind zu unterschiedlichen Zeitpunkten verschiedene Ressorts relevant und insbesondere in der Markteintrittsphase nimmt die Anzahl der Akteure, die zur Koordination einer „Agri-PV-Markteinführung aus einem Guss“ notwendig sind, stark zu. Der sich aus dieser Dynamik ableitende Koordinationsaufwand, die Kompetenzkonflikte und die Kompromissfindung – teils auf unterschiedlichen Politikebenen – stützen am Beispiel des Innovationsprozesses der Agri-PV in Deutschland die Theorien der „negativen Koordination“ und „Politikverflechtung“ von Fritz W. Scharpf (Scharpf 1993) sowie das „Ambiguity-Conflict Model“ von Richard E. Matland (Matland 1995). Für die Ermittlung der Innovatoren und Frühen Übernehmer der Agri-PV-Innovation im Agrarsektor wurde die Diffusionstheorie von Everett Rogers herangezogen (Rogers 2003).

Für die Politikanalyse zur Agri-PV-Diffusion wurden die drei Politik-Dimensionen Polity, Policy und Politics herangezogen. In der Analyse der Polity-Dimension wurden für die Beantwortung der scheinbar trivialen Fragen, „Welche bundesstaatlichen Ressorts sind durch das Querschnittsthema Agri-PV betroffen und welches ist federführend für eine Markteinführung politisch verantwortlich?“, die drei Grundformen horizontaler Koordination (Konzentration, Integration und Kooperation) herangezogen (Buhr 2010, S. 196) und auf die Regierungen Kabinett Merkel III und IV sowie Scholz I angewandt. Bei der übergeordneten Umfeldanalyse werden unter anderem theoretische Grundlagen aus der Ressourcenökonomie berücksichtigt. Für die Policy- und Politics-Analyse wurden bestehende Gesetzgebungen auf innovationshemmende Kriterien geprüft, die ideologischen Distanzen zwischen Akteuren hinsichtlich der Agri-PV-Markteinführung evaluiert und die Kompromissqualität im Verhandlungssystem anhand von Fachgesprächen, Experteninterviews, Auswertungen von Verbändeanhörungen und Konsultationen im Gesetzgebungsprozess ermittelt. Die Ergebnisse dieser Forschungsarbeiten brachten mehrere bemerkenswerte Erkenntnisse hervor:

1) In der **Zuständigkeit des Kanzleramts im Politikfeld Nachhaltigkeitspolitik:** Obwohl nach Scharpf in einer zentralistischen Abstimmung (Nachhaltigkeit ist in Deutschland gemäß Dr. Angela Merkel „Chefsache“) die Koordination von politischen Zielen effizienter und effektiver erscheinen sollte, sind die Nachhaltigkeitsziele, den täglichen Siedlungsflächenanstieg bis 2050 auf „Nettonull“ zu reduzieren und gleichzeitig den Ausbau von Photovoltaik-Freiflächenanlagen (PV-FFA) auf Agrarflächen zu fördern, nicht komplementär. Die Umsetzung von PV-FFA ist nicht durch die Verfügbarkeit von Agrarflächen eingeschränkt, sondern vielmehr durch die europäischen und bundesstaatlichen Reduktionsziele des täglichen Siedlungsflächenanstiegs.

2) In der **Zuständigkeit des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) und der Länder im Politikfeld Baupolitik**: Damit eine simultane, multifunktionale Landnutzung zur Erzeugung von Nahrungsmitteln und Solarstrom auf einer Agrarfläche baurechtlich ermöglicht und statistisch erfasst werden kann, müsste im Baugesetzbuch die Baunutzungsverordnung angepasst und die Flächenkategorie „landwirtschaftliche Nutzfläche mit integrierter Solarstromerzeugung“ geschaffen werden.

3) In der **Zuständigkeit des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) im Politikfeld Agrarpolitik**: Die Direktzahlungsdurchführungsverordnung (DirektZahldurchfV) kennt bis dato nur mono-funktionale Landnutzung und schließt die Beihilfefähigkeit der landwirtschaftlichen Tätigkeit in Verbindung mit Agri-PV für Zahlungen aus der gemeinsamen europäischen Agrarpolitik (EU-GAP) aus. Diese Restriktion verstößt gegen EU-Richtlinien und verkennt die Chance der multi-funktionalen Landnutzung. Politisches Lernen in Verbindung mit einer evidenzbasierten Gesetzesanpassung, die Minimalanforderungen an die landwirtschaftliche Tätigkeit im Zusammenhang mit Agri-PV stellt, sind Lösungen für diese Agri-PV-Markteintrittsbarriere. Die Ausarbeitung des Agri-PV-Qualitätsstandards DIN SPEC 91434, der auch in der Politikanpassung EU-GAP-Direktzahlungen-Verordnung (GAPDZV) referenziert wird, ist ein erheblicher Beitrag aus den vorliegenden Forschungsarbeiten zur Agri-PV-Markteinführung, weil Ambiguitäten zur Agri-PV-Projektumsetzung reduziert werden konnten und der Koordinationsaufwand im Gesetzgebungsprozess wesentlich verringert wird. Für Landwirte ist die EU-GAP-Beihilfefähigkeit eine Grundvoraussetzung bei der Agri-PV-Umsetzung. Darüber hinaus sollten Landwirte aus der 2. Säule der EU-GAP einen Anreiz erhalten, wenn sie ihre Agrarflächen für die Agri-PV-Installation und die damit einhergehenden positiven Klimaschutz- und Gemeinwohlnutzen zur Verfügung stellen. Der nationale GAP-Strategieplan sollte daher die landwirtschaftliche Tätigkeit in der Agri-PV-Landnutzung mittels Öko-Regelung (engl. „Eco-Schemes“) zusätzlich fördern.

4) In der **Zuständigkeit des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) im Politikfeld Energiepolitik**: Damit für die Anpassung der Landwirtschaft an den Klimawandel und zur Dekarbonisierung des Nahrungsmittelsystems ausreichend private Investitionen bereitgestellt werden, sollten durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) Fördermittel zur Agri-PV-Markteinführung bereitgestellt werden. Die bisherige

Innovationsausschreibungsverordnung für besondere Solaranlagen verfügt über ein zu kleines Volumen, zu geringe Projektgrößen, zu komplexe Auflagen wie die Anlagenkombination, ist nur einmalig vorgesehen und bietet somit in Deutschland keine Investitionsanreize in Technologien, die in anderen internationalen Märkten bereits im großen Umfang und tausendfach gefördert und umgesetzt werden. Der Aspekt, dass die stromseitigen Vergütungen über den Projektverlauf von 20 Jahren in Abhängigkeit der jährlichen landwirtschaftlichen Erträge gestellt werden, ist zwar normativ wünschenswert, verkennt jedoch die Realitäten in der landwirtschaftlichen Praxis und der Finanzierung von Solarkraftwerken. Finanzierungsanbieter und Investoren in die Agri-PV müssten das Risiko des Landwirts auf den Agrarertrag, bspw. durch Todesfall, Krankheit oder sonstige Unwägbarkeiten wie der Klimawandel, Insektenbefall und Trockenheit, mittragen und geringere, unplanbare Erlösausfälle in ihren Renditeerwartungen miteinkalkulieren. Dies führt zu wesentlich höheren Finanzierungskosten und macht die Agri-PV weniger wettbewerbsfähig oder eine sogenannte „Bankability“ ist überhaupt nicht möglich. Die Agri-PV-Markteinführung scheitert an dieser Stelle an der Übersteuerung und dem politischen Versuch, jegliches Risiko von Mitnahmeeffekten und Marktineffizienzen in der kritischen Phase der Markteinführung auszumerzen.

5) In der **Zuständigkeit der Länder, Regionalplanung und Gemeinden für Qualitätssicherung und Bauleitplanung**: Damit im Genehmigungsprozess eine hohe Akzeptabilität für das Agri-PV-Vorhaben in der Bevölkerung und Politik gewährleistet werden kann, müssen im Aufstellungsbeschluss der Gemeinde dieselben Minimalanforderungen an die landwirtschaftliche Tätigkeit gestellt sein, die für die EU-GAP-Beihilfefähigkeit in Betracht gezogen werden. Nur Agri-PV-Vorhaben, deren dauerhafte und landwirtschaftliche Machbarkeit durch einen Sachverständigen bestätigt wurde, sollten genehmigungs- und beihilfefähig sein. Die Länder sollten für die Ausweisung von geeigneten Agrarflächen zur Agri-PV-Umsetzung in der Regionalplanung Vorrangflächen ausweisen und durch die Veröffentlichung von Handlungsleitfäden die lokalen Landmanager:innen in der unteren Baurechtsbehörde im Agri-PV-Genehmigungsprozess unterstützen.

6) Die **Ergebnisse der Wirkungsanalyse zur Agri-PV-Markteinführung** zeigen, dass bei einem gesamten PV-Zubau von 300 GWp bis 2050 81,3 GWp PV-FFA-Leistung durch Agri-PV-Zubau ersetzt werden könnte, wodurch knapp 60.000 Hektar für die landwirtschaftliche Tätigkeit erhalten blieben. Sollte der PV-Zubau, wie aktuell im EEG 2023 vorgesehen, auf 475 GWp bis 2045 ansteigen und 50 % dieser PV-Leistung als PV-FFA auf

Agrarflächen umgesetzt werden, würden 208.000 Hektar bzw. durchschnittlich 23,73 Hektar – umgerechnet 33 Fußballplätze – Agrarfläche am Tag für 24 aufeinanderfolgende Jahre durch den PV-FFA-Ausbau beansprucht. Das Potential, Agrarflächen für die Nahrungsmittelproduktion zu erhalten, indem Agri-PV gefördert wird, steigt mit den wachsenden Annahmen zum weiteren PV-FFA-Ausbau bis 2045 bzw. 2050.

7) Die **Federführung für die Einhaltung des Nachhaltigkeitsziels 11.1.a „Reduktion des täglichen Siedlungsflächenanstiegs“** obliegt derzeit dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV). Die wesentlichen Treiber und Betroffenen des täglichen Siedlungsflächenanstiegs sind jedoch im BMWSB, BMWK und BMEL zu verorten. Das BMUV ist somit auf die Koordination von Regierungshandeln angewiesen und muss den Agrarflächenerhalt managen, ohne mit den Aufgaben der anderen Ressorts in Konkurrenz zu treten. Des Weiteren wird die Zielvorgabe zur Reduktion des Siedlungsflächenanstiegs durch das Subsidiaritätsprinzip im Föderalismus erschwert. Denn die politische Entscheidung, wie eine Fläche beansprucht wird, obliegt den Kommunen und regionalen Verwaltungen, die sich wiederum an die Vorgaben der Landesentwicklungspläne und Regionalpläne halten sollten, aber gleichzeitig im innerdeutschen Wettbewerb zueinanderstehen. Die Dysfunktionalität des Steuerungswesens für eine nachhaltige Landnutzung lässt sich aus einem politischen Akteurs- und Interessensgemenge auf Bundesebene und dem Spannungsfeld im Mehr-Ebenen-System erklären und stützt die Konzepte der negativen Koordination und Politikverflechtung von Fritz W. Scharpf.

Die Wahrscheinlichkeit einer verbesserten Koordination von Nachhaltigem Landmanagement und einer Agri-PV-Markteinführung hat sich unter der neuen Bundesregierung (Kabinett Scholz) im Vergleich zur Vorgängerregierung (Kabinett Merkel IV) erhöht. Drei Gründe sprechen dafür: 1) Zum einen ist im Koalitionsvertrag „Mehr Fortschritt wagen“ die Agri-PV explizit vermerkt. Die drei Koalitionspartner setzen sich zum Ziel, innovative Solarenergien zu stärken und die Ko-Nutzung zu ermöglichen. 2) Zum anderen konnten die Nachteile eines politisch geprägten Ministerialmarkts mit einer kompetitiven Heterarchie (Buhr 2010, S. 198) dadurch verringert werden, indem eine zentrale, parteibezogene Hierarchie hergestellt wurde. Drei von vier für Nachhaltiges Landmanagement und Agri-PV-Markteinführung relevante Ressorts, namentlich das BMUV, BMEL und BMWK, sind in dieser Legislaturperiode durch Minister:innen der Grünen-Partei geführt. Durch diese Kompetenzkonzentration der Querschnittsthemen Umwelt- und Klimaschutz, nachhaltige Landwirtschaft und Kreislaufwirtschaft werden die Kohärenz und Kohäsion der Akteure gestärkt, die ideologische

Distanz ist geringer, das Agenda Setting ist vereinfacht und die Kompromissbereitschaft erhöht. Das vierte wichtige Ressort für Nachhaltiges Landmanagement und Agri-PV- Markteinführung ist das neugegründete BMWSB unter der Federführung der SPD. Die Koordination mit dem BMWSB sollte aufgrund des Ressortzuschnitts erleichtert sein, weil die Angelegenheiten des Inneren (siehe Ressortzuschnitt der Vorgängerregierung) das Agenda Setting nicht mehr beeinflussen und ausschließlich Baupolitik verhandelt werden muss. In der Verhandlungsmasse werden die drei Ministerien BMEL, BMUV und BMWK mit hoher Wahrscheinlichkeit gewichtiger sein als das BMWSB, sodass dieses Ressort mehr ein ausführendes als bestimmendes Ressort sein dürfte. Weil die Agri-PV mittlerweile einen hohen „Solution Readiness Level“ erreicht hat, wird die Bedeutung des BMBF im Fortschreiten des Agri-PV-Innovationsprozesses schwinden. Die Agri-PV hat in ihrer technischen Ontogenese den Sprung von einer Invention zur Innovation vollzogen. Für die Diffusion der Agri-PV und die damit zusammenhängenden Auswirkungen auf den Siedlungsflächenanstieg kann nicht das BMBF zuständig sein. 3) Zuletzt könnte sich die Politikverflechtung im Mehr-Ebenen-System entwirren, indem sich die Kompetenzkonzentrationen im Bereich Umwelt- und Klimaschutz sowie Ernährung und Kreislaufwirtschaft auf die Bundesländer mit grüner Regierungsbeteiligung spiegeln, bspw. in Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz, wo durch die jeweiligen Ministerien für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft die ersten Agri-PV-Forschungsanlagen gefördert wurden und durch die Ausarbeitung von Handlungsleitfäden für die Regionalverbände und Kommunen die Umsetzung von Agri-PV-Anlagen unterstützt wird.

Aus dem Promotionsverfahren gingen insgesamt vierzehn Publikationen hervor. Neun wissenschaftliche Artikel wurden in begutachteten, international anerkannten Fachzeitschriften publiziert. Weitere fünf Publikationen wurden zwar nicht durch wissenschaftliche Fachzeitschriften veröffentlicht, sind aber gleichwohl von hoher wissenschaftlicher Bedeutung und werden Auswirkung auf die Agri-PV-Markteinführung in Deutschland und der EU haben, u. a. ein DIN SPEC Dokument, ein Best Practice Guide, ein Leitfaden, eine Gebrauchsmusteranmeldung sowie Kapitelbeiträge in einem Buch, das als Meta-Analyse aus der Begleitforschung der Fördermaßnahme „Innovationsgruppen für ein Nachhaltiges Landmanagement“ mit dem Titel „Nachhaltig Landnutzung managen“ hervorging.

Vier wissenschaftliche Artikel, die in den Jahren 2020 und 2021 in Fachzeitschriften publiziert wurden, sind Leistungen aus den politikwissenschaftlichen Forschungsarbeiten im APV-RESOLA-Projekt und **bieten den roten Faden für die vorliegende kumulative Dissertation**. Zwei dieser Fachartikel wurden aus alleiniger Autorenschaft, eine als Hauptautor

mit Co-Autoren und eine weitere durch eine Co-Autorenschaft erarbeitet. Die Ergebnisse sind anschlussfähig an bestehende Forschungen in den Bereichen Agrar-, Energie- und Nachhaltigkeitspolitik und erlauben gleichzeitig neue Perspektiven auf die Genehmigungs- und Beihilfefähigkeit der Agri-PV-Diffusion in Deutschland. Elf der vierzehn Publikationen wurden durch Co-Autorenbeiträge unterstützt, wodurch der trans- und interdisziplinäre Charakter der Agri-PV als Versuchsgegenstand und des APV-RESOLA-Projektes untermauert wird.

Die **Forschungsleistungen und das APV-RESOLA-Projekt erhielten mehrere Auszeichnungen**: 2016, die Auszeichnung als Ort im Land der Ideen, und 2017, 1. Platz für das Projektteam „Fruitvoltaic“ im Ideenwettbewerb „FormFollowsFuture“, Fraunhofer-Symposium. Zwischenzeitlich wurde die „Fruitvoltaic“-Idee in der Praxis umgesetzt und erhielt 2021 die Auszeichnung „The Smarter eAward“ in der Kategorie „Outstanding Projects“ für das Projekt „Agrivoltaics System Protects Berry Production“ der BayWa r.e.. Im November 2022 wurden Maximilian Trommsdorff (Fraunhofer ISE), Prof. Dr. Petra Högy (Universität Hohenheim) und Stephan Schindele (BayWa r.e. AG) für ihren Beitrag zur Agri-PV-Forschung vom BMBF zur Nominierung des Deutschen Zukunftspreises 2023 vorgeschlagen. Die wissenschaftlichen Publikationen und Auszeichnungen der Promotionsarbeit ermöglichten einen Gastbeitrag des Promovierenden in der Frankfurter Allgemeinen Zeitung (Schindele 2017) sowie hunderte Presseberichte und Interviews in Print-, Radio- und Fernsehen, u. a. ZDF, ARD, SWR, Bayerischer Rundfunk, ARTE, Deutschlandfunk, TopAgrar, Agrarzeitung, DPA, Süddeutsche Zeitung, Spiegel-Online, Tagespiegel und viele mehr.

Die Ergebnisse der Promotionsarbeit sind nachweislich in mehreren politischen Stellungnahmen von Agrar- und Energieverbänden übernommen worden und haben die Gesetzgebung zur Agri-PV-Markteinführung in Deutschland wesentlich mitbeeinflusst, u. a. die Novelle des Erneuerbare-Energien-Gesetzes 2021 sowie die Überarbeitung der Direktzahldurchführungsverordnung 2021. Die Forschungsergebnisse wurden auf vielen national und international anerkannten Konferenzen vorgestellt und präsentiert, u. a. auf der PV-SEC in Brüssel (2018), Green Energy Expo in Daegu Süd-Korea (2019), der International Agrivoltaic Conference (2020 und 2021) und Intersolar Conference in München (2021 und 2022). Der Doktorand gilt als international anerkannter und führender Wissenschaftler im Forschungsgebiet der Agri-PV. Das APV-RESOLA-Projekt unter der Leitung von Stephan Schindele und seine Promotionsergebnisse haben dazu beigetragen, ein neues wissenschaftliches Fachgebiet – „Die Agri-Photovoltaik“ – zu erschließen. Seine vier

Fachartikel mit Schwerpunkten auf Agri-PV-Definition, Wirtschaftspolitik und Wirkungsanalyse prägen den wissenschaftlichen Diskurs in den Bereichen Nachhaltigkeits-, Klima-, Agrar- und Energiepolitik bis heute. Im August 2022 erhielt Schindele gemeinsam mit Constantin Klyk, International Solar Energy Research Center (ISC) der Universität Konstanz, die Zusage von „The Institution of Engineering and Technology“, ein Buch herauszugeben mit dem Titel „Agri-Photovoltaics. Sustainable Land Use by Double Harvesting. Technical, Ecological, Economical, and Legal Aspects.“. Teile der vorliegenden Dissertationsschrift sollen dadurch einem englischsprachigen Fachpublikum bereitgestellt werden.

Schlagwörter:

Agri-PV, Agri-Photovoltaik, Agrarpolitik, Nachhaltiges Landmanagement, Nachhaltigkeitspolitik, Energiepolitik, Mehrebenen Policy-Analyse, Politikfeldanalyse, Koordination in der Ministerialverwaltung, Politikverflechtung

Inhaltsverzeichnis

Kapitel 1 Entwicklungsgeschichte der Agri-PV in Deutschland und mein Promotionsvorhaben	1
1.1 Von der Idee zur Invention: 1981 bis 2019	1
1.2 Von der Invention zur Innovation: 2019 bis 2021.....	15
1.3 Exkurs: Internationale Agri-PV-Marktentwicklung von 2004 bis 2021	17
1.4 Von der Innovation zur Diffusion: ab 2022	23
1.5 Mein Promotionsvorhaben im APV-RESOLA-Projekt	24
1.5.1 Meine Funktionen und Fragestellungen im APV-RESOLA-Projekt	24
1.5.2 Meine Publikationsübersicht.....	26
1.6 Referenzen	30
Kapitel 2 Literaturübersicht, Umfeldanalyse und theoretische Grundlagen	37
2.1 Agrarpolitik und nachhaltige Landnutzung	37
2.1.1 Gemeinsame Agrarpolitik in der EU	39
2.1.2 Agrarpolitik in Deutschland.....	40
2.1.3 Nachhaltige Landnutzung in Deutschland	44
2.2 Klima- und Energiepolitik	49
2.3 Koordination von Regierungshandeln in Deutschland – Theorie	54
2.3.1 Theoretische Grundlagen Teil 1: Negative Koordination und Politikverflechtung von Fritz W. Scharpf	57
2.3.2 Theoretische Grundlagen Teil 2: „Ambiguity-Conflict Model“ in der Policy-Umsetzung von Richard E. Matland	59
2.4 Praxisbeispiel zur Koordination von Regierungshandeln: Nachhaltigkeits- und Agri-PV-Politik in Deutschland.....	65
2.4.1 Nachhaltigkeitspolitik in Deutschland.....	65
2.4.2 Agri-PV-Förderregime Deutschland (Stand: 30.06.2022).....	68
2.5 Referenzen	72

Kapitel 3 Mein Beitrag: Methoden und Daten	79
3.1 Disziplinäre Beiträge.....	79
3.1.1 Methodik, Datenerhebung, -Analyse und -Auswertung.....	79
3.1.2 Der rote Faden in meinen Publikationen.....	82
3.1.3 Übersichtstabelle Methoden und Daten meiner Publikationen.....	88
3.2 Interdisziplinäre Beiträge.....	90
3.2.1 Beiträge zu nicht politikwissenschaftlichen Publikationen.....	90
3.2.2 Beiträge zu nicht wissenschaftlichen Veröffentlichungen mit wissenschaftlicher Bedeutung.....	92
3.3 Beiträge aus weiteren nationalen und internationalen Agri-PV-Projekten am Fraunhofer ISE bis 2020.....	96
3.3.1 Beiträge zu weiteren Agri-PV-Projekten in Deutschland.....	96
3.3.2 Beiträge zu internationalen Agri-PV-Projekten.....	97
3.4 Mein Beitrag im Agri-PV-Innovationsprozess in Deutschland – der Versuch einer Selbstreflexion.....	99
3.5 Referenzen.....	103
Kapitel 4 Ergebnisse	106
4.1 Polity-Dimension: Welche bundesstaatlichen Ressorts sind durch das Querschnittsthema Agri-PV betroffen und welches ist federführend für eine Markteinführung politisch verantwortlich?.....	106
4.2 Politics-Dimension: Welche ideologischen Distanzen bestehen zwischen den Akteuren hinsichtlich der Agri-PV-Markteinführung? Positionen von Ministerien, Fraktionen, Parteien und Verbänden im Agri-PV-Abstimmungsprozess.....	111
4.2.1 Parteienanalyse.....	112
4.2.2 Analyse der BnetzA-Konsultation zur InnAusV für besondere Solaranlagen 2021.....	115
4.2.3 Analyse der BMEL-Verbändeanhörung zur Anpassung der Direktzahlungen-Verordnung (GAPDZV).....	119
4.2.4 Analyse der Experteninterviews, Gruppenfachgespräche und diversen Diskussionsrunden.....	121
4.2.5 Agenda Setting und Spin-Doctoring: Ergänzungen zur Agri-PV-Markteinführung.....	128
4.3 Policy-Dimension: Welche gesetzlichen Rahmenbedingungen im Mehr-Ebenen- System stehen der Agri-PV-Markteinführung innovationshemmend entgegen?.....	133

4.4 Politics- und Policy-Dimension: Wie müssten sich der bundesstaatliche Koordinationsprozess und gesetzliche Rahmenbedingungen ändern, damit die Agri-PV-Markteinführung gelingen kann?.....	138
4.4.1 Politics: Änderung im bundesstaatlichen Koordinationsprozess der Agri-PV-Markteinführung.....	138
4.4.2 Policy: Änderung der gesetzlichen Rahmenbedingungen in den Transformationsbereichen zur Agri-PV-Markteinführung.....	142
4.5 Policy-Dimension: Welche Auswirkungen könnte eine Agri-PV-Diffusion auf den absoluten und täglichen Agrarflächenerhalt in Deutschland bis Jahresende 2050 haben?	151
4.5.1 Szenario 1: Inanspruchnahme Agrarflächen durch PV in Deutschland bis 2045 ohne Agri-PV.....	152
4.5.2 Szenario 2: Inanspruchnahme Agrarflächen durch PV in Deutschland bis 2045 mit Agri-PV.....	154
4.6 Referenzen.....	156
Kapitel 5 Schlussfolgerungen	159
5.1 Gesamtfazit und Politikempfehlungen	159
5.1.1 Gesamtfazit.....	159
5.1.2 Politikempfehlung.....	165
5.2 Herausforderungen, Unzulänglichkeiten und weiterführende Forschungsbedarfe	177
5.2.1 Herausforderungen in meinen Forschungsarbeiten	177
5.2.2 Unzulänglichkeiten in meinen Forschungsarbeiten.....	179
5.2.3 Empfehlungen zu weiterführenden Forschungsarbeiten.....	181
5.3 Referenzen.....	187
Appendix A: Publikation „Applied Energy”	189
Appendix B: Publikation „GAiA Teil 1 von 2”.....	209
Appendix C: Publikation „GAiA Teil 2 von 2”	219
Appendix D: Publikation “Agricultural Systems”	230
Literaturverzeichnis	243
Selbstständigkeitserklärung	281

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1: Übersichtstabelle der wissenschaftlichen Artikel mit Beiträgen von Schindele; veröffentlicht in begutachteten, international anerkannten Fachzeitschriften (eigene Darstellung).....	27
Tabelle 1-2: Übersichtstabelle der Veröffentlichungen mit Beiträgen von Schindele in nicht wissenschaftlichen Fachzeitschriften, jedoch mit wissenschaftlicher Bedeutung und Auswirkung auf die Agri-PV-Markteinführung in Deutschland und der EU (eigene Darstellung)	29
Tabelle 2-1: Bausteine der EU-GAP-Förderung aus der 1. Säule in Deutschland zwischen 2014 und 2020 (Quellen: DBV, 2019 und BMEL, 2019; eigene Darstellung).....	41
Tabelle 2-2: Bausteine der EU-GAP-Förderung inkl. Kofinanzierung aus der 2. Säule in Deutschland zwischen 2014 und 2020 (Quellen: DBV, 2019 und BMEL, 2019; eigene Darstellung).....	41
Tabelle 2-3: Ausgabenbereiche der EU-GAP-Förderung inkl. Kofinanzierung aus der 2. Säule in Deutschland zwischen 2014 und 2020 (Quelle: DBV, 2019; eigene Darstellung).....	42
Tabelle 2-4: Auswirkung der Agri-PV-Diffusion auf die Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie 2021 (Quelle: Die Bundesregierung, 2020b; eigene Darstellung).....	67
Tabelle 3-1: Publikationen aus dem Promotionsverfahren im Zusammenhang der Forschungsfragen und der Politikdimensionen (eigene Darstellung).....	87
Tabelle 3-2: Übersicht Zitierungen und Lesungen der vier Publikationen aus dem Promotionsverfahren (Stand: 05.08.2023; Quelle: Research Gate).....	88
Tabelle 3-3: Übersichtstabelle Methoden und Daten der Publikationen aus dem Promotionsverfahren (eigene Darstellung).....	89
Tabelle 3-4: Übersicht Zitierungen und Lesungen der fünf wissenschaftlichen, interdisziplinären, jedoch nicht politikwissenschaftlichen Beiträge (Stand: 05.08.2023, Quelle: Research Gate).....	92
Tabelle 4-1: Übersichtstabelle Mehr-Ebenen-Policy-Analyse der Agri-PV-Markteinführung in Deutschland (eigene Darstellung).....	135
Tabelle 4-2: Bundesstaatlicher Ressortzuschnitt im Bereich Klimaschutz und die Partezuordnung der Zuständigkeiten zwischen 1998 und 2024 (eigene Darstellung).....	139
Tabelle 5-1: Bodenwertigkeit auf Basis von Hemerobiestufen und unter Einbezug der Bodengefährdungen für verschiedene Landnutzungskategorien (Quelle: (Wunder et al. 2018); eigene Darstellung).....	171

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Erste Agri-PV-Anlage in Europa, Italien, 2007 (Leitner und Czaloun 2018)	18
Abbildung 2-1: Weltweite Veränderung in Prozent (%) von 1961 bis 2018: Landwirtschaftliche Nutzfläche, Ackerland pro Person, Waldfläche, Bevölkerung (Quelle: FAO; eigene Darstellung)	38
Abbildung 2-2: Veränderung in Prozent (%) von 1961 bis 2018: Ackerland pro Person in Deutschland im Vergleich zur EU und weltweit (Quelle: FAO, 2022; eigene Darstellung)	45
Abbildung 2-3: Struktur der Flächennutzung in Deutschland (Quelle: UBA, 2021)	46
Abbildung 2-4: Relevanteste Bodengefährdungen in Deutschland (Quelle: UBA, 2018)	48
Abbildung 2-5: Treibhausgas-Emissionen der EU in % im Jahr 2019 (Quelle: UBA, 2022; eigene Darstellung)	50
Abbildung 2-6: Pro-Person-Treibhausgas-Emissionen ausgewählter EU-Mitgliedstaaten im Jahr 2019 (Quelle: UBA, 2022; eigene Darstellung)	51
Abbildung 2-7: Politik-Umwelt-Matrix von Fritz W. Scharpf, 1972	58
Abbildung 2-8: Ergebnisse Konstellationsanalyse APV-RESOLA zwischen 2015 und 2018 (Quelle: Inter3, Dr. Susanne Schön; Eigene Darstellung)	63
Abbildung 2-9: S-Kurve der Diffusion und Adopterkategorien nach Rogers (Karnowski und Kümpel 2015)	64
Abbildung 3-1: Agri-PV-Innovationsprozess und Publikationen aus dem Promotionsverfahren Schindele (eigene Darstellung)	83
Abbildung 4-1: Agri-PV-Innovationsprozess und politische Verantwortlichkeiten in bundesstaatlichen Ressorts in Deutschland (eigene Darstellung)	109
Abbildung 5-1: PV-integriertes Regenauffangsystem zur saisonalen Wasserspeicherung	184

Abkürzungsverzeichnis

AA	Auswärtiges Amt
AG	Aktiengesellschaft
Agri-PV	Agri-Photovoltaik
AfD	Alternative für Deutschland
AKT	Arbeitskreis Klimatechnologietransfer
APV	Agri-Photovoltaik
ASTGUs	Agricultural Solar Tariff Generation Units
AUKM	Förderangebot für Agrarumwelt- und Klimamaßnahmen
BauGB	Baugesetzbuch
BauNVO	Baunutzungsverordnung
BaWü	Baden-Württemberg
BBV	Bayerischer Bauernverband
BDEW	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft
BfN	Bundesamt für Naturschutz
BioDiv	Biodiversität
BLE	Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung Deutschland
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung Deutschland
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft Deutschland
BMUV/BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz Deutschland
BMWK/BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz Deutschland
BMWSB	Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen Deutschland
BMZ	Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung Deutschland
BNatSchG	Bundesnaturschutzgesetz
BNE	Bundesverband Neue Energiewirtschaft
BNetzA	Bundesnetzagentur Deutschland
BPlan	Bebauungsplan

BRD	Bundesrepublik Deutschland
BRIC	Brasilien, Russland, Indien, China
BRRL	Bodenrahmenrichtlinie der EU
BSW-Solar	Bundesverband Solarwirtschaft
CDU	Christlich Demokratische Union Deutschlands
CSU	Christlich-Soziale Union in Bayern
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
Ct	Cent
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt
DBV	Deutscher Bauernverband
DIN SPEC 91435	DIN SPEC 91434:2021-05 Agri-Photovoltaik-Anlagen – Anforderungen an die landwirtschaftliche Hauptnutzung
DirektZahldurchfV	Verordnung zur Durchführung der Direktzahlungen an Inhaber landwirtschaftlicher Betriebe im Rahmen von Stützungsregelungen der EU-GAP
DLG	Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft
DNS	Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie
€	Euro
ECTS	Europäisches System zur Übertragung und Akkumulierung von Studienleistungen (engl. European Credit Transfer and Accumulation System)
EE	Erneuerbare Energien
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
ELER	Europäische Landwirtschaftsfonds für die Entwicklung des ländlichen Raums
Engl	Englisch
EnWG	Energiewirtschaftsgesetz
EPLR	Entwicklungsprogramm für den ländlichen Raum
EU	Europäische Union
EWS-Schönau	Elektrizitätswerke Schönau
FAO	Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen (engl. Food and Agriculture Organization)
FDB	Fiji Development Bank
FDP	Freie Demokratische Partei

FH	Fachhochschule
FNP	Flächennutzungsplan
FONA	Forschung für die Nachhaltigkeit
Fraunhofer CSET	Fraunhofer Chile Research Center for Solar Energy Technologies FCR-CSET
Fraunhofer ISE	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Frz	Französisch
FuE	Forschung und Entwicklung
GAK	Gemeinschaftsaufgabe Verbesserung der Agrarstruktur und des Küstenschutzes
GAP	Gemeinsame Agrarpolitik der EU
GAPDZV	Verordnung zur Durchführung der GAP-Direktzahlungen
GCF	Green Climate Fund
GGO	Gemeinsame Geschäftsordnung der Bundesministerien Deutschland
GIZ	Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit
GWp	Gigawatt Leistung
Ha	Hektar
HSWT	Hochschule Weihenstephan-Triesdorf
IfP	Institut für Politikwissenschaft der Universität Tübingen
InnAusV	Innovationsausschreibungsverordnung
INRA	Nationales Institut für Agronomieforschung Frankreich (frz. Institut national de la recherche agronomique)
InVeKos	Integriertes Verwaltungs- und Kontrollsystem EU-GAP
IPCC	Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderung (engl. Intergovernmental Panel on Climate Change)
ITAS	Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse KIT
JRC	Gemeinsame Forschungsstelle (engl. Joint Research Centre)
Kat	Kategorie
KAVA	Korean Agrivoltaic Association
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
KOICA	Korea International Cooperation Agency

KPI	Schlüsselindikator (engl. Key Performance Indicator)
KSG	Klimaschutzgesetz
kWp	Kilowatt Leistung
LBO	Landesbauordnung
LuF	Land- und forstwirtschaftliches Betriebsvermögen
m	Meter
MA DOER	Massachusetts Department of Energy and Resources
MAFF JP	Ministerium für Landwirtschaft, Forsten und Fischerei Japan
MAP	Mess- und Auswertungsprogramm
MBA	Master of Business Administration
MdB	Mitglied des Deutschen Bundestags
MinR	Ministerialrat
Mio.	Millionen
MLR	Ministerium für Ernährung, Ländlichen Raum und Verbraucherschutz
MoEP	Mitglied des Europäischen Parlaments (engl. Member of European Parliament)
Mrd.	Milliarden
MS	Mitgliedstaat (der EU)
MUEEF	Ministerium für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten RLP
MWp	Megawatt Leistung
N	Stickstoff (engl. Nitrogen)
NECP	Nationale Energie- und Klimapläne (engl. National Energy and Climate Plan)
NPV	Net Present Value
Nr	Nummer
OPV	Organische Photovoltaik
ÖKVO	Ökokontoverordnung
PBnE	Parlamentarischer Beirat für nachhaltige Entwicklung Deutschland
PV	Photovoltaik
PV-FFA	Photovoltaik-Freiflächenanlage
PPR	Preis-Leistungs-Verhältnis (engl. Price-Performance-Ration)

PTJ	Projektträger Jülich
RESOLA	APV-RESOLA: Agri-Photovoltaik – Ein Beitrag zur ressourceneffizienten Landnutzung
RLP	Rheinland-Pfalz
RVBO	Regionalverband Bodensee-Oberschwaben
SDG	UN-Ziele für nachhaltige Entwicklung (engl. Sustainable Development Goals)
SMART	Solar Massachusetts Renewable Target
SPD	Sozialdemokratische Partei Deutschlands
SPE	Solar Power Europe
SRL	Solution Readiness Level
SuV	Siedlungs- und Verkehrsfläche
TRL	Technology Readiness Level
UBA	Umweltbundesamt
UdK Berlin	Universität der Künste Berlin
UM	Umweltministerium
UN	Vereinte Nationen (engl. United Nations)
UNCSD	Konferenz der Vereinten Nationen über nachhaltige Entwicklung (engl. United Nations Conference on Sustainable Development)
UNFCCC	Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (engl. United Nations Framework Convention on Climate Change)
UNCCD	Übereinkommen der Vereinten Nationen zur Bekämpfung der Wüstenbildung (engl. United Nations Convention to Combat Desertification in those Countries Experiencing Serious Drought and/or Desertification, particularly in Africa)
VDL	Vereinigung Deutscher Landesschafzuchtverbände
WEF	Wasser, Energie, Nahrungsmittel (engl. Water Energy Food)
WKA	Windkraftanlage
ZALF	Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung
ZSW	Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg

Kapitel 1 Entwicklungsgeschichte der Agri-PV in Deutschland und mein Promotionsvorhaben

„Wer bewirkt, dass dort, wo bisher ein Halm wuchs, nunmehr zwei Halme wachsen, der hat mehr für ein Volk geleistet als ein Feldherr, der eine Schlacht gewann.“

Friedrich II. der Große (1712–1786), preußischer König, >>Der alte Fritz<<

Im Folgenden wird die trans- und interdisziplinäre Entwicklungsgeschichte der Agri-Photovoltaik (Agri-PV) in Deutschland von der Idee bis zur Innovation im Zeitraum 1981 bis 2022 festgehalten. Hierbei werden informelle Hintergründe, bedeutsame Akteure, Ereignisse, Netzwerke, erste Projektentwicklungen sowie explizit die Rollen des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme ISE (Fraunhofer ISE) und der meinigen in diesem Innovationsprozess erläutert.

1.1 Von der Idee zur Invention: 1981 bis 2019

Ursprung der Agri-PV-Idee: Kartoffeln unter dem Kollektor, 1981

Im Jahre 1981 wurde in Freiburg im Breisgau von Adolf Goetzberger das Fraunhofer ISE gegründet. Im selben Jahr veröffentlichte dieser gemeinsam mit Zastrow den Fachartikel „Kartoffeln unter dem Kollektor“ (Goetzberger und Zastrow 1981). Darin prognostizierten sie, dass die Herstellungskosten für photoelektrische Systeme konkurrenzfähig werden gegenüber anderen Energiearten. Im Gegensatz zu damaligen Studien, die als eine erste attraktive Anwendung die Gewinnung photoelektrischer Energie auf den Dächern von Einfamilienhäusern in Verbindung mit dem Stromnetz sahen, schlugen die Autoren „photoelektrisch-landwirtschaftliche Farmen“ vor, die auf einer landwirtschaftlichen Nutzfläche durchschnittlicher Größe aufgebaut werden. „Dieser Typ von Solarfarm würde im Allgemeinen nicht direkt mit einem Verbraucher verbunden werden, sondern für das Netz produzieren. So könnte er sich z. B. im Besitz des Energieversorgungsunternehmens befinden und von diesem gewartet werden“ (Goetzberger und Zastrow 1981). Bei einer optimalen

Anordnung der Kollektoren und unter Berücksichtigung der Abstände zwischen den Kollektorreihen sollte eine gleichzeitige Nutzung zur Sonnenenergiegewinnung und zu landwirtschaftlichen Zwecken auf einer Agrarfläche möglich sein. Zastrow war für die Berechnungen und Simulationen des direkten und diffusen Lichts der Sonneneinstrahlung verantwortlich. Goetzberger hatte die Idee der „Doppelernte“ und konzeptionierte die systemische Einbettung seiner Idee unter anderem mit Blick auf Netzintegration, Eigentumsverhältnisse und Wirtschaftlichkeit. Goetzberger erkannte vor über 40 Jahren, dass großflächige, bodennah installierte Photovoltaik (PV)-Freiflächenanlagen (FFA) die günstigste Art der Energieerzeugung werden und somit eine Konkurrenzsituation zwischen Energie- und Agrarproduktion entstehen würde. Er stellte fest, dass wenn Solarkollektoren in gemäßigten klimatischen Zonen aufgestellt werden, das Wachstum von Unkraut unter Kontrolle zu halten ist. Durch eine simultane Nutzung von Agrarflächen und die Ko-Existenz von Pflanzenbau und Solarstromerzeugung würden sogar Synergieeffekte entstehen. Goetzberger und Zastrow erwähnten in ihrem visionären Artikel, dass wenn sowohl das PV-System als auch der Nutzpflanzenanbau „auf einem gegebenen Stück Land für sich allein wirtschaftlich sind, die einzigen zusätzlichen Kosten bei der Kombination beider Nutzungen diejenigen für die Anhebung der Kollektoren auf ein genügend stabiles Gestell sind“. Zum Abschluss machten sich die beiden Wissenschaftler Gedanken, welche Pflanzen unter den Kollektoren angebaut werden könnten oder sollten. Pflanzen, deren Wachstum durch die Verfügbarkeit von Licht begrenzt ist, sollten nicht angebaut werden, bspw. C4-Metabolismus, wie Mais. Roggen, Hafer, Gerste und speziell Zuckerrüben wurden als geeignet identifiziert. „Sehr attraktiv könnte in manchen Gegenden auch die Viehzucht sein, so könnte man Schafe, Wild oder sogar Rinder dort weiden lassen, wenn nur die Kollektorstruktur stabil genug gemacht wird“ (Goetzberger und Zastrow 1981). Dieser visionäre Artikel wurde ins Englische übertragen und 1982 mit dem Titel „On the Coexistence of Solar-Energy Conversion and Plant Cultivation“ im international renommierten Journal „Solar Energy“ publiziert (Goetzberger und Zastrow 1982). Goetzberger leitete das Fraunhofer ISE von 1981 bis 1993. Er behielt sein Arbeitsbüro im Institut und eine enge Verbindung zur Institutsleitung bis ins Jahr 2018. In Telefonaten mit Fördermittelgebern auf Bundesebene, insbesondere mit dem 1986 gegründeten Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), diskutierte er regelmäßig, jedoch stets vergeblich, die Finanzierung eines Pilotvorhabens zur Demonstration und Untersuchung der Doppelernte.

Aufruf aus der Solarbranche: Sun Farming, 2006

Im Jahre 2006 veröffentlichte Goetzberger gemeinsam mit den Solarunternehmern Swanson und Werner, damalige Geschäftsführende der SunPower Corporation mit Hauptsitz in Kalifornien, USA, sowie mit Masafumi Yamaguchi, damals Leiter des Toyota Technological Institute, Department of Materials Science and Engineering, Japan, den Artikel „Energy Farming“ (Goetzberger et al. 2006). „Dieses Papier ist ein Aufruf an die PV-Industrie, sich zusammenzufinden, um diese Vision Wirklichkeit werden zu lassen.“ Die Autoren machen darin den Vorschlag, dass jährlich 1 % der rund 300 Milliarden US-Dollar, die Industrieländer in der Europäischen Union (EU), den USA und Japan an ihre Landwirte als Subvention zahlen, für die Umsetzung von „SunFarming“-Projekten verwendet wird. Vorteile, die sich aus einem solchen SunFarming-Förderprogramm für die Land- und Solarwirtschaft ergeben, wurden wie folgt zusammengefasst: Landwirte können durch den Ausbau von erneuerbaren Energien finanziell profitieren und die ländliche Entwicklung wird gefördert; der Klimaschutz und die Einhaltung der Ziele des Kyoto-Protokolls werden gestärkt; die Nahrungsmittelproduktion bleibt erhalten und Negativwerbung gegen PV-FFA würde verhindert sowie die nationalen Handelsdefizite würden reduziert, die vom Import fossiler Energieträger verursacht werden. Die Idee bestand darin, dass Agrarsubventionen die Differenzkosten kompensieren, die zwischen einer herkömmlichen PV-FFA (ohne Nahrungsmittelproduktion) und einer hochaufgeständerten SunFarming-Anlage (mit Nahrungsmittelproduktion) zu verbuchen sind.

Fraunhofer ISE Zusammenarbeit mit Elektor Guggenmos und der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, 2009–2011

Im Jahr 2004 errichtete Manfred Guggenmos, Elektromeister, in Warmisried nahe Mindelheim in Allgäu, Bayern, eine PV-FFA mit einer Gesamtleistung von 70 Kilowatt Peak (kWp). Hierbei wurden die Betonsockel eines alten Lastkranes als Fundament verwendet, sodass die PV-Module in einer Höhe von über 3 m montiert sind. In den Folgejahren stellte Guggenmos fest, dass Gras und Kräuter unter der PV-FFA besser wachsen als auf der Wiese nebenan ohne Teilverschattung. Guggenmos begann, ohne den Einsatz von Maschinen Gemüse und Getreide anzubauen, und wandte sich im Jahr 2009 an das Amt für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten in Mindelheim, um den Ertragsbestand des Winterweizens zu verifizieren, der im Herbst 2008 unter der PV-FFA ausgesät wurde. Die Behörde bestätigte Guggenmos, dass der Winterweizenertrag auf 60 Dezitonnen pro Hektar geschätzt wird und ein höherer Ertrag unter vergleichbaren Bedingungen auch außerhalb der PV-FFA nicht zu erwarten gewesen wäre

(AELF Krumbach (Schwaben)-Mindelheim 2009). Guggenmos, Dr. Michael Beck von der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf (HSWT) und Goetzberger lernten sich kennen und beschlossen 2009, gemeinsam eine Projektanfrage zur Untersuchung einer größeren PV-FFA in Kombination mit Winterweizen an die Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft zu stellen. Die Anfrage wurde als nicht förderwürdig abgelehnt (Bopp 2021).

Goetzberger und der im Juli 2006 neuberufene Fraunhofer ISE Institutsleiter, Eicke Weber, intensivierten ihre Anstrengungen, eine SunFarming-Machbarkeitsstudie durchführen zu können, und nahmen 2010 erneut Kontakt mit BMUV und der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) auf, um gemeinsam mit der HSWT Fördermittel in Höhe von 330.000 € zu beantragen. Paradoxerweise wurde dieser Fördermittelantrag mit der Begründung abgelehnt, PV-FFA würden die Nahrungsmittel- oder Biomasseproduktion einschränken. Vor dem Hintergrund, dass seit 2004 die Umsetzung von PV-FFA auf Ackerflächen durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) in Deutschland gefördert wurde, war diese Absage für die Fraunhofer ISE Institutsleitung sehr schmerzlich. Als im September das EEG 2010 angepasst und die Förderung von PV-FFA auf Ackerflächen aufgrund „einer schwer beherrschbaren hohen Ansiedlungsdynamik mit negativen Folgen für die räumliche Ordnung und Bodenpreisentwicklung“ (ZSW und Bosch & Partner 2018, S. 25) ausgesetzt wurde, beschloss im selben Jahr die Fraunhofer ISE Institutsleitung, Eigenmittel für die Fortführung der SunFarming-Idee bereitzustellen.

Fraunhofer ISE Eigenforschungsprojekt „Doppelernte“: Erste Patentanmeldungen und Machbarkeitsstudie zu Agri-PV in Deutschland, 2011

Das Eigenforschungsprojekt „Doppelernte“ diente zur Entwicklung eines Verfahrens zur simultanen Kultivierung von Nutzpflanzen und energetischen Nutzung von Sonnenlicht auf einer Agrarfläche. Dieses Verfahren wurde 2012 als EU-Patent angemeldet (Bopp et al. 2012) und auf der EU PV-SEC vorgestellt (Beck et al. 2012). Für die Berücksichtigung der Randeffekte in diesem Kultivierungsverfahren wurde 2014 durch Goetzberger ein zweites Patent angemeldet (Goetzberger 2014). Projektleiter des „Doppelernte“-Projekts war Georg Bopp. Bopp betreute in diesem Zusammenhang die Masterabschlussarbeit von Tabea Obergfell mit dem Titel: „Agrovoltaik – Landwirtschaft unter PV-Anlagen. Eine Machbarkeitsstudie für den Standort Deutschland.“. Stephan Schindele, der ab 2011 als Doktorand zum Thema „Solartechnologien innerhalb der Klimarahmenkonvention“ promovierte sowie zwischen 2011 und 2020 in einer Stabstellenfunktion der Institutsleitung Ansprechpartner und Koordinator der

Fraunhofer ISE Aktivitäten in der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (UNFCCC) und Teilnehmer im Deutschen Arbeitskreis Klimatechnologietransfer (AKT) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) war, betreute das Wirtschaftlichkeitskapitel in Oberfelds Masterarbeit. Für die Licht- bzw. Verschattungssimulationen im Doppelernte-Projekt war Dr. Christian Reise zuständig.

Kontaktaufnahme zur Universität Hohenheim, WEF-Nexus Konferenz, November 2011

Im November 2011 wurde Weber in seiner Funktion als Institutsleiter vom Fraunhofer ISE auf die in Bonn stattfindende Konferenz „The Water, Energy and Food Security Nexus – Solutions for the Green Economy“ eingeladen. Ziel der Konferenz war es, einen Beitrag im Vorfeld der für Juni 2012 geplanten UN-Konferenz für nachhaltige Entwicklung (UNCSD oder Rio+20) zu leisten (Die Bundesregierung 2011). In Vertretung für Weber wurde Schindele zur Konferenzteilnahme entsandt und lernte dort Prof. Dr. Joachim Sauerborn kennen, der damals Dekan der Agrarwissenschaftlichen Fakultät der Universität Hohenheim war. Sauerborn war von der Sinnhaftigkeit und Interdisziplinarität der Doppelernte-Idee überzeugt und erläuterte, dass speziell in der semi-ariden und ariden Klimazone die Verschattungseffekte einer hochaufgeständerten PV-Anlage auf die Agrarfläche eine positivere Auswirkung auf die Agrarerträge haben könnten als im Vergleich zur gemäßigten Klimazone.

Kontaktaufnahmen zur Hofgemeinschaft Heggelbach und SEKEM, 2011

Schindele berichtete an Weber und Goetzberger von der UN-Konferenz in Bonn und der Unterhaltung mit Sauerborn, woraufhin Weber den Arbeitsauftrag an Schindele gab, einen landwirtschaftlichen Betrieb in Deutschland sowie einen in der ariden Klimazone zu finden, damit eine Vergleichsanalyse zu den Annahmen von Sauerborn durchgeführt werden konnte. Schindele nahm Kontakt mit der Demeter-Hofgemeinschaft Heggelbach nahe Überlingen am Bodensee auf. Die Hofgemeinschaft Heggelbach wurde bereits im Jahr 2009 aufgrund ihres vorbildlichen Engagements im Bereich der erneuerbaren Energien von Eurosolar mit dem Deutschen Solarpreis ausgezeichnet (Hofgemeinschaft Heggelbach 2022). Durch die Netzwerke von Demeter-International und um die landwirtschaftliche Vergleichsanalyse möglichst aussagekräftig zu erarbeiten, nahm Schindele Kontakt zur „Entwicklungsinitiative“ SEKEM in Ägypten auf, die in der ariden Klimazone ebenso nach biologisch-dynamischen Demeter-Standards landwirtschaftet. SEKEM wurde im Jahr 1977 von Dr. Ibrahim Abouleish gegründet, wofür er im Jahr 2003 mit dem „Right Livelihood Award“ ausgezeichnet wurde (Sekem 2022).

Kontaktaufnahme zum Umweltministerium Baden-Württemberg, 2011

Nachdem sowohl die Hofgemeinschaft Heggelbach als auch SEKEM Interesse zur Mitwirkung an einem Pilotvorhaben bekundet hatten, wurde Schindele durch Weber damit betraut, Kontakt mit Ministerialrat (MinR) Stefan Gloger, Leiter des Referats Forschung, Umwelttechnik, Ökologie im UM BaWü, aufzunehmen, um dessen Einschätzung zur Doppelernte-Idee einzuholen und in Erfahrung zu bringen, ob ein Sun-Farming-Pilotvorhaben in BaWü durch die Forschungsförderung des UM BaWüs finanziert werden könnte. Für die Finanzierung des Pilotvorhabens in Ägypten sollte die Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) oder das Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) kontaktiert werden, wobei der Fokus zunächst auf die Finanzierung einer Pilotanlage in Deutschland gelegt werden sollte. Gloger, der zum damaligen Zeitpunkt auch Kurator am Fraunhofer ISE war, verstand auf Anhieb das Lösungspotential der Doppelernte. BaWü wurde seit Mai 2011 erstmals von einem Ministerpräsidenten regiert, der der Grünen-Partei angehörte. Nachdem im Dezember 2010 die Landesregierung BaWü ankündigte, für 4,67 Milliarden Euro 45,01 % Aktienanteile an der EnBW zu kaufen, und sich im März 2011 die Nuklearkatastrophe von Fukushima ereignete, wurden vom Kabinett Kretschmann I neue und mutige Initiativen gesucht, um die nachhaltige Entwicklung in BaWü zu unterstützen. Gloger bat Schindele darum, ein Treffen zu koordinieren, bei dem die Grundidee der Doppelernte und Vorarbeiten des Fraunhofer ISE vorgestellt werden sollten und zugleich die bisherigen interessierten Akteure für die Pilotprojektumsetzung teilnehmen würden.

Erstes Doppelernte-Projekttreffen unter der Leitung von Schindele, Januar 2012

Am 30. Januar 2012 besuchten Sauerborn und Prof. Dr. Iris Lewandowski (Universität Hohenheim), Thomas Schmid (Hofgemeinschaft Heggelbach), Tilmann Ebert (SolarWorld AG), Eduard Merger (Unique Forest and Land-use), Stefan Gloger (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg) und Dr. Hani Sewilam (SEKEM) das Fraunhofer ISE, um gemeinsam die Umsetzung eines Forschungsvorhabens zu besprechen. Bei dem Termin machte Gloger deutlich, dass vor dem Hintergrund der Akzeptanzprobleme um das Eisenbahn-Großprojekt Stuttgart 21 eine Zuwendungsbereitschaft für ein APV-Forschungsvorhaben in BaWü nur bestehe, wenn neben den pflanzenphysiologischen und solartechnischen auch wirtschafts- und sozialwissenschaftliche Fragestellungen beantwortet werden. Für die Finanzierung des Forschungsvorhabens in Ägypten sollte das BMZ kontaktiert werden. Nachdem der Termin vielversprechend endete und Schindele die unterschiedlichen

Akteure erfolgreich zusammengeführt hatte, wurde Schindele von Weber darum gebeten, zukünftig die Doppelernte-Aktivitäten des Fraunhofer ISE zu koordinieren.

Kontaktaufnahme zu SolarWorld, EWS-Schönau und zum Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse KIT, 2012

Zwischenzeitlich beschloss das Fraunhofer ISE, die Doppelernte-Idee durch den Begriff „Agrophotovoltaik“, abgekürzt „APV“, zu definieren. Dieser Begriff sollte sich in die Begriffsfamilie Agroforstwirtschaft, Agrochemie und Agrotreibstoffe einreihen. Für die Umsetzung des ersten APV-Pilotvorhabens konnten die Unterstützung von Frank Asbeck, Vorstandsvorsitzender der SolarWorld AG für die Entwicklung und Installation des Piloten, und von Sebastian Sladek, Vorstand der Elektrizitätswerke Schönau für die Stromabnahme als Praxispartner gewonnen werden. Im Sommer 2012 beschloss Schindele, das Thema seiner Doktorarbeit zu ändern, um sich verstärkt der Implementierung der APV als neues Geschäftsfeld am Fraunhofer ISE sowie der Projektakquise und Projektleitung des ersten APV-Leuchtturmprojekts zu widmen. Für die Forschungsarbeiten zur Akzeptabilität der APV wurde Dr. Christine Rösch, Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), in das APV-Projektconsortium mitaufgenommen und somit die Projektstruktur für das inter- und transdisziplinäre Forschungsvorhaben komplementiert. Das Land BaWü unterstützte den vom Fraunhofer ISE eingereichten Forschungsantrag zur Umsetzung eines APV-Pilotvorhabens auf Agrarflächen der Demeter-Hofgemeinschaft Heggelbach nahe dem Bodensee.

Ablehnung der Co-Finanzierung zum Förderantrag für das Teilprojektvorhaben in Ägypten durch das BMZ und GIZ-Büro in Ägypten, 2012

Parallel zur Entwicklung des APV-Pilotvorhabens in Süddeutschland traf sich Schindele im Mai 2012 während der SB-36 UNFCCC-Konferenz in Bonn mit BMZ-Vertreter:innen, um die BMZ-Finanzierung einer Agri-PV-Forschungsanlage auf Agrarflächen von SEKEM in Ägypten zu besprechen. Die Projektskizze mit dem Titel „Agro-Photovoltaics for Greening the Desert“ hatte zum Ziel, auf einem nicht ans Stromnetz angeschlossenen SEKEM-Betrieb eine bis dato ausschließlich mit einem Dieselgenerator betriebene Bewässerungspumpe mit Agri-PV zu unterstützen. Gleichzeitig sollte durch die Reduktion der Sonneneinstrahlung im Agri-PV-System die Wasserverdunstung auf der Agrarfläche reduziert werden, wodurch der Energiebedarf für die Bewässerung ebenso abnehmen sollte. Im Jahr 2011 brach in mehreren arabischen Ländern der sogenannte „Arabische Frühling“ aus. In Ägypten hatte dies zur Folge,

dass Diesellieferungen knapp wurden und der Dieselpreis stark stieg. Dies wiederum führte zur Konsequenz, dass bei vielen landwirtschaftlichen Betrieben die dieselgeführten Bewässerungssysteme eingestellt werden mussten und die Ernteerträge in Ägypten in den Folgejahren wesentlich geringer ausfielen. Die Projektskizze wurde durch das GIZ-Büro in Ägypten mit den Begründungen abgelehnt, dass i) SEKEM bereits (zu) viele Fördermittel aus Deutschland erhalte. Durch die Einbindung eines anderen landwirtschaftlichen Betriebs in Ägypten wären die Erfolgchancen höher gewesen. ii) Zudem wurde erörtert, dass es in Ägypten keine Landnutzungskonkurrenz zwischen der Agrar- und Solarwirtschaft gibt. Für die PV-Unterstützung von Dieselgeneratoren könnte die PV-Anlage bodennah auf einer angrenzenden Wüstenfläche installiert werden. Die Verschattungseffekte zur Reduktion des Wasserbedarfs würden nicht die hohen Aufständerkosten rechtfertigen. iii) Zudem seien Entwicklungsländer keine „Spielwiese zum Erproben“ neuer Technologien wie die Agri-PV. Der Austausch zwischen Schindele (Fraunhofer ISE) und Maximilian Abouleish-Boes, Chief Sustainable Development Officer SEKEM, blieb bis ins Jahr 2018 bestehen. 2014, zum Ende des Arabischen Frühlings in Ägypten, reiste Schindele auf Einladung von SEKEM nach Ägypten, um an der Heliopolis University einen Vortrag zum Thema Agri-PV zu halten und die Umsetzung einer Agri-PV-Pilotanlage zu besprechen. Im Jahr 2014 ließ das Fraunhofer ISE durch Ramy Essam eine Diplomarbeit erstellen, in der geeignete Kulturpflanzen für den Anbau im Agri-PV-System in der ariden Klimazone am Fallbeispiel Ägypten untersucht wurden. 2015 reichte SEKEM erfolgreich einen Antrag für die Umsetzung einer netzgekoppelten Agri-PV-Demonstrationsanlage am Hauptstandort von SEKEM bei der österreichischen Entwicklungsbank (OeEB) ein – jedoch ohne Beteiligung des Fraunhofer ISE (OeEB 2022). Maximilian Abouleish-Boes war bis 2018 Projektbeirat beim APV-RESOLA-Projekt, das ebenso ab dem Jahr 2015 gefördert wurde und die Umsetzung der Agri-PV-Pilotanlage in Heggelbach ermöglichte, siehe fortfolgend.

SolarWorld Insolvenz, Kontaktaufnahme zu BayWa r.e. und zum Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) sowie Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), 2013–2014

Im Frühjahr 2013 zog sich die Firma SolarWorld aus dem Projektkonsortium zurück, weil das Unternehmen finanzielle Probleme hatte. Das Land BaWü gab dem Fraunhofer ISE eine Frist, bis Ende September 2013 einen Ersatz für SolarWorld zu finden, damit das Projekt starten und die Fördermittel abgerufen werden konnten. Im Sommer 2013, während der Intersolar Messe in München führten Schindele und Bopp einige Gespräche mit potenziellen Industriepartnern

als Ersatz für SolarWorld, unter anderem auch mit Günter Haug, Geschäftsführer der BayWa r.e.. Haug bestätigte bei dem Termin, dass die APV-Idee sehr gut zur BayWa r.e. Vision passe, und stellte daraufhin den Kontakt zu Christof Thannbichler, damals Geschäftsführer der BayWa r.e. Solar Projects GmbH, sowie Edgar Gimbel, damals Technikleiter der BayWa r.e. Solar Projects GmbH, her. Im Frühjahr 2014 beschloss die BayWa r.e., offiziell Projektpartner im Agri-PV-Forschungsvorhaben zu werden und die Rolle von SolarWorld zu übernehmen. Weil jedoch der Stichtag aus dem Zuwendungsbescheid des Landes BaWü nicht eingehalten werden konnte, mussten die in Aussicht gestellten Fördermittel an das Land BaWü zurückgegeben werden. Erneut auf der Suche nach einem Fördermittelgeber nahm Schindele Kontakt mit dem Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) auf und lernte dadurch Dr. Gerhard Justinger kennen. Justinger war BMEL-Mitarbeiter im Referat für Forschung und Innovation und gab Schindele den entscheidenden Hinweis, dass die höchsten Förderchancen für ein Querschnittsthema wie das der Agri-PV beim Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) liegen. Justinger nahm Bezug auf den BMBF-Förderschwerpunkt Nachhaltiges Landmanagement, der durch Dr. Birgit Metz, BMBF-Referatsleiterin Ressourcen und Nachhaltigkeit, gefördert wird (BMBF 2022a). Justinger stand der Agri-PV offen gegenüber und unterstützte Schindele im Promotionsvorhaben, indem er bspw. im APV-RESOLA-Projektverlauf den Kontakt zu dessen Kollegen MinR Niendieker, BMEL-Referatsleiter für Energieangelegenheiten und Bioenergie, für die Durchführung eines Fachgesprächs herstellte oder beim späteren Fraunhofer ISE Projekt „APV-Obst“ unterstützend mitwirkte. Auf Justingers anraten stieß Schindele auf die BMBF-Fördermaßnahme „Innovationsgruppen für ein Nachhaltiges Landmanagement“ (BMBF 2020). Darin sollte im BMBF-Rahmenprogramm „Forschung für die Nachhaltigkeit (FONA)“ der Förderschwerpunkt „Nachhaltiges Landmanagement“ fortgeführt werden, damit gezielt neue, praktikable Lösungen für Regionen, die vor dem Hintergrund klimatischer, wirtschaftlich-struktureller und demographischer Veränderungen vor besonderen Herausforderungen stehen, untersucht und unterstützt werden können.

Kontaktaufnahme zum Regionalverband Bodensee-Oberschwaben und zum Projektträger Jülich, 2013

Das Fraunhofer ISE und Projektkonsortium beschlossen, sich als Innovationsgruppe bei der Fördermaßnahme zu bewerben, und Schindele nahm Kontakt mit Christian Bodensteiner, Projektträger Jülich (PTJ), auf. Bodensteiner untermauerte, dass für eine erfolgsversprechende Bewerbung die Unterstützung der Region im Umsetzungsort notwendig ist, weshalb Schindele

2013 Kontakt mit Winfried Franke, Direktor des Regionalverbands Bodensee-Oberschwaben (RVBO), aufnahm. Bei einer Sitzung des Planungsausschusses wurde die Teilnahme des RVBO im Projektvorhaben einstimmig beschlossen, sodass fortan der RVBO als assoziierter Projektpartner im APV-Pilotvorhaben mitwirken konnte. Schindele verantwortete die Projektstruktur, inhaltliche Ausgestaltung des Projektvorhabens, Zeit- und Budgetplanung und koordinierte sowohl die Projektskizze für die erste Förderphase als auch die Vorhabenbeschreibung mit Vollantrag für die zweite Förderphase.

Innovationsschritt von Idee zur Invention: Projektstart APV-RESOLA, Pilotumsetzung, erste Doppelernte Projektergebnisse, Begleitvorhaben, Abschlusskonferenz, Sichtbarkeit, 2013 bis 2019

Parallel zur APV-RESOLA-Definitionsphase zwischen 2013 und 2014 beschloss das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) durch die EEG-Novelle 2014, die PV-FFA-Umsetzung auf Agrarflächen entlang von Transportwegen, auf bundeseigenen Flächen sowie in benachteiligten Gebieten wieder aufzunehmen. Diese Policy-Anpassung verstärkte den Handlungsdruck, agrarflächenneutrale PV-Anwendungen wie die Agri-PV zu fördern. Schindele beschloss gemeinsam mit Dr. Hans-Jochen Luhmann und Prof. Dr. Manfred Fishedick, beide tätig am Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie, eine Stellungnahme zur BMWi-Konsultation „Eckpunkte für ein Ausschreibungsdesign für Photovoltaik-Freiflächenanlagen“ einzureichen, um auf die internationalen Agri-PV-Marktentwicklungen aufmerksam zu machen sowie auf die Notwendigkeit, dieses innovative Marktsegment auch ins Förderregime in Deutschland aufzunehmen. Die Agri-PV-Stellungnahme vom Wuppertal Institut und Fraunhofer ISE wurde durch Dr. Sabine Zikeli und Prof. PD Dr. Petra Högy, beide von der Universität Hohenheim, sowie durch Hans-Josef Fell, Kurator am Fraunhofer ISE und ehemaliger Bundestagsabgeordneter für die Bündnis90/Die Grünen, unterstützt (Wuppertal Institut 2014). Das BMBF beschloss, das APV-RESOLA-Projekt in der Hauptphase zu fördern, und im März 2015 wurde das erste offizielle Projekttreffen des APV-RESOLA-Forschungsverbundes mit der Innovationsgruppe in Freiburg am Fraunhofer ISE abgehalten. Ein Jahr später, im August 2016, wurde der Agri-PV-Pilot auf Agrarflächen der Hofgemeinschaft Heggelbach installiert. In den Jahren 2017, 2018 und 2019 wurden die Agrar- und Solarstromerträge erfasst, ausgewertet und durch wissenschaftliche Publikationen veröffentlicht. Die Bürgerwerkstätten und Stakeholder Workshops wurden abgehalten, ausgewertet und die Ergebnisse ebenso publiziert. Schindele agierte während des gesamten Projektverlaufs bis zu seinem Wechsel im März 2020 als Leiter

des Forschungsverbundes sowie Innovationsgruppenleiter. Die Innovationsgruppe bildete den inneren Kern des Forschungsverbundes, dem die drei Doktoranden Daniel Ketzer (ITAS KIT), Axel Weselek (Universität Hohenheim) und Stephan Schindele (Fraunhofer ISE, Universität Tübingen) angehörten sowie ein:e Vertreter:in von jedem Projektpartner. Schindele selbst verantwortete zusätzlich den Arbeitsschwerpunkt „Politik und Ökonomie“ und koordinierte in dieser Funktion den Baugenehmigungsprozess, die Rechtsgutachten mit Fokus auf Agrar-, Energiewirtschafts- und Baurecht, führte die Forschungsarbeiten für sein Promotionsvorhaben aus und koordinierte den APV-RESOLA-Projektbeirat, der als dauerhafter Fachexpertenkreis die fortlaufenden Projektergebnisse jährlich evaluierte und kommentierte. Dem APV-RESOLA-Projektbeirat gehörten folgende Beiräte an: Prof. Dr. Adolf Goetzberger (Fraunhofer ISE), Franz Pöter (Solar Cluster BW), Sylvia Pilarsky-Grosch (BUND BW), Ralf Ries (GLS Gemeinschaftsbank), Manfred Oetzel (Landesbauernverband BW), Dr. Florian Brahms (Kanzlei Brahms & Nebel & Kollegen), Dr. Winfried Hoffmann (ASE), Prof. Dr. Daniel Buhr (Doktorvater Schindele, Universität Tübingen) und Hans-Josef Fell, Vorsitzender des APV-RESOLA-Projektbeirats (Energy-Watch Group).

Zusätzlich zur fachlichen Betreuung der Agri-PV-Projektergebnisse durch den Projektbeirat wurde die APV-RESOLA-Innovationsgruppe durch das Begleitvorhaben der Fördermaßnahme unterstützt. Prof. Dr. Klaus Müller und Sebastian Rogga vom Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) waren für die Analyse und Synthese zwischen den neun unterschiedlichen Innovationsgruppen zuständig und setzten Schwerpunkte beim Prozessmanagement (z. B. Organisation von Workshops und Konferenzen) sowie der wissenschaftlichen Analyse von projektübergeordneten Fragestellungen, speziell zum Thema Nachhaltiges Landmanagement (BMBF 2022b). Dr. Susanne Schön und Dr. Christian Eismann vom Inter3 Institut für Ressourcenmanagement waren für die Prozessbegleitung der einzelnen Innovationsgruppen zuständig und coachten im Schwerpunkt Innovationsmanagement. In jedem Projektjahr wurde von Inter3 gemeinsam mit Schindele als Innovationsgruppenleiter eine Konstellationsanalyse vorbereitet und im Rahmen eines Innovationsgruppentreffens von APV-RESOLA mit allen Teilnehmenden durchgeführt. Hierin wurde das Zusammenwirken der für die Agri-PV relevanten Akteure, Institutionen und Prozesse in einem grafischen Gefüge dargestellt und die Innovationsdynamik der Agri-PV über die Jahre dokumentiert. Die Innovationsgruppe APV-RESOLA konnte dadurch ein gemeinsames Verständnis entwickeln, was der aktuelle Stand des Innovationsprozesses ist und wo die gemeinsame Perspektive liegt. Darüber hinaus entwickelte Inter3 in Zusammenarbeit mit den Innovationsgruppenleiter:innen

den Solution Readiness Level (SRL). Dabei handelt es sich um eine Adaption der aus dem technischen Bereich bekannten Technology Readiness Level (TRL). Hinsichtlich Agri-PV konnte festgestellt werden, dass Innovationsbarrieren nicht technischer, sondern häufig regulatorischer Natur sind, bspw. konnte im Baugenehmigungsprozess eine multifunktionale Landnutzung für die Agrar- und Stromerzeugung nicht in der Flächenfestsetzung abgebildet werden, sondern die Fläche musste als Sondergebiet ausgewiesen werden und verlor dadurch den Status landwirtschaftliche Nutzfläche. Ein weiteres Beispiel ist die damals gültige Direktzahlungendurchführungsverordnung (DirektZahldurchfV). Hierin wird reguliert, dass ungeachtet dessen, ob eine Fläche eine landwirtschaftliche Fläche ist, alsbald sich Anlagen zur Nutzung von solarer Strahlungsenergie auf dieser Fläche befinden, diese Fläche hauptsächlich nicht mehr für eine landwirtschaftliche Tätigkeit genutzt wird. Diese beiden regulatorischen Innovationshemmnisse sind in einer TRL-Skala nicht abgebildet, können jedoch im SRL erfasst werden. Der SRL dient somit nicht nur als analytisches Instrument zur Fortschritts- und Wirkungsmessung, sondern kann auch im operativen Innovationsmanagement strategische Ausrichtungen und Arbeitsschwerpunkte aufzeigen (BMBF 2022c). Inter3 unterstützte zudem die Ausarbeitung des Buches „Nachhaltige Landnutzung managen. Akteure beteiligen – Ideen entwickeln – Konflikte lösen“, das als Meta-Analyse aus der Fördermaßnahme hervorging (Schön et al. 2019).

Die APV-RESOLA-Forschungsergebnisse wurden auf der APV-RESOLA-Abschlusskonferenz in Berlin im Mai 2019 durch die Teilnehmenden als sehr vielversprechend bewertet. APV-RESOLA demonstrierte, dass eine Doppelnutzung der Agrarfläche zur simultanen Erzeugung von Nahrungsmitteln und Solarstrom technisch – und unter bestimmten regulatorischen Bedingungen auch wirtschaftlich – durchführbar ist (Weselek et al. 2019; Trommsdorff et al. 2021; Schindele et al. 2020). Die Agri-PV-Akzeptanzforschung ergab, dass im Vergleich zu anderen erneuerbaren Energien, wie Windkraftanlagen, Biogas oder herkömmlichen PV-FFA, die Agri-PV durch die betroffenen Bürger und Stakeholder positiv bewertet wird (Ketzer et al. 2020a; Ketzer et al. 2020b). Das Projekt bekam bei der offiziellen Einweihung der Agri-PV-Forschungsanlage im Jahre 2016 die Auszeichnung „Land der Ideen“ der Bundesregierung. Ebenso 2016 erhielt Ketzer auf dem Nachwuchsforscher-Kongress 2016 im Schwerpunkt Ressourceneffizienz den „Best Presentation“-Award. Schindele erzielte 2017 auf dem Fraunhofer-Symposium in München für seine „Fruitvoltaic“-Idee, die er gemeinsam mit Studierenden der Universität der Künste (UdK) Berlin entwickelt hatte, den 1. Platz. Bis ins Jahr 2019 wurde in über 270 Medienbeiträgen in Print, Online, Fernsehen, Radio und

Fachmagazinen über das Projekt berichtet, darunter namhafte Medien wie ARD, ZDF, Spiegel Online, Welt, Süddeutsche, Deutschlandfunk, SWR, BR, Deutsche Welle, DPA und viele mehr im In- und Ausland. Im Jahr 2017 wurde Schindele dazu eingeladen, einen Gastbeitrag für die Frankfurter Allgemeine Zeitung (FAZ) zu verfassen (Schindele 2017). Bevor das APV-RESOLA-Projekt zum 31.12.2020 beendet wurde, veröffentlichte das Fraunhofer ISE im Oktober 2020 einen Leitfaden für Deutschland mit dem Titel „Agri-Photovoltaik: Chance für Landwirtschaft und Energiewende“. Hierin sind die wichtigsten wissenschaftlichen Ergebnisse für Praktiker aus den Zielgruppen Landwirte, Energieprojektierer, Politik sowie Forschung und Entwicklung übersetzt. Das Vorwort des Leitfadens wurde gemeinsam von Ministerin Anja Karlicek, BMBF, und Ministerin Julia Klöcker, BMEL, verfasst (Fraunhofer ISE 2020). Im November 2022 wurde das APV-RESOLA-Projekt für die Nominierung des Deutschen Zukunftspreises vorgeschlagen.

Notwendigkeit der Agri-PV-Definition und Qualitätssicherung, Mittelaufstockung APV-RESOLA, 2019–2020

In ihrem Aufruf für SunFarming von 2006 resümieren und appellieren die Wissenschaftler um Goetzberger: „Wir halten es für schwierig, Nachteile unseres Vorschlags zu finden“ (Goetzberger et al. 2006). Ein wichtiger Aspekt, der im Aufruf jedoch nicht beleuchtet wurde, ist die Qualitätssicherung von SunFarming bzw. Agri-PV-Anlagen. Die Bereitstellung von 3 Milliarden US-Dollar Agrarsubventionen jährlich bedarf der Notwendigkeit eines Mindeststandards in der Agrarproduktion, um die Fördermittel zu rechtfertigen. Ansonsten läuft die Agri-PV-Idee Gefahr, gesellschaftlich in Verruf zu kommen, wenn von einer „Doppelnutzung“ gesprochen wird, ein Projekt allerdings überwiegend auf einen monofunktionalen Nutzen zur Solarstromerzeugung abzielt, um Mitnahmeeffekte zu generieren. Im APV-RESOLA-Projekt verlangten deshalb Thomas Schmid und Florian Reyer in Vertretung für die Hofgemeinschaft Heggelbach, dass im Landpachtvertrag zwischen dem Fraunhofer ISE und der Hofgemeinschaft festgeschrieben wurde, dass der Agrarertrag im mehrjährigen Mittel nach der Agri-PV-Anlagenerrichtung im Verhältnis zur Referenzfläche nicht mehr als 25 % sinken dürfte. Sollte der Ertrag um mehr als 25 % zurückgehen, müsste die Agri-PV-Anlage durch das Fraunhofer ISE rückstandslos rückgebaut werden. Die Befürchtung von Trittbrettfahrern, die durch die Umsetzung von minderwertigen Agri-PV-Anlagen mit möglichst geringen Installationskosten eine zusätzliche Subvention oder Markteinführungsprämie abgreifen möchten, bestätigte sich in Italien und Frankreich, als eine relativ hohe Einspeisevergütung an sogenannte „SolarGewächshäuser“ bezahlt wurde, diese

SolarGewächshäuser jedoch nicht überwiegend der Agrarproduktion dienen, sondern nichts anderes waren als herkömmliche PV-FFA in Verbindung mit einer Alibi-Landwirtschaft darunter (Redazione ANSA 2017; GrIG 2015). Wissenschaftlich wurden im APV-RESOLA-Projekt die Gefahren von Pseudo-Agri-PV-Anlagen durch die beiden Promotionsvorhaben von Ketzer und Schindele behandelt. Ketzer stellte in der Akzeptanzforschung fest, dass Mindeststandards und Qualitätskriterien eingehalten werden müssen, damit die Agri-PV in der betroffenen Bevölkerung nicht an Akzeptanz einbüßt. In den Bürgerwerkstätten wurde die Befürchtung von Pseudo-Landwirtschaft in Verbindung mit Agri-PV erfasst (Ketzer et al. 2020a; Ketzer et al. 2020b).

Am 26.06.2018 diskutierte Schindele die Thematik der Agri-PV-Qualitätssicherung und Mindeststandards im Fachgespräch mit dem Referat für Energieangelegenheiten und Bioenergie unter der Leitung von MinR Niendieker, BMEL in Berlin. An diesem Termin nahmen auch u. a. Högy (Universität Hohenheim), Bodensteiner (PTJ) sowie MinR Dr. Wolf Junker, Referatsleiter Ressourcen, Kreislaufwirtschaft, Geoforschung im BMBF, teil. Junker erklärte, dass sich das BMBF auch für Normungsprozesse zuständig fühlt und dass häufig in vom BMBF geförderten Projekten das Instrument der DIN SPEC angewandt wird, um Erkenntnisse aus der Forschung in die erste Marktumsetzung zu bringen. DIN SPEC ist keine Norm, sondern eine Vornorm. Das Ergebnis eines DIN SPEC-Prozesses ist ein marktkonformer Standard für eine Innovation, die kurz vor der Markteinführung und Diffusion steht. Voraussetzung für die Umsetzung einer DIN SPEC sei es, dass sich Akteure außerhalb des APV-RESOLA-Forschungsverbundes in einem Konsortium zusammenfinden, um innerhalb weniger Monate einen Konsortialstandard zu entwickeln. Entscheidungen über qualitätssichernde Parameter werden dabei nicht im Konsens, sondern durch eine absolute Mehrheit beschlossen.

Für die Agri-PV-Markteinführung in Deutschland erschien die Umsetzung einer DIN SPEC zum gegenwärtigen Zeitpunkt genau richtig. Der APV-RESOLA-Verbund musste sich dadurch weiteren Marktteilnehmern öffnen und diese in den DIN SPEC-Prozess einbinden. Wenige Tage nach dem Fachgespräch mit BMEL und BMBF wurde Schindele (Fraunhofer ISE) von Bodensteiner (PTJ) aufgefordert, eine Mittelaufstockung für das APV-RESOLA für die Partner Fraunhofer ISE und Universität Hohenheim zu beantragen, damit diese beiden Akteure im interdisziplinären Schulterschluss und in Abstimmung mit DIN den DIN SPEC-Prozess für eine Agri-PV-Qualitätssicherung initiieren und moderieren konnten.

1.2 Von der Invention zur Innovation: 2019 bis 2021

Hintergründe zur regulatorischen Einbettung der DIN SPEC 91434 Agri-PV Qualitätssicherung

Schindele erarbeitete den Antrag zur Mittelaufstockung und Projektlaufzeitverlängerung für APV-RESOLA und nahm Kontakt mit Gloria Görgner bei DIN auf. Görgner war Senior Project Manager bei DIN und moderierte die DIN SPEC 91434. Der DIN SPEC 91434 Prozess startete am Dezember 2019 in Berlin. Mit seinem Wechsel vom Fraunhofer ISE zur BayWa r.e. im März 2020 übergab Schindele die APV-RESOLA-Projektleitung und somit auch die inhaltliche Moderation der DIN SPEC an Andreas Steinhüser (Fraunhofer ISE). Schindele vertrat im DIN SPEC 91434 Prozess nicht die BayWa r.e., die durch Edgar Gimbel und Albert Schlaak vertreten wurde, sondern den Bundesverband Solarwirtschaft (BSW-Solar) und verhandelte innerhalb der BSW-Mitgliedsunternehmen eine Position zu den Agri-PV Qualitätsmerkmalen. Bei Entscheidungen mit knappen Mehrheiten innerhalb der BSW-Mitglieder sowie innerhalb des DIN SPEC 91434 Konsortiums enthielt sich Schindele. Nachdem die Agri-PV in der EEG-Novelle 2021 durch die Innovationsausschreibung für besondere Solaranlagen in die PV-Förderlandschaft integriert (BMJV 2020) und die Bundesnetzagentur (BNetzA) aufgefordert wurde, Festlegungen für die Fördervoraussetzungen zu bestimmen (BNetzA 2021b), bot die im Mai 2021 veröffentlichte DIN SPEC 91434 den regulatorischen Rahmen, um Anforderungen an die landwirtschaftliche Hauptnutzung in Verbindung mit Agri-PV-Systemen zu stellen. Ebenso konnte die DIN SPEC 91434 bei der Überarbeitung der DirektZahldurchfV herangezogen werden. Im GAPDZV-Entwurf wurde im § 12 Absatz 4, Punkt 6 die Beihilfefähigkeit für die landwirtschaftliche Tätigkeit in Verbindung mit einem Agri-PV-Nachweis ermöglicht und § 12 durch Absatz 5 ergänzt sowie dadurch der direkte Bezug zur DIN SPEC 91434 hergestellt (BMEL 2021c, S. 15). Die DIN SPEC 91434 hatte zum Ziel, die Agri-PV-Systemtechnik zu definieren und die Agri-PV von herkömmlichen PV-Freiflächenanlagen abzugrenzen. Die Vermeidung von Ambiguität hinsichtlich der Agri-PV-Technologie wurde als Grundvoraussetzung für eine politische Handhabung und Berücksichtigung der Agri-PV in bestehenden Förderregimen angenommen.

Agri-PV Basis-Definition, Qualitätskriterien und Zuständigkeit der Qualitätsprüfung

Die DIN SPEC 91434 definiert Agri-PV wie folgt: „Agri-Photovoltaik: kombinierte Nutzung ein und derselben Landfläche für landwirtschaftliche Produktion als Hauptnutzung und für Stromproduktion mittels einer PV-Anlage als Sekundärnutzung“ (DIN 2022, S. 7). Im Rahmen der DIN SPEC 91434 wurden zwei Agri-PV-Anwendungskategorien definiert: Anlagen mit einer Aufständerung mit lichter Höhe (Kategorie 1) und Anlagen mit einer bodennahen Aufständerung (Kategorie 2). Für beide Kategorien wurden teils unterschiedliche Qualitätskriterien festgelegt, bspw. darf der Verlust an landwirtschaftlich nutzbarer Fläche durch Aufbauten und Unterkonstruktionen bei Kategorie 1 höchstens 10 % der Gesamtprojektfläche betragen und bei Kategorie 2 höchstens 15 %. Unabhängig der Agri-PV-Anwendung müssen mindestens 66 % des Referenzertrags nach Anlagenerrichtung auf der Agrarfläche erwirtschaftet werden. Ein externer Sachverständiger muss die Möglichkeit einer dauerhaften, wirtschaftlich tragfähigen, landwirtschaftlichen Tätigkeit im Agri-PV-System bestätigen. Diese Bestätigung kann im Baugenehmigungsverfahren eingefordert werden, wodurch die lokalpolitische Ebene, insbesondere die unteren Baurechtsbehörden auf Landkreisebene, in der Pflicht stehen, die Qualität der Agri-PV-Projekte zu überprüfen und die Projekte freizugeben. Auf Bundesebene reicht es gegenüber dem Agri-PV-Fördermittelgeber aus, wenn im Förderantrag an die BNetzA der Nachweis des kommunalen Aufstellungsbeschlusses mit einer Kopie des Sachverständigengutachtens zum Agri-PV-Projekt nachgewiesen wird. Ausführliche Details und Hintergründe zur Agri-PV-Definition und deren regulatorischer Integration, insbesondere auch die Abgrenzung zwischen PV-FFA- und Agri-PV-Anlagen, wurden durch Schindele in seiner zweiten Publikation „Feldfrüchte und Strom von Agrarflächen: Was ist Agri-Photovoltaik und was kann sie leisten?“ im Jahr 2021 erläutert (Schindele 2021a).

Weitere nationale Agri-PV-Projekte, 2019–2021

Im Jahr 2019 veröffentlichten Weselek als Hauptautor (Universität Hohenheim) und Schindele (Fraunhofer ISE) als einer der Co-Autoren eine weltweite Übersicht von Agri-PV-Forschungsprojekten (Weselek et al. 2019; Weselek et al. 2021b; Weselek et al. 2021a). Schindele publizierte 2020 seinen ersten Fachartikel zum Thema Agri-PV als Hauptautor mit Co-Autoren. Darin enthalten ist eine Tabelle, die Hintergründe zu insgesamt acht bekannten Agri-PV-Anlagen in Deutschland liefert (Schindele et al. 2020). Im Jahr 2021 wurden durch das Fraunhofer ISE und mit Schindele als Co-Autor die technischen Hintergründe der Agri-PV-Pilotanlage in Heggelbach publiziert (Trommsdorff et al. 2021). Seitdem sind weitere Agri-PV-Demonstrationsanlagen in Deutschland installiert worden. Fraunhofer ISE und BayWa r.e.

installierten 2021 in Gelsdorf, Rheinland-Pfalz, eine Agri-PV-Apfel-Forschungsanlage, die den elektrischen Fendt-Traktor und das Bewässerungssystem mit Solarstrom versorgt und gleichzeitig die Untersuchung von acht Apfelsorten unter drei unterschiedlichen Agri-PV-Konfigurationen ermöglicht (BayWa r.e. AG 2021). In diesem Zusammenhang wurde durch das Fraunhofer ISE und erneut mit Schindele als Co-Autor der Fachartikel veröffentlicht, in dem beschrieben wird, welche Auswirkung PV auf die Elektrifizierung von Landmaschinenteknik haben kann (Gorjian et al. 2021). Das Unternehmen Agrosolar Europe errichtete in Lüchow, Niedersachsen, eine Agri-PV-Anlage, die durch das Umweltbundesamt gefördert wurde (AgroSolar Europe 2021). Die Firma SunFarming errichtete in Morschnich-Alt im Rheinland, Nordrhein-Westfalen, in Zusammenarbeit mit dem Forschungszentrum Jülich und Fraunhofer ISE eine Agri-PV-Anlage (Eckmann 2022). Das Land BaWü fördert die Umsetzung von fünf Agri-PV-Kategorie-1-Modellanlagen mit Schwerpunkt auf Kernobst- und Beerenbau in Zusammenarbeit mit der Hochschule für öffentliche Verwaltung Kehl und Fraunhofer ISE (Landesregierung BaWü 2022). Next2Sun errichtete nahe Donaueschingen, BaWü, sowie in Eppelborn-Dirmingen, Saarland, Agri-PV-Kategorie-2-Anlagen (next2sun 2022). MKG Göbel hat 2020 in Büren, Niedersachsen, eine Agri-PV-Kategorie-1-Anlage für den Beerenbau aufgebaut (MKG GÖBEL 2022). Hörmann bietet ähnlich wie Next2Sun Agri-PV-Anlagen der Kategorie 2 an und hat einen Piloten in BW installiert (Hörmann 2022). Die ÖkoHaus GmbH errichtete 2020 in Althegnenberg, Bayern, eine Agri-PV-Kategorie-2-Anlage mit nachgeführten PV-Modulen (ÖKO-HAUS GmbH 2022). Gemeinsam mit Feuerbacher (Uni Hohenheim) und weiteren Co-Autoren erarbeitete Schindele die erste makroökonomische Modellierung zur Auswirkung einer Agri-PV-Diffusion auf den Agrarsektor in Deutschland (Feuerbacher et al. 2021).

1.3 Exkurs: Internationale Agri-PV-Marktentwicklung von 2004 bis 2021

Parallel zum Innovationsprozess der Agri-PV in Deutschland hat sich die „Doppelernte“-Idee von Goetzberger in anderen Märkten weltweit wesentlich schneller und effektiver durchgesetzt.

Frankreich: In Frankreich wurde bereits 2011 durch das INRA in Montpellier ein „Agrivoltaic“-Forschungsvorhaben umgesetzt. Pionier der Agri-PV-Forschung in Frankreich ist Prof. Christian Dupraz, der mehrere Doktoranden hinsichtlich pflanzenphysiologischer

Fragestellungen betreute und der Haupt- und Co-Autor mehrerer Agri-PV-Publikationen ist (Dupraz et al. 2011). Dupraz nimmt Bezug auf die Publikation von Goetzberger und Zastrow von 1981. Seit 2017 wird die Agri-PV-Umsetzung in Frankreich durch eine Innovationsförderung finanziell unterstützt. Mehr als 50 Agri-PV-Projekte werden über diesen Fördermechanismus ermöglicht. Mit einem Marktanteil von über 75 % der geförderten Projekte ist das Unternehmen SunAgri Marktführer in Frankreich (Sun'Agri 2021). Die Energieversorgungskonzerne EDF (EDF France 2020), Engie (ENGIE 2022) und Total Quadran (InVivo 2020; Petrova 2020) haben bereits Agri-PV-Projekte umgesetzt und bauen diese Kapazitäten weiter aus.

Italien: Im Jahr 2007 realisierte Hans Günter Czaloun in Zusammenarbeit mit einem international tätigen Seilbahnbauer Europas erste Agri-PV-Anlagen basierend auf einer Tragseilstruktur über einer Apfel-Spalierobstplantage bei Bozen in Südtirol (Leitner und Czaloun 2018), siehe folgende Abbildung.



Abbildung 1-1: Erste Agri-PV-Anlage in Europa, Italien, 2007 (Leitner und Czaloun 2018)

Das Unternehmen REMtech realisierte 2011 eine erste großflächige Agri-PV-Anlage in Norditalien (REMTEC 2011) und hat seitdem mehrere Agri-PV-Anlagen im Megawatt(MWp)-Bereich in Italien, Frankreich und China installiert. Die italienische Regierung hat durch den EU Recovery Act ein Agri-PV-Förderprogramm mit einem Budget von 1,1 Milliarden Euro in Aussicht gestellt (Matalucci 2021).

Niederlande: In den Niederlanden installierte die BayWa r.e. Tochtergesellschaft GroenLeven zwischen 2020 und 2022 insgesamt neun Agri-PV-Projekte im Bereich Kern-, Stein- und Beerenobst (BayWa r.e. AG 2020). Das französische Unternehmen Engie in Zusammenarbeit mit GreenMeteor setzte ebenfalls Agri-PV-Pilotprojekte in Kombination mit Beerenbau in den Niederlanden um (ENGIE 2022).

Österreich: Wien Energie installierte 2019 die erste Agri-PV-Kategorie-2-Anlage Österreichs (Wien Energie Positionen 2021). Die BayWa r.e. Tochtergesellschaft EcoWind Solar- und Windenergie installierte auf den Versuchsflächen der Forschungseinrichtung Heidegg des Landes Steiermark eine Agri-PV-Pilotanlage für Apfel- und Kirschanbau (Ecowind 2022). Hinsichtlich der Definition von Agri-PV liefert die Landwirtschaftskammer Oberösterreich einen wichtigen Impuls, indem steuerliche Konsequenzen von PV-Anlagen auf landwirtschaftlichen Flächen definiert werden. Dabei wird über das Finanzministerium definiert, welche Grundstücke ein land- und forstwirtschaftliches (LuF) Betriebsvermögen darstellen. Als Entscheidungskriterium, ob eine Fläche einem landwirtschaftlichen Hauptzweck dient, werden bspw. in der Tierhaltung eine bestimmte Mindestanzahl von Nutztieren je Hektar definiert, die innerhalb der umzäunten PV-Fläche gehalten werden müssen. Flächen mit Sonderkulturen, bei denen die PV-Module als Überdachung oder als Ersatz von Hagelnetzen dienen, sind weiterhin als LuF-Hauptzweck zu betrachten. Ebenso werden Flächen mit unterfahrbaren Modulen oder Flächen mit vertikal angebrachten Modulen als LuF-Hauptzweck angenommen (Landwirtschaftskammer Oberösterreich 2021).

Vereinigte Staaten von Amerika (USA): Im Jahr 2018 verabschiedete das Massachusetts Department of Energy Resources (MA DOER) das Solar Massachusetts Renewable Target (SMART)-Programm. In diesem Förderprogramm können für „Dual-use systems“ besondere „Agricultural Solar Tariff Generation Units (ASTGUs)“ beantragt werden (Commonwealth of Massachusetts et al. 2018; DOER MA 2018). Das Shading-Analysis-Tool wurde vom Fraunhofer ISE 2018 verifiziert (DOER MA 2022). Auch außerhalb von Massachusetts wurden bereits mehrere Agri-PV-Projekte umgesetzt und wissenschaftlich begleitet, bspw. durch die University of Arizona (Harwood 2021), die Colorado State University (Sandbox Solar 2021), die Stanford University (Ravi et al. 2014) und die UC Davis in Kalifornien (Lieth 2022). Das US Department of Energy (DOE) hat gemeinsam mit dem National Renewable Energy Laboratory (NREL) das InSPIRE Projekt veröffentlicht, bei dem Agri-PV-Projekte gefördert und untersucht werden sollen (OpenEI 2020). Die politischen und wissenschaftlichen Akteure in den USA und Deutschland möchten im Bereich der Agri-PV enger kooperieren (Umann 2020). Der wissenschaftliche Dienst des US-Kongresses informiert über Agri-PV (Lawson et al. 2020).

Japan: Nach eigenen Aussagen ohne Vorkenntnisse der Veröffentlichungen von Goetzberger entwickelte und installierte Akira Nagashima im Jahr 2004 die erste „SolarSharing“-Anlage weltweit in Japan. Nagashima war ein pensionierter Landmaschineningenieur, der später

Biologie studierte und dadurch den pflanzenphysiologischen „Lichtsättigungspunkt“ kennenlernte. Er kam dadurch auf die Idee, PV-Systeme mit Landwirtschaft zu kombinieren, weil für bestimmte Kulturpflanzen eine zu hohe Lichtmenge zum Rückgang der Photosyntheserate führt. Er installierte mehrere Testfelder mit unterschiedlichen Beschattungsgraden für verschiedene Pflanzen und verbesserte dadurch die Doppelernte. Im April 2013 genehmigte das japanische Ministerium für Landwirtschaft, Forsten und Fischerei (engl. Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries MAFF) die Installation von PV-Anlagen auf Ackerflächen. Zuvor war die PV-Installation auf Ackerflächen verboten (PRI 2013). Voraussetzung für die Genehmigung zur Errichtung einer PV-Anlage auf Ackerflächen ist bis heute, dass eine kontinuierliche landwirtschaftliche Tätigkeit unter der PV-Anlage gewährleistet wird. Die regional zuständigen Landwirtschaftskammern verlangen von den Landwirten, die unter der PV-Anlage landwirtschaftlich tätig sind, dass sie ihre Agrarerträge melden. Sollte sich nach zehn Jahren der Agrarertrag um mehr als 20 % im Vergleich zu der Zeit vor der Installation der PV-Anlage verringert haben, muss die Agri-PV-Anlage rückstandslos rückgebaut werden und die verbleibenden zehn Jahre Förderzeitraum verfallen. Das Gesetz wurde als Reaktion auf die Nuklearkatastrophe in Fukushima im Jahr 2011 eingeführt und ermöglicht es den Landwirten, ihr Einkommen durch die Beteiligung an der Solar-Sharing-Anlage zu diversifizieren. Dadurch sollten finanzielle Verluste in der Landwirtschaft ausgeglichen werden, die aus dem Rückgang der japanischen Agrarexporte infolge der Katastrophe hervorgingen. Des Weiteren sollte die SolarSharing-Förderung der Landflucht und dem Hofsterben entgegenwirken. Viele Landwirte gaben ihren landwirtschaftlichen Betrieb auf, suchten in Städten nach Arbeit und verschlimmerten dadurch die Landflucht. Insgesamt wurden zwischen 2013 und 2021 über 3.000 Agri-PV-Projekte umgesetzt, was einer geschätzten Agri-PV-Gesamtkapazität von etwa 320 MWp entspricht (Sugibuchi 2019).

Südkorea: Angesichts der noch geringeren Verfügbarkeit von Ackerland pro Kopf im Vergleich zu Japan unterstützt die südkoreanische Regierung die Agri-PV-Einführung seit Herbst 2018. Südkorea möchte den Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung von 7 % im Jahr 2016 auf 20 % bis 2030 erhöhen. Die PV-Kapazität soll von 7,9 GWp im Jahr 2018 auf 30,8 GWp bis 2030 steigen, wobei der PV-Markt in vier verschiedenen Segmenten entwickelt werden soll: 2,4 GWp (8 % der PV-Ziele) sollen durch private Haushalte über Stromeigenverbrauchsregelungen umgesetzt werden und weitere 7,5 GWp (24 %) aus kleinen PV-Anlagen im privaten und gewerblichen Sektor. Große Freiflächen und schwimmende PV-

Anlagen sollen 10,9 GWp (35 %) ausmachen und 10 GWp (33 %) sollen anhand von Agri-PV auf Ackerland durch Handwerker und Landwirte umgesetzt werden. Ähnlich wie in Japan unterstützt die südkoreanische Regierung eher kleine Agri-PV-Projekte mit durchschnittlich etwa 100 kWp, was zu 100.000 Agri-PV-Anlagen bis 2030 führen soll. Im April 2019 waren 18 Agri-PV-Anlagen umgesetzt, was einer Agri-PV-Leistung von rund 2 MWp entspricht. Neben der knappen Verfügbarkeit von Ackerland in Südkorea sind weitere politische Gründe für die Agri-PV-Förderung die alternden Landwirte und das Problem der Betriebsaufgabe, ohne dass Nachkommen oder Neulandwirte diese Betriebe übernehmen. Dementsprechend ist davon auszugehen, dass landwirtschaftliche Flächen brach liegen werden und dass die monatliche Rente der pensionierten Bauern niedriger ausfällt als erhofft, da ihr Agrarland nicht verpachtet werden kann. Die Agri-PV soll diesen Landwirten ein zusätzliches monatliches Einkommen verschaffen und das Potenzial für den künftigen Anbau von Kulturpflanzen auf dem Ackerland bewahren. Bei der Auswahl der Kulturpflanzen, die für den Anbau unter Agri-PV zugelassen sind, bezieht sich die koreanische Regierung auf die Handelsbilanz für landwirtschaftliche Güter. Nur Kulturpflanzen mit einem netto Handelsüberschuss sind für Agri-PV förderfähig, damit potenzielle Ertragseinbußen der landwirtschaftlichen Erzeugnisse keine negativen Auswirkungen auf die Ernährungssicherheit haben. Die Korean Agrivoltaic Association (KAVA) wird von der Regierung unterstützt, sodass Landwirte und Handwerker in der Umsetzung und dem Betrieb von Agri-PV-Anlagen geschult und mit ihnen vertraut gemacht werden (Hong 2019; Park 2019; Han 2019).

China: Die mit Abstand größten Agri-PV-Projekte und die bei weitem höchsten installierten Agri-PV-Kapazitäten sind in China zu finden. Nach Angaben von Jinlin Xue wurden in China zwischen 2015 und 2018 schätzungsweise 4,0 GWp an landwirtschaftlicher PV-Kapazität installiert, wovon 2,3 GWp dieser Agri-PV-Kapazität auf das Segment SolarGewächshäuser entfallen und 1,7 Gwp auf Agri-PV-Anwendungen der Kategorie 1. Die weltweit größte Agri-PV-Kategorie-1-Anlage in Kombination mit Goji-Beeren wurde in Ningxia auf einer Fläche von über 1.200 Hektar mit einer Kapazität von etwa 1.000 MWp durch Huawei Fusion Solar errichtet (Bellini 2020a). Auf der Internationalen Agri-PV Konferenz 2020 wurde durch Jijiang He, Tsinghua University, und Xiaoxia Jia, UNCCD, berichtet, dass im Jahr 2020 insgesamt 16 GWp und somit rund ein Drittel des gesamten PV-Zubaus von 48,2 GWp in China durch sogenannte „PV+“-Systeme installiert wurden (Xue 2017) (Wang et al. 2017). PV+ umfasst Aqua-PV (z. B. PV kombiniert mit Shrimps oder Fischzucht), Agri-PV, PV und Eco-System Restauration, bspw. durch Biodiversität Maßnahmen und Bodenregenerierung,

SolarGewächshäuser sowie PV-Installationen zur Reduktion von Armut und für die Entwicklung ländlicher Regionen. PV+ Anlagen sind von der Landnutzungsobergrenze ausgenommen, die 2017 durch die chinesische Regierung für die Installation von PV-Anlagen auf landwirtschaftlichen Nutzflächen eingeführt wurde. Im Jahr 2022 veröffentlichte die Energiepartnerschaft Deutschland China durch die GIZ eine Übersicht der aktuellen Agri-PV-Marktentwicklung in China. Allein im Jahr 2021 wurden in China rd. 37 GWp Agri-PV-Leistung registriert, was mehr als der Hälfte der gesamten PV-Registrierungen entspricht. Im 14. und 15. Fünf-Jahres-Plan wird beabsichtigt, dass auf 1 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche, Gewächshausfläche und Fischzuchtfläche Agri-PV installiert wird, wodurch die Agri-PV-Leistung in den kommenden Jahren auf 234 GWp ansteigen wird (GIZ 2022).

Weitere Agri-PV-Projekte weltweit:

Chile: Fraunhofer ISE koordinierte gemeinsam mit Fraunhofer CSET in Chile einen Agri-PV-Technologietransfer und installierte 2017 drei Pilotvorhaben in der Metropolregion Santiago de Chile (Fraunhofer CSET 2017).

Kenia: Die Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden unterstützte unter der Leitung von Prof. Dr. Ulrike Feistel die Umsetzung einer Agri-PV-Anlage in Kenia (Feistel 2022).

Belgien: Die KU Leuven realisierte mehrere Agri-PV-Pilotprojekte in Belgien (Bellini 2020b).

Indien: In Indien sind mindestens zwölf Agri-PV-Pilotprojekte installiert und wissenschaftlich begleitet (Pulipaka und Peparthy 2021).

Israel: Im Januar 2022 haben in Israel das Ministerium für Landwirtschaft und ländliche Entwicklung sowie das Ministerium für Energie eine gemeinsame Auktion für die Umsetzung von 100 Agri-PV-Piloten veröffentlicht (Bellini 2022).

Ein Zwischenstand zu den Agri-PV-Marktentwicklungen in Japan, Südkorea, China, Frankreich und Massachusetts wurde von Schindele in seiner ersten Publikation 2020 im „Applied Energy Journal“ veröffentlicht und im Rahmen der vorliegenden Dissertationsschrift aktualisiert und ergänzt (Schindele et al. 2020). Im Jahr 2021 veröffentlichte der Verband der europäischen Solarunternehmen, SolarPowerEurope (SPE), eine Best Practice Guideline (BPG) zur Umsetzung von Agri-PV-Anlagen. Schindele war Teilnehmer im SPE-Workstream „Agrisolar“ und ist Co-Autor der Guideline. Obgleich in abgeschwächter Form im Vergleich zum deutschen DIN SPEC 91434 Agri-PV-Qualitätsstandard, so wurde auch in diesem

europäischen BPG-Agrisolar der Versuch unternommen, die unterschiedlichen Intensitäten von techno-ökologischen Synergien im Agri-PV-System zu bewerten, siehe Kapitel 2 „Sustainable agriculture and photovoltaics“, Unterkapitel 2.4 „Towards a 3-Star Benchmark for Agrisolar projects“, Seite 16, im SPE-BPG-Agrisolar (SolarPower Europe 2021). Im November 2022 wurde Schindele im neugegründeten SPE-Workstream „Land Use & Permitting“ von den führenden Solarunternehmen in der EU zum Co-Chair gewählt, damit dieser seine Erfahrungen auf EU-Ebene einbringen kann, wie der PV-Ausbau in Einklang mit der Landwirtschaft und Naturschutz auf Agrarflächen ermöglicht werden kann, damit die Baugenehmigungsverfahren in den EU-Mitgliedstaaten vereinfacht werden können.

1.4 Von der Innovation zur Diffusion: ab 2022

In Frankreich und im wissenschaftlichen Kontext wird die Agri-PV „Agrivoltaic“ genannt, in Japan „SolarSharing“ und in China „PV+“. Der Grundgedanke ist in allen Ländern der gleiche: Die Agri-PV koppelt eine Solarstromerzeugung an die Nahrungsmittelproduktion auf einer Agrarfläche. Für den Landwirtschaftssektor kann die Agri-PV zugleich ein Instrument zur Anpassung an den Klimawandel sein sowie auch einen Beitrag zur Reduktion der CO₂-Emissionen leisten. Agri-PV erhält ein bestimmtes Minimalniveau an landwirtschaftlichen Erträgen, sodass von einer landwirtschaftlichen Haupterzeugung ausgegangen werden kann und die Landnutzungseffizienz durch eine kombinierte Agrarflächennutzung wesentlich gesteigert wird. Weltweit wurden tausende Agri-PV-Projekte umgesetzt und vielfach wissenschaftlich begleitet. Der Aufruf von Goetzberger et al. aus dem Jahr 2006 „an die PV-Industrie, sich zusammenzufinden, um diese Vision Wirklichkeit werden zu lassen“, scheint mehr als erfolgreich gewesen zu sein, denn der Aufruf zur Unterstützung und Umsetzung von Agri-PV-Anlagen kommt längst nicht mehr ausschließlich aus der PV-Industrie. Insbesondere der Agrarsektor und die Wissenschaft haben erkannt, dass die Agri-PV einen Beitrag zum nachhaltigen Landmanagement sowie zu einem ressourcenschonenden Umgang mit fruchtbaren Böden leisten kann und simultan die Energiewende und den Klimaschutz vorantreibt. Auf nationaler Ebene haben sich die Koalitionsparteien im Koalitionsvertrag darauf geeinigt, die Agri-PV zu stärken und die Ko-Nutzung zu ermöglichen (SPD und Bündnis 90/Die Grünen und FDP 2021, S. 58). Dieser bundespolitischen Zielsetzung waren diverse

Positionspapiere aus dem Agrar- und Solarsektor sowie aus unterschiedlichen Landesregierungen vorausgegangen (BDEW 2022; BnetzA 2021b; Deutscher Bauernverband 2021), die sich häufig aus den Erkenntnissen und Veröffentlichungen aus dem APV-RESOLA-Projekt bedienen. Im November 2020 trat die „Richtlinie zur Förderung der Energieeffizienz und CO₂-Einsparung in Landwirtschaft und Gartenbau“ in Kraft und im September 2021 wurden für dieses Bundesprogramm bessere Förderbedingungen und ein leichter Zugang beschlossen (BMEL 2021b). Am 01.04.2022 wurde in Deutschland im Rahmen des EEGs 2021 die erste Innovationsausschreibung für besondere Solaranlagen und somit auch für die Agri-PV durchgeführt (BnetzA 2022b). Das am 10. Februar 2022 von den drei zuständigen Bundesministerien BMWK, BMUV und BMEL veröffentlichte Eckpunktepapier „Ausbau der Photovoltaik auf Freiflächen im Einklang mit landwirtschaftlicher Nutzung und Naturschutz“ (Die Bundesregierung 2022b) untermauert die Ambitionen aus dem Koalitionsvertrag und den nächsten Schritt im Agri-PV-Innovationsprozess von Innovation zur Diffusion. Im BMWK-Osterpaket wurde das EEG 2023 präsentiert und die Agri-PV aus der Innovationsausschreibung in das erste Segment der PV-Förderung integriert (Die Bundesregierung 2022a).¹ Die deutsche Bundesregierung scheint den Mehrwert der Agri-PV zur Steigerung des Nachhaltigkeitsniveaus erkannt zu haben und fördern zu wollen. Das Bewusstsein der Bevölkerung gegenüber der globalen Ernährungs- und Energiekrise ist seit dem Ukraine-Krieg gestiegen.

1.5 Mein Promotionsvorhaben im APV-RESOLA-Projekt

1.5.1 Meine Funktionen und Fragestellungen im APV-RESOLA-Projekt

Im APV-RESOLA-Projekt erfüllte ich mehrere Funktionen. Ich war leitender Projektkoordinator des gesamten Forschungsverbundes, Innovationsgruppenleiter, Leiter des Arbeitsschwerpunktes Politik und Ökonomie sowie Doktorand. Hinsichtlich der Agri-PV-

¹ In diesem Kabinettsbeschluss wird auf der letzten Seite unser Freund, Kollege und IfP-Absolvent Dr. Steffen Jenner für sein Engagement in der Energie- und Klimapolitik gewürdigt.

Markteinführung in Deutschland stellte ich mir im Rahmen der drei Dimensionen von Politik (Polity, Policy und Politics) die folgenden fünf wirtschaftspolitischen Fragestellungen:

1) Welche bundesstaatlichen Ressorts sind durch das Querschnittsthema Agri-PV betroffen und welches ist federführend für die Agri-PV-Markteinführung politisch verantwortlich? (Dimension: Polity; Methode: Politikfeldanalyse, Ist-Zustand)

2) Welche ideologischen Distanzen bestehen zwischen den Akteuren hinsichtlich der Agri-PV-Markteinführung? (Dimension: Politics; Methode: Auswertung Konsultationsphasen EEG und DirektZahlDurchfV, Fachgespräche, Experteninterviews, Ist-Zustand)

3) Welche gesetzlichen Rahmenbedingungen im Mehr-Ebenen-System stehen der Agri-PV-Markteinführung innovationshemmend entgegen?

(Dimension: Policy; Methode: Mehr-Ebenen-Policy-Analyse, Ist-Zustand)

4) Wie müssten sich der bundesstaatliche Koordinationsprozess und gesetzliche Rahmenbedingungen ändern, damit die Agri-PV-Markteinführung gelingen kann?

(Dimension: Politics und Policy; Methode: Fachgespräche, Experteninterviews, Soll-Zustand)

5) Welche Auswirkungen könnte eine Agri-PV-Diffusion auf den absoluten und täglichen Agrarflächenerhalt (und somit auf Nachhaltiges Landmanagement) in Deutschland bis Jahresende 2050 haben?

(Dimension: Policy; Methode: Literaturrecherche, Wirkungsanalyse durch Simulation der Agri-PV-Diffusion mit Bewertung des Agrarflächenerhalts)

Die einzelnen Fragestellungen wurden im Projekt bestimmten Arbeitspaketen zugewiesen. Die Fragen 1–3 dienten zur Bewertung des Ist-Zustands und wurden durch Literaturrecherchen, Fachgespräche und Experteninterviews, Politikfeldanalysen, Mehr-Ebenen-Policy-Analysen, Stromgestehungskosten- und Price-Performance-Ratio-Berechnungen beantwortet. Die Fragen 4–5 waren in die Zukunft gerichtet und bedienten sich normativen Annahmen, die in den Fachgesprächen und Experteninterviews diskutiert wurden. Die Wirkungsanalyse auf den Agrarflächenerhalt wurde in einer Excel-Szenarien-Simulation durchgeführt. Die Antworten auf die wirtschaftspolitischen Fragestellungen sind in Kapitel 4 „Ergebnisse“ erläutert.

1.5.2 Meine Publikationsübersicht

Aus dem Promotionsverfahren gingen insgesamt vierzehn Publikationen hervor. Neun wissenschaftliche Artikel wurden in begutachteten, international anerkannten Fachzeitschriften publiziert. Weitere fünf Publikationen wurden zwar nicht durch wissenschaftliche Fachzeitschriften veröffentlicht, sind aber gleichwohl von hoher wissenschaftlicher Bedeutung und werden Auswirkung auf die Agri-PV-Markteinführung haben, u. a. ein DIN SPEC Dokument, ein Best Practice Guide, ein Leitfaden, eine Gebrauchsmusteranmeldung sowie Kapitelbeiträge in einem Buch, das als Meta-Analyse aus der Begleitforschung der Fördermaßnahme „Innovationsgruppen für ein Nachhaltiges Landmanagement“ mit dem Titel „Nachhaltig Landnutzung managen“ hervorging.

Vier wissenschaftliche Artikel, die in den Jahren 2020 und 2021 in Fachzeitschriften publiziert wurden, sind Leistungen aus den politikwissenschaftlichen Forschungsarbeiten im APV-RESOLA-Projekt und bieten den roten Faden für die vorliegende kumulative Dissertation. Zwei dieser Fachartikel wurden aus alleiniger Autorenschaft, einer als Hauptautor mit Co-Autoren und ein weiterer durch eine Co-Autorenschaft erarbeitet. Die Ergebnisse sind anschlussfähig an bestehende Forschungen in den Bereichen Innovations-, Agrar-, Energie- und Nachhaltigkeitspolitik und erlauben gleichzeitig neue Perspektiven auf die Genehmigungs- und Beihilfefähigkeit der Agri-PV-Diffusion in Deutschland. Elf der vierzehn Publikationen wurden durch Co-Autorenbeiträge unterstützt, wodurch der trans- und interdisziplinäre Charakter der Agri-PV als Versuchsgegenstand und des APV-RESOLA-Projektes untermauert wird.

Tabelle 1-1: Übersichtstabelle der wissenschaftlichen Artikel mit Beiträgen von Schindele; veröffentlicht in begutachteten, international anerkannten Fachzeitschriften (eigene Darstellung)

Nr.	Titel	Journal/ Herausgeber	Hauptautor	Co-Autoren	Beitrag Schindele	Jahr	Arbeitsschwerpunkt
1	Combining PV and Food Crops to Agrophotovoltaic – Optimization of Orientation and Harvest	EU PV SEC Proceedings 2012	Georg Bopp	Michael Beck, Adolf Goetzberger, Tabea Obergfell, Christian Reise, <u>Stephan Schindele</u>	0-25 % Literaturübersicht, 26–50 % Analysedurchführung und Methodenauswahl/-entwicklung Potenzialanalyse 0-25 % Konzeption und Verfassen des Artikels	2012	Technik
2	Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities. A review	Agronomy for Sustainable Development/INRA und Springer-Verlag	Axel Weselek	Andrea Ehmann, Sabine Zikeli, Iris Lewandowski, <u>Stephan Schindele</u> , Petra Högy	25 % Literaturübersicht, 25 % Konzept und Design der Studie/Analyse	2019	Landwirtschaft
3	Implementation of agrophotovoltaics: Techno-economic analysis of the price-performance ratio and its policy implications	Applied Energy/Elsevier	Stephan Schindele	Max Trommsdorff, Albert Schlaak, Tabea Obergfell, Georg Bopp, Christian Reise, Christian Braun, Axel Weselek, Andrea Bauerle, Petra Högy, Adolf Goetzberger, Eicke Weber	> 75 % Literaturübersicht > 51–75 % Entwicklung des theoretischen Modells und Rahmens > 51–75 % Konzept und Design der Studie/Analyse > 51–75 % Analysedurchführung und Methodenauswahl/-entwicklung > 75 % Auswertung und Interpretation der Ergebnisse > 75 % Konzeption und Verfassen des Artikels	2020	Politik und Ökonomie
4	Feldfrüchte und Strom von Agrarflächen: Was ist Agri-Photovoltaik und was kann sie leisten?	GAiA/oekom Verlag	Stephan Schindele	-	> 75 % Literaturübersicht > 75 % Entwicklung des theoretischen Modells und Rahmens > 75 % Konzept und Design der Studie/Analyse > 75 % Analysedurchführung und Methodenauswahl/-entwicklung > 75 % Auswertung und Interpretation der Ergebnisse > 75 % Konzeption und Verfassen des Artikels	2021	Politik und Ökonomie

5	Nachhaltige Landnutzung mit Agri-Photovoltaik: Photovoltaikausbau im Einklang mit der Lebensmittelproduktion	GAiA/oekom Verlag	Stephan Schindele	-	> 75 % Literaturübersicht > 75 % Entwicklung des theoretischen Modells und Rahmens > 75 % Konzept und Design der Studie/Analyse > 75 % Analysedurchführung und Methodenauswahl/-entwicklung > 75 % Auswertung und Interpretation der Ergebnisse > 75 % Konzeption und Verfassen des Artikels	2021	Politik und Ökonomie
6	The advent of modern solar-powered electric agricultural machinery: A solution for sustainable farm operations	Journal of Cleaner Production/Elsevier	Shiva Gorjian	Hossein Ebadi, Max Trommsdorff, H. Sharon, Matthias Demant, <u>Stephan Schindele</u>	0–25 % Literaturübersicht 0–25 % Entwicklung des theoretischen Modells und Rahmens 0–25 % Konzept und Design der Studie/Analyse	2021	Technik
7	Combining food and energy production: Design of an agrivoltaic system applied in arable and vegetable farming in Germany	Renewable and Sustainable Energy Reviews/Elsevier	Max Trommsdorff	Jinsuk Kang, Christian Reise, <u>Stephan Schindele</u> , Georg Bopp, Andrea Ehmann, Axel Weselek, Petra Högy, Tabea Obergfell	26–50 % Literaturübersicht 0–25 % Entwicklung des theoretischen Modells und Rahmens 26–50 % Konzept und Design der Studie/Analyse 0–25 % Analysedurchführung und Methodenauswahl/-entwicklung 26–50 % Auswertung und Interpretation der Ergebnisse 0–25 % Konzeption und Verfassen des Artikels	2021	Technik
8	An analytical framework to estimate the economics and adoption potential of dual land-use systems: The case of agrivoltaics	Agricultural Systems	Arndt Feuerbacher	Moritz Laub, Petra Högy, Christian Lippert, Lisa Pataczek, <u>Stephan Schindele</u> , Christine Wieck, Sabine Zikeli	0–25 % Literaturübersicht 26–50 % Datenbereitstellung Agri-PV Kosten und Deckungsbeitragsrechnung Landwirtschaft 0–25 % Entwicklung des theoretischen Modells und Rahmens 0–25 % Auswertung und Interpretation der Ergebnisse 0–25 % Konzeption und Verfassen des Artikels	2021	Politik und Ökonomie
9	Can synergies in agriculture through an integration of solar energy reduce the cost of agrivoltaics? An economic analysis in apple farming.	Applied Energy/Elsevier	Maximilian Trommsdorff	Michaela Hopf, Oliver Hörnle, Matthew Berwind, <u>Stephan Schindele</u> , Kerstin Wydra	0–25 % Literaturübersicht >51 - 75 % Datenbereitstellung Agri-PV Kosten und Deckungsbeitragsrechnung Landwirtschaft 0–25 % Entwicklung des theoretischen Modells und Rahmens 0–25 % Konzeption und Verfassen des Artikels	2023	Technik und Ökonomie

Tabelle 1-2: Übersichtstabelle der Veröffentlichungen mit Beiträgen von Schindele in nicht wissenschaftlichen Fachzeitschriften, jedoch mit wissenschaftlicher Bedeutung und Auswirkung auf die Agri-PV-Markteinführung in Deutschland und der EU (eigene Darstellung)

Nr	Titel	Herausgeber	Verfasser (Organisation)	Sprache	Jahr
1	Agri-Photovoltaik: Chance für Landwirtschaft und Energiewende. Ein Leitfaden für Deutschland.	Fraunhofer ISE	Max Trommsdorff, Simon Gruber, Tobias Keinath, Michaela Hopf, Charis Hermann, Frederik Schönberger (alle Fraunhofer ISE), Petra Högy, Sabine Zikeli, Andrea Ehmman, Axel Weselek (alle Universität Hohenheim), Ulrich Bodmer (Hochschule Weihenstephan-Triesdorf), Christine Rösch, Daniel Ketzer, Nora Weinberger (alle ITAS/KIT), <u>Stephan Schindele (BayWa r.e.)</u> , Jens Vollprecht (Becker Büttner Held Rechtsanwälte)	Deutsch, Englisch	2020
2	Agri-Photovoltaik-Anlagen – Anforderungen an die landwirtschaftliche Hauptnutzung DIN SPEC 91434:2021-05	DIN	Friedrich Lettenmeier (ABCERT), Edgar Gimbel, Albert Schlaak (beide BayWa r.e.), <u>Stephan Schindele (BSW-Solar)</u> , Tobias Keinath, Andreas Steinhüser, Max Trommsdorff (alle drei Fraunhofer ISE), Constantin Lindemeyer (Goldbeck Solar), Georg Mair (Hilber Solar), Andreas Lachhammer (Lachhammer Windkraft), Franz Hilber (Magdalenahof), Markus Balz, Matthis Bohn, Mike Schlaich, Gerhard Weinrebe (alle vier sbp Sonne), Daniel Eisel, Gawan Heintze (beide TFZ), Thomas Hüttmayer, Hoachim Mack, Johann Mayer (alle drei TubeSolar), Jonas Brückner, Norbert Lenck (beide VDE Rnewables), Jens Wagner (Viridi RE)	Deutsch, Englisch, Spanisch, Französisch, Niederländisch, Polnisch	2021
3	Agrisolar Best Practices Guidelines Version 1.0	SolarPowerEurope	Bas van Aken (TNO), Blandine Thuel (Acthuel), Eric Tonnaer (Vattenfall), Faustine Gaymard (Akuo), Felipe Canto Teixeira (Everoze), Guillaume Motillon (NCA environment), Horacio Gonzalez Aleman (Farm Europe), Isabelle Decombeix (Enoe Energie), Jean-François Lerat (Sun'Agri), Katrin Aust (BayWa r.e.), Kay Cesar (TNO), Lucie Grenet (RES Group), Luisa Calleri (Elettricità Futura), Margot Varenterghem (CETIAC), Nelsie Berges (SER), Paul Elfassi (SER), Ragna Schmidt-Haupt (Everoze), <u>Stephan Schindele (BayWa r.e.)</u> , Teresa Ojanguren Fernandez (Iberdrola), Xavier Daval (kiloWatt Sol)	Englisch	2021
4	APV-Anlage mit integrierter Feldbearbeitungsrobotik (APV-Bot) Gebrauchsmusteranmeldung in Deutschland	Fraunhofer ISE	Max Trommsdorff (Fraunhofer ISE), <u>Stephan Schindele (BayWa r.e.)</u> , Matthias Demant (Fraunhofer ISE)	Deutsch	2021
5	Nachhaltige Landnutzung managen. Akteure beteiligen – Ideen entwickeln – Konflikte lösen Kapitel 1: Grundlagen, Land nachhaltig nutzen Kapitel 3: Mitmacher:innen, Politik und Verwaltung konstruktiv stören	Inter3 Institut für Ressourcenmanagement: Susanne Schön, Christian Eismann, Helke Wendt-Schwarzburg, Till Ansmann	Christian Böhm (BTU Cottbus-Senftenberg), Florian Etterer (Technische Universität Dresden), Daniela Kempa (Leibniz Universität Hannover), Bettina König (Humboldt-Universität zu Berlin), Gesa Matthes (Technische Universität Hamburg), André Schaffrin (EA European Academy of Technology and Innovation Assessment), <u>Stephan Schindele (Fraunhofer ISE)</u> , Jens Schneider (Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen), Anne von Streit (Ludwig-Maximilians-Universität München), Birgit Böhm (mensch und region), Peter Huusmann (Kreis Steinburg), Joachim Liesenfeld (Universität Duisburg-Essen), Tobias Preising (Region Hannover), Lena Strothe (TU Dortmund), Alexandra Terhorst (Institut für Landes- und Stadtentwicklungsforschung Dortmund)	Deutsch	2019

1.6 Referenzen

- AELF Krumbach (Schwaben)-Mindelheim (2009): Versuchs-anbau (Schauversuch) von Winterweizen unter der Photovoltaik-Anlage in Warmisried; Besichtigung am 02.09.2009; Brief vom 04.09.2009. Brief. Unter Mitarbeit von Manfred Guggenmos. Mindelheim. Online verfügbar unter http://elektro-guggenmos.de/uploads/media/Bescheinigung_Landwirtschaftsamt_Mindelheim_-_Versuchsanbau_Doppelernte.pdf, zuletzt aktualisiert am 2009, zuletzt geprüft am 25.04.2022.
- AgroSolar Europe (2021): Forschung & Entwicklung: Unsere Projekte. Lüchow: Eine 750kW Anlage. Unsere erste 1-Hektar Agro PV Anlage. Online verfügbar unter <https://www.agrosolareurope.de/forschung-entwicklung-unsere-projekte/#steinicke>, zuletzt aktualisiert am 05.11.2021, zuletzt geprüft am 27.04.2022.
- BayWa r.e. AG (2021): Erste Agri-PV-Anlage für Äpfel in Deutschland errichtet. Online verfügbar unter <https://www.baywa-re.com/de/news/details/erste-agri-pv-anlage-fuer-aepfel-in-deutschland-errichtet>, zuletzt geprüft am 27.04.2022.
- BDEW (2022): Positionspapier. 30 Vorschläge für einen PV-Turbo. Was jetzt für einen schnellen PV-Ausbau zu tun ist. Hg. v. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V. (BDEW). Berlin. Online verfügbar unter https://www.bdew.de/media/documents/220316_BDEW-Papier_30_Vorschlae_f%C3%A4ge_f%C3%BCr_einen_PV_Turbo.pdf, zuletzt geprüft am 16.05.2022.
- Bellini, Emiliano (2020a): Giant agrivoltaic project in China. In: PV Magazine, 03.09.2020. Online verfügbar unter <https://www.pv-magazine.com/2020/09/03/giant-agrivoltaic-project-in-china/>, zuletzt geprüft am 13.05.2022.
- Bellini, Emiliano (2020b): Agrivoltaics for pear orchards. In: PV Magazine, 02.10.2020. Online verfügbar unter <https://www.pv-magazine.com/2020/10/02/agrivoltaics-for-pear-orchards/>, zuletzt geprüft am 13.05.2022.
- Bellini, Emiliano (2022): Israel launches tender for 100 MW of agrivoltaics. In: PV Magazine, 14.01.2022. Online verfügbar unter <https://www.pv-magazine.com/2022/01/14/israel-launches-tender-for-100-mw-of-agrivoltaics/>, zuletzt geprüft am 13.05.2022.
- BMBF (2020): Innovationsgruppen für ein Nachhaltiges Landmanagement. Hg. v. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und Forschung für Nachhaltigkeit (FONA). Online verfügbar unter <https://www.fona.de/de/massnahmen/foerdermassnahmen/innovationsgruppen-fuer-ein-nachhaltiges-landmanagement.php>, zuletzt aktualisiert am 26.04.2022, zuletzt geprüft am 26.04.2022.
- BMBF (2022a): Nachhaltiges Landmanagement Modul B: Aktuelles. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). Online verfügbar unter <http://modul-b.nachhaltiges-landmanagement.de/modul-b-info/aktuelles/>, zuletzt aktualisiert am 25.04.2022, zuletzt geprüft am 25.04.2022.
- BMBF (2022b): Innovationsgruppen für ein Nachhaltiges Landmanagement. Begleitvorhaben: Analyse und Synthese (Schwerpunkt ZALF). Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF); Forschung für Nachhaltigkeit (FONA). Online verfügbar unter <https://innovationsgruppen-landmanagement.de/de/begleitvorhaben/analyse-und-synthese/>, zuletzt aktualisiert am 26.04.2022, zuletzt geprüft am 26.04.2022.
- BMBF (2022c): Innovationsgruppen für ein Nachhaltiges Landmanagement. Begleitvorhaben: Innovationsmanagement und Prozessbegleitung (Schwerpunkt inter3). Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF); Forschung für Nachhaltigkeit (FONA). Online verfügbar unter <https://innovationsgruppen-landmanagement.de/de/begleitvorhaben/prozessbegleitung/>, zuletzt aktualisiert am 26.04.2022, zuletzt geprüft am 26.04.2022.
- BMEL (2021a): Richtlinie zur Förderung der Energieeffizienz und CO₂-Einsparung in Landwirtschaft und Gartenbau. Teil A – Landwirtschaftliche Erzeugung, Wissenstransfer. Hg. v. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). BMEL. Online verfügbar unter https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/Projektfoerderung/BuPro_Energieeffizienz/A-Richtlinie.pdf?__blob=publicationFile&v=2, zuletzt aktualisiert am 18.08.2021, zuletzt geprüft am 18.05.2022.

- BMEL (2021b): Richtlinie zur Förderung der Energieeffizienz und CO₂-Einsparung in Landwirtschaft und Gartenbau. Teil B: Erneuerbare Energieerzeugung. Hg. v. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). Berlin. Online verfügbar unter https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/Projektfoerderung/BuPro_Energieeffizienz/B-Richtlinie.pdf?__blob=publicationFile&v=5, zuletzt geprüft am 16.05.2022.
- BMEL (2021c): Verordnung zur Durchführung der GAP-Direktzahlungen. GAP-Direktzahlungen-Verordnung – GAPDZV. Unter Mitarbeit von Schneider Charlotte. BMEL. Online verfügbar unter https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Glaeserne-Gesetze/Kabinettfassung/GAPDZV.pdf?__blob=publicationFile&v=3, zuletzt aktualisiert am 24.11.2021, zuletzt geprüft am 31.05.2022.
- BMJV (2020): Verordnung zu den Innovationsausschreibungen. InnAusV. BMWi. Online verfügbar unter <https://www.gesetze-im-internet.de/innausv/BJNR010610020.html>, zuletzt aktualisiert am 20.01.2020, zuletzt geprüft am 26.04.2022.
- BnetZA (2021a): Verwaltungsverfahren Az.: 8175-07-00-21/1. Festlegung der Anforderungen besonderer Solaranlagen nach §15 Innovationsausschreibungsverordnung. Hg. v. Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen. BnetZA. Online verfügbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/Ausschreibungen/Innovations/GezeichneteFestlegungOktober2021.pdf?__blob=publicationFile&v=3, zuletzt geprüft am 26.04.2022.
- BnetZA (2021b): Ein-ge-gan-ge-ne Stel-lung-nah-men im Fest-le-gungs-verfah-ren zu den be-son-de-ren So-lar-an-la-gen. Bundesnetzagentur (BNetZA). Online verfügbar unter <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Ausschreibungen/Innovation/BesondereSolaranlagen/StellungnahmenFestlegungsverfahren/start.html>, zuletzt aktualisiert am 18.05.2022, zuletzt geprüft am 18.05.2022.
- BnetZA (2022): In-no-va-ti-ons-aus-schrei-bun-gen: Ge-bots-ter-min 1. April 2022. Hg. v. Bundesnetzagentur (BNetZA). Online verfügbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Ausschreibungen/Innovation/Gebortstermin_010422/artikel.html, zuletzt aktualisiert am 16.05.2022, zuletzt geprüft am 16.05.2022.
- Bopp, Georg (2021): Die lange Geschichte der APV. Von der Idee bis zum Projekt. Lecture Series Fraunhofer ISE. Fraunhofer ISE. Freiburg, 08.04.2021.
- Bopp, Georg; Goetzberger, Adolf; Obergfell, Tabea; Reise, Christian (2012): Verfahren zur simultanen Kultivierung von Nutzpflanzen und energetischen Nutzung von Sonnenlicht. Patent Nr. EP2811819B1. Hg. v. Fraunhofer ISE. Fraunhofer-Gesellschaft. Online verfügbar unter <https://patents.google.com/patent/EP2811819B1/de>.
- Chan, Gabriel; Gabel, Matthias; Jenner, Steffen; Schindele, Stephan (2011): BRIC by BRIC. Governance and Energy Security in Developing Countries. Working Paper No. 47 - 2011. Hg. v. Wirtschaft & Politik (WiP). Universität Tübingen. Tübingen (ISSN 1614-5925). Online verfügbar unter https://bibliographie.uni-tuebingen.de/xmlui/bitstream/handle/10900/47813/pdf/Chan_Gabel_Jenner_Schindele_2011_Bric_by_Bric_.pdf?sequence=1, zuletzt geprüft am 16.05.2022.
- Commonwealth of Massachusetts; EEA; DOER; MDAR (2018): Guideline Regarding the Definition of Agricultural Solar Tariff Generation Units. Hg. v. Commonwealth of Massachusetts, Executive Office of Energy and Environmental Affairs (EEA), Massachusetts Department of Energy Resources (DOER) und Massachusetts Department of Agricultural Resources (MDAR). Online verfügbar unter <https://www.mass.gov/doc/agricultural-solar-tariff-generation-units-guideline-final/download>, zuletzt geprüft am 27.04.2022.
- Deutscher Bauernverband (2021): Potenziale und Synergien von Agri-Photovoltaik im EEG nutzen. Deutscher Bauernverband und Fraunhofer ISE schlagen Optimierung vor. 29.04.2021. Online verfügbar unter <https://www.bauernverband.de/presse-medien/pressemitteilungen/pressemitteilung/potenziale-und-synergien-von-agri-photovoltaik-im-eeg-nutzen>, zuletzt geprüft am 13.05.2022.
- Die Bundesregierung (2011): The Water, Energy and Food Security Nexus – Solutions for the Green Economy. Bonn. Online verfügbar unter <https://www.water-energy-food.org/about-us>.

- Die Bundesregierung (2022a): Gesetzentwurf der Bundesregierung. Entwurf eines Gesetzes zu Sofortmaßnahmen für einen beschleunigten Ausbau der erneuerbaren Energien und weiteren Maßnahmen im Stromsektor. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). Die Bundesregierung. Online verfügbar unter https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/04_EEG_2023.pdf?__blob=publicationFile&v=8, zuletzt geprüft am 16.05.2022.
- Die Bundesregierung (2022b): Eckpunktepapier BMWK BMUV und BMEL. Ausbau der Photovoltaik auf Freiflächen im Einklang mit landwirtschaftlicher Nutzung und Naturschutz. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). Berlin. Online verfügbar unter https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/eckpunktepapier-ausbau-photovoltaik-freiflaechenanlagen.pdf?__blob=publicationFile&v=12, zuletzt geprüft am 16.05.2022.
- DIN (2022): DIN SPEC 91434:2021-05. Agri-Photovoltaik-Anlagen - Anforderungen an die landwirtschaftliche Hauptnutzung. DIN. Online verfügbar unter <https://www.beuth.de/de/technische-regel/din-spec-91434/337886742>, zuletzt aktualisiert am 26.04.2022, zuletzt geprüft am 26.04.2022.
- DOER MA (2018): Agricultural Solar Tariff Generation Units Guideline Final. Last updated: 2018-04-26. Hg. v. Massachusetts Department of Energy Resources (DOER MA). Online verfügbar unter <https://www.mass.gov/doc/agricultural-solar-tariff-generation-units-guideline-final>, zuletzt geprüft am 30.05.2022.
- DOER MA (2022): Dual-use shading analysis tool. Massachusetts Department of Energy Resources (DOER MA). Online verfügbar unter <https://massgov.github.io/DOER/DOER.html>, zuletzt aktualisiert am 18.03.2022, zuletzt geprüft am 01.09.2022.
- Dupraz, Christian.; Marrou, Hélène; Talbot, Grégoire; Dufour, Lydie; Nogier, A.; Ferard, Yoann (2011): Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use. Towards new agrivoltaic schemes. In: *Renewable Energy* 36 (10), S. 2725–2732. DOI: 10.1016/j.renene.2011.03.005.
- Eckmann, U. (2022): SUNfarming Group entwickelt und realisiert neuartige Agri-Solar-Systeme im Rheinland. *SUNfarming.de*. 15.02.2022. Online verfügbar unter <https://sunfarming.de/blog/sunfarming-group-entwickelt-und-realisiert-neuartige-agri-solar-systeme-im-rheinland>, zuletzt geprüft am 27.04.2022.
- Ecowind (2022): Agri-PV Anlage Haidegg. Leuchtturmprojekt Agri-PV Anlage in Haidegg. ECOWIND Handels- & Wartungs-GmbH. Online verfügbar unter <https://www.ecowind.at/unternehmen/referenzen/agri-pv-anlage-haidegg/>, zuletzt aktualisiert am 02.03.2022, zuletzt geprüft am 31.05.2022.
- EDF France (2020): Une année sous les panneaux d'Agri-PV. Publié le 22/09/2020. Électricité de France SA. Online verfügbar unter <https://www.edf.fr/groupe-edf/inventer-l-avenir-de-l-energie/r-d-un-savoir-faire-mondial/toutes-les-actualites-de-la-r-d/une-annee-sous-les-panneaux-d-agri-pv>, zuletzt geprüft am 27.04.2022.
- ENGIE (2022): Agri PV. Online verfügbar unter <https://www.engie.nl/over-ons/projecten/Agri-PV>, zuletzt aktualisiert am 01.09.2022, zuletzt geprüft am 01.09.2022.
- Feistel, Ulrike (2022): Hydrologie und Energiewende - Projektbeispiele. Aufbau Agro-PV Anlage in Ngerenyi, Kenia. Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden. Online verfügbar unter <https://www.htw-dresden.de/hochschule/fakultaeten/bauingenieurwesen/studium/lehrgebiete/wasserwesen/forschung/hydrologie-und-energiewende>, zuletzt aktualisiert am 01.09.2022, zuletzt geprüft am 01.09.2022.
- Feuerbacher, Arndt; Laub, Moritz; Högy, Petra; Lippert, Christian; Pataczek, Lisa; Schindele, Stephan 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.
- Fraunhofer CSET (2017): FIC AgroPV. Presentacion del proyecto. Hg. v. Fraunhofer Chile. Online verfügbar unter https://www.smart-agropv.com/principal/1/resultados_agropvr15/, zuletzt geprüft am 07.01.2020.
- Fraunhofer ISE (2020): Agri-Photovoltaik: Chance für Landwirtschaft und Energie. Ein Leitfaden für Deutschland. Hg. v. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Online verfügbar unter https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/infomaterial/brochures/photovoltaik/APV-Leitfaden_2020_web_neu.pdf, zuletzt geprüft am 26.04.2022.
- GIZ (2022): An Overview of the Current Situation of Agrivoltaic Development in China and Some Recommendations. Sino-German Energy Partnership. Hg. v. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. The Sino-German Energy Partnership.

- Goetzberger, Adolf (2014): Solarmodulanordnung mit reduzierten Randeffekten und Verwendung der Solarmodulanordnung zur simultanen Kultivierung von Nutzpflanzen und energetischer Nutzung von Sonnenlicht. Patent Nr. DE102014218458A1. Hg. v. Fraunhofer ISE. Fraunhofer-Gesellschaft. Deutsches Patent- und Markenamt. Online verfügbar unter <https://patents.google.com/patent/DE102014218458A1/ja>, zuletzt geprüft am 25.04.2022.
- Goetzberger, Adolf; Swanson, Richard; Werner, Tom; Yamaguchi, Masafumi (2006): Energy Farming. Für einen intelligenteren Gebrauch von Agrarsubventionen. In: *Solarzeitalter* 2006 (4), S. 44–48.
- Goetzberger, Adolf; Zastrow, Armin (1981): Kartoffeln unter dem Kollektor. In: *Sonnenenergie* (3), S. 19–22. Online verfügbar unter <https://produktdatenbank.innovationsgruppen-landmanagement.de/kartoffeln-unter-dem-kollektor>, zuletzt geprüft am 25.04.2022.
- Goetzberger, Adolf; Zastrow, Armin (1982): On the coexistence of solar-energy conversion and plant cultivation. In: *International Journal of Solar Energy* 1982 (1), S. 55–69. Online verfügbar unter DOI:10.1080/01425918208909875, zuletzt geprüft am 25.04.2022.
- Gorjian, Shiva; Ebadi, Hossein; Trommsdorff, Max; Sharon, H.; Demant, Matthias; Schindele, Stephan (2021): The advent of modern solar-powered electric agricultural machinery: A solution for sustainable farm operations. In: *Journal of Cleaner Production* 292, S. 126030. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126030.
- GrIG (2015): Sequestrata la più grande concentrazione europea di serre fotovoltaiche. In: Gruppo d'Intervento Giuridico (GrIG), 04.07.2015. Online verfügbar unter <https://gruppodinterventogiuridicoweb.com/2015/07/04/sequestrata-la-piu-grande-concentrazione-europea-di-serre-fotovoltaiche/>, zuletzt geprüft am 01.09.2022.
- Han, Kim Chang (2019): Korea's farming-type photovoltaic business and Association role. Session 3: The 1st Solar Sharing Symposium - The Next Big Things (I) Moderator: Prof. Oh Soo Young, Yeungnam University. KAVA. Green Energy Expo. Daegue, Korea (04.04.2019), 2019. Online verfügbar unter <http://greenconference.kr/eng/doc/program02.php>, zuletzt geprüft am 25.09.2019.
- Harwood, Lori (2021): UArizona Partners on \$10M USDA Grant to Expand Research on Growing Crops Under Solar Panels. The University of Arizona. 06.10.2021. Online verfügbar unter <https://news.arizona.edu/story/uarizona-partners-10m-usda-grant-expand-research-growing-crops-under-solar-panels>, zuletzt geprüft am 13.05.2022.
- Hofgemeinschaft Heggelbach (2022): Regenerative Energien. Die Energie der Hofgemeinschaft. Hg. v. Hofgemeinschaft Heggelbach. Online verfügbar unter <https://hofgemeinschaft-heggelbach.de/energie>, zuletzt aktualisiert am 25.04.2022, zuletzt geprüft am 27.05.2022.
- Hong, Seo Jae (2019): Overview of Korean PV Market, Policies and Industry. Key note speech 2 (04.04.2019). Session 2: Market Trend and Technology (Host: Prof. Jung Jae Hak). KOPIA. Green Energy Expo. Daegue, Korea, 2019. Online verfügbar unter <http://greenconference.kr/eng/doc/program02.php>, zuletzt geprüft am 24.09.2019.
- Hörmann (2022): Agrar-Photovoltaik Solarzaun. Bereich Photovoltaik. Online verfügbar unter <https://www.hoermann-info.de/photovoltaik/agrar-photovoltaik-solarzaun>, zuletzt aktualisiert am 30.05.2022, zuletzt geprüft am 30.05.2022.
- InVivo (2020): Agrivoltaïsme : Total et InVivo mettent en commun leur savoir-faire pour allier production agricole et énergie renouvelable | InVivo. Union InVivo - Union de Coopératives Agricoles. 04.03.2020. Online verfügbar unter <https://www.invivo-group.com/en/node/221633>, zuletzt geprüft am 27.04.2022.
- Jenner, Steffen (2013): Why and how effectively do states support renewable energy? a comparative econometric analysis of state-level policies in the EU and U.S. Dissertation. Universität Tübingen, Tübingen. Online verfügbar unter <https://bibliographie.uni-tuebingen.de/xmlui/handle/10900/37922>, zuletzt geprüft am 16.05.2022.
- Jenner, Steffen; Ovaere, Lotte; Schindele, Stephan (2013): The Impact of Private Interest Contributions on RPS Adoption. In: *Econ Polit* 25 (3), 411-423. DOI: 10.1111/ecpo.12018.
- Ketzer, Daniel; Schlyter, Peter; Weinberger, Nora; Rösch, Christine (2020a): 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.

- Ketzer, Daniel; Weinberger, Nora; Rösch, Christine; Seitz, Stefanie B. (2020b): Land use conflicts between biomass and power production – citizens' participation in the technology development of Agrophotovoltaics. In: *Journal of Responsible Innovation* 7 (2), S. 193–216. DOI: 10.1080/23299460.2019.1647085.
- Landesregierung BaWü (2022): Land fördert fünf Modellanlagen zur Agri-Photovoltaik. Baden-Württemberg.de. 13.01.2022. Online verfügbar unter <https://www.baden-wuerttemberg.de/de/service/presse/pressemitteilung/pid/land-foerdert-fuenf-modellanlagen-zur-agri-photovoltaik/>, zuletzt geprüft am 27.04.2022.
- Landwirtschaftskammer Oberösterreich (2021): Steuerliche Konsequenzen von PV-Anlagen auf landwirtschaftlichen Flächen. Grundlage: Einkommensteuerrichtlinien Rz 5189 ff. Online verfügbar unter <https://ooe.lko.at/steuerliche-konsequenzen-von-pv-anlagen-auf-landwirtschaftlichen-fl%C3%A4chen+2400+3421151>, zuletzt geprüft am 27.05.2022.
- Leitner, Hubert; Czaloun, Günther (2018): Innovatives Seil-Tragsystem für Anwendungen in der Agro-Photovoltaik. 15. Symposium Energieinnovation. Technische Universität Graz, 14.02.2018. Online verfügbar unter https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/Events/Eninnov2018/files/lf/Session_C6/461_LF_Leitner.pdf, zuletzt geprüft am 27.04.2022.
- Lieth, Heiner (2022): Emeritus Crop Ecologist specializing in greenhouse, nursery and in-door production, soilless culture, and applications of photovoltaic energy production in agriculture. UC Davis. Online verfügbar unter <https://lieth.ucdavis.edu/>, zuletzt aktualisiert am 03.08.2022, zuletzt geprüft am 01.09.2022.
- Matalucci, Sergio (2021): Italy devotes €1.1bn to agrivoltaics, €2bn to energy communities and storage. In: *PV Magazine*, 28.04.2021. Online verfügbar unter <https://www.pv-magazine.com/2021/04/28/italy-devotes-e1-1bn-to-agrivoltaics-e2bn-to-energy-communities-and-storage/>, zuletzt geprüft am 02.12.2022.
- Matland, Richard E. (1995): Synthesizing the Implementation Literature: The Ambiguity-Conflict Model of Policy Implementation. In: *Journal of Public Administration Research and Theory: J-PART* 5 (2), S. 145–174. Online verfügbar unter <http://www.jstor.org/stable/1181674>.
- MKG GÖBEL (2022): Büren (D). Projekte. Online verfügbar unter <https://www.mkg-goebel.de/de/projekt/bueren>, zuletzt aktualisiert am 15.04.2022, zuletzt geprüft am 31.05.2022.
- next2sun (2022): Referenzen. Agri-PV-Anlagen. Solarpark Donaueschingen-Aasen, Baden-Württemberg. Online verfügbar unter <https://www.next2sun.de/referenzen/>, zuletzt aktualisiert am 20.02.2022, zuletzt geprüft am 30.05.2022.
- OeEB (2022): Langfristige Kreditlinie an SEKEM Ägypten. Österreichische Entwicklungsbank. Online verfügbar unter <https://www.oe-eb.at/unsere-projekte/projekte-im-ueberblick/sekem-holding.html>, zuletzt aktualisiert am 02.12.2022, zuletzt geprüft am 02.12.2022.
- ÖKO-HAUS GmbH (2022): Referenzen. Freifläche. Online verfügbar unter <https://www.oeko-haus.com/referenzen/>, zuletzt aktualisiert am 25.01.2022, zuletzt geprüft am 27.04.2022.
- OpenEI (2020): U.S. Department of Energy InSPIRE Project Overview. Online verfügbar unter <https://openei.org/wiki/InSPIRE/Project>, zuletzt aktualisiert am 13.05.2022, zuletzt geprüft am 13.05.2022.
- Park, Jongseong (2019): Governmental measures and directions of renewable energy policy in Korea. Speaker (24.07.2019). International Symposium on Solar Energy in the Form of Farming. Green Energy Institute. Jeonnam Agricultural Research and Extension Service (JARES) South Korea. Naju-City, Republic of Korea, 2019.
- Petrova, Veselina (2020): Total Quadran to pursue solar agrivoltaic development with InVivo. *Renewables Now*. 05.05.2020. Online verfügbar unter <https://renewablesnow.com/news/total-quadran-to-pursue-solar-agrivoltaic-development-with-invivo-689759/>, zuletzt geprüft am 27.04.2022.
- PRI (2013): Japanese Farmers Producing Crops and Solar Energy Simultaneously. Revitalizing the farming sector for the next-generation and could provide more than enough electricity for the entire country. Restriction to solar PV installation on farmlands removed. In: *Permaculture Research Institute* October 16, 2013, 2013. Online verfügbar unter <https://permaculturenews.org/2013/10/16/japanese-farmers-producing-crops-solar-energy-simultaneously/>, zuletzt geprüft am 30.05.2022.

- Pulipaka, Subrahmanyam; Peparthy, Murali (2021): Agrivoltaics in India. Overview of operational Projects and relevant Policies. Hg. v. National Solar Energy Federation of India (NSEFI) und Indo-German Energy Forum Support Office (IGEF-SO). New Delhi. Online verfügbar unter https://www.energyforum.in/fileadmin/user_upload/india/media_elements/Photos_And_Gallery/20201210_SmarterE_AgroPV/20201212_NSEFI_on_AgriPV_in_India_1__01.pdf, zuletzt geprüft am 13.05.2022.
- Ravi, Sujith; Lobell, David B.; Field, Christopher B. (2014): Tradeoffs and Synergies between biofuel production and large solar infrastructure in deserts. In: *Environmental science & technology* 48 (5), S. 3021–3030. DOI: 10.1021/es404950n.
- Redazione ANSA (2017): Truffe: sigilli a impianti fotovoltaici. Gdf sequestra 2 serre in Sardegna e recupera 50 mln di incentivi. In: ANSA.it, 14.04.2017. Online verfügbar unter https://www.ansa.it/sardegna/notizie/2017/04/13/truffe-sigilli-a-impianti-fotovoltaici_92465d93-74e0-453c-a082-a01420b0d1c3.html, zuletzt geprüft am 01.09.2022.
- REMTEC (2020): Borgo Virgilio. Agrovoltaico Plant Mantova - Italy. REM TEC S.r.l. Online verfügbar unter <https://remtec.energy/en/agrovoltaico/installations/29-borgo-virgilio>, zuletzt aktualisiert am 27.04.2022, zuletzt geprüft am 27.04.2022.
- Sandbox Solar (2021): Agrivoltaics. Sandbox Solar LLC. Online verfügbar unter <https://sandboxsolar.com/agrivoltaics/>, zuletzt aktualisiert am 17.02.2021, zuletzt geprüft am 13.05.2022.
- Schindele, Stephan (2017): Agrophotovoltaic: Doppelte Ernte. In: *Frankfurter Allgemeine Zeitung*, 04.11.2017. Online verfügbar unter <https://www.faz.net/aktuell/wissen/agrophotovoltaik-der-bauer-als-energiwirt-15260666.html>, zuletzt geprüft am 26.04.2022.
- Schindele, Stephan (2021a): 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, Stephan (2021b): Nachhaltige Landnutzung mit Agri-Photovoltaik: Photovoltaikausbau im Einklang mit der Lebensmittelproduktion: Szenarioanalyse zur Inanspruchnahme landwirtschaftlicher Nutzflächen durch Photovoltaik in Deutschland bis 2050. In: *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society* 30 (2), S. 96–105. DOI: 10.14512/gaia.30.2.7.
- Schindele, Stephan; Trommsdorff, Maximilian; Schlaak, Albert; Oberfell, Tabea; Bopp, Georg; Reise, Christian 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.
- Schön, Susanne; Eismann, Christian; Ansmann, Till; Wendt-Schwarzburg, Helke (Hg.) (2019): Nachhaltige Landnutzung managen. Akteure beteiligen - Ideen entwickeln - Konflikte lösen. Bielefeld: wbv Media GmbH & Co. KG. Online verfügbar unter https://www.wbv.de/fileadmin/webshop/pdf/6004699w_Leseprobe.pdf, zuletzt geprüft am 16.05.2022.
- Sekem (2022): Über uns. Online verfügbar unter <https://www.sekem.com/de/uber-uns/>, zuletzt aktualisiert am 02.12.2022, zuletzt geprüft am 02.12.2022.
- SolarPower Europe (2021): Agrisolar Best Practice Guidelines. Version 1.0. 1. Aufl. Hg. v. SolarPower Europe. Online verfügbar unter <https://www.solarpowereurope.org/insights/thematic-reports/agrisolar-best-practice-guidelines>, zuletzt geprüft am 16.05.2022.
- SPD; Bündnis 90/Die Grünen und FDP (2021): Mehr Fortschritt wagen. Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit. Online verfügbar unter https://www.spd.de/fileadmin/Dokumente/Koalitionsvertrag/Koalitionsvertrag_2021-2025.pdf, zuletzt geprüft am 13.05.2022.
- Sugibuchi, Koichi (2019): Solar Sharing: Symbiosis of PV and Agriculture in Japan. Agrovoltaics - Sharing Resources for Multiple Benefits. RTS Corporation, PV Business Consulting Division. Intersolar Conference Europe. Munich, 2019. Online verfügbar unter https://www.rts-pv.com/en/news/201905_7655/, zuletzt geprüft am 25.05.2022.
- Sun'Agri (2021): The world's first agrivoltaic power plant. Domaine de Nidolères. Hg. v. Sun'Agri SAS. Online verfügbar unter <https://sunagri.fr/en/project/nidoleres-estate/>, zuletzt aktualisiert am 17.11.2021, zuletzt geprüft am 27.04.2022.

- Trommsdorff, Maximilian; Hopf, Michaela; Hörnle, Oliver; Berwind, Matthew; Schindele, Stephan; Wydra, Kerstin (2023): Can synergies in agriculture through an integration of solar energy reduce the cost of agrivoltaics? An economic analysis in apple farming. In: *Applied Energy*.
- Trommsdorff, Max; Kang, Jinsuk; Reise, Christian; Schindele, Stephan; Bopp, Georg; Ehmann, Andrea et al. (2021): Combining food and energy production: Design of an agrivoltaic system applied in arable and vegetable farming in Germany. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 140, S. 110694. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110694.
- Wang, Tianyue; Wu, Gaoxiang; Chen, Jiewei; Cui, Peng; Chen, Zexi; Yan, Yangyang et al. (2017): Integration of solar technology to modern greenhouse in China. Current status, challenges and prospect. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 70, S. 1178–1188. DOI: 10.1016/j.rser.2016.12.020.
- Weizmann, Martin L. (1974): Prices vs. Quantities. In: *The Review of Economic Studies* 41 (4), S. 477–491. Online verfügbar unter <https://scholar.harvard.edu/weizman/publications/prices-vs-quantities>, zuletzt geprüft am 16.05.2022.
- Weselek, Axel; Bauerle, Andrea; Hartung, Jens; Zikeli, Sabine; Lewandowski, Iris; Högy, Petra (2021a): Agrivoltaic system impacts on microclimate and yield of different crops within an organic crop rotation in a temperate climate. In: *Agron. Sustain. Dev.* 41 (5). DOI: 10.1007/s13593-021-00714-y.
- Weselek, Axel; Bauerle, Andrea; Zikeli, Sabine; Lewandowski, Iris; Högy, Petra (2021b): Effects on Crop Development, Yields and Chemical Composition of Celeriac (*Apium graveolens* L. var. *rapaceum*) Cultivated Underneath an Agrivoltaic System. In: *Agronomy* 11 (4), S. 733. DOI: 10.3390/agronomy11040733.
- Weselek, Axel; Ehmann, Andrea; Zikeli, Sabine; Lewandowski, Iris; Schindele, Stephan; Högy, Petra (2019): Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities. A review. In: *Agron. Sustain. Dev.* 39 (35), S. 1–20. DOI: 10.1007/s13593-019-0581-3.
- Wien Energie Positionen (2021): Mit Agrophotovoltaik Synergien schaffen. Wien Energie GmbH. Online verfügbar unter <https://positionen.wienenergie.at/projekte/strom/agro-pv/>, zuletzt aktualisiert am 05.10.2021, zuletzt geprüft am 27.04.2022.
- Wuppertal Institut (2014): Stellungnahme zur BMWi-Konsultation "Eckpunkte für ein Ausschreibungsdesign für Photovoltaik-Freiflächenanlagen". Agrophotovoltaik (APV) als ressourceneffiziente Landnutzung. Hg. v. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. Wuppertal. Online verfügbar unter <https://epub.wuppertalinst.org/frontdoor/index/index/docId/5547>, zuletzt geprüft am 26.04.2022.
- Xue, Jinlin (2017): Economic assessment of photovoltaic greenhouses in China. In: *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 9 (3), S. 33502. DOI: 10.1063/1.4982748.
- ZSW; Bosch & Partner (2018): Vorbereitung und Begleitung bei der Erstellung eines Erfahrungsberichts gemäß § 97 Erneuerbare-Energien-Gesetz. Teilvorhaben II c: Solare Strahlungsenergie. Zwischenbericht Februar 2018 Erstellt im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Unter Mitarbeit von Tobias Kelm. Hg. v. Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW). ZSW; Bosch & Partner. Stuttgart, Hannover. Online verfügbar unter https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/bmwi_de/bericht-eeg-4-solar.pdf?__blob=publicationFile&v=4, zuletzt geprüft am 25.04.2022.

Kapitel 2 Literaturübersicht, Umfeldanalyse und theoretische Grundlagen

„Eine Nation, die ihre Böden zerstört, zerstört sich selbst.“

Franklin D. Roosevelt, 32. Präsident der Vereinigten Staaten von Amerika (1937)

„Moderne Landwirtschaft ist im Grunde die Umwandlung von Energie über Pflanzen und Tiere in Nahrungsmittel.“

Josef Schmidhuber, Stellvertretender Direktor der FAO-Abteilung Handel und Märkte

Im Folgenden werden im Kontext der Agri-PV die zentralen Politikfelder im Mehr-Ebenen-System sowie die theoretischen Grundlagen zum Koordinationsprozess einer Agri-PV-Markteinführung in Deutschland erläutert.

2.1 Agrarpolitik und nachhaltige Landnutzung

Im Zeitraum von 1961 bis 2018 stieg die Weltbevölkerung von etwa 3,07 Milliarden Menschen auf 7,60 Milliarden. Dies entspricht einer prozentualen Zunahme um 148 % (United Nations 2019). Im selben Zeitraum stieg die global verfügbare Acker- und Dauerkulturfläche (engl. Cropland Area) um 15 % (FAO 2021a, 2022). Da in diesem Zeitverlauf die gesamte Landfläche nahezu konstant blieb, jedoch die Siedlungsfläche zunahm, wird davon ausgegangen, dass die Zunahme der Ackerfläche überwiegend auf der Abholzung von Primärwäldern und Umwandlung von extensiven Weideflächen basierte. Zwischen 1990 und 2018 nahm die weltweite Waldfläche um 4 % ab, was rund 163 Millionen Hektar entspricht bzw. etwa 4,6-mal die Landfläche Deutschlands umfasst (FAO 2020). Die Umwandlung von Wald- und

Weideflächen zu Ackerland bedingt eine erheblich negative Auswirkung auf die Artenvielfalt (FAO 2021b).

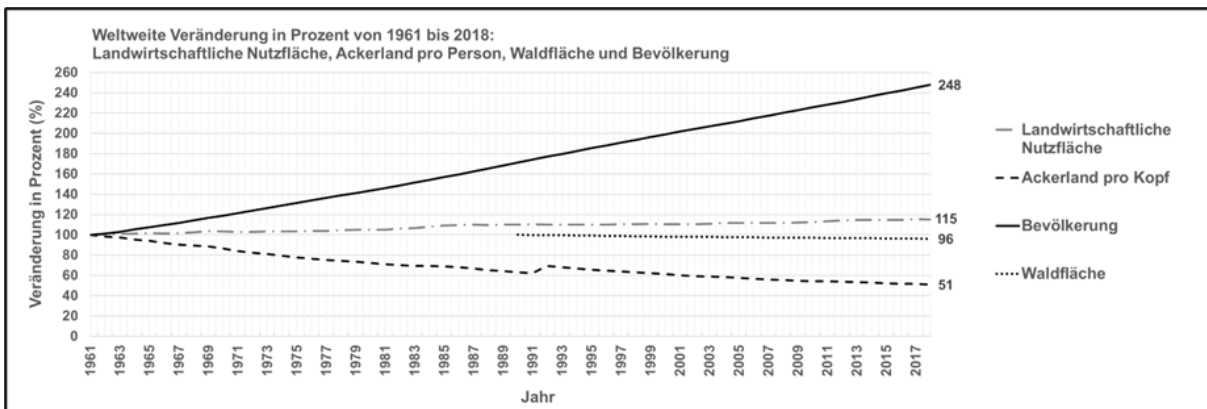


Abbildung 2-1: Weltweite Veränderung in Prozent (%) von 1961 bis 2018: Landwirtschaftliche Nutzfläche, Ackerland pro Person, Waldfläche, Bevölkerung (Quelle: FAO; eigene Darstellung)

Die verfügbare Ackerfläche pro Person hat zwischen 1961 und 2018 um 49 % abgenommen und bringt statistisch die „Bevölkerungsfalle“ zum Ausdruck, vor der im 18. Jahrhundert bereits Thomas Robert Malthus warnte (Malthus 1798). Während der Bevölkerungszuwachs exponentiell verläuft, können die Ausweitung der Ackerfläche und Produktivitätszunahme nur linear verlaufen. Im Jahr 2050 werden schätzungsweise 9,7 Milliarden Menschen den Planeten Erde bevölkern (World Bank 2022). Die Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen (engl. Food and Agriculture Organization, FAO) nimmt an, dass die Nachfrage für Nahrungsmittel und Biomasseerzeugnisse bis 2050 um über 50 % im Verhältnis zum Bedarf im Jahr 2021 steigen wird. Gleichzeitig wird angenommen, dass über ein Drittel der globalen Ackerfläche durch Klimawandel, Wüstenbildung, Wasserknappheit, Siedlungsflächenanstieg und Übernutzung bedroht ist (FAO 2021b) sowie dass die jährlichen globalen Produktivitätssteigerungen aufgrund des Einsatzes von Agrochemikalien (Düngemittel und Pestizide) und moderner Landmaschinenteknik sowie Agrarstrukturänderungen nicht ausreichen, um die steigende Nahrungsmittelnachfrage zu decken (Steensland 2021). Vor diesen Hintergründen ist bereits im Jahr 2021 absehbar, dass das zweite Ziel für nachhaltige Entwicklung der Vereinten Nationen – „Kein Hunger bis 2030“ – nicht einzuhalten ist. Die Zahl der unterernährten Menschen ist von 604 Millionen im Jahr 2014 auf 768 Millionen im Jahr 2020 gestiegen und wird mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit weiter zunehmen. Der FAO-Bericht „The State of the World’s Land and Water Resources for Food and Agriculture. Systems at Breaking Point“ (FAO 2021b) gelangt zu dem Ergebnis, dass ein „weiter wie bisher“ nicht möglich ist und disruptive Anpassungen in der Agrarpolitik

notwendig sind, um das Ausmaß der humanitären Krise zu verringern. Der Agrarsektor ist insofern vom Klimawandel betroffen wie er ihn auch gleichzeitig mit verursacht. Insgesamt 34 % der weltweiten CO₂-Emissionen sind auf den Landwirtschaftssektor zurückzuführen (European Commission 2022c). Er ist hinter dem Energiesektor somit der zweitgrößte CO₂-Emittent. Ein Großteil der CO₂-Emissionen im Agrarsektor ist auf dessen Energiebedarf zurückzuführen, wobei die energieintensive Produktion von Pestiziden und Kunstdünger methodisch nicht dem Energie-, sondern dem Industriesektor zugewiesen werden kann. Dr. Josef Schmidhuber, stellvertretender Direktor für Märkte und Handel der FAO, urteilt: „Moderne Landwirtschaft ist im Grunde die Umwandlung von Energie über Pflanzen und Tiere in Nahrungsmittel“ (Schmidhuber 2021). Sowohl für die Anpassung an den Klimawandel als auch zur Dekarbonisierung des Nahrungsmittelsystems werden im Agrarsektor dringend öffentliche und private Investitionen benötigt. Die Nachfrage nach intelligenten Lösungen, die das Klima schützen und eine Resilienzsteigerung der landwirtschaftlichen Betriebe ermöglichen, steigt. Die Bedeutung des „Food-Water-Energy Nexus“ und von „integrierten Nahrungsmittel- und Energiesystemen“ nimmt zu (FAO 2014). Der Nahrungsmittelleinzelhandel und mehrere Agrarkonzerne haben die Herausforderungen erkannt (EIT Food 2021) und nehmen es sich (Scope 1 und 2) und den Lieferanten (Scope 3) zum Vorsatz, das Nachhaltigkeitsniveau zu steigern (Handley 2020). Landwirtschaftliche Betriebe stehen vor der Herausforderung, eine wirtschaftlich tragfähige Agrarproduktion in Zeiten von extremer Hitze, Dürre, Frost und Starkregen auf ihren Betrieben dauerhaft zu ermöglichen und gleichzeitig den Anforderungen des Nahrungsmittelleinzelhandels hinsichtlich nachhaltiger Entwicklung gerecht zu werden.

2.1.1 Gemeinsame Agrarpolitik in der EU

In der EU wird zur Eindämmung des Klimawandels und zur Anpassung an seine Auswirkungen im Agrarsektor der Europäische Grüne Deal mit der „Farm-to-Fork“-Strategie flankiert. Diese zielt darauf ab, dass landwirtschaftliche Betriebe eine neutrale oder positive Auswirkung auf die Umwelt haben sollen. Der Verlust von biologischer Vielfalt soll umgekehrt werden und der Zugang zu ausreichenden, sicheren und nahrhaften Lebensmitteln soll gewährleistet werden. Die gemeinsame europäische Agrarpolitik (EU-GAP) soll die Wettbewerbsfähigkeit des EU-Versorgungssektors unterstützen und die Erschwinglichkeit von Lebensmitteln bei gleichzeitiger Erzielung gerechterer wirtschaftlicher Erträge für die landwirtschaftlichen Betriebe beibehalten (European Commission 2019, 2022d).

Die EU-GAP-Fördermittel sind in zwei Säulen aufgeteilt. In der 1. Säule werden Direktzahlungen an Landwirte je Hektar landwirtschaftliche Fläche bezahlt. Drei Ziele werden durch die 1. Säule verfolgt: Erstens sollen die generellen landwirtschaftlichen Leistungen honoriert und gesichert werden, bspw. Kulturlandschaftsschutz und die Lebensmittelversorgung der Bevölkerung. Die Qualität der landwirtschaftlichen Tätigkeit und deren Auswirkungen auf die Umwelt werden dabei nicht bewertet. Zweitens sollen diese staatlichen Förderungen die Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Landwirte gewährleisten und einen Ausgleich für höhere Produktionskosten schaffen. Dabei wird angenommen, dass Landwirte in der EU höhere Umwelt-, Tier- und Verbraucherschutzstandards einhalten müssen als Landwirte in anderen außereuropäischen Märkten, wodurch höhere Produktionskosten entstehen und die internationale Wettbewerbsfähigkeit sinkt. Drittens dienen Direktzahlungen der Einkommensstabilisierung und Risikovorsorge der Landwirte, um Auswirkungen von zum Teil extremen Preisschwankungen abzufedern (European Commission 2020).

Die 2. Säule der EU-GAP wird durch die EU-Verordnung über die Förderung der ländlichen Entwicklung (ELER) ausgezahlt und verfolgt zwei Ziele: Zum einen soll die ländliche Entwicklung unterstützt werden und zum anderen die umweltschonende Bewirtschaftung, bspw. die ökologische Landwirtschaft. Anders als in der 1. Säule können in der 2. Säule nicht ausschließlich landwirtschaftliche Betriebe Fördermittel beantragen, sondern auch bspw. Genossenschaften, Vereine, Kommunen oder andere Akteure im ländlichen Raum. Projekte zur Entwicklung der dörflichen Struktur, Investitionen in den Tourismus, Maßnahmen zur Verbesserung der Marktstruktur, Forstmaßnahmen, Agrarumwelt- und Klimaschutz sowie Küsten- und Hochwasserschutz können hierdurch gefördert werden. Voraussetzung für die Auszahlung der EU-ELER-Fördermittel aus der 2. EU-GAP-Säule sind Kofinanzierungen aus dem Fördermittel empfangenden EU-Mitgliedstaat (Deutscher Bauernverband 2019).

2.1.2 Agrarpolitik in Deutschland

In Deutschland standen im Zeitraum von 2014 bis 2020 insgesamt über 43,4 Milliarden Euro an EU-Mitteln für die Agrarförderung zur Verfügung, was durchschnittlich etwa 6,2 Milliarden Euro jährlich entspricht. Davon wurden jährlich rund 80 % bzw. 4,85 Milliarden Euro der 1. Säule zugewiesen. Die Direktzahlungen sichern den landwirtschaftlichen Betrieben in Deutschland durchschnittlich 40 % ihres Einkommens. Die Fördermittel aus der 1. Säule werden in Deutschland seit 2014 durch vier Bausteine ausgezahlt und sind in der folgenden Tabelle dargestellt (BMEL 2019):

Tabelle 2-1: Bausteine der EU-GAP-Förderung aus der 1. Säule in Deutschland zwischen 2014 und 2020 (Quellen: DBV, 2019 und BMEL, 2019; eigene Darstellung)

Jährliche EU-GAP Förderung Deutschland 2014 - 2020		
1. Säule		
Nr.	Bausteine	in €/Ha/a
1	Basisprämie	175
2	Greening-Maßnahme	85
3	Zuschlag für kleine (<30 Hektar) und mittlere (< 46 Hektar) Betriebe	30 - 50
4	Zusatzförderung für Junglandwirte (<40 Jahre) für max. 5 Jahre und max. 90 Hektar	44
	Maximal erzielbare Fördermittel in €/ha	354
	Gesamte jährliche Fördermittel	4,85 Mrd. €

Im selben Zeitraum wurden für die 2. Säule rund 20 % bzw. 1,35 Milliarden Euro des jährlichen EU-GAP-Gesamtbudgets in Deutschland verwendet. Hinzu kommen die Kofinanzierungen von Bund, Ländern und Kommunen, wodurch rund 2,41 Milliarden Euro ELER-Fördermittel für die 2. Säule bereitstanden, siehe Tabelle 2-2:

Tabelle 2-2: Bausteine der EU-GAP-Förderung inkl. Kofinanzierung aus der 2. Säule in Deutschland zwischen 2014 und 2020 (Quellen: DBV, 2019 und BMEL, 2019; eigene Darstellung)

Jährliche EU-GAP Förderung inkl. Kofinanzierung Deutschland 2014 - 2020		
2. Säule		
Nr.	Bausteine	in Mrd. €/Jahr
1	Europäischer Landwirtschaftsfond für die Entwicklung des ländlichen Raums (ELER)	1,35
2	ELER-Kofinanzierung von Bund, Länder und Kommunen	1,06
	Gesamte jährliche Fördermittel	2,41 Mrd. €

Bei der ELER-Kofinanzierung beteiligt sich der Bund mit etwa 600 Millionen Euro jährlich über das Förderprogramm „Gemeinschaftsaufgabe Verbesserung der Agrarstruktur und des Küstenschutzes (GAK)“. Die Konkretisierung des Förderangebots für Agrarumwelt- und Klimamaßnahmen (AUKM), des Ökolandbaus und der Tierschutzmaßnahmen erfolgt über die Programme der Länder für die ländliche Entwicklung (EPLR). Im Zeitraum von 2014 bis 2020 wurde die deutsche ELER-Förderung einschließlich nationaler Kofinanzierungen in die folgenden Ausgabenbereiche verteilt, siehe Tabelle 2-3 (DBV 2019).

Tabelle 2-3: Ausgabenbereiche der EU-GAP-Förderung inkl. Kofinanzierung aus der 2. Säule in Deutschland zwischen 2014 und 2020 (Quelle: DBV, 2019; eigene Darstellung)

Durchschnittliche jährliche ELER-Förderung in		
2. Säule		
Nr.	Ausgabenbereiche	in Mio. €/Jahr
1	Agrarumwelt- und Klimamaßnahmen	494
2	Agrarinvestitionsförderung	402
3	Basisdienstleistungen und Dorferneuerung	371
4	LEADER-Programm	287
5	Ausgleichszulage	277
6	Ökologischer Landbau	272
7	Hochwasserschutz	87
8	Sonstige	221
	Gesamte jährliche Fördermittel	2,41 Mrd. €

Seit Dezember 2021 ist die GAP-Strategieplanverordnung der EU in Kraft. Alle EU-Mitgliedstaaten müssen für die GAP-Förderperiode ab 2021 erstmals einen nationalen Strategieplan für die 1. und 2. Säule der EU-GAP entwickeln und bis zum 01.01.2022 an die EU-Kommission zur Prüfung und Freigabe senden. In Deutschland wird der EU-GAP-Strategieplan durch das BMEL koordiniert und mit anderen Ressorts auf Bundes- und Landesebene sowie Verbänden und Interessensgruppen abgestimmt. Fördermaßnahmen aus der 1. Säule im Bereich der Direktzahlungen, u. a. auch die Regelungen zum Integrierten Verwaltungs- und Kontrollsystem für Direktzahlungen (InVeKos), werden wie bisher durch Bundesrecht festgelegt (BMEL 2009). Die Planung und Durchführung künftiger Fördermaßnahmen der 2. Säule werden gemäß dem bisherigen Entwurf des nationalen GAP-Strategieplans in der Kompetenz der Länder liegen. Der Entwurf des deutschen GAP-Strategieplans wurde im Dezember 2020 von der EU-Kommission geprüft, kommentiert und

Empfehlungen zur Anpassung des Strategieplans wurden ausgesprochen. Der finale GAP-Strategieplan aus Deutschland befindet sich im Januar 2022 noch in der Vorbereitung und wurde noch nicht bei der EU-Kommission eingereicht (BMEL 2022; European Commission 2022a).

Ein zentraler, neuer Baustein der EU-GAP ist die „Eco-Scheme“-Regelung. Die EU-Kommission hat eine Liste potenzieller landwirtschaftlicher Tätigkeiten veröffentlicht, die als „Ökoregelungen“ bei der Erstellung der nationalen GAP-Strategien herangezogen werden kann (European Commission 2021a). Landwirtschaftliche Tätigkeiten, die den Klima-, Tier- und Umweltschutz unterstützen, können auf der Grundlage ihrer nationalen GAP-Strategiepläne eine finanzielle Förderung über die 2. Säule erhalten. Die EU-Agrarpolitik kommt durch die EU-GAP-Reform und die Integration von Ökoregelungen den Empfehlungen aus der Wissenschaft nach, die eine Mittelumverteilung aus der 1. Säule der EU-Agrarförderung in die 2. Säule als wichtigen Schritt für eine nachhaltige Entwicklung im Agrarsektor identifizieren (Bauchmüller 2021). Zukünftig sollen Umweltmaßnahmen und die Qualität der Landnutzung in der Primärproduktion eine gewichtigere finanzielle Rolle in der Landwirtschaft spielen. Ab dem 01.01.2023 müssen EU-Mitgliedstaaten mindestens 30 % der ihnen zugewiesenen EU-Fördermittel in die 2. Säule einsetzen (BMEL 2022).

Die EU-Zielvorgaben für eine nachhaltige Agrarpolitik spiegeln sich im Koalitionsvertrag des Scholz-Kabinetts wieder, indem bspw. die Maßnahme beschlossen wurde, das bisherige Ziel von 20 % Ökolandbau bis 2030 auf 30 % zu erhöhen. Diese Steigerung des Ökolandbaus wird einen Einfluss auf die Mittelaufteilung zwischen der 1. und 2. Säule haben und soll zusätzlich mit Bundesmitteln für das Bundesprogramm Ökolandbau erhöht werden. Bis zur Mitte der Legislaturperiode will die Scholz-Regierung die aktuelle Architektur des nationalen EU-GAP-Strategieplans überprüft haben, damit für die EU-GAP-Weiterentwicklung ab 2027 frühzeitig der EU-Kommission ein Konzept vorgelegt werden kann, wie die Direktzahlungen (1. Säule) durch die Honorierung von Klima- und Umweltleistungen (2. Säule) „angemessen ersetzt werden können“ (SPD und Bündnis 90/Die Grünen und FDP 2021, S. 46).

Zwischenfazit Agrarpolitik: Der globale Agrarsektor steht vor großen Herausforderungen, um die wachsende Weltbevölkerung zu ernähren. Die Anpassung an den Klimawandel, eine Dekarbonisierung des Nahrungsmittelsystems sowie die Umsetzung von Klima- und Umweltleistungen durch landwirtschaftliche Betriebe benötigen umfangreiche öffentliche und private Investitionen. Die EU-GAP-Reform veranlasste ab 2021 eine Mittelumwidmung aus

der 1. Säule hin zur 2. Säule, worin Klima- und Umweltschutzmaßnahmen im Rahmen von Eco-Scheme-Maßnahmen gefördert werden können. Seit 1961 ist die verfügbare Ackerfläche pro Person weltweit um 49 % zurückgegangen. In diesem Zeitraum konnte mittels Innovationen in der Landmaschinenteknik sowie der Agrochemie die Produktivität der Agrarerzeugung, einhergehend mit einem hohen Energieaufwand, stark gesteigert werden. Heute ist etwa ein Drittel der weltweiten Ackerflächen von Degradierung und Übernutzung bedroht, weil die Belastungskapazitäten der fruchtbaren Böden überschritten wurden. Das Kabinett Scholz unterstützt den Prozess der EU-GAP-Reform und will im Jahr 2023 ein Konzept vorlegen, wie im nationalen GAP-Strategieplan weiterhin Mittel aus der 1. Säule durch Mittelaufstockungen in der 2. Säule ersetzt werden können. Umwelt- und Klimaschutzmaßnahmen werden für landwirtschaftliche Betriebe zunehmend einkommenswirksam, wohingegen die Basisprämien langfristig hinsichtlich der Bedeutung des Betriebseinkommens abnehmen sollen.

2.1.3 Nachhaltige Landnutzung in Deutschland

In der klassischen Nationalökonomie ist neben Kapital und Arbeit der Boden einer von drei Produktionsfaktoren (Ricardo 2001). Zu Beginn der Nationalökonomie im 18. Jahrhundert war der Begriff Boden als Ackerboden zu verstehen (Smith 1904). Bereits im 19. Jahrhundert erweiterte sich allerdings dessen Bedeutungsumfang um Bodenschätze, was auf die Kosten-Nutzen-Bilanz des Raubbaus im Kolonialismus und die zunehmende Globalisierung zurückzuführen ist. Heutzutage ist in der Volkswirtschaftslehre der Produktionsfaktor Boden wesentlich weiter umfasst. Auch Gemeingüter, wie saubere Luft, beständiges Klima, Zugang zu Wasser und Biodiversität, die heute ebenfalls als benötigte Produktionsmittel anerkannt werden, reduzieren sich stetig. Daher gelten nicht mehr ausschließlich Boden und Bodenschätze als dritter Produktionsfaktor, sondern die „Umwelt“ als solche (Ostrom 1990). Mit Blick auf die Herausforderungen der globalen Primärproduktion, die geringen Produktivitätsreserven und die sinkenden Verfügbarkeiten von Ackerfläche pro Kopf weltweit sind speziell Märkte wie die EU und Deutschland gefragt, möglichst ressourcenschonend mit dem knappen Gut „Boden“ umzugehen. Denn sowohl die EU als auch Deutschland verfügen trotz ihrer im internationalen Vergleich hohen Qualität an Bodenfruchtbarkeit und Flächenproduktivität über einen Importüberschuss an Nahrungs- und Futtermitteln (Destatis 2019; Mirazo 2022). Ein Rückgang der Agrarproduktion in der EU und Deutschland führt deshalb zu einer größeren Agrarflächeninanspruchnahme im Ausland und zu einer geringeren Versorgungsquote in den Exportländern. Die EU und Deutschland weisen eine hohe Bevölkerungsdichte auf und die

absolut verfügbare Ackerfläche pro Person liegt in Deutschland mit 0,141 Hektar/Person unterhalb der EU mit 0,221 Hektar/Person und des globalen Durchschnitts mit 0,184 Hektar/Person (FAO 2022), siehe Abbildung 2-2.

Der Erhalt von fruchtbaren landwirtschaftlichen Nutzflächen sowie die Steigerung der

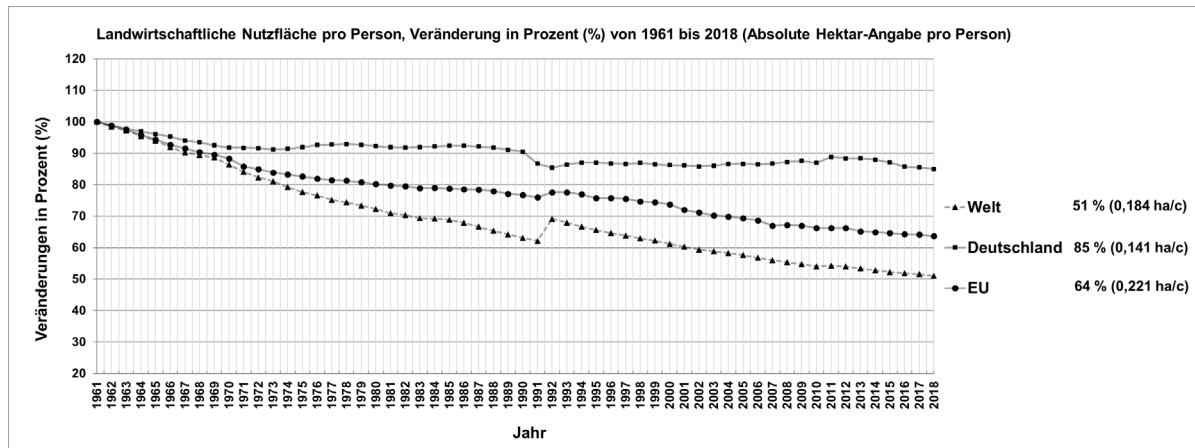


Abbildung 2-2: Veränderung in Prozent (%) von 1961 bis 2018: Ackerland pro Person in Deutschland im Vergleich zur EU und weltweit (Quelle: FAO, 2022; eigene Darstellung)

Landnutzungseffizienz sind für eine nachhaltige Landnutzung und zur weltweiten Ernährungssicherung unabdingbar. Die politische und ökonomische Bedeutsamkeit der Lebensgrundlage „Agrarboden“ wird in der EU und in Deutschland daher aus ethischen, entwicklungs- und umweltpolitischen Gründen wachsen. Vor diesen Hintergründen hat die EU-Kommission bereits 2011 die Richtlinie „Fahrplan für ein ressourceneffizientes Europa“ verabschiedet, worin spätestens bis zum Jahr 2050 die Etablierung einer Flächenkreislaufwirtschaft in der EU vorgesehen ist (European Commission 2011). Dieses Ziel wurde im Jahr 2019 durch die Bundesregierung in ihrem Klimaschutzplan 2050 für Deutschland verankert. Bis 2050 soll der „Übergang zur Flächenkreislaufwirtschaft erreicht“ sein und der tägliche Siedlungsflächenanstieg soll ab dann „Nettonull“ betragen (BMWK 2022a; BMUB 2016). Gemessen und bewertet wird dieses Ziel in der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie (DNS) durch den Zielindikator 11.1.a „Anstieg Siedlungs- und Verkehrsfläche“. Der Indikator ist dem elften Ziel der Vereinten Nationen (UN) für nachhaltige Entwicklung (SDG), nachhaltige Städte und Gemeinden zugeordnet, weil der Anstieg der Siedlungs- und Verkehrsfläche im Wesentlichen zulasten von Agrarflächen erfolgt (Die Bundesregierung 2020b, S. 269). Dies lässt sich daraus schlussfolgern, weil sich der Anteil der Waldfläche in Deutschland seit 2000 erhöht hat, die Wasserfläche nahezu konstant blieb und

ausschließlich die landwirtschaftliche Nutzfläche zurückgegangen ist. Ende 2020 betrug die Siedlungs- und Verkehrsfläche rund 14,5 % der gesamten Fläche Deutschlands. 50,6 % entsprechen Agrarflächen, 29,8 % Waldfläche, 2,3 % Wasserfläche und 2,8 % sind sonstige Flächen einschließlich Abbau- und Umland und Gehölz, siehe folgende Abbildung 2-3 (Umweltbundesamt 2021c).

Steigender Wohlstand und Wirtschaftswachstum sowie die hierfür notwendigen

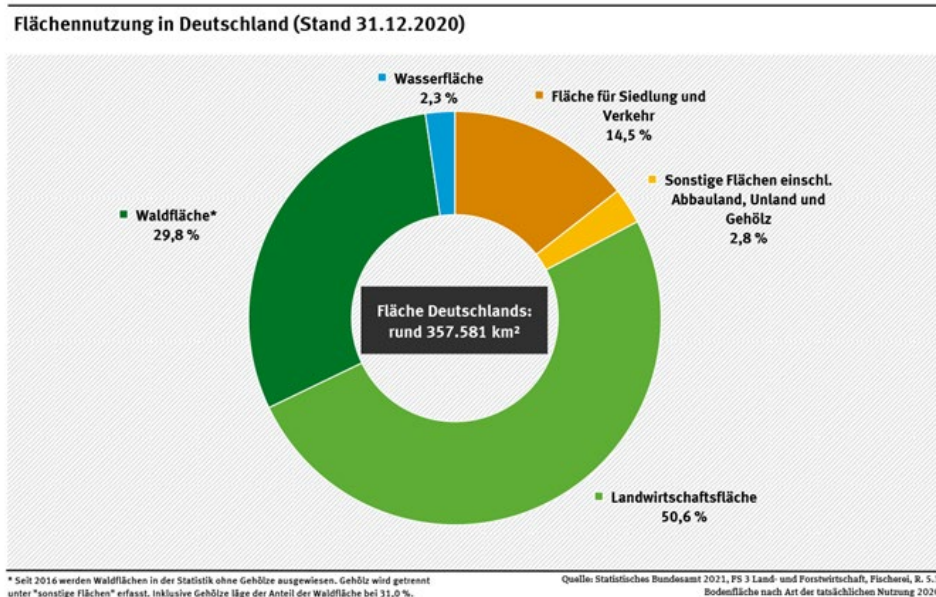


Abbildung 2-3: Struktur der Flächennutzung in Deutschland (Quelle: UBA, 2021)

Flächeninanspruchnahmen für mehr Gewerbe-, Wohnraum-, Freizeit- und Verkehrsflächen führten in Deutschland im Jahr 2018 zu einem gleitenden Vierjahresdurchschnitt von 56 Hektar Siedlungsflächenanstieg pro Tag. Zwar lag dieser Wert im Jahr 2000 noch bei 129 Hektar pro Tag, doch wurde der niedrigste Wert im Jahr 2016 mit 51 Hektar pro Tag verzeichnet. 2018 liegt der durchschnittliche, tägliche Siedlungsflächenanstieg bei 58 Hektar pro Tag (Die Bundesregierung 2020b, S. 269), was in etwa der durchschnittlichen Flächenausstattung von 60,5 Hektar je landwirtschaftlichem Betrieb in Deutschland im Jahr 2016 entspricht (BMEL 2018). Vertreter des Agrarsektors sprechen in diesem Kontext von „Flächen- und Landfraß“ sowie „Hofsterben“, weil jeden Tag flächenbilanziell etwa ein landwirtschaftlicher Betrieb mit Siedlungsfläche überbaut wird (Zinke 2021; agrarheute Redaktion 2021).

In der DNS wird im Zusammenhang mit Nachhaltigem Landmanagement erstmals 2006 das Ziel zur Begrenzung des Siedlungsflächenanstiegs auf 30 Hektar (Ha) pro Tag bis 2020 aufgenommen. Als allerdings 2016 absehbar war, dass dieses Ziel um voraussichtlich über das

Doppelte verfehlt wird, wurde in der DNS-Neuaufgabe von 2017 die Zielvorgabe für die Begrenzung des Flächenanstiegs für den Schlüsselindikator 11.1.a auf der einen Seite verschärft auf 30 „minus x Hektar“ pro Tag und auf der anderen Seite um zehn Jahre bis 2030 verschoben. Bereits 2014 äußerte das Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung in der Studie „Flächenverbrauch, Flächenpotenziale und Trends 2030“ die Sorge, dass ohne Gegenmaßnahmen in der Raumordnung der tägliche Siedlungsflächenanstieg im Jahr 2030 bei 45 ha/Tag liegen (BBSR 2014) und die Zielsetzung dadurch um mehr als 50 % übertroffen wird. Weitere fünf Jahre später, im November 2019, stellte die Bundesregierung fest, dass gemessen am 30 ha-x/Tag-Ziel bis 2030 der tägliche Siedlungsflächenanstieg immer noch zu hoch ist und dass eine „zusätzliche“ Agrarflächeninanspruchnahme für den PV-FFA-Ausbau hinzukommt, sodass die Zielerreichung des Schlüsselindikators 11.1.a „Nachhaltige Landnutzung“ bis 2030 mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht erreicht wird (Die Bundesregierung 2019). Im Vergleich unterschiedlicher Ausbauszenarien wird die direkte Flächeninanspruchnahme durch PV-FFA-Anlagen in Deutschland bis ins Jahr 2050 zwischen 39.000 und 280.000 Hektar geschätzt (Böhm und Tietz 2022) (Pfluger et al. 2018, Tabelle 16 & 17). In Deutschland wird Nachhaltiges Landmanagement über das BMUV koordiniert. Im Koalitionsvertrag des Scholz-Kabinetts findet sich das 30 ha-x/Tag-Ziel wieder. Im Kapitel „Bodenschutz“ werden Anreize angekündigt, um den „Flächenverbrauch“ für Siedlungs- und Verkehrszwecke zu reduzieren (SPD und Bündnis 90/Die Grünen und FDP 2021, S. 41–42). Fehlanreize, die zum Siedlungsflächenanstieg führen, sollen vermieden werden. Die Frage, wie diese Zielsetzungen mit dem Vorhaben vereinbar sind, jährlich 400.000 neue Wohnungen zu bauen und den PV-FFA-Ausbau zu beschleunigen, lässt der Koalitionsvertrag unbeantwortet. Für das Monitoring und die Evaluierung des täglichen Siedlungsflächenanstiegs werden die Aktualisierung des Bodenschutzgesetzes und die Gründung eines nationalen Bodenmonitoringzentrums vorgeschlagen. Zudem unterstützt die Bundesregierung die EU-Bodenrahmenrichtlinie (EU-BRRL) (SPD und Bündnis 90/Die Grünen und FDP 2021, S. 47). Die EU-BRRL soll den Grundsatz der Nachhaltigkeit im Bereich des Bodenschutzes etablieren, indem Gegenmaßnahmen für acht wesentliche Boden-Gefährdungsprozesse ergriffen werden: Erosion, Verlust organischer Substanzen, Verdichtung, Versalzung, Versiegelung, Verunreinigung, Rückgang der biologischen Vielfalt im Boden sowie Erdrutsche und Überschwemmungen. In der EU-Bodenstrategie wird betont, dass sich im Jahr 2021 60 bis 70 % der Böden in der EU in keinem guten Zustand befinden (European Commission 2021b).

In Deutschland wurde 2015 die erste länderübergreifende Übersicht über den Status der Böden veröffentlicht. Der Bodenzustandsbericht des Umwelt Bundesamts (UBA) und die darin enthaltene Expert:innen-Befragung kommen zu dem Ergebnis, dass der Siedlungsflächenanstieg die Hauptgefährdung für den Boden darstellt (Wunder et al. 2018, S. 42), siehe Abbildung 2-4.

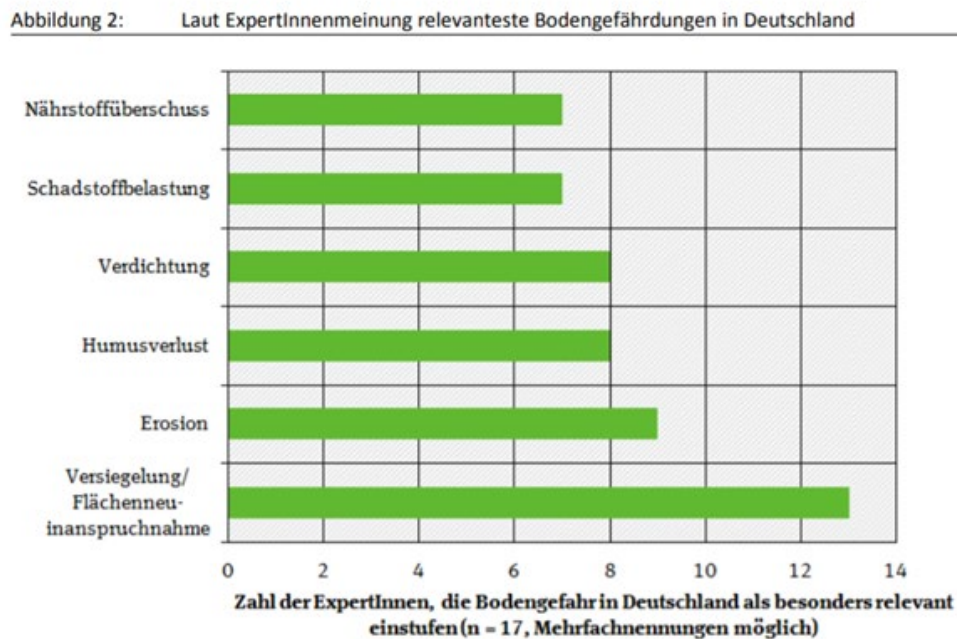


Abbildung 2-4: Relevanteste Bodengefährdungen in Deutschland (Quelle: UBA, 2018)

Die Ziele und Absichten aus dem Koalitionsvertrag sind komplementär mit den Bestrebungen aus der DNS, einen neuen Bodenindikator zu entwickeln, der alle relevanten Landnutzungsformen abdeckt. Dieser Indikator soll in der DNS-Weiterentwicklung im Jahr 2022 eingebracht werden, um Veränderungen der Bodenfunktionen zu beurteilen. Sowohl der Koalitionsvertrag als auch die DNS geben keine Auskunft darüber, ob der Indikator 11.1.a „Nachhaltiges Landmanagement/Reduktion des täglichen Siedlungsflächenanstiegs“ in den neu angedachten Indikator 15.3 „Land Degradation Neutralität“ integriert werden soll (Die Bundesregierung 2020b, S. 326). Aus den Handlungsempfehlungen des Umweltbundesamts aus dem Jahr 2018 zur Implementierung eines bodenbezogenen Indikators „Land Degradation Neutrality“ geht hervor, dass die Siedlungs- und Verkehrsfläche „PV-Freifläche“ als unversiegelte Fläche mit Vegetation betrachtet wird. In der Beurteilung der Bodenwertigkeit auf Basis von Hemerobiestufen und unter Einbezug der Bodengefährdung schneidet somit die

Landnutzungskategorie PV-Freiflächen mit einer höheren Wertigkeit ab als eine konventionelle Ackerbaufläche (Wunder et al. 2018, S. 74).

Zwischenfazit Nachhaltiges Landmanagement: In Deutschland liegt die verfügbare Ackerfläche pro Person unter dem EU- und dem globalen Durchschnitt. Als Hauptgefährdung für den Boden in Deutschland wird der Siedlungsflächenanstieg betrachtet. Die DNS gibt den Zielindikator Reduktion des täglichen Siedlungsflächenanstiegs auf 30 ha-x/Tag bis ins Jahr 2030 an. Gemäß EU-Richtlinien soll in Deutschland ab 2050 eine Flächenkreislaufwirtschaft etabliert sein. Das Kabinett Scholz möchte ein Bodenmonitoringzentrum gründen und unterstützt die EU-Bodenrahmenrichtlinie. Komplementär zur DNS-Weiterentwicklung im Jahr 2022 soll ein neuer Indikator 15.3 „Land Degradation Neutralität“ etabliert werden, der die jährlichen Veränderungen der Bodenfunktion festhalten und beurteilen kann. Auf Basis der Hemerobiestufen und unter Berücksichtigung der Bodengefährdung ist die Landnutzungskategorie PV-Freifläche mit einer höheren Bodenwertigkeit zu beurteilen als eine konventionelle Ackerbaufläche.

2.2 Klima- und Energiepolitik

Die deutsche Klimapolitik ist eingebettet in die Klimapolitik der EU und diese orientiert sich wiederum an den wissenschaftlichen Erkenntnissen des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderung (IPCC). Im August 2021 wurde über die Organisation Scientist Rebellion der dritte Teil des sechsten IPCC-Berichts mit Schwerpunkt auf der Milderung des Klimawandels geleakt (Spiegel 2021). Aus dem Bericht geht hervor, dass die globalen CO₂-Emissionen vor dem Jahr 2025 ihren Höchststand erreichen müssen und zwischen 2050 und 2075 auf null sinken sollten, damit eine kosteneffiziente Begrenzung der Erderhitzung auf 1,5 bis 2,0 Grad Celsius über dem vorindustriellen Niveau erzielt wird (Scientist Rebellion 2021). Vor diesem Hintergrund hat sich die EU zum Ziel gesetzt, der erste klimaneutrale Kontinent zu werden. Im „EU Green Deal“ sind folgende Ziel vorgesehen: Bis Ende 2050 möchte die EU keine Netto-Treibhausgase mehr ausstoßen. Das Wirtschaftswachstum soll von der Ressourcennutzung abgekoppelt werden und niemand, weder Mensch noch Region, soll auf diesem Weg im Stich gelassen werden. Als Zwischenziel sollen bis Ende 2030 die Netto-Treibhausgase in der EU auf mindestens 55 % gegenüber 1990 zurückgegangen sein. Im Jahr 2019 betrug der EU-weite Rückgang der Treibhausgas-Emissionen gegenüber 1990 25,9 %. In den kommenden acht

Jahren (2023 bis Ende 2030) müssen die Treibhausgas-Emissionen mehr als doppelt so viel zurückgehen wie in den rund 30 Jahren (1990 bis Ende 2022) zuvor. Für die Einhaltung der CO₂-Reduktionsziele bis 2030 fließen im Siebenjahreshaushalt des Grünen Deals insgesamt 1,8 Billionen Euro aus dem Aufbaupaket „NextGenerationEU“ ein (European Commission 2022b).

Im Jahr 2019 ist Deutschland mit einem Anteil von 22,8 % der Treibhausgas-Emissionen in der EU der mit Abstand größte CO₂-Verursacher. Frankreich, Italien, Polen und Spanien folgen mit jeweils ca. 10 % CO₂-Emissionsanteil in der EU. Die sieben größten CO₂-Emissionsverursacher verantworten ca. 75 % der gesamten EU-CO₂-Emissionen (Umweltbundesamt 2021a), siehe Abbildung 2-5.

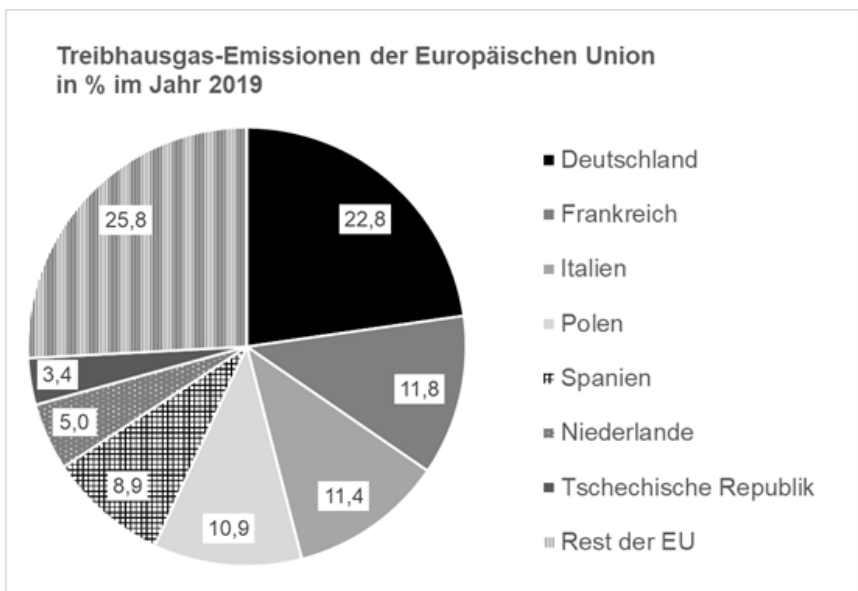


Abbildung 2-5: Treibhausgas-Emissionen der EU in % im Jahr 2019 (Quelle: UBA, 2022; eigene Darstellung)

Gemessen an den Pro-Person-Emissionen verfügen Frankreich, Spanien und Italien über unterdurchschnittliche Werte im EU-Vergleich 2019. Deutschland hingegen liegt mit 9,7 Tonnen Kohlendioxid-Äquivalent pro Person² über dem EU-Durchschnitt mit 8,1 Tonnen pro Person, siehe Abbildung 2-6 (Umweltbundesamt 2021b).

² Entsprechend der UNFCCC-Berichterstattung sind hierbei Emissionen aus Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF) nicht berücksichtigt.

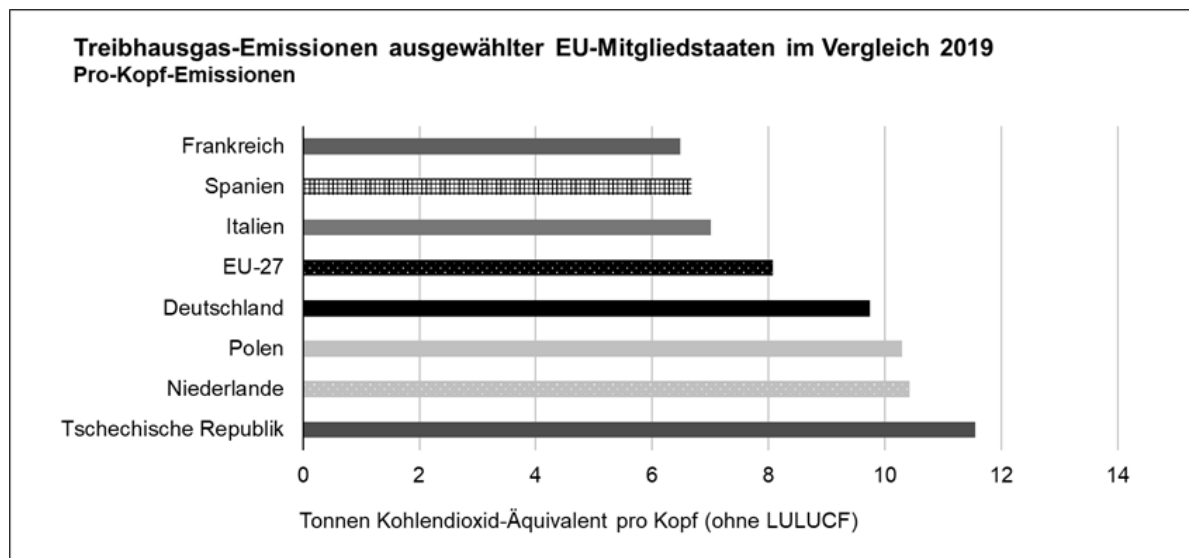


Abbildung 2-6: Pro-Person-Treibhausgas-Emissionen ausgewählter EU-Mitgliedstaaten im Jahr 2019
(Quelle: UBA, 2022; eigene Darstellung)

Für die Vergleichbarkeit und Koordination der Energie- und Klimapolitiken der EU-Mitgliedstaaten (MS) sowie das Monitoring und die Auskunft über die aktuellen Entwicklungen und CO₂-Reduktionspläne der einzelnen EU-MS mussten bereits Ende 2018 die ersten Entwürfe der sogenannten nationalen Energie- und Klimapläne (engl. National Energy and Climate Plan – NECP) an die EU-Kommission übermittelt werden. Ab 2023 müssen die NECP alle zwei Jahre aktualisiert werden (European Commission 2022a). Die NECP-Struktur orientiert sich an den fünf Säulen der EU-Energieunion: i) Verringerung CO₂-Emissionen durch Ausbau der erneuerbaren Energien, ii) Energieeffizienz, iii) Energieversorgungssicherheit, iv) Energiebinnenmarkt sowie v) Forschung, Innovation und Wettbewerbsfähigkeit. Sollten die EU-2030-Ziele nicht erreicht werden, müssten auf Ebene der EU oder der Mitgliedstaaten zusätzliche Maßnahmen ergriffen werden. Deutschland übermittelte im Juni 2020 den finalen NECP an die EU-Kommission (BMWK 2020). Nachdem im April 2021 das Bundesverfassungsgericht den Verfassungsbeschwerden gegen das Klimaschutzgesetz teilweise Recht gab, wurde die Bundesregierung zur Nachbesserung des Klimaschutzgesetzes (KSG) gezwungen (Bundesverfassungsgericht 2021). Im Mai 2021 wurde daraufhin im Bundeskabinett das Klimaschutz-Sofortprogramm 2022 beschlossen. Bis zum Jahr 2030 will Deutschland seine nationalen Treibhausgas-Emissionen statt um 55 % nun um 65 % bezogen auf das Ausgangsjahr 1990 mindern. Das Ziel der Netto-Treibhausgasneutralität wurde von 2050 auf das Jahr 2045 vorgezogen (BMF 2021). Deutschland steht somit im EU-Vergleich vor besonders großen Herausforderungen in den kommenden Jahren, um bis 2030 seine

Klimaschutzziele zu erreichen. Der vom BMWi beauftragte und im Mai 2021 veröffentlichte Bericht „Energiewirtschaftliche Projektionen und Folgeabschätzungen 2030/2050“ gibt Auskunft über die wesentlichen Bausteine der Energiewende. Der Primärenergiebedarf soll um ca. 46 %, von rund 12.800 PJ im Jahr 2020 auf etwa 6.900 PJ im Jahr 2050, sinken (Prognos et al. 2021, S. 42). Durch den Ausbau der Elektromobilität im Verkehrssektor und von elektrischen Wärmepumpen im Wärmesektor wird die Sektorkopplung zu einer steigenden Bruttostromerzeugung in Deutschland führen. Insgesamt wird der Anstieg der Bruttostromerzeugung bei ca. 13 % liegen, von rund 655 TWh im Jahr 2020 auf etwa 740 TWh im Jahr 2050. Ein Großteil der Bruttostromerzeugung, ca. 86 % bzw. durchschnittlich 633 TWh, soll dann aus erneuerbaren Energien erzeugt werden. Die verbleibende Stromerzeugung soll mithilfe von Biomasse, sonstigen Energieträgern und mit Stromimporten abgedeckt werden (Prognos et al. 2021, S. 44). Zur Versorgungssicherheit, insbesondere der Netzstabilisierung und für den Ausgleich der fluktuierenden Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien, sollen Gaskraftwerke als Brückentechnologie dienen. Die Gaskraftwerksinfrastruktur ist Teil der deutschen Wasserstoffstrategie (Die Bundesregierung 2020a), weshalb sich Deutschland in der EU-Taxonomie-Debatte für die Aufnahme von Gaskraftwerksinfrastruktur als zugelassene Investition in eine klimaneutrale Wirtschaft einsetzt. Im Januar 2022 betont die Bundesregierung in ihrer Stellungnahme zur Taxonomie, dass die verlangten Zwischenschritte beim Fuel Switch von Erdgas durch Beimischungsquoten von 30 % bis 2026 und 55 % bis 2030 durch dekarbonisierte Gase nicht realistisch sind. Die Bundesregierung schlägt vor, dass Zwischenschritte ausgespart werden, jedoch der Fuel Switch von Erdgas zu Wasserstoff bis ins Jahr 2036 abgeschlossen sein soll (BMF 2022)³. Diese Zielsetzung ist bemerkenswert, war doch der Kohleausstieg bis vor kurzem im Jahr 2038 vorgesehen (BMW i 2019). Gemäß Koalitionsvertrag soll nun der Kohleausstieg bis 2030 vollzogen sein und laut Bundesregierung nur sechs Jahre danach kein Erdgas zur Stromerzeugung mehr verwendet werden (SPD und Bündnis 90/Die Grünen und FDP 2021, S. 58). Als Antwort auf den russischen Angriffskrieg auf die Ukraine im Februar 2022 kündigte die Bundesregierung an, die Abhängigkeit von russischem Gas möglichst schnell zu reduzieren. Bereits im Jahr 2035 soll Deutschland zu 100 % erneuerbare Energien nutzen (Die Bundesregierung 2022a). Die Energiewende muss somit stark beschleunigt und die Wasserstoffinfrastruktur schnellstmöglich ausgebaut werden, damit auch ohne die russischen Gasimporte eine hohe Versorgungssicherheit gewährleistet ist (Pepe 2022). Allerdings steht der Ausbau erneuerbarer Energien (EE) in Deutschland vor großen

³ Dieses Dokument war das letzte Dokument, an dem Dr. Steffen Jenner aktiv mitgearbeitet hat, bevor er im Februar 2022 verstorben ist.

Herausforderungen. Neben den technischen Problemen bezüglich der Systemintegration, bspw. Ausbau der Stromnetz- und Wasserstoffinfrastruktur, gewinnen seit mehreren Jahren Diskussionen um die Sozialverträglichkeit der Energiewende (Goldammer et al. 2013) und die Flächenverfügbarkeit für die Projektumsetzung an Bedeutung (Kühne und Weber 2018; Böhm 2022). Während bei Windkraftanlagen (WKA) und der energetischen Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen weniger räumliche Flächenverfügbarkeit das begrenzende Kriterium darstellt, sondern vielmehr die Akzeptanz in der Bevölkerung, bspw. aufgrund der Tank-oder-Teller-Diskussion bei Biokraftstoffen (Fehrenbach 2019) oder aus Gründen des Landschaftsbild- und Vogelschutzes bei WKA an Land (Eichenauer et al. 2018), kommt es bei der Umsetzung von herkömmlichen PV-FFA zu einem Siedlungsflächenanstieg (Deutscher Bundestag 2019, 2022). Für einen möglichst kostengünstigen und schnellen EE-Ausbau soll insbesondere der WKA-Ausbau auf See und der PV anvisiert werden. Die WKA-Kapazität auf See soll bis 2030 um den Faktor neun steigen (Die Bundesregierung 2022c). Die PV-Kapazität soll von rund 60 GWp im Jahr 2022 auf über 215 GWp im Jahr 2030 gesteigert werden (Die Bundesregierung 2022a), was einem jährlichen PV-Zubau von 22 GWp entspricht. Der PV-Zubau soll jeweils zur Hälfte durch PV-Dachanlagen und PV-FFA erfolgen. Die direkte Flächeninanspruchnahme durch PV-FFA wird demnach um rund 77.000 Hektar bzw. 11.000 Hektar im Jahr und 30 Hektar pro Tag bis 2030 stark zunehmen und übertrifft selbst die Szenarien mit den höchsten Annahmen zur PV-FFA-Flächeninanspruchnahme bis 2030 um mehr als das Doppelte (Pfluger et al. 2018, 43, Tabelle 16). 30 Hektar pro Tag PV-FFA-Flächeninanspruchnahme, die nach derzeitigen gesetzlichen Rahmenbedingungen auf Bundesebene als zusätzlicher Siedlungsflächenanstieg betrachtet werden, würden das Nachhaltigkeitsziel, den Siedlungsflächenanstieg auf unter 30 Hektar pro Tag bis 2030 zu senken, sozusagen im Alleingang beanspruchen. Im Jahr 2017 hat als erstes Bundesland die bayerische Staatsregierung eine Zuschlagsmengenbegrenzung auf zunächst 30 (Bayerische Staatskanzlei 2017), dann 70 (Bayerische Staatskanzlei 2019) und dann auf maximal 200 PV-FFA-Projekte pro Jahr verabschiedet (Bayerische Staatskanzlei 2020). Unter Berücksichtigung der eingeschränkten Verfügbarkeit landwirtschaftlich nutzbarer Böden und des Ziels, bis 2030 den Anstieg der Siedlungs- und Verkehrsfläche zu begrenzen (SPD und Bündnis 90/Die Grünen und FDP 2021, S. 41) sowie ab 2050 eine „Nettonull“-Flächenkreislaufwirtschaft zu etablieren (BMUB 2016), ist abzusehen, dass die steigende Flächennachfrage für den PV-FFA-Ausbau zu einer Flächennutzungskonkurrenz und damit zu Konfliktkonstellationen führen wird. Ein durchschnittlicher landwirtschaftlicher Betrieb verfügt über 60 Hektar Betriebsfläche in Deutschland. Der PV-FFA-Ausbau würde demnach alle zwei Tage – bzw. 183

landwirtschaftlichen Betrieben im Jahr – die Flächennutzung entziehen, obwohl weltweit der Bedarf an Nahrungsmitteln und nachwachsenden Rohstoffen bis 2050 um über 50 % zunimmt. Das reine Zahlenwerk spricht dafür, dass anstelle des jährlichen Einschränkens der Agrarproduktion von rund 180 Landwirten innovative Systemlösungen ins Förderregime aufgenommen werden, die eine Solarstromerzeugung im Einklang mit der Nahrungsmittelproduktion ermöglichen und die diese zusätzlich bei der Anpassung an die Klimaveränderungen unterstützen können.

Zwischenfazit Klima- und Energiepolitik: Sowohl in der absoluten Betrachtung des CO₂-Verbrauchs als auch in der relativen Pro-Person-Bewertung schneidet Deutschland im EU-Vergleich schlecht ab. Deutschland ist im Jahr 2019 der größte CO₂-Verursacher der EU und der Pro-Person-Verbrauch liegt 20 % höher als der eines durchschnittlichen EU-Mitbürgers. Die beschlossenen Ausstiege aus der Nuklearstromerzeugung im Jahr 2022 und der Kohleverbrennung möglichst vor 2030 sowie die Erdgasverbrennung bis 2036 bedürfen massiver Investitionen in die Strom- und Gasnetzinfrastruktur, in den Ausbau der WKA an Land und auf See sowie in PV-Kapazitäten auf Dächern, konversions- und künstlichen Standgewässerflächen und auf Agrarflächen. Damit einerseits der PV-FFA-Ausbau auf Agrarflächen nicht mit dem Nachhaltigkeitsziel Reduktion des täglichen Siedlungsflächenanstiegs konteragiert und andererseits ein Interessenausgleich zwischen agrarpolitischen Handlungsnotwendigkeiten stattfindet, bspw. Finanzierung der Anpassung des Landwirtschaftssektors an die Klimaveränderung, wurde die Agri-PV als innovative Systemlösung in die bestehenden Klimaschutz- und Energiewende-Steuerungsmechanismen aufgenommen.

2.3 Koordination von Regierungshandeln in Deutschland – Theorie

Die Agri-PV-Markteinführung umfasst in der exekutiven Ministerialverwaltung auf Bundesebene die oben beschriebenen Politikfelder Agrarpolitik (BMEL), Nachhaltiges Landmanagement (BMUV) sowie Energie- und Klimapolitik (BMWK). Übergeordnet werden diese Politikbereiche in der Nachhaltigkeitspolitik eingerahmt und durch das Kanzleramt koordiniert. In der Legislative überprüft der Parlamentarische Beirat für Nachhaltige Entwicklung (PbnE) die Gesetzesvorhaben auf Nachhaltigkeit. Der PbnE konstatiert, „dass die

Nachhaltigkeitsziele und die DNS im Alltagsgeschäft des Bundestags oft untergehen“ und dass das Leitprinzip Nachhaltigkeit nicht „hinreichend in der politischen Arbeit verankert ist“ (Deutscher Bundestag 2020). Diese kritische Selbstreflexion aus dem Bundestag steht im Kontrast mit der Wahrnehmung, dass die Koordination der nachhaltigen Entwicklung in Deutschland gut funktioniert, weil sie mit Relevanz und kohärentem Handeln im Kanzleramt zur „Chefsache“ gemacht wurde (Wölkner und Elsner 2021). Für die erfolgreiche Markteinführung eines Querschnittthemas wie die Agri-PV ist die Koordination zwischen den zuständigen Ressorts notwendig. Die theoretischen Grundlagen zu den Mechanismen und Perspektiven von Koordination wurden von Buhr, meinem Doktorvater und Betreuer der vorliegenden Dissertationsschrift, im Jahr 2010 erläutert. Buhr befasst sich u. a. mit der Frage zur Koordination des Querschnittthemas „Innovationspolitik“ auf bundesstaatlicher Ebene und damit, wie beteiligte staatliche Akteure sich koordinieren könnten, um eine gewünschte „Innovationspolitik aus einem Guss“ zu erhalten (Buhr 2010, S. 163). Im Betreuungsverhältnis zwischen Buhr und Schindele wurden diese Überlegungen und Ausführungen auf die Agri-PV-Markteinführung übertragen. Die Bundesregierung ist als Kollegialorgan organisiert (Kabinettsprinzip), wobei der Bundeskanzler das Recht der Regierungsbildung hat und zugleich die Richtlinien der Politik vorgibt (Kanzlerprinzip).

Das Zusammenspiel zwischen Kanzleramt (Nachhaltigkeitspolitik) und den relevanten Kabinettsmitgliedern (BMEL, BMUV, BMWK) sowie deren Umsetzung in den Ressorts (Ressortprinzip) sind für eine „Agri-PV-Markteinführung aus einem Guss“ entscheidend. Dabei ist das Aufeinander-Abstimmen der gesetzlichen Richtlinien ausschlaggebend, um eine möglichst hohe Kohärenz zu erzielen, die wiederum dem Wunsch nach einem maximalen Beitrag zur Steigerung des Nachhaltigkeitsniveaus in Deutschland gerecht wird. Die Effektivität und Effizienz im bundesstaatlichen Koordinationsprozess werden durch mehrere interne und externe Faktoren bestimmt. Interne Faktoren sind bspw. die Anzahl von staatlichen Akteuren, die bei der Synchronisierung der rechtlichen Rahmenbedingungen miteinbezogen werden müssen. Außerdem zählen politische Pfadabhängigkeiten, existierende Entscheidungsregeln, formelle und informelle Kontakte und Netzwerke, Informationsasymmetrien, Verhandlungsformen und politische Positionen zu internen Erfolgsabhängigkeiten. Externe Faktoren können internationale Ereignisse und Schocks, bspw. die russische Aggression in der Ukraine, die Nuklearkatastrophe in Fukushima oder die

Flutkatastrophe im Ahrtal, parteipolitisches Kalkül oder neue Technologien und Markteinflussnahmen sein.

In der Regel gilt, je größer die Teilnehmendenzahl im Verhandlungssystem ausfällt, desto höher sind die Transaktionskosten im Abstimmungsprozess und desto mehr interne und externe Faktoren gefährden den Verhandlungserfolg sowie die Effektivität der Markteinführung. Ebenso wichtig wie die Anzahl der Verhandlungsteilnehmenden ist die Auswirkung des Verhandlungsgegenstands auf die einzelnen Ressortziele. „Allgemein gilt, dass eine Politik, die allen gibt und keinem erkennbar nimmt, sich auf eine breite öffentliche Zustimmung stützen kann“ (Scharpf 1973, S. 126). Beziehen wir diese Logik auf die Agri-PV-Markteinführung, sind nach Mayntz (Mayntz 2003) und Scharpf zwei Aspekte für die Auswirkung auf die Ressortziele maßgeblich, zum einen: Wie groß ist das Konfliktpotential? Dies wird bemessen am Ausmaß, ob und wie weit etablierte politische Ziele und Interessen durch die Agri-PV-Diffusion positiv oder negativ beeinträchtigt werden. Zum anderen: Wie hoch ist der gesellschaftspolitische Problemlösungsdruck und das Krisenbewusstsein gegenüber des Agrarflächenverlusts und Mangel an globaler Ernährungssicherheit in der Öffentlichkeit? Für die Koordination des Regierungshandelns stehen gemäß Buhr drei Koordinationsformen zur Verfügung: Konzentration, Integration und Kooperation (Buhr 2010, S. 200).

Konzentration: Durch eine Zentralisierung von Kompetenz in einem Ressort würde der Abstimmungsprozess hierarchischer erfolgen und das Agenda Setting wäre einfacher. Ein neuer Ressortzuschnitt würde Politikfelder in einem Haus bündeln und somit den Koordinationsaufwand reduzieren (Buhr 2010, S. 196).

Integration: Bei der Integration würden betroffene wichtige Kompetenzen in den Ressorts bleiben, allerdings würde ein Koordinationsgremium eingesetzt, das über den Abteilungsleiterausschuss oder Ressortbesprechungen der Staatssekretäre hinausgeht und das aus dem Kanzleramt ausdrücklich unterstützt wird. Dies könnte bspw. ähnlich wie ein Staatsminister und Beauftragter der Bundesregierung für Ostdeutschland oder Kultur und Medien eine neue Funktion eines Staatsministers und ein Beauftragter der Bundesregierung für Nachhaltiges Landmanagement sein, der in Kabinettsitzungen die Aufgabenzuteilung in den betroffenen Ressorts koordiniert (Buhr 2010, S. 196).

Kooperation: Der Koordinationstypus „Kooperation“ hält am Status quo und somit an der bestehenden Gemeinsamen Geschäftsordnung der Bundesministerien (GGO) fest. Im Kabinett wird die Federführung bestimmt und Verhandlungen zur Zielerreichung unter der Koordination des zuständigen Ministeriums geführt.

Gerade weil eine Agri-PV-Markteinführung mehrere Kompetenzfelder tangiert, können aufgrund von Kompetenzkonflikten, Abstimmungsproblemen, Transaktionskosten und inhaltlichen Differenzen zu den Politikgehalten die Effizienz und Effektivität des bundesstaatlichen Koordinationsprozesses gefährdet werden.

2.3.1 Theoretische Grundlagen Teil 1: Negative Koordination und Politikverflechtung von Fritz W. Scharpf

Scharpf, der als Pionier des Forschungsfeldes „Entscheidungsprozesse in der Ministerialverwaltung“ gilt, differenziert zwischen einer negativen und einer positiven Koordination (Scharpf 1993). Beide Ansätze sind gemäß Buhr dem Koordinationstypus „Kooperation“ zuzuordnen.

Bei der **negativen Koordination** wird angenommen, dass im ersten Schritt ein Problemverständnis in einem spezialisierten Fachreferat entwickelt und im nächsten Schritt ein intersektoraler Lösungsprozess initiiert wird. Das zuständige Ressort leitet den Dialog und Abstimmungsprozess zur Policy-Einführung oder -Anpassung. Im Verhandlungssystem werden negative Auswirkungen auf andere Politikfelder analysiert und Kompromisse ausgelotet, was zu einer Reduktion des ursprünglichen Programmziels führt. Die Akteure erkennen ihre wechselseitigen Probleminterdependenzen an, müssen jedoch keine Zugeständnisse an das federführende Referat machen (Scharpf 2000). „Für das Gesamtsystem folgt hieraus eine in seiner Struktur begründete Tendenz zum Inkrementalismus, zu einer Politik der kleinen Schritte und der halben Maßnahmen, die jedenfalls dann gefährlich sein muss, wenn gesellschaftliche Teilprobleme sich zu Krisenlagen kumulieren, die nur durch weitreichende und umfassende Veränderungsstrategien vermieden oder bewältigt werden können“ (Scharpf 1973, 88 ff). Als Policy-Ergebnis wird im Konsens ein Minimalkompromiss beschlossen, der nur knapp über der Policy-Ablehnung liegt.

Unter **positiver Koordination** versteht Scharpf einen Abstimmungsprozess, bei dem alle Organisationseinheiten gemeinsam handeln, um neue Policy-Lösungen zu suchen, und dabei gleichzeitig die Verteilungsfragen lösen (Scharpf 1993). Hier leistet jedes spezifische Ressort seinen maximalen Beitrag an das federführende Referat, das die einzelnen Bausteine zu einem Gesamtwerk zusammenträgt. Nachteile der positiven Koordination sind die höhere Anzahl beteiligter Akteure und die größere Auswahl an Entscheidungsalternativen. Bei der negativen Koordination sind die Koordinationskosten geringer und die Entscheidungsfindung ist schneller. In der Praxis der Ministerialverwaltung ist die positive Koordination daher eher selten und die negative Koordination bei weitem das vorherrschende Muster von Abstimmungsprozessen (Scharpf 2000). Um die Abstimmungsprozesse zu erleichtern, plädiert Scharpf deshalb, Politikfelder zu gruppieren. Er verwendet dafür eine Politik-Umwelt-Matrix, siehe die folgenden Abbildungen (Scharpf 1972):

Politikbereiche	Umweltbereiche						
	a	b	c	d	e	f	g
1	0	1	1	0	1	0	0
2	1	0	0	0	0	1	0
3	1	0	0	0	1	1	0
4	0	1	1	0	0	1	1
5	0	1	1	0	0	0	1
6	0	0	0	1	1	1	0

Politikbereiche	Umweltbereiche						
	b	c	g	a	f	e	d
1	1	1	0	0	0	0	①
4	1	1	1	0	①	0	0
5	1	1	1	0	0	0	0
2	0	0	0	1	1	0	0
3	0	0	0	1	1	1	0
6	0	0	0	0	1	1	①

Abbildung 2-7: Politik-Umwelt-Matrix von Fritz W. Scharpf, 1972

Dabei wird analysiert, welcher Politikbereich von welchem Policy-Inhalt, in diesem Fall Umweltbereich, betroffen ist. Die betroffenen Politikbereiche und Policy-Inhalte werden dann gruppiert und möglichst in ein oder zumindest auf wenige Ressorts konzentriert. Innerhalb eines Policy-Clusters wird das Agenda Setting einfacher, da Abstimmungswege verkürzt werden, und die ideologischen Distanzen geringer.

Die Koordination von Regierungshandeln in einem föderalistischen Mehr-Ebenen-System wird zwischen der horizontalen und vertikalen Ebene unterschieden. Die horizontale Ebene bildet die intersektorale Abstimmung in der bundespolitischen Ministerialverwaltung. Die vertikale Ebene betrifft die Koordination mit den Gliedstaaten. Scharpf spricht von Politikverflechtung, wenn entweder öffentliche Aufgaben nicht zentralstaatlich und autonom durchgeführt werden

können, sondern eine Zusammenarbeit unter der Beteiligung von Akteuren mehrerer Politikebenen notwendig ist, oder wenn neben der hierarchischen Beziehung im Mehr-Ebenen-System auch informelle Kooperationen auf einer Politikebene, bspw. zwischen mehreren Landesregierungen oder Regionalverbänden und Landesregierungen, zu beobachten sind (Scharpf et al. 1976). Arthur Benz prägt den Begriff der Politikverflechtungsfalle, die die Unfähigkeit des föderalistischen Systems beschreibt, institutionelle Änderungen zur Auflösung bestimmter Blockaden zu ermöglichen (Benz 2003, S. 220). Im Zusammenhang mit Nachhaltigem Landmanagement verfügt der Bund über die funktionale Kompetenz, die bundespolitische Zielsetzung festzusetzen und durch die Gesetzgebung, bspw. durch das Baugesetzbuch, den ordnungspolitischen Rahmen zu definieren. Die Bundesstaaten mit ihren Landesregierungen führen die Bundesgesetzgebung aus, bspw. durch die Umsetzung von Bauleitplanungen auf der kommunalen Ebene unter Beteiligung der unteren Baurechtsbehörde im Landkreis. Die Politikumsetzung erfolgt demnach in einem Spannungsfeld zwischen „Top-Down-Zielsetzungen“ und „Bottom-Up-Problembewältigung“ (Matland 1995).

2.3.2 Theoretische Grundlagen Teil 2: „Ambiguity-Conflict Model“ in der Policy- Umsetzung von Richard E. Matland

Matland befasste sich in der Herleitung seines „Ambiguity-Conflict Model“ mit den beiden Ansätzen „Top-Down“ und „Bottom-Up“ in der Policy-Umsetzung. Er analysierte dabei, welche Faktoren einen Einfluss auf den Koordinationsprozess der Policy-Umsetzung haben. Ähnlich der negativen Koordination bei Scharpf geht auch Matland davon aus, dass im Verhandlungssystem zur Kompromissfindung zwischen den beteiligten, intersektoralen Akteuren gegenseitige Handlungsspielräume analysiert und ausgelotet werden müssen, um einen Minimalkompromiss bei der Policy-Umsetzung zu identifizieren. Matland nimmt an, dass bei der Auswertung der gemeinsamen politischen Schnittmenge Ambivalenzen und Ambiguitäten offengelegt werden. **Ambivalenzen** bringen zum Ausdruck, ob der angedachten Policy-Umsetzung im jeweiligen Ressort ein hohes oder niedriges Konfliktrisiko inhärent ist. Führt die Policy-Umsetzung zu einer Verschlechterung anderer Handlungsstränge und Zielsetzungen des Ressorts, wird die Fähigkeit zu einer positiven Entscheidung als konfliktreich bewertet. Die Entscheidungsbefugnis und Kompromissbereitschaft zur Policy-Umsetzung sind damit weitestgehend eingeschränkt. Ist mit keiner Verschlechterung zu

rechnen, wird in der idealtypischen Konstellation von einer konfliktarmen Umsetzung und somit von einer positiven Entscheidung ausgegangen. Unter **Ambiguitäten** versteht Matland das Risiko von Mehrdeutigkeit. Die Mehrdeutigkeit kann sich sowohl auf die Zielsetzung beziehen als auch auf die Mittel zur Zielerfüllung. Sind im Koordinationsprozess widersprüchliche Auffassungen im Zusammenhang mit den Policy-Zielen und der Policy-Umsetzung vorhanden, nimmt die Ineffizienz und somit das Risiko zu einer negativen Entscheidung gegenüber der Initiative zu. Im Umkehrschluss führt die Ambiguitätsreduktion zu einer effizienteren Abstimmung und erhöht die Wahrscheinlichkeit der Kompromissbereitschaft. Wie Scharpf sieht auch Matlands „Ambiguity-Conflict Model“ eine zunehmende Komplexität der Policy-Umsetzung, wenn die Anzahl der beteiligten oder betroffenen Akteure zunimmt. Vor diesen Hintergründen untergliedert Matland sein Ambivalenz-Ambiguität-Hybrid-Modell in vier idealtypische Konstellationen der Policy-Umsetzung (Matland 1995):

i) konfliktarm-geringe Ambiguität: Treiber der Policy-Umsetzung ist die Ministerialverwaltung, weshalb dieses Paradigma „**administrative Umsetzung**“ genannt wird. Die Ziele sind klar und das Verhandlungsergebnis wird durch die gegebenen Ressourcen bestimmt. Meist werden inkrementelle Policy-Anpassungen in diesem Koordinationsparadigma umgesetzt.

ii) konfliktreich-geringe Ambiguität: Diese Konstellation wird „**politische Umsetzung**“ genannt. Die politischen Ziele sind klar definiert, aber Unstimmigkeiten sind zu erwarten, weil die Ziele unvereinbar sind. Im Verhandlungsraum und Koordinationsprozess wird die Politikumsetzung entweder durch die stärkste politische Macht bestimmt oder die involvierten Akteure greifen auf Verhandlungen zurück, um eine Einigung über Zielumfang, Verantwortlichkeiten und zeitlichen Ablauf zu erzielen.

iii) konfliktreich-hohe Ambiguität: Bei einer konfliktreichen Politikumsetzung mit hoher Ambiguität handelt es sich um eine „**symbolische Umsetzung**“. In diesem Paradigma sind oftmals die horizontalen und vertikalen Zuständigkeiten nicht eindeutig geklärt. Gemäß Matland können die beiden Ansätze zur Policy-Implementationsforschung – „Top-Down“ und „Bottom-Up“ – diese Konfliktsituation nicht lösen. Auf bundespolitischer Ebene stehen die Ressourcen zur Verfügung, aber die Entscheidungsgewalt obliegt den Kommunen. Hieraus entsteht ein hohes Konfliktniveau und der Koordinationsprozess wird hoch politisch, allerdings

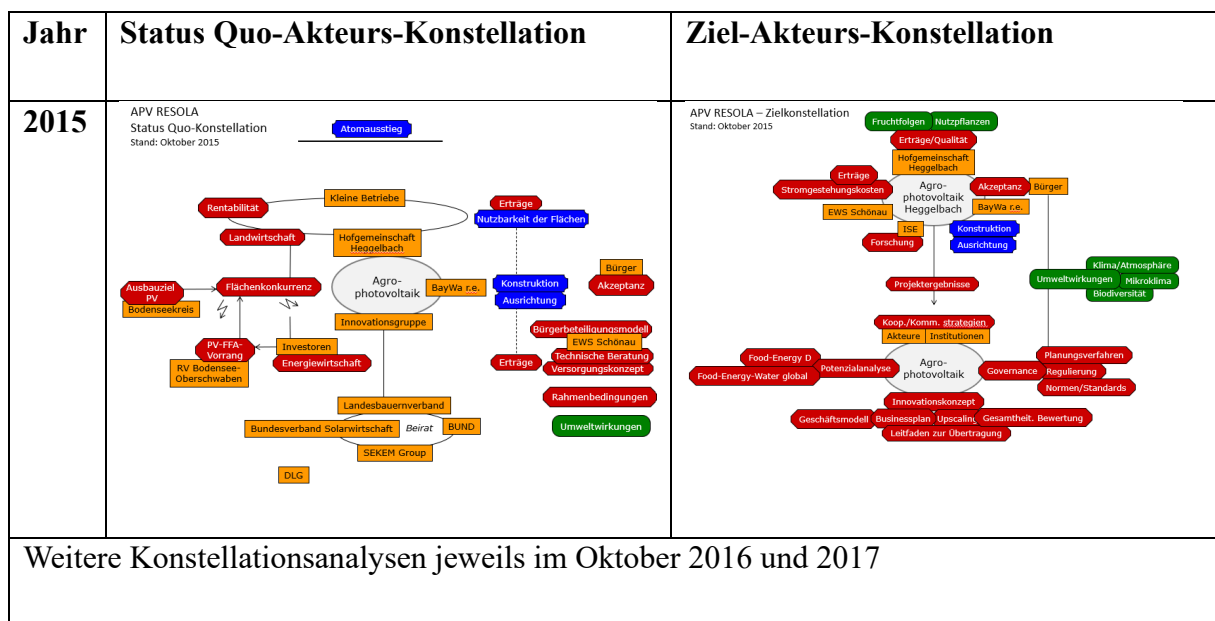
von lokalen Akteuren dominiert. In der Phase der Politikverabschiedung erfahren diese Gesetzgebungen eine große Aufmerksamkeit, haben jedoch nur eine geringe Wirksamkeit und sind deshalb im Nachgang fast ausschließlich mit politischem Misserfolg verbunden.

iv) konfliktarm-hohe Ambiguität: Das Paradigma „**experimentelle Umsetzung**“ beschreibt eine konfliktarme Koordinationskonstellation mit einer hohen Ambiguität. In diesem Umsetzungsprozess besteht eine umfangreiche politische Einigung, dass eine Policy-Umsetzung erfolgen soll, und die Zielsetzung ist klar. Ähnlich wie bei der positiven Koordination von Scharpf möchten die beteiligten Ressorts pro-aktiv einen Beitrag zur Policy-Umsetzung leisten, allerdings sind widersprüchliche Auffassungen zu den Begrifflichkeiten und dem zu regulierenden Gegenstand sowie die Ressourcenverfügbarkeit und der zeitliche Ablauf noch nicht eindeutig geklärt. Das geringe Konfliktniveau führt zu einer höheren Anzahl von beteiligten Akteuren, wodurch die Komplexität des Koordinationsprozesses und die Ambiguität zusätzlich erhöht werden. Die Policy-Umsetzung bedarf in dieser Konstellation einer Unterstützung zur Ambiguitätsreduktion. Im Verhandlungssystem steht nicht zur Debatte, ob die politische Maßnahme umgesetzt werden soll, sondern vielmehr werden Antworten benötigt, was und wie genau reguliert wird. Konsultationsphasen im Gesetzgebungsprozess können Informationslücken schließen und intersektorale Kompromissbereitschaften sichtbar machen. In der experimentellen Politikumsetzung sind die detaillierten Präferenzen der beteiligten Akteure sowie der Verhandlungsgegenstand noch nicht hinreichend bekannt. Ambiguität wird dabei als eine Gelegenheit zum gegenseitigen Kennenlernen erachtet und der Koordinationsprozess erfordert das Bewusstsein, dass ein gemeinsames Lernen das Ziel bildet.

Im Zusammenhang mit der Agri-PV-Markteinführung kann das „Ambiguity-Conflict Model“ herangezogen werden, um zwei Fragen zu beantworten: 1. Wie hoch sind die Ambivalenz und das daraus resultierende Konfliktniveau zwischen den unterschiedlichen Ressorts in der Ministerialverwaltung der Bundesebenen sowie zwischen den politischen Parteien? 2. Kann evaluiert werden, ob die politischen Entscheidungsträger:innen eine ähnliche Vorstellung davon haben, was unter dem Begriff „Agri-PV“ in Abgrenzung zu herkömmlichen PV-FFA zu verstehen ist und durch welche Policy-Umsetzung eine effiziente und effektive Agri-PV-Markteinführung gelingen kann?

Zusätzlich zu den Verwaltungstheorien von Scharpf und Matland können Theorien aus der Diffusions- und Organisationsforschung herangezogen werden, um die Koordination von

Regierungshandeln in Deutschland mit Bezug auf Agri-PV-Innovationsmanagement zu analysieren. Bei einem organisationstheoretischen Ansatz wird hinterfragt, ob und wie die Funktionsweise eines bestehenden Politiksystems verbessert werden könnte. Ausgehend vom Status Quo werden unterschiedliche Szenarien für Verantwortlichkeiten, Wissensmanagement, Steuerungsprozesse und Transaktionskosten (Ross 1973) zur Politikanpassung evaluiert (Witte 1977). Eine Methode der Organisationsforschung zur Bewertung der Rollenverschiebungen von im Innovationsprozess beteiligten Akteure ist die Akteur-Netzwerk-Analyse. Im APV-RESOLA-Projekt wurde durch das wissenschaftliche Begleitvorhaben im Innovationsschwerpunkt von Inter3 eine Konstellationsanalyse durchgeführt, um den akteurszentrierten Theorieansatz innerhalb der Agri-PV-Innovationsarena zu erproben und gleichzeitig die kurzfristigen, dringlichsten Maßnahmen zum Fortschreiten des Agri-PV-Innovationsprozesses zu identifizieren. Hierzu wurden im Rahmen eines jährlich stattfindenden Innovationscoachings persönliche Interviews mit Mitgliedern der Innovationsgruppe-APV-RESOLA sowie Dokumentenanalysen durchgeführt. In der folgenden Abbildung sind die Akteure und deren Rollenverschiebungen im Zeitverlauf zwischen 2015 und 2018 im Agri-PV-Innovationsprozess dargestellt:



Schritt trifft der potentielle Anwender seine Entscheidung über Annahme oder Ablehnung der Innovation; iv) In der Implementierungsphase sammelt der Innovationsanwender Erfahrungswerte im Alltag; v) Abschließend entscheidet der Anwender, ob die Innovation fortgesetzt, unterbrochen oder zukünftig abgelehnt wird. Aus der Analyse der ersten beiden Entscheidungsprozessen können wiederum fünf Adopterkategorien ausgemacht werden: i) Innovatoren; ii) Frühe Übernehmer; iii) Frühe Mehrheit; iv) Späte Mehrheit; v) Nachzügler. Die Innovation durchläuft in ihrer Diffusion diese fünf Adopterkategorien bis zunächst eine kritische Masse bei der Anwendung in einer frühen Mehrheit erzielt wurde und anschließend eine Adoptionsrate von 100 % erreicht ist. Die sich daraus ableitende S-Kurve ist in folgender Abbildung dargestellt:

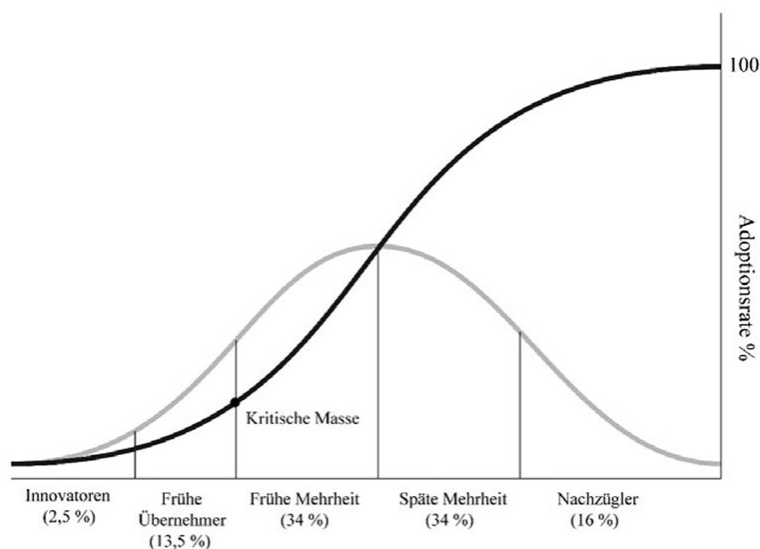


Abbildung 2-9: S-Kurve der Diffusion und Adopterkategorien nach Rogers (Karnowski und Kümpel 2015)

Im Kontext der Agri-PV-Markteinführung kann die Diffusionstheorie von Rogers verwendet werden, um im Agrarsektor landwirtschaftliche Betriebe ausfindig zu machen, die sich aufgrund ihrer sozio-ökonomischen Eigenschaften als Innovatoren und Frühe Übernehmer der Agri-PV-Systemtechnik eignen. Die Diffusionsforschung ermöglicht somit eine Effizienzsteigerung im Verwaltungs- und Organisationssystem zur Agri-PV-Markteinführung, indem eine gezielte Politiksteuerung die Erfolgswahrscheinlichkeiten zur Agri-PV-Umsetzung erhöht, bei gleichzeitiger Verringerung des Aufwands. Die Risikoabwägung im intersektoralen Verhandlungsraum der Bundesministerialverwaltung führt dadurch zu einer „Politik der kleinen Schritte“ (Scharpf 1993), begünstigt jedoch im Innovationsprozess den Übergang von einer experimentellen Agri-PV-Politikumsetzung, die auf Learning-by-Doing angewiesen ist, zu

einer konfliktarmen, geringe Ambiguität Konstellation, die gemäß Matland zur administrativen Umsetzung führt – was ein Indiz dafür wäre, dass die Agri-PV-Markteinführung politisch geglückt ist und die Agri-PV-Diffusion bis zur kritischen Masse vorgedrungen.

Zwischenfazit: Koordination von Regierungshandeln in Deutschland – Theorie: In dieser Promotion wurden die drei Theorieansätze aus der Verwaltungs- und Diffusionsforschung von Scharpf, Matland und Rogers herangezogen, um die Koordination von Regierungshandeln auf Bundesebene und im Mehrebenen System zur Agri-PV-Markteinführung näher zu betrachten. Organisationstheoretische Ansätze wurden im Rahmen der Begleitforschung zum BMBF-Förderschwerpunkt Nachhaltige Landnutzung im Schwerpunkt Innovationsmanagement durch Inter3 durchgeführt, indem zwischen den Jahren 2015 und 2018 Konstellationsanalysen für die Innovationsgruppe APV-RESOLA erarbeitet wurden.

2.4 Praxisbeispiel zur Koordination von Regierungshandeln: Nachhaltigkeits- und Agri-PV-Politik in Deutschland

2.4.1 Nachhaltigkeitspolitik in Deutschland

Die Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie (DNS) wurde im Kabinett Schröder I vorbereitet und erstmals 2002 veröffentlicht. Seitdem wird die DNS alle vier Jahre fortgeschrieben. Im Jahr 2016 wurde die DNS grundlegend überarbeitet und an die 17 Ziele für nachhaltige Entwicklung (englisch: Sustainable Development Goals – SDGs) der Vereinten Nationen (englisch: United Nations – UN) bis 2030, genannt Agenda 2030, angepasst. Zuletzt wurde die DNS im März 2021 aktualisiert, um die Entwicklungen aus dem europäischen Green Deal und der Coronapandemie abzubilden. Die aktuelle DNS-Version umfasst 66 Indikatoren, die jeweils sechs Transformationsbereichen und einem der 17 UN-SDGs zugewiesen sind (Die Bundesregierung 2020b, S. 59). Die sechs DNS-Transformationsbereiche sind ähnlich einer Politik-Umwelt-Matrix nach Scharpf, 1972, gruppiert, wodurch die Ermittlung von Zuständigkeiten, das Agenda Setting und der Abstimmungsprozess zwischen den betroffenen Politikbereichen erleichtert werden. Die DNS-Zuständigkeit in der Exekutive liegt im

Bundeskanzleramt, konkret im Staatssekretärausschuss für Nachhaltige Entwicklung unter der Leitung des Chefs des Bundeskanzleramts. In der Legislative überprüft der Parlamentarische Beirat für Nachhaltige Entwicklung (PbnE) die Gesetzesvorhaben auf Nachhaltigkeit. In jüngster Vergangenheit mehren sich Stimmen aus der Wissenschaft und Zivilgesellschaft, „den pandemiebedingten Wiederaufbau des Landes mit der DNS zu verknüpfen und ihre Governance-Struktur zu stärken“ (Wölkner und Elsner 2021). Der PbnE ist sich mit dem Rat für Nachhaltige Entwicklung und dem Sachverständigenrat für Umweltfragen einig, dass die institutionelle Verankerung einer Nachhaltigkeits-Gesetzesfolgenabschätzung gewährleistet sein muss, damit nicht wie bisher die DNS-Ziele „häufig anderen, kurzfristigen Zielen untergeordnet und damit langfristig die sozialen, ökologischen und ökonomischen Entwicklung gefährdet“ werden. In einem Positionspapier aus dem Jahr 2020 fordert der PbnE deshalb u. a., dass der Beirat in seinen Befugnissen einem Bundestagsausschuss gleichgestellt wird und die Kohärenz der Nachhaltigkeitspolitik weiterhin verbessert wird, indem künftig die DNS-Ziele frühzeitig in der Erarbeitungsphase mit Referentenentwürfen, Programmen und Aktionsplänen abgestimmt werden. Die Gesetzesfolgenabschätzung sollte vor der ersten Lesung im Bundestag abgeschlossen sein. Ministerien sollten sich künftig stärker am Wortlaut der Gemeinsamen Geschäftsordnung der Bundesministerien orientieren sowie ausführlich und nachvollziehbar darstellen, ob die Wirkung des Vorhabens einer nachhaltigen Entwicklung entspricht. Die Nachhaltigkeits-Gesetzesfolgenabschätzung der Bundesregierung soll durch einen Nachhaltigkeitskontrollrat überprüft werden, damit Zielkonflikte erkannt werden und Lösungsoptionen mit einer höchstmöglichen Übereinstimmung empfohlen werden können (Deutscher Bundestag 2020, S. 4).

Nachhaltigkeitsfolgenabschätzung: Agri-PV in der DNS

Für die gesellschaftspolitische Entscheidung zur Koordination und Förderung der Agri-PV-Diffusion ist die Beurteilung wichtig, ob Agri-PV in Summe einen Beitrag zur Steigerung des Nachhaltigkeitsniveaus in Deutschland leisten kann. Hierbei wird gefragt, welche der Agri-PV-Eigenschaften gegenüber bestehenden PV-Techniken einen zusätzlichen Nutzen für die nachhaltige Entwicklung bedeuten und somit eine Aufnahme in ein Förderregime rechtfertigen. In der folgenden Tabelle werden die Auswirkungen zusammengefasst, die eine Agri-PV-Diffusion in Deutschland auf die Umsetzung der DNS haben könnte.

Tabelle 2-4: Auswirkung der Agri-PV-Diffusion auf die Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie 2021 (Quelle: Die Bundesregierung, 2020b; eigene Darstellung)

SDG/ Indikator	Transformations- bereich	Ziel und Postulat
SDG 2	Nachhaltige Agrar- und Ernährungssysteme	Hunger beenden, Ernährungssicherheit erreichen und nachhaltige Landwirtschaft fördern
2.1.b	Anteil ökologischer Landbau erhöhen	
SDG 7	Energiewende und Klimaschutz	Zugang zu bezahlbarer, verlässlicher, nachhaltiger Energie für alle sichern
7.2.a	Anteil erneuerbarer Energien am Brutto-Endenergieverbrauch erhöhen	
7.2.b	Anteil erneuerbarer Energien am Brutto-Stromverbrauch erhöhen	
SDG 8	Kreislaufwirtschaft	Nachhaltiges Wirtschaftswachstum und produktive Vollbeschäftigung für alle fördern
8.4	Wirtschaftsleistung umwelt- und sozial-verträglich steigern	
8.5.a	Beschäftigungsniveau steigern	
SDG 9	Kreislaufwirtschaft	Nachhaltige Industrialisierung fördern und Innovationen unterstützen
9.1	Zukunft mit neuen Lösungen gestalten	
SDG 11	Nachhaltiges Bauen und Verkehrswende	Städte und Siedlungen widerstandsfähig und nachhaltig machen
11.1a	Nachhaltige Landnutzung	
SDG 13	Energiewende und Klimaschutz	Umgehend Maßnahmen zur Bekämpfung des Klimawandels und seiner Auswirkungen ergreifen
13.1.a	Treibhausgase reduzieren	

Insgesamt sind sechs SDGs, acht Indikatoren und vier Transformationsbereiche direkt von einer Agri-PV-Diffusion beeinflusst. Die Indikatoren „11.1.a Nachhaltige Landnutzung“ und „9.1 Zukunft mit neuen Lösungen gestalten“ sind Alleinstellungsmerkmale der Agri-PV im Vergleich zu sonstigen PV-Freiflächen-Anwendungen. Ein weiterer wichtiger Punkt ist das Agri-PV-Alleinstellungsmerkmal, die Landwirtschaft bei der Anpassung an den Klimawandel zu unterstützen, bspw. wenn Nutztiere in der Sommerhitze unter Agri-PV-Anlagen weiden können oder bestehende Kulturschutzsysteme im Sonderkulturenbereich ersetzt werden. Landwirte profitieren so von einer Schutzfunktion, deren Investitionskosten über das EEG finanziert werden könnten. Allerdings stellt die Anpassung der Landwirtschaft an den Klimawandel derzeit kein DNS-Ziel dar (Schindele 2021a). Ebenso könnten Indikatoren als

Agri-PV-Alleinstellungsmerkmal direkt betroffen sein, wenn Zielsetzungen synchronisiert und nicht getrennt voneinander umgesetzt werden, bspw. Indikator „2.1.b Anteil ökologischer Landbau erhöhen“, indem Agri-PV-Projekte in Verbindung mit ökologischem Landbau im EEG-Ausschreibungsverfahren bevorzugt bezuschlagt werden würden.

2.4.2 Agri-PV-Förderregime Deutschland (Stand: 30.06.2022)

Das erste Förderinstrument in Deutschland, das die Agri-PV berücksichtigt und eine wirtschaftliche Umsetzung von Agri-PV-Anlagen ermöglicht hat, ist die im September 2020 veröffentlichte und ab November 2020 in Kraft getretene „Richtlinie zur Förderung der Energieeffizienz und CO₂-Einsparung in Landwirtschaft und Gartenbau. Teil A – Landwirtschaftliche Erzeugung, Wissenstransfer“ (BMEL 2021a, S. 7). Hierin werden u. a. PV-Anlagen, auch Agri-PV-Anwendungen, für die Eigenendenergieerzeugung im Zusammenhang mit Elektrifizierungsmaßnahmen auf landwirtschaftlichen Betrieben gefördert, bspw. PV-Stromerzeugung für eine elektrische Wasserpumpe, Kompressoren oder Elektrotransporter. Als Fördervoraussetzung wird ein Energiekonzept für den Bauernhof benötigt, das Auskunft über die vermiedenen CO₂-Tonnen gibt und somit den Förderzuschuss rechtfertigt. Das Fördervolumen kann ausschließlich von landwirtschaftlichen Betrieben beantragt werden und ist auf maximal 40 % der Investitionskosten begrenzt – oder maximal 500.000 € bzw. maximal 800 € je vermiedener CO₂-Tonne. Kurze Zeit darauf, im Dezember 2020, wurde im Bundestag eine Änderung der Innovationsausschreibungsverordnung (InnAusV) beschlossen, damit die Agri-PV gemeinsam mit weiteren „besonderen Solaranlagen“ in das EEG-Förderregime integriert wird (BMJV 2020). Für die Umsetzung der InnAusV wurde die BNetzA angehalten, die konkreten förderrechtlichen Bedingungen für die Agri-PV bis Anfang Oktober 2021 zu definieren, damit die erste Ausschreibung für besondere Solaranlagen am 01. April 2022 durchgeführt werden kann. Die BNetzA initiierte daraufhin am 16. Juni 2021 eine Konsultation zur „Festlegung der an die besonderen Solaranlagen nach § 15 der Innovationsausschreibungsverordnung (InnAusV) zu stellenden Anforderungen“. Im Rahmen dieser Konsultation wurden 34 Stellungnahmen von Verbänden, Landesministerien, Unternehmen, Stiftungen und anderen Akteuren veröffentlicht, die sich mit der Agri-PV-Markteinführung befassen (BNetzA 2021b). Im Anschluss an die BNetzA-Festlegung zur Agri-PV initiierte am 06.10.2021 das BMEL eine Verbändeanhörung zum Referentenentwurf einer

GAP-Direktzahlungen-Verordnung, zu der 32 Stellungnahmen eingereicht wurden (BMEL 2021c). Die sich daraus ableitende Kabinettfassung der BMEL-Verordnung zur Durchführung der GAP-Direktzahlungen (GAPDZV) ermöglicht unter den folgenden Bedingungen die Beihilfefähigkeit für die landwirtschaftliche Tätigkeit im Agri-PV-System: § 12, Absatz 4, Nummer 6, hat eine Ausnahme für Agri-PV geschaffen, indem der Betriebsinhaber nachweist, dass es sich um eine Agri-PV-Anlage handelt. Zudem wurde durch die Ergänzung von Nummer 5 festgelegt, dass zum einen eine Bearbeitung der Fläche unter Einsatz üblicher landwirtschaftlicher Methoden, Maschinen und Geräte nicht ausgeschlossen wird und dass sich zum anderen die landwirtschaftliche Nutzfläche unter Zugrundelegung der DIN SPEC 91434 um höchstens 15 % verringert. Förderfähig sind somit 85 % der Fläche (BMEL 2021d). Die im Mai 2021 veröffentlichte DIN SPEC 91434, deren Initiative aus einem Gruppenfachgespräch hervorging, das Schindele mit Vertreter:innen aus dem BMEL, der Universität Hohenheim, BMBF und PTJ am 26.6.2018 in Berlin im Rahmen seiner Promotion durchführte, unterstützte den politischen Koordinationsprozess zur Agri-PV-Markteinführung. Die DIN SPEC 91434 reduziert die intersektoralen Mehrdeutigkeiten (Ambiguitäten) hinsichtlich der Bedeutung von Agri-PV und verringert dadurch das Risiko von Mitnahmeeffekten, indem die Umsetzung von Alibi-Agri-PV-Anlagen in etablierten Förderregimen erschwert wird. Bei der Politikumsetzung wurde mittels der DIN SPEC 91434 die Agri-PV-Technologie in den Gesetzgebungen InnAusV (BMWK) sowie GAPDZV (BMEL) verankert. Das APV-RESOLA-Projekt unter der Leitung von Schindele leistete dadurch einen wesentlichen Beitrag zur Agri-PV-Markteinführung in Deutschland in den Jahren 2020 und 2021. In Anlehnung an das „Ambiguity-Conflict Model“ von Matland wird die Agri-PV-Markteinführung mit geringem Konfliktpotential und hoher Ambiguität somit als „experimentelle Umsetzung“ erachtet.

Nach den Regierungswechseln im Herbst 2021 veröffentlichten am 10. Februar 2022 die drei Ministerien BMWK, BMUV und BMEL ein Eckpunktepapier, in dem als gemeinsamer Vorschlag der Ausbau der PV-Freiflächen im Einklang mit landwirtschaftlicher Nutzung und Naturschutz gefordert wird (Die Bundesregierung 2022b). Darin wurde vorgeschlagen, dass Agri-PV-Anlagen auf allen Ackerflächen grundsätzlich zulässig sein sollen, nicht jedoch auf Grünlandflächen sowie naturschutzrelevanten Ackerflächen und Moorböden. Die EU-GAP-Mittel sollen weiterhin bis zu 85 % zur Verfügung stehen. Die Projektplanung soll beschleunigt werden, indem Kommunen durch die Förderung einer Angebotsplanung unterstützt werden. Den Ankündigungen aus dem Eckpunktepapier folgte am 28.02.2022 der Referentenentwurf

eines Gesetzes zu Sofortmaßnahmen für einen beschleunigten Ausbau der erneuerbaren Energien und weiteren Maßnahmen im Stromsektor (EEG 2023) durch das BMWK. Hierin sollen die besonderen Solaranlagen inkl. Agri-PV aus der InnAusV in die regulären Freiflächenausschreibungen überführt werden. Somit gibt es kein gesondertes Ausschreibungssegment mehr für besondere Solaranlagen. Hochaufgeständerte, horizontale Agri-PV-Anlagen sollen einen Bonus von zunächst 1,2 €-ct/kWh erhalten, der in den Folgejahren degressiv bis 0,5 €-ct/kWh abnimmt. Die Pflicht zur Anlagenkombination entfällt und die maximale Gebotsgröße liegt wie bei klassischen PV-FFA bei 20 MWp. Für Agri-PV wurde die Flächenkulisse im Vergleich zu Freiflächen deutlich ausgeweitet. Das EEG 2023 soll ab dem 01.01.2023 in Kraft treten. Die Ausschreibungsmenge für Freiflächen soll im Jahr 2023 bei 5.850 MWp liegen und dann bis 2027 auf 9.000 MWp pro Jahr ansteigen (Die Bundesregierung 2022a).

Zwischenfazit Nachhaltigkeits- und Agri-PV-Politik in Deutschland:

Eine Agri-PV-Diffusion würde sechs SDGs, acht Nachhaltigkeitsindikatoren und vier Transformationsbereiche der DNS direkt beeinflussen. Gegenüber anderen PV-Anwendungen sind insbesondere die Indikatoren „11.1.a Nachhaltige Landnutzung“ und „9.1 Zukunft mit neuen Lösungen gestalten“ Alleinstellungsmerkmale. Ob eine Agri-PV-Diffusion durch Regierungshandeln gefördert wird, hängt einerseits davon ab, ob die Agri-PV in Summe einen Beitrag zur Steigerung des Nachhaltigkeitsniveaus in Deutschland leisten kann und diese Leistungen durch Akteure wie Wissenschaft, Interessensvertretungen, Fachreferate in der Ministerialverwaltung auf Bundesebene, Parteien sowie aus Fraktionen im Bundestag eingefordert werden. Andererseits ist die Agri-PV-Diffusion davon abhängig, ob die Regierung in der Lage ist, sich auf eine „Agri-PV-Markteinführung aus einem Guss“ zu einigen. Dabei sind die Anzahl der Verhandlungsteilnehmer und die Auswirkungen der Agri-PV-Diffusion auf die einzelnen Ressortziele sehr wichtig. „Allgemein gilt, dass eine Politik, die allen gibt und keinem erkennbar nimmt, sich auf eine breite öffentliche Zustimmung stützen kann“. Schlussendlich hängt der Erfolg des Regierungshandelns und der damit verbundenen Agri-PV-Diffusion ebenfalls davon ab, ob Ambivalenzen und Ambiguitäten im Verhandlungssystem zwischen den Politikbereichen geklärt werden können, ein Krisenbewusstsein zum Agrarflächenverlust und Mangel an Ernährungssicherheit der Weltbevölkerung bis 2050 in der Öffentlichkeit ausreichend vorhanden ist, ob eine geeignete Koordinationsform in der bundesstaatlichen Ministerialverwaltung gefunden wird und ob die Hürden im Mehr-Ebenen-

System durch eine Politikverflechtung überwindbar sind. Bereits das Kabinett Merkel IV hat die Agri-PV-Technologie in bestehende Förderregime integriert und Anpassungen an Gesetzgebungen und Verordnungen vorgenommen, bspw. die Aufnahme der Agri-PV in die Richtlinie zur CO₂-Reduktion in der Landwirtschaft, in die GAPDZV, durch die 85 % Direktzahlungen der EU-GAP für die landwirtschaftliche Tätigkeit im Agri-PV-System zur Verfügung stehen, und in die InnAusV im EEG 2021, die ein gesondertes Fördersegment für besondere Solaranlagen beinhaltet. Das Kabinett Scholz festigt diese Politikentwicklung und untermauert durch den gemeinsamen Vorschlag für den Ausbau der PV-Freiflächen im Einklang mit landwirtschaftlicher Nutzung und Naturschutz durch das BMWK, BMUV und BMEL, dass eine erfolgreiche Markteinführung des Querschnittthemas Agri-PV der Koordination zwischen mehreren Politikfeldern bedarf. Der Referentenentwurf zum EEG 2023 weitet die Flächenkulisse für Agri-PV-Anwendungen aus, erhöht die maximale Projektgröße auf 20 MWp, entbindet die Agri-PV der Anlagenkombination und integriert die Agri-PV in das gleiche Fördersegment wie herkömmliche PV-FFA, wodurch eine längerfristige Kontinuität für die Agri-PV-Diffusion gewährleistet wird. Das Regierungshandeln unterstützt die Koordination von der „Agri-PV-Markteinführung aus einem Guss“. Die Ambivalenz und das Konfliktpotential der Agri-PV-Markteinführung auf betroffene Ressorts werden als niedrig bewertet, während die Ambiguität in der Ministerialverwaltung als hoch eingeschätzt wurde, als noch kein Agri-PV-Qualitätsstandard vorhanden war. Erst nach der Veröffentlichung des DIN SPEC 91434 Agri-PV-Standards im Mai 2021 konnte die Agri-PV-Systemtechnik sowohl in die InnAusV im EEG 2021 als auch in der GAPDZV mit Bezug auf die DIN SPEC 91434 integriert werden. Gemäß den theoretischen Hintergründen aus dem „Ambiguity-Conflict Model“ von Matland ist die Agri-PV-Markteinführung eine „experimentelle Politikumsetzung“ mit geringem Konfliktpotential, allerdings hoher Ambiguität, wodurch ein ressortübergreifender Lernprozess und die Notwendigkeit zum „Learning-by-doing“ den beteiligten Akteuren bewusst sind.

In den folgenden Kapiteln werden die Literaturübersicht und Umfeldanalyse mit meinen fünf wirtschaftspolitischen Fragestellungen aus dem APV-RESOLA-Projekt in einen Zusammenhang gebracht. In Kapitel 3 werden meine disziplinären und interdisziplinären Beiträge im Agri-PV-Innovationsprozess in Deutschland sowie die Methoden erläutert, die ich für die Beantwortung meiner Fragestellungen herangezogen habe. In Kapitel 4 werden die Ergebnisse meiner Forschungsaktivitäten als Antwort auf die Fragen zusammengefasst.

2.5 Referenzen

- agrارheute Redaktion (2021): Flächenverbrauch: Der Landwirtschaft geht der Platz aus. Online verfügbar unter <https://www.agrarheute.com/management/flaechenverbrauch-landwirtschaft-geht-platz-582128>, zuletzt aktualisiert am 10.06.2021, zuletzt geprüft am 17.05.2022.
- Bauchmüller, Michael (2021): Agrarmilliarden: Regierung einig über neue Verteilung. In: Süddeutsche Zeitung, 12.04.2021. Online verfügbar unter <https://www.sueddeutsche.de/politik/landwirtschaft-agrarsubventionen-kloeckner-bundesregierung-1.5262727>, zuletzt geprüft am 02.09.2022.
- Bayerische Staatskanzlei (2017): Verordnung über Gebote für Freiflächenanlagen. 754-4-1-W, 2015-1-1-V, 752-2-W. Bayerische Staatsregierung. Online verfügbar unter https://www.bayern.landtag.de/www/ElanTextAblage_WP17/GVBl/2017/GVBl-2017-Nr-04.pdf, zuletzt aktualisiert am 07.03.2017, zuletzt geprüft am 18.05.2022.
- Bayerische Staatskanzlei (2019): Nr. 119, Bericht aus der Kabinettsitzung. Erneuerbare Energien: Mehr Freiflächen-Photovoltaikanlagen für Bayern. 04.06.2019. München. Rainer Riedl. Online verfügbar unter <http://www.bayern.de/bericht-aus-der-kabinettsitzung-vom-4-juni-2019/#1>, zuletzt geprüft am 09.09.2019.
- Bayerische Staatskanzlei (2020): Dritte Verordnung über Gebote für Freiflächenanlagen. 754-4-1-W. Bayerische Staatsregierung. Online verfügbar unter <https://www.verkuendung-bayern.de/files/gvbl/2020/17/gvbl-2020-17.pdf>, zuletzt aktualisiert am 26.05.2020, zuletzt geprüft am 18.05.2022.
- Bayerische Staatsregierung (2019): Zweite Verordnung über Gebote für Freiflächenanlagen. 754-4-1-W, vom 04.06.2019. Fundstelle: GVBl. 2019 S. 314. Online verfügbar unter <https://www.verkuendung-bayern.de/gvbl/2019-314/>, zuletzt geprüft am 03.02.2020.
- BBSR (2014): Flächenverbrauch, Flächenpotenziale und Trends 2030. BBSR-Analysen KOMPAKT 07/2014. Unter Mitarbeit von Roland Goetzke, Christian Schlump, Jana Hoymann, Gisela Beckmann und Fabian Dosch. Hg. V. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR). Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung. Bonn. Online verfügbar unter http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/AnalysenKompakt/2014/DL_07_2014.pdf?__blob=publicationFile&v=, zuletzt geprüft am 03.02.2020.
- Benz, Arthur (2003): Konstruktive Vetospieler in Mehrebenensystemen. In: Renate Mayntz (Hg.): Die Reformierbarkeit der Demokratie. Innovationen und Blockaden. Festschrift für Fritz W. Scharpf. Unter Mitarbeit von Fritz W. Scharpf. Frankfurt/Main, New York: Campus-Verl. (Schriften aus dem Max-Planck-Institut für Gesellschaftsforschung, Bd. 45), S. 205–236. Online verfügbar unter [https://books.google.de/books?hl=de&lr=&id=uGRKNR7mLBIC&oi=fnd&pg=PA205&dq=Benz,+Arthur,+2003:+Konstruktive+Vetospieler+in+Mehrebenensystemen,+in:+Mayntz,+Renate++Streeck,+Wolfgang+\(Hrsg.\),+2003:+Die+Reformierbarkeit+der+Demokratie,+Innovationen+und+Blockaden,+Frankfurt++Main,+2005+%E2%80%93+238.&ots=xSl3fr12AS&sig=P9DFKP37eh5OyPxBEHiaG4focpA&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.de/books?hl=de&lr=&id=uGRKNR7mLBIC&oi=fnd&pg=PA205&dq=Benz,+Arthur,+2003:+Konstruktive+Vetospieler+in+Mehrebenensystemen,+in:+Mayntz,+Renate++Streeck,+Wolfgang+(Hrsg.),+2003:+Die+Reformierbarkeit+der+Demokratie,+Innovationen+und+Blockaden,+Frankfurt++Main,+2005+%E2%80%93+238.&ots=xSl3fr12AS&sig=P9DFKP37eh5OyPxBEHiaG4focpA&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false), zuletzt geprüft am 18.05.2022.
- BMEL (2009): Leitfaden der Bund-Länder-Arbeitsgruppe „InVeKoS/Direktzahlungen“ zur Anwendung von Artikel 3 c der VO (EG) Nr. 795/2004 – Kriterien zur Abgrenzung von auf beihilfefähigen Hektarflächen zulässigen und nicht zulässigen nichtlandwirtschaftlichen Tätigkeiten. 424-40402/0002. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. 04.06.2009. Aufl. Unter Mitarbeit von Referat 424, Gez. Dr. Müller. Hg. V. BMEL. Online verfügbar unter https://www.thueringen.de/imperia/md/content/lwa-lei/blag_leitfaden.pdf, zuletzt geprüft am 07.01.2020.
- BMEL (2018): Landwirtschaft verstehen. Fakten und Hintergründe. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. Unter Mitarbeit von Referat 121. Hg. V. BMEL. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Broschueren/Landwirtschaft-verstehen.html>, zuletzt geprüft am 01.10.2019.
- BMEL (2019): Grundzüge der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) und ihrer Umsetzung in Deutschland. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). Online verfügbar unter

-
- <https://www.bmel.de/DE/themen/landwirtschaft/eu-agrarpolitik-und-foerderung/gap/gap-nationale-umsetzung.html>, zuletzt aktualisiert am 11.05.2020, zuletzt geprüft am 16.05.2022.
- BMEL (2021a): Richtlinie zur Förderung der Energieeffizienz und CO₂-Einsparung in Landwirtschaft und Gartenbau. Teil A – Landwirtschaftliche Erzeugung, Wissenstransfer. Hg. V. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). BMEL. Online verfügbar unter https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/Projektfoerderung/BuPro_Energieeffizienz/A-Richtlinie.pdf?__blob=publicationFile&v=2, zuletzt aktualisiert am 18.08.2021, zuletzt geprüft am 18.05.2022.
- BMEL (2021b): Richtlinie zur Förderung der Energieeffizienz und CO₂-Einsparung in Landwirtschaft und Gartenbau. Teil B: Erneuerbare Energieerzeugung. Hg. V. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). Berlin. Online verfügbar unter https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/Projektfoerderung/BuPro_Energieeffizienz/B-Richtlinie.pdf?__blob=publicationFile&v=5, zuletzt geprüft am 16.05.2022.
- BMEL (2021c): GAP-Direktzahlungen-Verordnung (GAPDZV). Verbändestellungnahmen zum Referentenentwurf. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). Online verfügbar unter https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Glaeserne-Gesetze/Stellungnahmen/GAPDZV.pdf?__blob=publicationFile&v=2, zuletzt geprüft am 18.05.2022.
- BMEL (2021d): Verordnung zur Durchführung der GAP-Direktzahlungen. GAP-Direktzahlungen-Verordnung – GAPDZV. Unter Mitarbeit von Schneider Charlotte. BMEL. Online verfügbar unter https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Glaeserne-Gesetze/Kabinettfassung/GAPDZV.pdf?__blob=publicationFile&v=3, zuletzt aktualisiert am 24.11.2021, zuletzt geprüft am 31.05.2022.
- BMEL (2022): GAP-Strategieplan für die Bundesrepublik Deutschland. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). Online verfügbar unter <https://www.bmel.de/DE/themen/landwirtschaft/eu-agrarpolitik-und-foerderung/gap/gap-strategieplan.html>, zuletzt aktualisiert am 04.04.2022, zuletzt geprüft am 16.05.2022.
- BMF (2021): Klimaschutz Sofortprogramm 2022. Hg. V. Bundesministerium für Finanzen (BMF). Online verfügbar unter https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Downloads/klimaschutz-sofortprogramm-2022.pdf?__blob=publicationFile&v=1, zuletzt geprüft am 17.05.2022.
- BMF (2022): Stellungnahme zur Taxonomie. Eingangsbemerkung. Hg. V. Bundesfinanzministerium (BMF). Online verfügbar unter https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Downloads/Europa/stellungnahme-zur-taxonomie.pdf?__blob=publicationFile&v=4, zuletzt geprüft am 17.05.2022.
- BMJV (2020): Verordnung zu den Innovationsausschreibungen. InnAusV. BMWi. Online verfügbar unter <https://www.gesetze-im-internet.de/innausv/BJNR010610020.html>, zuletzt aktualisiert am 20.01.2020, zuletzt geprüft am 26.04.2022.
- BMUB (2016): Climate Action Plan 2050. Principles and goals of the German government’s climate policy. Hg. V. Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety. Berlin.
- BMWK (2019): Kommission „Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung“. Hg. V. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). BMWi. Online verfügbar unter https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/A/abschlussbericht-kommission-wachstum-strukturwandel-und-beschaeftigung.pdf?__blob=publicationFile&v=4, zuletzt geprüft am 17.05.2022.
- BMWK (2020): Integrierter Nationaler Energie- und Klimaplan. Hg. V. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). Online verfügbar unter https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/I/integrierter-nationaler-energie-klimaplan.pdf?__blob=publicationFile&v=4, zuletzt geprüft am 17.05.2022.
- BMWK (2022): Klimaschutzplan 2050. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). Online verfügbar unter <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/klimaschutz-klimaschutzplan-2050.html>, zuletzt aktualisiert am 16.05.2022, zuletzt geprüft am 16.05.2022.
- BnetzA (2021): Ein-ge-gan-ge-ne Stel-lung-nah-men im Fest-le-gungs-verfah-ren zu den be-son-de-ren So-lar-an-la-gen. Bundesnetzagentur (BNetzA). Online verfügbar unter <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Ausschreibungen/Innovation/Besond>
-

- ereSolaranlagen/StellungnahmenFestlegungsverfahren/start.html, zuletzt aktualisiert am 18.05.2022, zuletzt geprüft am 18.05.2022.
- BnetzA (2022): In-no-va-ti-ons-aus-schrei-bun-gen: Ge-bots-ter-min 1. April 2022. Hg. V. Bundesnetzagentur (BNetzA). Online verfügbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Ausschreibungen/Innovation/Gebortstermin_010422/artikel.html, zuletzt aktualisiert am 16.05.2022, zuletzt geprüft am 16.05.2022.
- Böhm, Jonas (2022): Wie viele landwirtschaftlichen Flächen sind bereits durch PV-Freiflächenanlagen aus der Produktion genommen? Hg. V. Thünen-Institut für Betriebswirtschaft. Online verfügbar unter https://www.dlg-mitteilungen.de/fileadmin/img/content/cover/heft/2022/22-02/DLG0222_Flaechennutzung_PV-FFA_Boehm.pdf, zuletzt geprüft am 27.05.2022.
- Buhr, Daniel (2010): Chaos oder Kosmos? Die Koordination der Innovationspolitik des Bundes – Probleme und Lösungsansätze. 1. Auflage. Baden-Baden: Nomos Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG (Wirtschafts- und Sozialpolitik, 4). Online verfügbar unter <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflicht-1202145>.
- Bundesverfassungsgericht (2021): Verfassungsbeschwerden gegen das Klimaschutzgesetz teilweise erfolgreich. Pressemitteilung Nr. 31/2021 vom 29. April 2021. 1 BvR 2656/18, 1 BvR 288/20, 1 BvR 96/20, 1 BvR 78/20. Online verfügbar unter <https://www.bundesverfassungsgericht.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2021/bvg21-031.html>, zuletzt geprüft am 17.05.2022.
- Destatis (2019): Statistisches Jahrbuch 2019. 19, Land- und Forstwirtschaft. Erschienen im Oktober 2019. Unter Mitarbeit von Juliane Gude. Hg. V. Statistisches Bundesamt (Destatis). Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Themen/Querschnitt/Jahrbuch/_inhalt.html, zuletzt geprüft am 04.02.2020.
- Deutscher Bauernverband (2019): EU-Agrarförderung. Zweite Säule – Förderung ländlicher Räume. Hg. V. Deutscher Bauernverband e. V. Online verfügbar unter <https://www.bauernverband.de/themendossiers/eu-agrarfoerderung/themendossier/zweite-saeule-foerderung-laendlicher-raeume>, zuletzt aktualisiert am 16.05.2022, zuletzt geprüft am 16.05.2022.
- Deutscher Bundestag (2019): Drucksache 19/12697. Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Stephan Protschka, Peter Felser, Franziska Gminder, weiterer Abgeordneter und der Fraktion der AfD – Drucksache 19/11956 –. Direkte und indirekte Landnutzungsänderungen. Deutscher Bundestag – 19. Wahlperiode. Online verfügbar unter <https://dserver.bundestag.de/btd/19/126/1912697.pdf>, zuletzt geprüft am 18.05.2022.
- Deutscher Bundestag (2020): Positionspapier Parlamentarischer Beirat für nachhaltige Entwicklung. Den Nachhaltigkeitszielen im Gesetzgebungsverfahren ein angemessenes Gewicht verleihen. Ausschussdrucksache 19(26)72. Deutscher Bundestag – 19. Wahlperiode. Online verfügbar unter <https://www.bundestag.de/resource/blob/704126/5200ee72f67fa1a6f17bb0e32a4d401d/positionspapier-Weiterentwicklung-PBnE-data.pdf>, zuletzt geprüft am 18.05.2022.
- Deutscher Bundestag (2022): Drucksache 20/591. Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Stephan Protschka, Peter Felser, Frank Rinck, weiterer Abgeordneter und der Fraktion der AfD – Drucksache 20/435 –. Flächenverbrauch und Verlust von Agrarflächen in Deutschland. Hg. V. Deutscher Bundestag – 20. Wahlperiode. Online verfügbar unter <https://dserver.bundestag.de/btd/20/005/2000591.pdf>, zuletzt geprüft am 18.05.2022.
- Die Bundesregierung (2019): Antwort der Bundesregierung. Auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Stephan Protschka, Peter Felser, Franziska Gminder, weiterer Abgeordneter und der Fraktion der AfD – Drucksache 19/11956 –. Direkte und indirekte Landnutzungsänderungen. 26.08.2019. Aufl. Hg. V. Deutscher Bundestag 19. Wahlperiode. Online verfügbar unter <https://kleineanfragen.de/bundestag/19/12697>, zuletzt geprüft am 03.02.2020.
- Die Bundesregierung (2020a): Die Nationale Wasserstoffstrategie. Hg. V. BMWK. BMWi. Online verfügbar unter https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=20, zuletzt geprüft am 17.05.2022.
- Die Bundesregierung (2020b): Die deutsche Nachhaltigkeitsstrategie. Weiterentwicklung 2021. Online verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/998194/1875176/3d3b15cd92d0261e7a0bc8f43b7839/deutsche-nachhaltigkeitsstrategie-2021-langfassung-download-bpa-data.pdf>, zuletzt geprüft am 16.05.2022.

- Die Bundesregierung (2022a): Gesetzentwurf der Bundesregierung. Entwurf eines Gesetzes zu Sofortmaßnahmen für einen beschleunigten Ausbau der erneuerbaren Energien und weiteren Maßnahmen im Stromsektor. Hg. V. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). Die Bundesregierung. Online verfügbar unter https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/04_EEG_2023.pdf?__blob=publicationFile&v=8, zuletzt geprüft am 16.05.2022.
- Die Bundesregierung (2022b): Eckpunktepapier BMWK BMUV und BMEL. Ausbau der Photovoltaik auf Freiflächen im Einklang mit landwirtschaftlicher Nutzung und Naturschutz. Hg. V. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). Berlin. Online verfügbar unter https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/eckpunktepapier-ausbau-photovoltaik-freiflaechenanlagen.pdf?__blob=publicationFile&v=12, zuletzt geprüft am 16.05.2022.
- Die Bundesregierung (2022c): Beschleunigter Ausbau. Mehr Windenergie auf See. Online verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/windenergie-auf-see-gesetz-2022968>, zuletzt aktualisiert am 18.05.2022, zuletzt geprüft am 18.05.2022.
- Eichenauer, Eva; Reusswig, Fritz; Meyer-Ohlendorf, Lutz; Lass, Wiebke (2018): Bürgerinitiativen gegen Windkraftanlagen und der Aufschwung rechtspopulistischer Bewegungen. In: Olaf. Kühne und Florian. Weber (Hg.): Bausteine der Energiewende. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden; Imprint; Springer VS (RaumFragen: Stadt – Region – Landschaft), S. 633–651. Online verfügbar unter https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-19509-0_32, zuletzt geprüft am 18.05.2022.
- EIT Food (2021): New Coalition Announces Bold Plan to Decarbonize Europe’s Food System. EIT Food iVZW. 04.05.2021. Online verfügbar unter <https://www.eitfood.eu/news/post/new-coalition-announces-bold-plan-to-decarbonize-europes-food-system>, zuletzt geprüft am 16.05.2022.
- European Commission (2011): Fahrplan für ein ressourcenschonendes Europa. Brüssel. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52011DC0571&from=EN>, zuletzt geprüft am 27.05.2022.
- European Commission (2019): Europäischer Grüner Deal. Erster klimaneutraler Kontinent werden. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_de, zuletzt aktualisiert am 17.05.2022, zuletzt geprüft am 17.05.2022.
- European Commission (2021a): Commission publishes list of potential eco-schemes. Brüssel. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/info/news/commission-publishes-list-potential-eco-schemes-2021-jan-14_de, zuletzt aktualisiert am 01.06.2021, zuletzt geprüft am 16.05.2022.
- European Commission (2021b): EU-Bodenstrategie für 2030. Die Vorteile gesunder Böden für Menschen, Lebensmittel, Natur und Klima nutzen. Brüssel. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52021DC0699&from=EN>, zuletzt geprüft am 17.05.2022.
- European Commission (2022a): National energy and climate plans. EU countries’ 10-year national energy and climate plans for 2021-2030. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/info/energy-climate-change-environment/implementation-eu-countries-energy-and-climate-governance-and-reporting/national-energy-and-climate-plans_de, zuletzt aktualisiert am 04.02.2022, zuletzt geprüft am 17.05.2022.
- European Commission (2022b): A European Green Deal. Striving to be the first climate-neutral continent. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en, zuletzt aktualisiert am 10.05.2022, zuletzt geprüft am 16.05.2022.
- European Commission (2022c): EDGAR – The Emissions Database for Global Atmospheric Research. EDGAR-FOOD. A global emission inventory of GHGs from the food systems. Online verfügbar unter https://edgar.jrc.ec.europa.eu/edgar_food, zuletzt aktualisiert am 16.05.2022, zuletzt geprüft am 16.05.2022.
- European Commission (2022d): Food Safety. Farm to Fork Strategy. For a fair, healthy and environmentally-friendly food system. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/food/horizontal-topics/farm-fork-strategy_de, zuletzt aktualisiert am 16.05.2022, zuletzt geprüft am 16.05.2022.
- FAO (2014): Making integrated food-energy systems work for people and climate. An overview. Unter Mitarbeit von Anne Bogdanski, Olivier Dubois, Craig Jamieson und Krell Rainer: FAO Books.
- FAO (2020): The State of the World’s Forests 2020. Forest, biodiversity and people. Rome: FAO (State of the world’s forests, 2020), zuletzt geprüft am 17.05.2020.

- FAO (2021a): The State of Food and Agriculture. Making agri-food systems more resilient to shocks and stresses. Rome: FOOD & AGRICULTURE ORG. Online verfügbar unter <https://www.fao.org/3/cb4476en/cb4476en.pdf>, zuletzt geprüft am 17.05.2022.
- FAO (2021b): The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture. Systems at breaking point. Synthesis Report. Hg. V. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Rome (978-92-5-135327-1). Online verfügbar unter <https://www.fao.org/documents/card/en/c/cb7654en>, zuletzt geprüft am 16.05.2022.
- FAO (2022): FAOSTAT. Land Use. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Online verfügbar unter <https://www.fao.org/faostat/en/#data/RL>, zuletzt aktualisiert am 04.05.2022, zuletzt geprüft am 17.05.2022.
- Fehrenbach, Horst (2019): Einsatz von Biokraftstoffen im Verkehrssektor bis 2030. Kurzstudie zu den Potenzialen an Kraftstoffen auf Basis von Anbaubiomasse sowie biogenen Abfällen und Reststoffen. Hg. V. Institut für Energie und Umweltforschung (ifeu). Heidelberg. Online verfügbar unter https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/ifeu_Kurzstudie_Potenzialschaetzungen_fuer_Biokraftstoffe_im_Verkehrssektor.pdf, zuletzt geprüft am 18.05.2022.
- Goldammer, Kathrin; Mans, Ulrich; Rivera, Manuel (2013): Beiträge zur sozialen Bilanzierung der Energiewende. Hg. V. Institute for Advanced Sustainability Studies (IASS). Potsdam. Online verfügbar unter https://www.iass-potsdam.de/sites/default/files/files/report_beitraege_zur_sozialen_bilanzierung_der_energiewende_0.pdf, zuletzt geprüft am 18.05.2022.
- Handley, Lucy (2020): Walmart has a grand plan to help suppliers club together to buy green energy. In: CNBC, 23.10.2020. Online verfügbar unter <https://www.cnbc.com/2020/10/23/walmart-wants-suppliers-to-buy-renewable-energy-collectively.html>, zuletzt geprüft am 02.09.2022.
- Karnowski, Veronika; Kümpel, Anna Sophie (2015): Diffusions of Innovations von Everett M. Rogers: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Kühne, Olaf.; Weber, Florian. (Hg.) (2018): Bausteine der Energiewende. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden; Imprint; Springer VS (RaumFragen: Stadt – Region – Landschaft).
- Malthus, Thomas (1798): An Essay on the Principle of Population. An Essay on the Principle of Population, as it Affects the Future Improvement of Society with Remarks on the Speculations of Mr. Godwin, M. Condorcet, and Other Writers. First edition. London: J. Johnson (The Macat Library. Politics). Online verfügbar unter <http://www.esp.org/books/malthus/population/malthus.pdf>, zuletzt geprüft am 16.05.2022.
- Matland, Richard E. (1995): Synthesizing the Implementation Literature: The Ambiguity-Conflict Model of Policy Implementation. In: *Journal of Public Administration Research and Theory: J-PART 5* (2), S. 145–174. Online verfügbar unter <http://www.jstor.org/stable/1181674>.
- Mayntz, Renate (Hg.) (2003): Die Reformierbarkeit der Demokratie. Innovationen und Blockaden. Festschrift für Fritz W. Scharpf. Unter Mitarbeit von Fritz W. Scharpf. Frankfurt/Main, New York: Campus-Verl. (Schriften aus dem Max-Planck-Institut für Gesellschaftsforschung, Bd. 45). Online verfügbar unter [https://books.google.de/books?hl=de&lr=&id=uGRKNR7mLBIC&oi=fnd&pg=PA205&dq=Benz,+Arthur,+2003:+Konstruktive+Vetospiele+in+Mehrebenensystemen,+in:+Mayntz,+Renate+Streeck,+Wolfgang+\(Hrsg.\),+2003:+Die+Reformierbarkeit+der+Demokratie,+Innovationen+und+Blockaden,+Frankfurt+Main,+2005+%E2%80%93+238.&ots=xSl3fr12AS&sig=P9DFKP37eh5OyPxBEHiaG4focpA&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.de/books?hl=de&lr=&id=uGRKNR7mLBIC&oi=fnd&pg=PA205&dq=Benz,+Arthur,+2003:+Konstruktive+Vetospiele+in+Mehrebenensystemen,+in:+Mayntz,+Renate+Streeck,+Wolfgang+(Hrsg.),+2003:+Die+Reformierbarkeit+der+Demokratie,+Innovationen+und+Blockaden,+Frankfurt+Main,+2005+%E2%80%93+238.&ots=xSl3fr12AS&sig=P9DFKP37eh5OyPxBEHiaG4focpA&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false), zuletzt geprüft am 18.05.2022.
- Mirazo, Jabier Ruiz (2022): Europa verschlingt die Welt. WWF. Brüssel. Online verfügbar unter <https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publicationen-PDF/Landwirtschaft/bericht-europa-verschlingt-die-welt.pdf>, zuletzt geprüft am 01.09.2022.
- Ostrom, Elinor (1990): Governing the commons. The Evolution of Institutions for Collective Action. Cambridge: Cambridge University Press (Political Economy of Institutions and Decisions). Online verfügbar unter <https://books.google.de/books?id=4xg6oUobMz4C>.
- Pepe, Jacobo Maria (2022): Der Ukraine-Krieg und seine Folgen: Deutschland muss seine Energietransformation neu austarieren. Hg. V. Stiftung Wissenschaft und Politik (SWP). Online verfügbar unter <https://www.swp-berlin.org/publikation/der-ukraine-krieg-und-seine-folgen-deutschland-muss-seine-energietransformation-neu-austarieren>, zuletzt aktualisiert am 18.05.2022, zuletzt geprüft am 18.05.2022.

- Pfluger, Benjamin; Tersteegen, Bernd; Franke, Bernd (2018): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Modul U.a: Ökologische Evaluierung der Szenarien Referenzszenario, Basisszenario, Szenario Geringerer Ausbau der Übertragungsnetze, Szenario Alternative regionale EE-Verteilung und Restriktionsarmes Szenario. Hg. V. Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), Consentec GmbH, Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (IFEU), Technische Universität Wien, M-Five und TEP Energy GmbH. Online verfügbar unter https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/B/berichtsmodul-u-a-oekologische-evaluierung-der-szenarien.pdf?__blob=publicationFile&v=4, zuletzt geprüft am 17.05.2022.
- Prognos; GWS; Fraunhofer ISI; IINAS (2021): Energiewirtschaftliche Projektionen und Folgeabschätzungen 2030/2050. Gesamtdokumentation der Szenarien. Bericht im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Hg. V. BMWK. Online verfügbar unter https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/energiewirtschaftliche-projektionen-und-folgeabschaetzungen-2030-2050.pdf?__blob=publicationFile&v=32, zuletzt geprüft am 17.05.2022.
- Ricardo, David (2001): On the Principles of Political Economy and Taxation. 1817 (third edition 1821). Kitchener, Ontario: Batoche Books. Online verfügbar unter <https://socialsciences.mcmaster.ca/econ/ugcm/3ll3/ricardo/Principles.pdf>, zuletzt geprüft am 16.05.2022.
- Rogers, Everett M. (2003): Diffusion of innovations. Fifth edition. New York: Free Press. Online verfügbar unter <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=4935198>.
- Ross, Stephan A. (1973): The Economic Theory of Agency: The Principal's Problem.
- Scharpf, Fritz W. (1972): Komplexität als Schranke der politischen Planung. In: Erwin Faul (Hg.): Gesellschaftlicher Wandel und politische Innovation Tagung der Deutschen Vereinigung für Politische Wissenschaft in Mannheim, Herbst 1971. Opladen, Westdeutsche Verlag: VS Verlag für Sozialwissenschaften (Politische Vierteljahresschrift./Sonderheft 4/1972), S. 168–192.
- Scharpf, Fritz W. (1973): Planung als politischer Prozess. Aufsätze zur Theorie der planenden Demokratie. 1. Aufl. Frankfurt am Main: Suhrkamp (Theorie), zuletzt geprüft am 18.05.2022.
- Scharpf, Fritz W. (1993): Positive und negative Koordination in Verhandlungssystemen. In: Adrienne Héritier (Hg.): Politische Vierteljahresschrift. PVS; Zeitschrift der Deutschen Vereinigung für Politische Wissenschaft. Wiesbaden: VS, Verl. Für Sozialwiss, S. 57–83.
- Scharpf, Fritz W. (2000): Interaktionsformen. Akteurzentrierter Institutionalismus in der Politikforschung. Unveränd. Nachdr. Der 1. Aufl. Wiesbaden: VS, Verl. Für Sozialwiss.
- Scharpf, Fritz Wilhelm; Reissert, Bernd; Schnabel, Fritz (1976): Politikverflechtung. Theorie und Empirie der kooperativen Föderalismus in der Bundesrepublik. Kronberg/Ts.: Scriptor-Vrlag (Monographien Ergebnisse der Sozialwissenschaften, 1).
- Schmidhuber, Josef (2021): Die Rückkehr der Missernten. In: Der Spiegel, 24.12.2021. Online verfügbar unter https://www.genios.de/presse-archiv/artikel/SPIE/20211224/die-rueckkehr-der-missernten/PMG4SPIEGEL-Heftimport-SP20211224-38831_b7a6ed78-6334-412e-a59e-716a644df5f1.html, zuletzt geprüft am 16.05.2022.
- Scientist Rebellion (2021): We leaked the upcoming IPCC report! Online verfügbar unter <https://scientistrebellion.com/we-leaked-the-upcoming-ipcc-report/>, zuletzt aktualisiert am 17.05.2022, zuletzt geprüft am 17.05.2022.
- Smith, Adam (1904): An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations. First Pub. Date 1776. 5. Aufl. London: Methuen & Co., Ltd. Online verfügbar unter <https://www.econlib.org/library/Smith/smWN.html>, zuletzt geprüft am 16.05.2022.
- SPD; Bündnis 90/Die Grünen und FDP (2021): Mehr Fortschritt wagen. Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit. Online verfügbar unter https://www.spd.de/fileadmin/Dokumente/Koalitionsvertrag/Koalitionsvertrag_2021-2025.pdf, zuletzt geprüft am 13.05.2022.
- Spiegel, Der (2021): Geleakter Teil des IPCC-Berichts: Die reichsten zehn Prozent verursachen mehr als ein Drittel der Treibhausgase. In: Der Spiegel, 13.08.2021. Online verfügbar unter <https://www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/geleakter-teil-des-ipcc-berichts-die-reichsten-zehn-prozent->

- verursachen-mehr-als-ein-drittel-der-treibhausgase-a-6d2e8438-7f3e-49bc-8967-4e3aeb6be585, zuletzt geprüft am 17.05.2022.
- Steensland, Ann (2021): Global Agricultural Productivity Report. Strengthening the Climate for Sustainable Agricultural Growth. 2021 GAP Report. Hg. V. Virginia Tech College of Agriculture and Life Sciences. Online verfügbar unter <https://globalagriculturalproductivity.org/wp-content/uploads/2021/10/2021-GAP-Report.pdf>, zuletzt geprüft am 16.05.2022.
- Umweltbundesamt (2021a): Treibhausgas-Emissionen in der Europäischen Union. Hauptverursacher. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-der-europaeischen-union#hauptverursacher>, zuletzt aktualisiert am 17.05.2022, zuletzt geprüft am 17.05.2022.
- Umweltbundesamt (2021b): Treibhausgas-Emissionen in der Europäischen Union. Pro-Kopf-Emissionen. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-der-europaeischen-union#pro-kopf-emissionen>, zuletzt aktualisiert am 17.05.2022, zuletzt geprüft am 17.05.2022.
- Umweltbundesamt (2021c): Struktur der Flächennutzung. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/flaeche-boden-land-oekosysteme/flaeche/struktur-der-flaechennutzung#die-wichtigsten-flaechennutzungen>, zuletzt aktualisiert am 16.05.2022, zuletzt geprüft am 16.05.2022.
- United Nations (2019): World Population Prospects 2019: Highlights. New York: United Nations (Statistical Papers – United Nations (Ser. A), Population and Vital Statistics Report). Online verfügbar unter https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2019_Highlights.pdf, zuletzt geprüft am 17.05.2022.
- Witte, Eberhard (1977): Power and Innovation: A Two-Center Theory. In: *International Studies of Management & Organization* 7 (1), S. 47–70. DOI: 10.1080/00208825.1977.11656219.
- Wölkner, Sabina; Elsner, Gisela (2021): Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie 2021. Sind die Weichen richtig gestellt? Hg. V. Konrad Adenauer Stiftung (KAS) und Monitor Nachhaltigkeit Nr.1/2021. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.kas.de/documents/252038/11055681/Monitor+Nachhaltigkeit%2C+1-2021%2C+Deutsche+Nachhaltigkeitsstrategie+2021.pdf/919b1e59-8aca-e17c-2d04-347c89b59498?version=1.0&t=1617110029188>, zuletzt geprüft am 18.05.2022.
- World Bank (2022): Population, total. Data. Online verfügbar unter <https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.TOTL>, zuletzt aktualisiert am 17.05.2022, zuletzt geprüft am 17.05.2022.
- Wunder, Stephanie; Kaphengst, Timo; Frelh-Larsen, Ana; McFarland, Keighley; Albrecht, Stefanie (2018): Land Degradation Neutrality. Handlungsempfehlungen zur Implementierung des SDG-Ziels 15.3 und Entwicklung eines bodenbezogenen Indikators. Hg. V. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-02-21_texte_15-2018_land-degration-nutrality_de.pdf, zuletzt geprüft am 17.05.2022.
- Zinke, Olaf (2021): Landwirtschaftszählung: Das Höfeerben geht weiter. Hg. V. agrarheute. Online verfügbar unter <https://www.agrarheute.com/management/betriebsfuehrung/landwirtschaftszaehlung-hoefesterben-geht-577405>, zuletzt aktualisiert am 21.01.2021, zuletzt geprüft am 17.05.2022.

Kapitel 3 Mein Beitrag: Methoden und Daten

„Plane das Schwierige da, wo es noch leicht ist.

Tue das Große da, wo es noch klein ist.

Alles Schwere auf Erden beginnt stets als Leichtes.

Alles Große auf Erden beginnt stets als Kleines.“

Laozi, Tao Te King (Chinesischer Philosoph, rd. 4. Jahrhundert v. Chr.)

3.1 Disziplinäre Beiträge

Aus dem APV-RESOLA-Arbeitsschwerpunkt Politik und Ökonomie gingen insgesamt vier wissenschaftliche Artikel hervor. Diese Publikationen wurden in den Jahren 2020 und 2021 in international anerkannten Fachzeitschriften publiziert und bieten den roten Faden für die vorliegende kumulative Dissertation. Gemäß den formalen Rahmenbedingungen für eine kumulative Promotion der Sozialwissenschaftlichen Fakultät der Universität Tübingen wurden zwei dieser Fachartikel aus alleiniger Autorenschaft und einer als Hauptautor mit Co-Autoren erarbeitet. Zusätzlich leistete ich als Co-Autor zu einer weiteren Publikation einen Beitrag, die dem Arbeitsschwerpunkt Ökonomie und Politik zuzuordnen ist. In Kapitel 1.5.2 „Meine Publikationsübersicht“ sind Titel, Journal, Hauptautor, Co-Autoren, mein Beitrag, Jahr und der APV-RESOLA-Arbeitsschwerpunkt angegeben. Die vier Publikationen sind in voller Länge im Appendix A–D dieser Dissertationsschrift beigefügt. Die Ergebnisse sind anschlussfähig an bestehende Agri-PV-Forschungsarbeiten sowie Forschungen in den Bereichen Innovations-, Agrar-, Energie- und Nachhaltigkeitspolitik.

3.1.1 Methodik, Datenerhebung, -Analyse und -Auswertung

Das APV-RESOLA-Projekt war als Fallstudie konzeptioniert. Das übergeordnete Ziel (Impact) bestand darin, einen Beitrag zur ressourceneffizienten Landnutzung zu leisten, um

Landnutzungskonflikten zwischen PV-FFA und der Landwirtschaft mit neuen Erkenntnissen, Techniken und Akteurskonstellationen entgegenzutreten. Untergeordnete Ziele (Outcome) des Vorhabens waren die Entwicklung und Umsetzung eines Agri-PV-Pilotvorhabens unter realen Bedingungen auf einem ackerbaulichen Praxisbetrieb und dessen inter- und transdisziplinäre wissenschaftliche Begleitung in den fünf Arbeitsschwerpunkten: Politik und Ökonomie, Agrarwissenschaft, Gesellschaft und Akzeptabilität, Umwelt und Biodiversität sowie Technik. Die Arbeitspakete wurden stets in einem transdisziplinären Tandem aus Praktiker und Wissenschaft erarbeitet. Den inneren Kern des Forschungskonsortiums bildete die sogenannte Innovationsgruppe, die sich bei regelmäßigen Projekttreffen gegenseitig auf den neusten Kenntnisstand brachte, Daten austauschte, das Versuchsdesign und Forschungsergebnisse auswertete und sich gemeinsam und individuell fortbildete. Ich agierte dabei als Konsortialleiter, Innovationsgruppenleiter, Leiter des Arbeitsschwerpunktes Politik und Ökonomie sowie als Doktorand. Aus den Arbeitsschwerpunkten Politik und Ökonomie, Landwirtschaft und Gesellschaft und Akzeptabilität ging jeweils eine Doktorarbeit hervor. Im Arbeitsschwerpunkt Politik und Ökonomie konnte ich folgende Daten erheben:

i) Für die Erfassung der rechtlichen Rahmenbedingungen im Mehr-Ebenen-System wurde vor der Agri-PV-Anlagenerrichtung eine **Policy-Analyse** durchgeführt und ein **Rechtsgutachten** erstellt mit Fokus auf Bau-, Agrar- und Energiewirtschaftsrecht.

ii) Ein **formales bauplanungsrechtliches Verfahren** zum Erhalt der Baugenehmigung für die Installation der Agri-PV-Pilotanlage wurde vollzogen. Dieses beinhaltete die Umsetzung eines **Bebauungsplans (Bplan)** und die parallele Fortschreibung eines **Flächennutzungsplans (FNP)** sowie die Durchführung einer **Bürgerinformationsveranstaltung**, eine **Initialbesprechung im Bauausschuss** des assoziierten APV-RESOLA-Projektpartners **Regionalverband Bodensee-Oberschwaben**, zwei **Gemeinderatssitzungen**, die Rückmeldung zu den **Anmerkungen der Träger öffentlicher Belange** sowie den **Umweltbericht aus der Bauleitplanung** für die Ermessung der Ausgleichs- und Kompensationsmaßnahmen.

iii) Die Innovationsgruppe präsentierte einmal jährlich und insgesamt vier Mal ihre Forschungsergebnisse dem **APV-RESOLA-Projektbeirat**, damit eine ständige Expertengruppe den Wissensprozess reflektieren konnte und mit neuen Impulsen und Verbesserungsvorschlägen die Forschungsarbeiten bereicherte. Gleichzeitig diente die Beiratssitzung als Informations-, Netzwerk- und Datenquelle, um aktuelle Trends und

Interessensbekundungen aufzunehmen. Die Beiratssitzungen wurden von Schindele vorbereitet, einberufen und moderiert. Vorsitzender des APV-RESOLA-Projektbeirats war Hans-Josef Fell.

iv) Eine **Politikfeldanalyse** wurde durchgeführt, bei der betroffene Gesetzgebungen, parteipolitische Inhalte und Verbandsinteressen den zuständigen Ressorts auf Bundes- und Landesebene zugeordnet wurden, damit eine positive Bewertung des Ist-Zustands erarbeitet werden konnte. Hieraus wurde nach Scharpf eine Politik-Umwelt-Matrix (Scharpf 1972) erstellt, um in Anlehnung an die DNS 2021 transformative Policy-Cluster und Zuständigkeitskonzentrationen zu identifizieren.

v) Weiterhin wurden **zwölf Fachgespräche oder Experteninterviews mit Bundestags-, Landtags- und EU-Parlamentsabgeordneten, Verbandsvertretern und Unternehmen sowie Gruppenfachgespräche mit der Ministerialverwaltung auf Bundes- und Landesebene** durchgeführt, u. a. mit Vertretern aus dem BMEL, BMBF, UM und MIR Ba-Wü, MUEEF RLP, BBV und DBV, BNE, BSW-Solar, BMWi, Alois Gerig (MdB, CDU), Norbert Lins (MoEP, CDU), mit Mitgliedern aus dem Agrar- und Energieausschuss SPD-Fraktion Bundestag sowie Martin Hahn (MdL BaWü, Bündnis90/Die Grünen). Diese Fachgespräche dienten u. a. dazu, gemäß Matland das Konfliktpotential/Ambivalenzen und Mehrdeutigkeiten/Ambiguitäten zwischen den Ressorts und Akteuren zu identifizieren.

vi) Abschließend wurden die **Stellungnahmen in den Konsultationsphasen und Verbändeanhörungen im Gesetzgebungsprozess** begutachtet, bspw. im Festlegungsprozess der Innovationsausschreibung für besondere Solaranlagen oder der Überarbeitung der EU-GAP-Direktzahlungsdurchführungsverordnung.

Durch die angewandten Methoden und die Datenerhebung konnte im Rahmen der Politik-Dimensionen Polity, Policy und Politics ein in die Zukunft gerichtetes normatives Bild entwickelt werden, um die Parameter für die Simulation einer Agri-PV-Wirkungsanalyse auf Nachhaltiges Landmanagement in Deutschland durchzuführen, die wirtschaftspolitischen Forschungsfragen zu beantworten und Handlungsempfehlungen auszusprechen. Die Methoden der Agri-PV-Stromgestehungskostenberechnung sowie die Rechengrundlage zur Preis-Leistungs-Analyse sind im wissenschaftlichen Artikel „Implementation of agrophotovoltaics: Techno-economic analysis of the price-performance ratio and its policy implications“ enthalten. Bei der Ausarbeitung der Wirkungsanalyse einer Agri-PV-Diffusion in Deutschland auf Nachhaltiges Landmanagement und den Agrarflächenerhalt, indem herkömmliche PV-FFA

durch Agri-PV-Kapazität substituiert werden, wurde das Spannungsfeld zwischen „objektive wissenschaftliche Folgenanalyse“ und „subjektive, politische Bewertung“ (Renn 2010) honoriert, indem die Ausbaupfade der Agri-PV und die Einführung der Flächenkreislaufwirtschaft ab dem Jahr 2050 sowie die damit verbundene Verdrängung der PV-FFA auf fruchtbaren landwirtschaftlichen Nutzflächen möglichst realitätsnah modelliert wurden.

3.1.2 Der rote Faden in meinen Publikationen

In Kapitel 1 „Entwicklungsgeschichte der Agri-PV in Deutschland“ wurden die fünf wesentlichen Phasen des Agri-PV-Innovationsprozesses in Deutschland beschrieben: i) Idee, ii) Invention, iii) Innovation, iv) Diffusion und v) Imitation. In der technischen Ontogenese wird jede Phase im Innovationsprozess durch den sogenannten Technologiereifegrad (TRL) bewertet (EARTO 2014). Bei der Ideenentwicklung im TRL 1–3 werden eine Vision für die Technik erläutert, erste Funktionsprinzipien beschrieben und teilweise kalkulatorische Nachweise für die Funktionstüchtigkeit der Technologie publiziert. Im Agri-PV-Innovationsprozess waren dies die Veröffentlichungen und Berechnungen von Goetzberger et al. in den Jahren 1981 und 2006 (Goetzberger und Zastrow 1981; Goetzberger et al. 2006; Goetzberger und Zastrow 1982). Die TRL-Stufen 3–6 beschreiben die Inventionsphase, in der die Technologie erstmalig in einem Versuchsaufbau im Labor oder in der Einsatzumgebung getestet wird. In dieser Phase wurden vom Fraunhofer ISE die Agri-PV-Patente angemeldet und eine Publikation veröffentlicht, die den technischen Aufbau des Agri-PV-Pilotvorhabens innerhalb des APV-RESOLA-Projektes erläuterte (Bopp et al. 2012; Trommsdorff et al. 2021). Die wirtschaftspolitischen Fragestellungen meines Promotionsvorhabens befassen sich überwiegend mit den drei Politik-Dimensionen Polity, Policy und Politics im Koordinationsprozess zur Agri-PV-Markteinführung und somit mit dem Übergang der Agri-PV-Systemtechnik von Innovation auf Diffusion bzw. den TRL-Stufen 6–9. Abbildung 3-1 veranschaulicht den Agri-PV-Innovationsprozess sowie die vier Publikationen aus meinem Promotionsvorhaben.

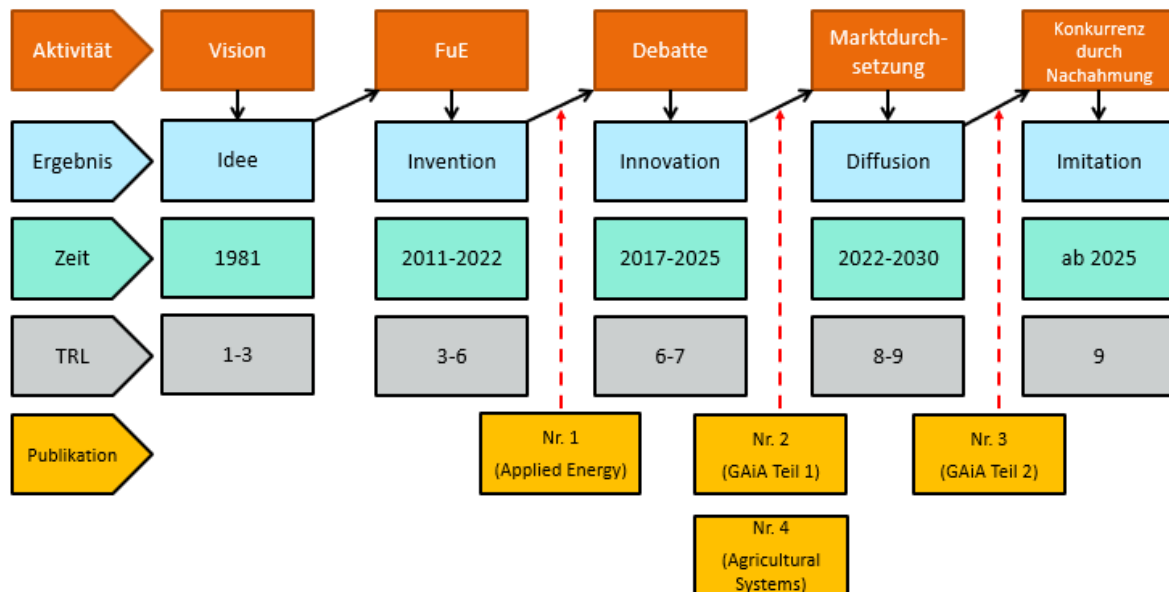


Abbildung 3-1: Agri-PV-Innovationsprozess und Publikationen aus dem Promotionsverfahren Schindele (eigene Darstellung)

Der rote Faden in meinen Publikationen ist die Unterstützung der Übergangsphasen im Agri-PV-Innovationsprozess in Deutschland. In jeder Übergangsphase der einzelnen Innovationsschritte besteht jeweils ein unterschiedlicher Informationsbedarf in den drei Politikdimensionen. Meine Publikationen hatten daher das Ziel, jenen Informationsbedarf zielgruppenspezifisch zu decken und zudem die Antworten auf die fünf wirtschaftspolitischen Fragestellungen meines Promotionsverfahrens möglichst schnell öffentlich zugänglich zu machen. Die folgenden fünf Fragestellungen wurden in meinen vier Publikationen beantwortet und auf die ausgewiesenen Politikdimensionen zugeschnitten:

- 1) Polity-Dimension: Welche bundesstaatlichen Ressorts sind durch das Querschnittsthema Agri-PV betroffen und welches ist federführend für eine Markteinführung politisch verantwortlich?
- 2) Politics-Dimension: Welche ideologischen Distanzen bestehen zwischen den Akteuren hinsichtlich der Agri-PV-Markteinführung?
- 3) Policy-Dimension: Welche gesetzlichen Rahmenbedingungen im Mehr-Ebenen-System stehen der Agri-PV-Markteinführung innovationshemmend entgegen?

4) Polity-, Politics- und Policy-Dimension: Wie müssten sich der bundesstaatliche Koordinationsprozess und gesetzliche Rahmenbedingungen ändern, damit die Agri-PV-Markteinführung gelingen kann?

5) Policy-Dimension: Welche Auswirkungen könnte eine Agri-PV-Diffusion auf den absoluten und täglichen Agrarflächenerhalt (und somit auf nachhaltiges Landmanagement) in Deutschland bis Jahresende 2050 haben?

Die **erste Publikation** „Implementation of agrophotovoltaics: Techno-economic analysis of the price-performance ratio and its policy implications“ wurde im März 2020 im „Applied Energy Journal“ veröffentlicht (Schindele et al., 2020). Hierin sind eine ausführliche Literaturübersicht, Hintergründe zur Fallstudie APV-RESOLA sowie erstmalig mikroökonomische Agri-PV-Betrachtungen wie die Stromgestehungskosten und die projektspezifische Preis-Leistungs-Analyse enthalten. Im Appendix dieser Publikation befinden sich politische Hintergründe zur Agri-PV-Markteinführung in Japan, Südkorea, China, Frankreich und Massachusetts. Ziel der Publikation war es, eine evidenzbasierte Politik zu unterstützen, indem Kostenvergleiche zwischen Agri-PV und herkömmlichen PV-FFA erarbeitet wurden und der finanzielle Nutzen des Agrarflächenerhalts (Leistung) den dafür anfallenden Kosten (Preis) gegenübergestellt wurde. Die Preis-Leistung-Berechnung erläutert, wieso bspw. der Kartoffelanbau in einem hochaufgeständerten Agri-PV-System ökonomisch sinnvoller erscheint als der Weizenanbau. Die Publikation wurde in englischer Sprache verfasst, um einen möglichst hohen, internationalen Impact zu erzielen. Die Agri-PV-Invention sollte durch die Publikation national und international bekannter gemacht, der Übergang im Agri-PV-Innovationsprozess hin zur Innovation unterstützt und die Politikdimensionen Polity und Policy angesprochen werden.

Die **zweite Publikation** „Feldfrüchte und Strom von Agrarflächen: Was ist Agri-Photovoltaik und was kann sie leisten?“ wurde als Research Article im GAiA-Journal „Ökologische Perspektiven für Wissenschaft und Gesellschaft“ im Mai 2021 veröffentlicht (Schindele, 2021a). Dieser Fachartikel erläutert politische Hintergründe zum DIN SPEC 91434 Agri-PV-Standard und den Grund, weshalb eine Agri-PV-Qualitätssicherung nicht nur für eine Definition und Begriffserläuterung von Bedeutung ist, sondern auch für die Policy-Makers bei der Bewertung der Agri-PV-Beihilfefähigkeit von Agrarsubventionen und Teilnahme in energiewirtschaftlichen Fördermechanismen. Die Veröffentlichung untermauert meine federführende Rolle bei der Ausarbeitung des DIN SPEC 91434 Agri-PV-Qualitätsstandards

und leistet einen Beitrag zur Verringerung von Ambiguität und Herstellung eines eindeutigen Verständnisses zur Frage „Was ist Agri-PV?“. Diese Eindeutigkeit reduziert in der Policy-Umsetzung den Abstimmungsaufwand und verringert somit das Risiko von Ambivalenz im Koordinationsprozess. Im Artikel wurde in drei Schritten eine Agri-PV-Definition erarbeitet: In Schritt 1 wurden die Eigenschaften der Agri-PV in Abgrenzung zu anderen PV-Techniken erläutert. Aus fünf identifizierten Abgrenzungsmerkmalen wurde eine Agri-PV-Basisdefinition hergeleitet, die als Grundlage für die Ausarbeitung einer international gültigen Agri-PV-Norm dienen kann. In Schritt 2 wurde die Basisdefinition durch Kann-Anforderungen aus dem nationalen gesellschaftspolitischen Kontext ergänzt. Hierbei wurden auch politische Gründe für die Agri-PV-Förderung berücksichtigt. Die Kernfrage lautet hier, ob die Eigenschaften der Agri-PV den politischen Zielen zur nachhaltigen Entwicklung entsprechen. Das Zitat von Scharpf – „Allgemein gilt, dass eine Politik, die allen gibt und keinem erkennbar nimmt, sich auf eine breite öffentliche Zustimmung stützen kann“ – ist hier Impuls zur Bewertung, welche Auswirkung eine Agri-PV-Diffusion auf Schlüsselindikatoren der DNS hat. Im dritten und letzten Schritt wurde die Agri-PV-Definition für den nationalen Kontext hergeleitet und Prüf- und EEG-Förderkriterien mit den dazugehörigen Spezifikationen erarbeitet. Die zweite Publikation hatte zum Ziel, möglichst effektiv und effizient – also ohne Zeitverluste und ohne sprachliche Barrieren – politische Akteure in der Ministerialverwaltung, Verbändevertreter und Wissenschaft zu erreichen. Deshalb wurde die Publikation in deutscher Sprache verfasst und nicht ins Englische übersetzt. Im Innovationsprozess wurde dadurch der Übergang von Innovation zur Diffusion unterstützt. Die Publikation diente dem Sprung aus der APV-RESOLA-Fallstudie hin zur Übertragung der Forschungsergebnisse in den nationalen Kontext. Interessenskonflikte zwischen Land- und Solarwirtschaft werden aufgezeigt und Kompromissvorschläge dargestellt, um die Koordinationsaufwände in der Verbands- und Parteienpolitik sowie Ressortabstimmung zu verringern. Die Politikdimensionen Politics und Policy werden berücksichtigt und Antworten auf die Forschungsfragen 1 bis 3 gegeben.

In der **dritten Publikation** „Nachhaltige Landnutzung mit Agri-Photovoltaik: Photovoltaikausbau im Einklang mit der Lebensmittelproduktion“ wird auf die widersprüchliche Gesetzgebung und Zielvorgaben in der DNS eingegangen. Diese wurde ebenso im Mai 2021 durch das GAiA-Journal als Research Article veröffentlicht (Schindele, 2021b). In einer Szenarioanalyse zur Inanspruchnahme landwirtschaftlicher Nutzfläche durch PV in Deutschland bis 2050 wird erläutert, dass die DNS-Zielvorgabe 11.1.a „Nachhaltiges

Landmanagement“ und der damit verbundene Schlüsselindikator „Reduktion des täglichen Siedlungsflächenanstiegs“ auf unter 30 Hektar pro Tag bis 2030 und auf Nettonull bis 2050 nur erreichbar sind, wenn der Ausbau von PV-FFA auf Agrarflächen schrittweise durch die Agri-PV-Diffusion substituiert wird. Diese Folgenabschätzung geht weit über die Agri-PV-Markteinführung hinaus und simuliert die Auswirkung auf die DNS-Zielsetzung zur nachhaltigen Landnutzung in Deutschland bei einer erfolgreichen Diffusion mit vielfacher Imitation. Die sich daraus ableitenden Ergebnisse sind eine Nachhaltigkeitsfolgenabschätzung und ein wichtiger Beitrag meiner Doktorarbeit für die Beurteilung zur ethisch-moralischen Sinnhaftigkeit der Agri-PV und der wirtschaftspolitischen Rechtfertigung, das Agri-PV-Marktsegment weiterhin auszubauen und zu unterstützen. Die GAiA-Redaktion beschloss, die zweite und dritte Publikation als zweiteilige Serie in einer Journalausgabe zu publizieren, weil die Agri-PV-Definition und deren mögliche Auswirkung auf den Agrarflächenerhalt direkt in Verbindung stehen. Die Zielgruppen und Wirkungsziele der Publikation sind ähnlich gewählt wie bei der zweiten Publikation: Nicht der wissenschaftliche Erfolg von möglichst hohen Zitierquoten, sondern eine möglichst zeitnahe Überbrückung von Ergebnissen in die Politikarena waren von Interesse, um den Agri-PV-Innovationsschritt von Diffusion zu Imitation zu begleiten. Ressortspezifische politische Handlungsempfehlungen an die Ministerialverwaltung des Bundes sind darin abschließend enthalten. Alle drei Politikdimensionen werden angesprochen. Antworten auf die Forschungsfragen 4 und 5 werden gegeben.

Der **vierte Fachartikel** „An analytical framework to estimate the economics and adoption potential of dual land-use systems: The case of agrivoltaics“ wurde nicht in meiner Federführung, sondern durch den Agrarökonom Dr. Arndt Feuerbacher, Universität Hohenheim, erarbeitet und im Journal „Agricultural Systems“ im Mai 2021 veröffentlicht (Feuerbacher et al., 2021). In diesem Artikel wird ein neues Analysemodell für die Bewertung der wirtschaftlichen Vorteile des landwirtschaftlichen Betriebs durch die Agri-PV-Umsetzung vorgestellt. Durch die Kombination der mikroökonomischen Daten aus Artikel 1 mit den repräsentativen betriebswirtschaftlichen Datensätzen der Agrarbetriebe in Deutschland kann auf einer makroökonomischen Ebene simuliert werden, welche Art von landwirtschaftlichen Betrieben den größten finanziellen Nutzen durch die Agri-PV-Umsetzung hat, bspw. weil ein durchschnittlicher Sonderkulturbetrieb andere Betriebsgrößen und finanzielle Ergebnisse vorweist als ein durchschnittlicher Ackerbau- oder ein Milchviehbetrieb. Ziel der

Forschungsarbeit ist gemäß der Diffusionstheorie von Innovationen nach Rogers (Quelle) die sogenannten „Innovatoren“ und „Frühen Übernehmer“ zu identifizieren, damit bei der Agri-PV-Diffusion diese Zielgruppen aus dem Agrarsektor explizit gefördert werden können. Mein Co-Autorenbeitrag bestand darin, die Daten aus der mikroökonomischen Betrachtung zur Verfügung zu stellen, damit diese im neuartigen „FEADPLUS“-Berechnungsmodell verwendet werden können, meine Agri-PV-Erfahrungswerte mit Blick auf Geschäftsmodellentwicklung und die unterschiedlichen Akteurskonstellationen zwischen Agri-PV-Investor, Landeigentümer und Landwirt einzubringen sowie das Manuskript Korrektur zu lesen und auf Konsistenz zu überprüfen. Im Agri-PV-Innovationsprozess in Deutschland wird durch die Veröffentlichung der Übergang von Innovation zur Diffusion unterstützt. Die Politikdimensionen Polity, Politics und Policy werden berücksichtigt und die Forschungsfragen 2, 4 und 5 beantwortet.

In der folgenden Tabelle werden die vier Publikationen den Fragestellungen aus meinem Promotionsverfahren sowie den drei Politikdimensionen zugewiesen.

Tabelle 3-1: Publikationen aus dem Promotionsverfahren im Zusammenhang der Forschungsfragen und der Politikdimensionen (eigene Darstellung)

Nr.	Forschungsfrage	Polity	Politics	Policy
1	Welche bundesstaatlichen Ressorts sind durch das Querschnittsthema Agri-PV betroffen und welches ist federführend für eine Markteinführung politisch verantwortlich?	Publikation Nr. 1, 2, 3 und 4		
2	Welche ideologischen Distanzen bestehen zwischen den Akteuren hinsichtlich der Agri-PV-Markteinführung?		Publikation Nr. 1, 2 und 4	Publikation Nr. 1, 2 und 4
3	Welche gesetzlichen Rahmenbedingungen im Mehr-Ebenen-System stehen der Agri-PV-Markteinführung innovationshemmend entgegen?		Publikation Nr. 2 und 3	Publikation Nr. 2 und 3
4	Wie müssten sich der bundesstaatliche Koordinationsprozess und gesetzliche Rahmenbedingungen ändern, damit die Agri-PV-Markteinführung gelingen kann?		Publikation Nr. 2 und 3	Publikation Nr. 2, 3 und 4
5	Welche Auswirkungen könnte eine Agri-PV-Diffusion auf den absoluten und täglichen Agrarflächenerhalt (und somit auf Nachhaltiges Landmanagement) in Deutschland bis Jahresende 2050 haben?	Publikation Nr. 4	Publikation Nr. 3 und 4	Publikation Nr. 3 und 4

Stand 05.08.2023 wurden laut Research Gate die vier Artikel in Summe 193-mal zitiert und 4.936-mal gelesen.

Tabelle 3-2: Übersicht Zitierungen und Lesungen der vier Publikationen aus dem Promotionsverfahren (Stand: 05.08.2023; Quelle: Research Gate)

Publikation Nr. (Journal)	Zitierungen (engl. Citations)	Lesungen (engl. Reads)	Sprache	Jahr der Veröffentlichung
1 (Applied Energy)	171	4.499	Englisch	2020
2 (GAiA Teil 1/2)	1	85	Deutsch	2021
3 (GAiA Teil 2/2)	0	100	Deutsch	2021
4 (Agricultural Systems)	21	252	Englisch	2021
Summe	193	4.936	-	

3.1.3 Übersichtstabelle Methoden und Daten meiner Publikationen

Die folgende Übersichtstabelle zeigt, welche Methoden und Daten in welchen der vier wirtschaftspolitisch relevanten Fachartikeln angewandt bzw. verwendet wurden. Zudem werden die Methoden untergliedert in positiv und normativ, um zu erörtern, welche Methoden für die Bewertung des Status quo herangezogen wurden und welche für die politischen Handlungsempfehlungen zur Agri-PV-Diffusion in Deutschland. Abschließend sind Ziel und Auswirkung des Artikels in der letzten Zeile zusammengefasst.

Tabelle 3-3: Übersichtstabelle Methoden und Daten der Publikationen aus dem Promotionsverfahren (eigene Darstellung)

Artikel Nr. (Journal)	1 (Applied Energy)	2 (GAiA Teil 1/2)	3 (GAiA Teil 2/2)	4 (Agricultural Systems)
Analyse				
Positiv Wie ist es? Status quo	<ul style="list-style-type: none"> -Literaturrecherche/-übersicht -Fallstudie APV-RESOLA: Akteursanalyse, Bauleitplanung, Umweltbericht -Stromgestehungskosten -Deckungsbeitragsrechnung -Kosten-Nutzen-Analyse -Mikroökonomische Analyse 	<ul style="list-style-type: none"> -Begriffserklärung/Definition -Hintergründe zum DIN SPEC 91434 Agri-PV-Standardisierungsprozess -Multi-Level-Policy-Analyse -Politikfeldanalyse -Akteurs- und Politikanalyse: Auswertung der Verbändeanhörungen und Parteiprogramme -Wirkungsanalyse Agri-PV-Diffusion auf DNS-KPIs 	<ul style="list-style-type: none"> -Experteninterviews -Gruppenfachgespräche -Wirkungsanalyse Agri-PV-Diffusion auf DNS-KPI 11.1.a „Nachhaltiges Landmanagement“ 	<ul style="list-style-type: none"> -Neues Analysemodell für die Bewertung der wirtschaftlichen Vorteile des landwirtschaftlichen Betriebs durch Agri-PV-Umsetzung -Datensätze aus Artikel 1 (Applied Energy) werden mit den vorhandenen Datensätzen auf Betriebsebene in Deutschland kombiniert angewandt
Normativ Wie sollte es sein? In die Zukunft gerichtet	<ul style="list-style-type: none"> -Kostenvergleich Agri-PV und PV-Freiflächenanlage -Vergleichende Politikwissenschaft Agri-PV Policy International 	<ul style="list-style-type: none"> -Normierungsprozess EU-Ebene -Policy learning: Anpassung Agrar-, Energie- und Baugesetzgebungen 	<ul style="list-style-type: none"> -Technikfolgenabschätzung durch Modellierung und Simulation von PV-Agrarflächeninanspruchnahmen in unterschiedlichen Ausbauszenarios 	<ul style="list-style-type: none"> -Makroökonomische Analyse, welche Art von landwirtschaftlichem Betrieb den größten finanziellen Nutzen durch Agri-PV-Anwendung vorweist
Ziel und Auswirkung	<ul style="list-style-type: none"> -Literatur und Agri-PV-Marktübersicht -Evidenzbasierte Politik -Erkenntnisse, wie und weshalb andere Regierungen Agri-PV fördern und wo Kostensenkungspotentiale bei der Agri-PV-Projektumsetzung sind -Steigerung Bekanntheitsgrad/wissenschaftliche Sichtbarkeit der Invention -Unterstützung Übergang von Invention zu Innovation 	<ul style="list-style-type: none"> -Science-Policy-Interface -Interessenskonflikte zwischen Agrar- und Solarwirtschaft aufzeigen -Kompromisse darstellen, damit in der politischen Koordination eine Diskussionsgrundlage vorliegt -Übertragung der Fallstudie auf ein repräsentatives Ergebnis -Unterstützung Übergang von Innovation zu Diffusion 	<ul style="list-style-type: none"> -Politikberatung: Ressortspezifische politische Handlungsempfehlung an die Ministerialverwaltung des Bundes -Unterstützung Übergang von Diffusion zu Imitation 	<ul style="list-style-type: none"> -Vorstellung eines neuen analytischen Rahmens zur Bewertung des wirtschaftlichen Nutzens und des Anwendungspotenzials von Agri-PV-Systemen -Übertragbarkeit der Methode in große Datensätze auf Betriebsebene im Agrarsektor in weiteren Märkten -Identifikation von Innovatoren und Frühen Übernehmer für Agri-PV-Anlagen im Agrarsektor -Übergang von Innovation zu Diffusion

3.2 Interdisziplinäre Beiträge

Zusätzlich zu den vier wirtschaftspolitischen Publikationen konnte ich Beiträge zu fünf interdisziplinären, nicht politikwissenschaftlichen Fachartikeln leisten sowie fünf Beiträge zu nicht wissenschaftlichen Veröffentlichungen, die allerdings von wissenschaftlicher Bedeutung sind. Die jeweiligen interdisziplinären bzw. nicht wissenschaftlichen Veröffentlichungen sind nicht im Appendix dieser Dissertationsschrift beigefügt. Titel, Herausgeber und weitere Hintergrundinformationen zu diesen Publikationen sind in Kapitel 1.5.2 „Meine Publikationsübersicht“ enthalten.

3.2.1 Beiträge zu nicht politikwissenschaftlichen Publikationen

Als Co-Autor beteiligte ich mich an fünf weiteren, nicht politikwissenschaftlichen Publikationen, die in anerkannten Fachjournals veröffentlicht worden sind.

Der erste wissenschaftliche Beitrag zur einer Agri-PV-Publikation leistete ich im Jahr 2012. Direkt nach erfolgreicher Patentanmeldung des Verfahrens zur simultanen Kultivierung von Nutzpflanzen und energetischen Nutzung von Sonnenlicht auf einer Agrarfläche wurden die **Ergebnisse aus den Agri-PV-Lichtsimulationen** auf der EU PV SEC Konferenz 2012 vorgestellt und im Nachgang in die EU PV SEC Proceedings aufgenommen. Meinen Beitrag zu dieser Publikation leistete ich bei der Abschätzung der technisch-wirtschaftlich erschließbaren Agri-PV-Potenziale in Deutschland sowie durch Literaturrecherchen und Mitverfassen des Artikels (Beck et al. 2012).

Aus dem **Arbeitsschwerpunkt Landwirtschaft** des APV-RESOLA-Projektes wurde von Axel Weselek, damals Doktorand an der Universität Hohenheim, eine weltweite Literaturübersicht von Agri-PV-Projekten veröffentlicht und analysiert, welche Pflanzen trotz Verschattung gut gedeihen. Durch meine Literaturrecherchen im Agri-PV-Bereich konnte ich diese Übersicht unterstützen (Weselek et al. 2019).

Der **Arbeitsschwerpunkt Technik** im APV-RESOLA-Projekt wurde durch das Fraunhofer ISE geleitet. Aus dem APV-RESOLA-Projekt gingen zwei wissenschaftliche Publikationen sowie eine Gebrauchsmusteranmeldung hervor, bei denen ich als Co-Autor beteiligt bin. Die erste wissenschaftliche Publikation erläutert die technischen Hintergründe zur APV-RESOLA-Pilotumsetzung, das Lichtmanagement in der Vegetationsperiode sowie die Fundamentierung

und das Anlagendesign in Verbindung mit der verwendeten Landmaschinenteknik (Trommsdorff et al. 2021). Die zweite Publikation bezieht sich auf die Verwertung des Solarstroms in der Landmaschinenteknik und Agrarrobotik. Die Idee hierbei lautet, den Dieselbedarf des landwirtschaftlichen Betriebs zu senken, indem die Traktoren und Landmaschinenteknik elektrifiziert werden. Umgesetzt wurde diese Idee im APV-Obstbau-Projekt in Gelsdorf im Jahr 2021, indem der elektrische Schmalspurtraktor eV100 von Fendt direkt mit Agri-PV-Strom betankt wurde. Den Kontakt zwischen dem Fraunhofer ISE und Fendt stellte ich im Jahr 2015 auf der Agritechnica Messe in Hannover her (Gorjian et al. 2021).



Abbildung 3-2: Elektrischer Traktor von Fendt bei der Apfelernte und Agri-PV-Obstbau Versuchsfeld in Gelsdorf, Rheinland-Pfalz (Quelle: Fraunhofer ISE, 2021b)

Im Zusammenhang mit dem Agri-PV-Obstbau-Projekt in Gelsdorf wurde im Juli 2023 ein Fachartikel im *Applied Energy Journal* zur Veröffentlichung angenommen. Hierin werden Investitionsanforderungen und Betriebskosten zwischen Agri-PV-Fruitvoltaics-Anlagen mit Apfelanbau mit herkömmlichen Kulturenschutzsystemen verglichen. Die techno-ökonomischen Synergien werden bewertet und erörtert, inwiefern die synergetischen Auswirkungen auf die landwirtschaftliche Tätigkeit die Agri-PV-Systemtechnik wirtschaftlich rentabler machen. Die Ergebnisse zeigen, dass die ökonomischen Synergieeffekte in der Landwirtschaft nicht ausreichen, um für die Agri-PV-Anlagen einen wirtschaftlichen Betrieb zu ermöglichen. Fruitvoltaics-Anlagen sind auf ausreichend hohe Einspeisevergütungen oder vergleichbare Förderungen angewiesen. Das Agri-PV-Apfel Potenzial wird auf 21 GW_p PV-Leistung in Deutschland geschätzt, was ca. 13 % der deutschen PV-Ausbauziele bis 2030 entspricht (Trommsdorff et al. 2023).

Stand 05.08.2023 wurden laut Research Gate die fünf nicht politikwissenschaftlichen Artikel in Summe 448-mal zitiert und 9.769-mal gelesen.

Tabelle 3-4: Übersicht Zitierungen und Lesungen der fünf wissenschaftlichen, interdisziplinären, jedoch nicht politikwissenschaftlichen Beiträge (Stand: 05.08.2023, Quelle: Research Gate)

Publikation Nr. (Journal)	Zitierungen (engl. Citations)	Lesungen (engl. Reads)	Sprache	Jahr der Veröffentlichung
1 (EU PV SEC Proceedings 2012)	39	5.284	Englisch	2012
2 (Agronomy for Sustainable Development)	230	2.685	Englisch	2019
3 (Renewable and Sustainable Energy Reviews)	120	1.171	Englisch	2021
4 (Journal of Cleaner Production)	59	629	Englisch	2021
5 (Applied Energy)	0	0	Englisch	2023 (am 16.07.2023 zur Veröffentlichung angenommen)
Summe	448	9.769	-	

3.2.2 Beiträge zu nicht wissenschaftlichen Veröffentlichungen mit wissenschaftlicher Bedeutung

Gebrauchsmusteranmeldung Agri-PV-Farbot, Fraunhofer ISE: In Zusammenhang mit der Elektrifizierung von Landmaschinen und Dieselsubstitution entwickelte ich im Jahr 2014 die Idee, die Farbot-Technik mit der Agri-PV-Idee zu kombinieren. Noch während meiner Zeit am Fraunhofer ISE im Jahr 2019 wurden für die Umsetzung eines Miniaturpiloten Agri-PV-Farbot auf Versuchsflächen vom Fraunhofer ISE erfolgreich die internen Fördermittel akquiriert. Nach meinem Fortgang vom Fraunhofer ISE wurde im Jahr 2021 der Agri-PV-Farbot umgesetzt und wird seitdem wissenschaftlich begleitet. Bei der daraus entstandenen Gebrauchsmusteranmeldung bin ich deshalb mit 16 % als Erfinder beteiligt und Co-Autor (Fraunhofer ISE 2021c).



Abbildung 3-3: Miniaturpilot „Agri-PV-Farbot“ auf Versuchsflächen des Fraunhofer ISE

Agri-PV-Qualitätsstandard DIN SPEC 91434, Beuth Verlag: Am 26.6.2018 fand in Berlin im Rahmen meiner Promotion ein Gruppenfachgespräch mit Teilnehmenden aus dem BMEL, Universität Hohenheim, BMBF und PTJ statt. Darin wurden die Übertragbarkeit der APV-RESOLA-Ergebnisse in die Markteinführungsphase, die Agri-PV-Definition sowie die Notwendigkeit eines Agri-PV-Qualitätsstandards diskutiert. Das BMBF forderte Schindele/Fraunhofer ISE dazu auf, einen Aufstockungsantrag für die Umsetzung einer DIN SPEC bei PTJ zu stellen, damit eine Vor-Norm zu Agri-PV entwickelt werden kann. Im Dezember 2019 fand in Berlin die Kick-off-Veranstaltung zum Agri-PV DIN SPEC-Prozess statt. Weil damals bereits bekannt war, dass ich vom Fraunhofer ISE zur BayWa r.e. wechseln werde, übergab ich die Koordination des DIN SPEC-Prozesses an Andreas Steinhüser, Fraunhofer ISE. Ich selbst erhielt von der BSW-Solar-Geschäftsstelle das Mandat, den BSW-Solar in diesem Prozess zu vertreten, und koordinierte die inhaltliche Abstimmung innerhalb der Solarbranche mit den Solarunternehmen IBC-Solar, Goldbeck Solar, Next2Sun, JUWI, BayWa r.e. und der BSW-Geschäftsstelle. Die BayWa r.e. wurde durch Albert Schlaak und

Edgar Gimbel im DIN SPEC 91434 Prozess vertreten. Von Carsten Körnig, Hauptgeschäftsführer des BSW-Solars, wurde ich dazu angehalten, mich bei Abstimmungen zu enthalten, wenn starke Unstimmigkeiten innerhalb der BSW-Verbandsmitglieder sowie dünne absolute Mehrheiten im DIN SPEC-Konsortium zu erwarten sind. Der industriepolitische Abstimmungsprozess im DIN SPEC-Prozess gestaltete sich sehr arbeitsintensiv, jedoch äußerst fruchtbar. Die DIN SPEC 91434 wurde in fünf weitere Sprachen übersetzt (Englisch, Spanisch, Holländisch, Französisch und Polnisch) und dient einigen Verbänden und Regierungen in der EU als Diskussionsgrundlage zur Agri-PV-Definition, bspw. in Italien (DIN 2022; Finanziato dall'Unione europea und MITE 2022).

Agri-PV-Leitfaden, Fraunhofer ISE, 2021: Bereits in der BMBF-Forschungsbekanntmachung zu den Innovationsgruppen Nachhaltiges Landmanagement wurde eingefordert, dass die Innovationsgruppen kurz vor dem Abschluss der Forschungsaktivitäten der geförderten Projekte jeweils ein sogenanntes Innovationskonzept beim Fördermittelgeber PJT und BMBF einreichen müssten. Das Innovationskonzept musste nicht, konnte jedoch veröffentlicht werden. Die APV-RESOLA-Innovationsgruppe beschloss, ein Dokument vorzubereiten, das öffentlich zugänglich gemacht werden soll. Insgesamt sollten vier zielgruppenspezifische Agri-PV-Leitfäden an folgende Akteursgruppen erarbeitet und publiziert werden: 1) Landwirtschaft, 2) Energiewirtschaft, 3) Politik und Gesellschaft, 4) Forschung und Entwicklung. Die Struktur der einzelnen Leitfäden und die ersten Inhalte wurden noch unter meiner Federführung als Innovationsgruppenleiter erarbeitet. Nach meinem Fortgang vom Fraunhofer ISE übernahm Max Trommsdorff diese Aufgabe und beschloss, die vier Leitfäden in einem einzelnen Dokument zusammenzufassen und über Fraunhofer ISE zu veröffentlichen. Die Vorworte zum Agri-PV-Leitfaden verfassten die damaligen Ministerinnen Anja Karliczek (BMBF) und Julia Klöckner (BMEL) (Fraunhofer ISE 2020). Im April 2022 wurde eine Aktualisierung des Leitfadens veröffentlicht mit Vorworten der Bundesminister:innen Bettina Stark-Watzinger (BMBF) und Cem Özdemir (BMEL) (Fraunhofer ISE 2022a).

Buch „Nachhaltige Landnutzung managen“, Hrsg. WBV: Im Rahmen des wissenschaftlichen Begleitvorhabens der Fördermaßnahme im Schwerpunkt Innovationsmanagement erarbeitete Inter3 Institut für Ressourcenmanagement als Meta-Analyse aus den unterschiedlichen Innovationsgruppen das Buch „Nachhaltige Landnutzung managen. Akteure beteiligen – Ideen entwickeln – Konflikte lösen“. In den Kapiteln 1

„Grundlagen, Land nachhaltig nutzen“ und Kapitel 3 „Mitmacher:innen, Politik und Verwaltung konstruktiv stören“ wurden Meinungen und Positionen der Innovationsgruppenleiter und -mitglieder abgefragt und in den Textentwurf eingearbeitet. Der Textentwurf wurde anschließend in den Innovationsgruppen herumgereicht und im Fall für APV-RESOLA von mir kommentiert und ergänzt (Schön et al. 2019).

Best Practices Guidelines Agrisolar, SolarPowerEurope: Nachdem innerhalb der EU mehrere nationale Solarverbände und Regierungen auf das Agri-PV-Thema aufmerksam geworden sind, insbesondere in Frankreich, den Niederlanden, in Deutschland und Österreich, und die EU im Rahmen des Green Deals für die Landwirtschaft die Farm-to-Fork-Strategie vorstellte, beschloss SolarPowerEurope im Jahr 2020, den Workstream Agrisolar zu initiieren. Das kurzfristige Ziel des Workstreams bestand darin, unterschiedliche Agri-PV-Projekte in der EU aufzuzeigen, den gegenseitigen Austausch zu diesem Thema in der EU zu vertiefen und gegenseitiges Lernen anzuregen sowie die Öffentlichkeit und Policy-Makers zu diesem Thema zu informieren. Als Vertreter von BSW-Solar im deutschen DIN SPEC 91434 Prozess sowie als Vertreter der BayWa r.e. wurde ich eingeladen, an diesem Workstream teilzunehmen. Von hohem wissenschaftlichem Interesse sind m. E. die Fragen, ob ein EU-weiter Agri-PV-Qualitätsstandard sinnvoll ist oder nicht und falls ja, wie und wer diesen ausgestaltet sowie die Unterscheidung der Begriffe „Agrisolar“ und „Agri-PV“. Innerhalb des SPE-Workstreams wurde sich darauf geeinigt, dass zwischen PV-Anwendungen differenziert wird, die einen landwirtschaftlichen Betrieb unterstützen können, bspw. gebäudeintegrierte PV auf Ställen und Scheunen, oder Anwendungen, die tatsächlich in den landwirtschaftlichen Prozess integriert werden, bspw. wenn Solartechnik bestehende Kulturenschutzsysteme wie Regenhauben nahezu vollständig ersetzt. Jegliche PV-Anwendungen, die der Landwirtschaft und der Entwicklung ländlicher Räume dienlich sind, werden im Überbegriff Agrisolar genannt. Agri-Photovoltaics (abgekürzt als Agri-PV oder Agrivoltaics bezeichnet) beschreibt dabei letzteres, also in den landwirtschaftlichen Prozess auf Agrarflächen integrierte PV, bei der insbesondere das Photonenmanagement, also eine gerechte Aufteilung des Lichtspektrums auf einer Agrarfläche für die optimale Nutzung von Photosynthese und dem photoelektrischen Effekt, eine übergeordnete Rolle spielt (SolarPower Europe 2021). Im November 2022 wurde Schindele im neugegründeten SPE-Workstream „Land Use & Permitting“ von den führenden Solarunternehmen in der EU zum Co-Chair gewählt, damit dieser seine Erfahrungen auf EU-Ebene einbringen kann, wie der PV-Ausbau in Einklang mit der Landwirtschaft und dem

Naturschutz auf Agrarflächen ermöglicht werden kann, damit die Baugenehmigungsverfahren in den EU-Mitgliedstaaten vereinfacht werden können.

3.3 Beiträge aus weiteren nationalen und internationalen Agri-PV-Projekten am Fraunhofer ISE bis 2020

Zwischen 2012 und 2020 – und parallel zum APV-RESOLA-Projekt – verantwortete oder unterstützte ich die Akquise weiterer nationaler und internationaler Agri-PV-Projekte. Weil sich in meiner Promotion auf den Agri-PV-Innovationsprozess in Deutschland und speziell auf wirtschaftspolitische Fragestellungen konzentriert wird, kann und will ich mir die folgenden Projektbeiträge nicht für mein Promotionsverfahren anrechnen lassen. Gleichwohl erhöhten die Projekte meinen Agri-PV-Erfahrungsschatz und meine Kompetenz, sodass ich auch durch den Erkenntnisgewinn für die Entwicklungen in Deutschland einen indirekten Nutzen aus diesen Projekten ziehen konnte.

3.3.1 Beiträge zu weiteren Agri-PV-Projekten in Deutschland

Machbarkeitsstudie organische Photovoltaik-Anwendung im Obstbau, Baden-Württemberg, September 2018: Seit 2013 war das Fraunhofer ISE in Kontakt mit der Landesregierung Baden-Württemberg, um die Unterstützung zur Umsetzung eines Agri-PV-Obstbau-Pilotprojekts in der Bodenseeregion zu evaluieren. Im Jahr 2018 erhielt das Fraunhofer ISE den Auftrag zur Durchführung einer Machbarkeitsstudie für die Anwendung organischer Photovoltaik-Folien im Obstbau. Auftraggeber waren das Ministerium für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz, Abteilung 2 und 5 mit Federführung von Alexander Möndel (MIR), und das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft, Referat 64. Das Ergebnis untermauerte, dass sich die Technologie der organischen Photovoltaik (OPV) noch in der Entwicklung befindet und derzeit nicht mit silizium-basierter Solarzellentechnik wettbewerbsfähig ist. Signifikante Anstrengungen müssten unternommen werden, um gleichzeitig eine hohe Effizienz, eine hohe Lebensdauer der OPV-Folien sowie einen hohen industriellen Produktionsprozess zu etablieren. Für die speziellen Anforderungen in der

Anwendung im Obstbau müssen noch geeignete Materialien entwickelt werden. Als Resultat aus den Gruppenfachgesprächen, wissenschaftlichen Vorarbeiten und dem Diskurs im Agrarausschuss im Landtag Baden-Württembergs zum Thema Agri-PV (Landtag BaWü 2020) gelangte die Landesregierung Baden-Württembergs zu dem Entschluss, die Umsetzung und wissenschaftliche Begleitung von fünf Agri-PV-Modellanlagen zu finanzieren (MLR BaWü 2022b).

Agri-PV als Resilienzkonzept zur Anpassung an den Klimawandel im Obstbau, Rheinland-Pfalz, seit 2020: Im Jahr 2017 nahmen Wolfgang Schlagwein und Götz von Stumpfheldt, damals Referent im Ministerium für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten (MUEEF) Rheinland-Pfalz, an einer APV-RESOLA-Projektbeiratssitzung und Exkursion zur Pilotanlage in Heggelbach teil. Daraufhin folgten mehrere Gruppenfachgespräche mit MUEEF und BMEL in Mainz und Bonn sowie mit dem Bioobsthof Nachtwey in Gelsdorf, Graftschaft, in Rheinland-Pfalz. Im Jahr 2020 beschlossen das MUEEF und BMEL, gemeinsam ein Agri-PV-Apfel-Projekt finanziell zu unterstützen. Die Projektleitung übergab ich im Fraunhofer ISE intern an Andreas Steinhüser und begleitete die Projektumsetzung durch meine Agri-PV-Produktmanagement-Funktion beim Projektpartner BayWa r.e. (Fraunhofer ISE 2021b).

3.3.2 Beiträge zu internationalen Agri-PV-Projekten

Agri-PV-Technologie Transfer nach Chile: Im Dezember 2014, auf der UNFCCC COP 20 in Lima, Peru, hielten Andreas Häberle, damals Leiter Fraunhofer CSET in Chile, und ich gemeinsam einen Vortrag mit dem Titel „International Cooperation and Technology Transfer with Scientists and Companies in Emerging and Developing Countries“. In diesem Zusammenhang konnten wir Kontakt mit der chilenischen Delegation aufnehmen und den Agri-PV-Technologie-Transfer nach Chile initiieren. Die Metropolregion Santiago de Chile finanzierte daraufhin die Umsetzung drei kleinerer Agri-PV-Pilotanlagen im Jahr 2017. Eine Anlage wurde auf einem professionellen und industriellen Gemüsebetrieb mit Spezialisierung für Blumenkohl- und Brokkolianbau installiert, eine weitere Anlage auf einem mittelgroßen Familienbetrieb, der auf Kräuteraanbau, bspw. Petersilie und Schnittlauch, spezialisiert war, und eine dritte Anlage wurde auf einem sehr kleinen und bäuerlichen Betrieb, bei dem der Strom für den Betrieb eines Inkubators für Hühner herangezogen wurde, umgesetzt. Fraunhofer CSET war Projektkoordinator und das Fraunhofer ISE erhielt einen Unterauftrag, um einerseits die Technik weiterzuentwickeln und andererseits die Markt- und Geschäftsmodellanalysen für

Agri-PV-Projekte in Chile zu unterstützen. Im November 2017 hielt ich in Santiago de Chile auf einem Agri-PV-Seminar einen Vortrag, um über die Erfahrungen in Deutschland zu referieren, und hatte anschließend Fachgespräche mit mehreren Ministerien der chilenischen Regierung (Fraunhofer ISE 2018).

Agri-PV-Machbarkeitsstudie, Indien: Im Jahr 2019 kontaktierte das KfW-Büro in Indien das Fraunhofer ISE mit der Anfrage, ob dieses eine Agri-PV-Machbarkeitsstudie durchführen könnte. Nachdem Präsident Modi den Kohleausstieg Indiens beschlossen hatte, durfte die Erweiterung eines Kohlekraftwerks im Bundesstaat Maharashtra durch den größten Energieversorger Indiens, Mahagenco, auf einer Agrarfläche von 125 Hektar nicht umgesetzt werden. Stattdessen sollte dort eine herkömmlichen PV-FFA installiert werden und die KfW-Bank wurde zwecks der Finanzierung kontaktiert. Weil jedoch die bereits enteigneten Landwirte (ca. 100 Personen) weiterhin auf der Agrarfläche landwirtschaftlich tätig waren und die Agrarfläche über eine sehr hohe Bodenqualität verfügt, lehnte KfW die Finanzierung ab, schlug jedoch gegenüber Mahagenco die Umsetzung einer Agri-PV-Anlage vor. In Zusammenarbeit mit der KfW, dem Indo-German Energy Forum, dem BMZ, Mahagenco und dem Ministry of New and Renewable Energy India wurde eine Machbarkeitsstudie mit dem Titel „Feasibility and Economic Viability of Horticulture Photovoltaics in Paras, Maharashtra, India“ durch das Fraunhofer ISE erarbeitet (Trommsdorff et al. 2019).

Agri-PV-Projektentwicklung mit Südkorea, Fiji und Green Climate Fund: In Zusammenarbeit mit dem Projektentwicklungsunternehmen ENVELOPS aus Süd-Korea erstellte das Fraunhofer ISE eine Machbarkeitsstudie für die Umsetzung einer 4 MWp großen Agri-PV-Anlage auf der Insel Ovalau, Fiji. Die Projektentwicklung wurde durch die Korea International Cooperation Agency (KOICA) und die Fiji Development Bank (FDB) finanziert. Die Projektumsetzung wird durch den Green Climate Fund (GCF) finanziert (Green Climate Fund 2020). Im Jahr 2019 reiste ich für die Projektakquise hierzu nach Seoul und hielt am 04. April 2019 auf der International Green Energy Conference in Daegu, in der Rubrik „PV Market Insights, Market Trends & Solar Sharing – The Next Big Things“, einen Vortrag mit dem Titel „Agrophotovoltaics: Power and Food. Global Warming Mitigation & Adaptation“.

Agri-PV Lichtmanagement Beratung und Verifizierung, Department of Energy and Resources (DOER) Massachusetts, USA: Im Jahr 2019 kontaktierte das Unternehmen BlueWave Solar aus Massachusetts das ehemalige Fraunhofer CSE in Boston, USA, damit

Fraunhofer CSE in Zusammenarbeit mit Fraunhofer ISE deren Agri-PV-Schattenanalysesimulation verifiziert. BlueWave hatte vom Department of Energy Resources (DOER) Massachusetts den Auftrag erhalten, ein solches Tool als Online-Webinterface öffentlich zugänglich zu machen. Ähnlich wie im chilenischen Agri-PV-Projekt nahm Fraunhofer CSE das Fraunhofer ISE in den Unterauftrag, um damit die Agri-PV-Schattenanalyse in Massachusetts zu unterstützen (Pierson 2019).

Weitere Agri-PV-Projekte am Fraunhofer ISE in Vietnam, Mali, Gambia, Algerien und Deutschland, die durch die Ministerialverwaltung des Bundes gefördert werden und auf den Vorarbeiten des APV-RESOLA-Projektes aufbauen, sind u. a. der Agri-PV-Technologie-Transfer nach Vietnam (Fraunhofer ISE 2019), nach Mali und Gambia (Fraunhofer ISE 2022b) und Algerien (Fraunhofer ISE 2022c), das Projekt BioREVIER im Rheinland (Fraunhofer ISE 2021a) sowie das APV 5+5 Projekt in Baden-Württemberg (MLR BaWü 2022b).

3.4 Mein Beitrag im Agri-PV-Innovationsprozess in Deutschland – der Versuch einer Selbstreflexion

Bei der Eröffnungsfeier der Agri-PV-Forschungsanlage in Heggelbach im September 2016 las mein direkter Vorgesetzter Georg Bopp die Begrüßungsworte von Goetzberger vor, der aus gesundheitlichen Gründen nicht an der Veranstaltung teilnehmen konnte. Goetzberger nahm in seiner Rede mit folgenden Worten direkt Bezug auf meinen Beitrag: „Dass wir heute dieses Projekt einweihen können, verdanken wir vor allem Stephan Schindele, der es mit unermüdlichem Eifer vorantrieb und sich durch Rückschläge nicht abschrecken ließ“.⁴ Im Arbeitszeugnis, das ich zu meinem Ausscheiden vom Fraunhofer ISE im Februar 2020 erhielt, steht geschrieben: „Besonders hervorzuheben ist, dass Herr Schindele das neue Geschäftsfeld Agrophotovoltaik am Institut aufbaute und das Fraunhofer ISE zu dem führenden Institut im Bereich Agrophotovoltaik machte.“ Die Tatsache, dass ich im Februar 2017 im Rahmen des Ideenwettbewerbs „Form Follows Future“ auf dem Fraunhofer-Symposium „Netzwerk“ mit dem Projektteam „Fruitvoltaic“ den 1. Platz belegte und gemeinsam mit der Firma BayWa

⁴ Im Februar 2022 sendete mir Georg Bopp die von Goetzberger verfasste Rede, die Bopp in Heggelbach vortrug.

r.e./GroenLeven in den Niederlanden 2020 die erste kommerzielle Fruitvoltaic-Anlage einweihen durfte, ehrt mich ganz besonders. Im Rahmen meiner 75%-Stelle als Doktorand am Fraunhofer ISE habe ich versucht, mit Beständigkeit und großem Engagement das Bestmögliche für die Umsetzung und wissenschaftliche Bewertung der Agri-PV-Idee zu geben. Ich war überrascht, wie viele rechtliche und politische Hürden bewältigt werden mussten, um die Unterstützung für die Umsetzung einer Agri-PV-Demonstrationsanlage mit umfangreicher wissenschaftlicher Begleitung in Deutschland zu erhalten. Der trans- und interdisziplinäre Lernprozess, der durch das APV-RESOLA-Projekt ermöglicht wurde, gab den notwendigen Innovationsrahmen, um die Idee zu einer Invention und schließlich in eine Innovation zu transformieren. Belohnt wurde mein Engagement durch das Vertrauen und die Unterstützung meiner Vorgesetzten am Fraunhofer ISE (namentlich möchte ich an dieser Stelle Georg Bopp, Dr. Harry Wirth, Prof. Eicke Weber und Prof. Andreas Bett nennen), meiner Kolleg:innen (namentlich Tabea Obergfell, Max Trommsdorff und Andreas Steinhüser), der Projektpartner:innen, Beirat:innen, Fördermittelgeber:innen, der universitären Betreuer (Daniel Buhr und Josef Schmid), Beamt:innen und Politiker:innen und all der Stakeholder, die ich während dieser sehr intensiven Zeit und im Rahmen meines Promotionsvorhabens kennenlernen durfte. Im Zeitraum von 2015 bis 2021 war ich für den Agri-PV-Innovationsprozess in Deutschland eine wichtige, wenn nicht die prägendste Figur. Im Wesentlichen habe ich den Agri-PV-Innovationsprozess in Deutschland durch vier Beiträge unterstützt:

- 1) **Umsetzung einer Agri-PV-Pilotanlage, umfangreiche wissenschaftliche Begleitung, Beitrag zur Erschließung eines neuen wissenschaftlichen Fachgebiets:** Nachdem das Fraunhofer ISE als Urheber der „Doppelernte“-Idee über Jahrzehnte hinweg versucht hatte, Fördermittel für die Umsetzung einer Agri-PV-Pilotanlage zu akquirieren, ist mir dies durch die Geduld und das Vertrauen der Fraunhofer ISE-Institutsleitung und mit der Unterstützung von PTJ und BMBF im Jahr 2016 gelungen. Die Forschungsanlage in Heggelbach ist eine der am umfangreichsten wissenschaftlich analysierten (Agri-)PV-Anlagen weltweit. Insgesamt gingen drei Doktorarbeiten und zwölf wissenschaftliche Fachartikel aus der APV-RESOLA-Innovationsgruppe hervor. Gemeinsam mit den publizierten Agri-PV-Forschungsergebnissen aus den USA, Frankreich, Japan und China hat das APV-RESOLA-Projekt einen deutschen Beitrag zur Erschließung eines neuen wissenschaftlichen Fachgebiets – die Agri-Photovoltaik – geleistet. Mit über 382 Zitierungen (Stand:

02.12.2022) innerhalb von drei Jahren sind meine wissenschaftlichen Arbeiten zu Agri-PV bereits gut verankert, wobei die deutschen Publikationen in der GAiA nicht auf wissenschaftlichen Impact und möglichst hohe Zitierungen abzielten, sondern einen möglichst effizienten und effektiven Wissenstransfer von Wissenschaft in Politik in Deutschland ermöglichen sollten. Die Tatsache, dass das APV-RESOLA-Projekt und ich als Person im November 2022 zur Nominierung des Deutschen Zukunftspreises vorgeschlagen wurden, ist eine besondere Würdigung für das APV-RESOLA-Projekt und meiner wissenschaftlichen Arbeiten.

- 2) **Politikberatung in der Science-Policy-Schnittstelle:** Insbesondere in den Übergangsphasen von Invention zu Innovation sowie von Innovation zu Diffusion wurde in den Gruppenfachgesprächen und Experteninterviews ein Wissenstransfer neuer Erkenntnisse in beide Richtungen vollzogen. Die politischen Entscheidungsträger:innen profitierten von mir als Agri-PV-Kompetenz und Wissensträger und konnten sich auf den national und international aktuellsten Stand zur Agri-PV-Machbarkeit und -Markteinführung bringen. Umgekehrt konnte ich formelle und informelle Informationen erhalten, die wiederum für die weitere Ausrichtung der Wissensbedarfe zum Agri-PV-Thema wichtig waren. Durch die Science-Policy-Schnittstelle war ich somit im Agri-PV-Innovationsprozess sowohl teilnehmender Beobachter als auch beobachtender Teilnehmer, der durch einen Informationsvorsprung zu Agri-PV als ein willkommener Politikberater und Wissensübermittler diente.
- 3) **Reduktion der Ambiguität in der Politikumsetzung durch Agri-PV-Definition und -Qualitätssicherung:** Eines der national und international bedeutsamsten Arbeitsergebnisse aus dem APV-RESOLA-Projekt ist der Agri-PV-Qualitätsstandard DIN SPEC 91434. Diese inter- und transdisziplinäre erarbeitete Vornorm ermöglichte der Ministerialverwaltung auf Bundesebene, mit stark reduziertem Risiko von Fördermissbrauch die Agri-PV in ihre Gesetzgebungsentwürfe und das darin vorgesehene Förderregime einzuarbeiten. Die DIN SPEC 91434 stellt Anforderungen an die landwirtschaftliche Tätigkeit im Agri-PV-System und bot somit die Grundlage, den PV-Ausbau auf Agrarflächen in den Einklang mit der Landwirtschaft zu bringen. Existierende Gesetze, die bis dato ausschließlich eine monofunktionale Landnutzung berücksichtigten, konnten durch die Ministerialverwaltung und die Legislative angepasst werden und die Akteure sich in einen Lernprozess begeben. Die Ambiguität gegenüber der Agri-PV wurde vermieden, der Koordinationsprozess dadurch

effizienter und eine experimentelle Politikumsetzung wurde ermöglicht, u. a. im EEG 2023 und der GAPDZV.

- 4) **Nachhaltigkeitsfolgenabschätzung und Wirkungsanalyse zur Agri-PV-Diffusionsphase:** Meine Analysen zur Auswirkung einer Agri-PV-Diffusion auf die Zielsetzungen der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie, insbesondere auf den Schlüsselindikator 11.1.a „Nachhaltiges Landmanagement“ und das Potential der Agri-PV, den täglichen Siedlungsflächenanstieg zu reduzieren, verringerten die Ambivalenz innerhalb und zwischen den beteiligten Ressorts. Das Politikziel in Deutschland (und hoffentlich bald auch in der EU) ist fortan, den PV-Ausbau auf Agrarflächen im Einklang mit Landwirtschaft und Naturschutz zu ermöglichen.

Mein Zutun wurde begleitet von einer internationalen Agri-PV-Marktentwicklung – insbesondere in Frankreich, Japan, USA und China –, sodass eine kritische Menge an wissenschaftlichen Publikationen und kommerziellen Agri-PV-Projekten überschritten wurde und somit eine Umkehrung dieser Agri-PV-Marktentwicklung nicht mehr möglich ist. Wir waren und sind in Deutschland nicht die Vorreiter hinsichtlich Agri-PV, auch wenn die Idee in Deutschland ihren Ursprung hat. Ich gehe davon aus, dass in den kommenden Jahren das heute noch kleine Agri-PV-Marktsegment stark an Bedeutung gewinnen wird und gleichermaßen die Bedeutung meines Beitrags zum Agri-PV-Innovationsprozess schwindet. In meiner heutigen Funktion als „Head of Product Management Agri-PV“ unterstütze ich die weltweiten Aktivitäten der BayWa r.e. und BayWa AG im Bereich der Agri-PV. Dabei lerne ich viel über die internationalen Gesetzgebungen, Regulierungen, Marktentwicklungen und Marktpotentiale der Agri-PV. Ich erkenne, dass sowohl der Technologie- als auch der Policy-Transfer nicht ausschließlich von Deutschland in die Welt, sondern auch gleichermaßen umgekehrt, von anderen Märkten nach Deutschland stattfinden kann und sollte. Diese Realität sollte unserer Legislative und Exekutive bewusst sein, steht doch innerhalb der EU gerade die deutsche Gesellschaft vor den größten Herausforderungen, einen Beitrag zum Klimaschutz zu leisten, bei gleichzeitiger Verringerung der Energieimporte und Agrarflächeninanspruchnahme.

3.5 Referenzen

- Beck, M.; Bopp, G.; Goetzberger, A.; Obergfell, T.; Reise, C.; Schindele, S. (2012): Combining PV and Food Crops to Agrophotovoltaic – Optimization of Orientation and Harvest. 5 pages / 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition; 4096-4100. DOI: 10.4229/27THEUPVSEC2012-5AV.2.25.
- DIN (2022): DIN SPEC 91434:2021-05. Agri-Photovoltaik-Anlag-n - Anforderungen an die landwirtschaftliche Hauptnutzung. DIN. Online verfügbar unter <https://www.beuth.de/de/technische-regel/din-spec-91434/337886742>, zuletzt aktualisiert am 26.04.2022, zuletzt geprüft am 26.04.2022.
- Feuerbacher, Arndt; Laub, Moritz; Högy, Petra; Lippert, Christian; Pataczek, Lisa; Schindele, Stephan 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.
- Finanziato d'Il'Unione europea; MITE (2022): Consultazione pubblica PNRR: Piano di Ripresa e Resilienza, Missione 2 (Rivoluzione verde e Transizione ecologica), Componente 2 (Energia rinnovabile, idrogeno, rete e mobilità sostenibile), Investimento 1.1 (Sviluppo Agrovoltaico). Finanziato d'Il'Unione europea; Ministero della transizione ecologica (MITE).
- Fraunhofer ISE (2018): Agrophotovoltaik goes global: von Chile bis Vietnam. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Online verfügbar unter <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2018/agrophotovoltaik-goes-global-von-chile-bis-vietnam.html>, zuletzt aktualisiert am 20.06.2018, zuletzt geprüft am 27.05.2022.
- Fraunhofer ISE (2019): SHRIMPS – Solar-Aquakultur-Habitate als Ressourceneffiziente und Integrierte Multilayer-Produktions-Systeme. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Online verfügbar unter <https://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/shrimps.html>, zuletzt aktualisiert am 27.05.2022, zuletzt geprüft am 27.05.2022.
- Fraunhofer ISE (2020): Agri-Photovoltaik: Chance für Landwirtschaft und Energie. Ein Leitfaden für Deutschland. Hg. v. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Online verfügbar unter https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/infomaterial/brochures/photovoltaik/APV-Leitfaden_2020_web_neu.pdf, zuletzt geprüft am 26.04.2022.
- Fraunhofer ISE (2021a): Erste Agri-PV Forschungs- und Demonstrationsanlage im Rheinischen Revier. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Online verfügbar unter <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/news/2021/erste-agri-pv-forschungs-und-demonstrationsanlage-im-rheinischen-revier.html>, zuletzt aktualisiert am 29.10.2021, zuletzt geprüft am 27.05.2022.
- Fraunhofer ISE (2021b): Erste Agri-PV-Anlage für CO2-neutralen Obstanbau im Test. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Online verfügbar unter <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2021/erste-agri-pv-anlage-fuer-co2-neutralen-obstanbau-im-test.html>, zuletzt aktualisiert am 14.09.2021, zuletzt geprüft am 27.05.2022.
- Fraunhofer ISE (2021c). *Vorrichtung zur Kultivierung von Nutzpflanzen: Gebrauchsmusterschrift*. Retrieved from <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/074644347/publication/DE202021100025U1?q=pn%3DDE202021100025U1> , zuletzt geprüft am 16.12.2022
- Fraunhofer ISE (2022a): Agri-Photovoltaik: Chance für Landwirtschaft und Energiewende. Ein Leitfaden für Deutschland. Hg. v. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Online verfügbar unter <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/agri-photovoltaik-chance-fuer-landwirtschaft-und-energiewende.html>, zuletzt aktualisiert am 26.04.2022, zuletzt geprüft am 26.04.2022.
- Fraunhofer ISE (2022b): APV-MaGa – Agri-Photovoltaik für Mali und Gambia: Nachhaltige Stromproduktion durch integrierte Nahrungsmittel-, Energie- und Wassersysteme. Forschungsprojekte. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Online verfügbar unter <https://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/apv-maga.html>, zuletzt aktualisiert am 27.05.2022, zuletzt geprüft am 27.05.2022.
- Gorjian, Shiva; Ebadi, Hossein; Trommsdorff, Max; Sharon, H.; Demant, Matthias; Schindele, Stephan (2021): The advent of modern solar-powered electric agricultural machinery: A solution for sustainable farm operations. In: *Journal of Cleaner Production* 292, S. 126030. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126030.

- Green Climate Fund (2020): SAP016. Fiji Agrophotovoltaic Project in Ovalau. Online verfügbar unter <https://www.greenclimate.fund/project/sap016>, zuletzt aktualisiert am 21.08.2020, zuletzt geprüft am 27.05.2022.
- Landtag von Baden-Württemberg (2020): Experten sehen großes Potenzial für die Agrophotovoltaik. 02.10.2020. Online verfügbar unter <https://www.landtag-bw.de/home/aktuelles/pressemitteilungen/2020/oktober/912020.html>, zuletzt geprüft am 27.05.2022.
- MLR (2022): Landesregierung fördert fünf Modellanlagen zur Agri-PV mit rund 2,5 Millionen Euro. 13.01.2022. Ministerium für Ernährung, Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg (MLR). Online verfügbar unter <https://mlr.baden-wuerttemberg.de/de/unser-service/presse-und-oeffentlichkeitsarbeit/pressemitteilungen/pressemitteilung/pid/landesregierung-foerdert-fuenf-modellanlagen-zur-agri-pv-mit-rund-25-millionen-euro-1/>, zuletzt aktualisiert am 2022, zuletzt geprüft am 27.05.2022.
- Pierson, Drew (2019): Making Solar and Agriculture Work Together. How solar and agrivoltaics are helping livestock farming and agriculture thrive at Knowlton Farms. Hg. v. BlueWave. Online verfügbar unter <https://bluewave.energy/bw-resources/making-solar-and-agriculture-work-together-at-knowlton-farms>, zuletzt aktualisiert am 27.05.2022, zuletzt geprüft am 27.05.2022.
- Renn, Ortwin (2010): Risk governance. Coping with uncertainty in a complex world. Repr., digital print. London: Earthscan (Earthscan risk in society series).
- Scharpf, Fritz W. (1972): Komplexität als Schranke der politischen Planung. In: Erwin Faul (Hg.): Gesellschaftlicher Wandel und politische Innovation Tagung der Deutschen Vereinigung für Politische Wissenschaft in Mannheim, Herbst 1971. Opladen, Westdeutsche Verlag: VS Verlag für Sozialwissenschaften (Politische Vierteljahresschrift./Sonderheft 4/1972), S. 168–192.
- Schindele, Stephan (2021a): Feldfrüchte und Strom von Agrarflächen: Was ist Agri-Photovoltaik und was kann sie leisten? In: GA–A - Ecological Perspectives for Science and Society 30 (2), S. 87–95. DOI: 10.14512/gaia.30.2.6.
- Schindele, Stephan (2021b): Nachhaltige Landnutzung mit Agri-Photovoltaik: Photovoltaikausbau im Einklang mit der Lebensmittelproduktion: Szenarioanalyse zur Inanspruchnahme landwirtschaftlicher Nutzflächen durch Photovoltaik in Deutschland bis 2050. In: GA–A - Ecological Perspectives for Science and Society 30 (2), S. 96–105. DOI: 10.14512/gaia.30.2.7.
- Schindele, Stephan; Trommsdorff, Maximilian; Schlaak, Albert; Obergfell, Tabea; Bopp, Georg; Reise, Christian 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.
- Schön, Susanne; Eismann, Christian; Ansmann, Till; Wendt-Schwarzburg, Helke (Hg.) (2019): Nachhaltige Landnutzung managen. Akteure beteilig–n - Ideen entwickel–n - Konflikte lösen. Bielefeld: wbv Media GmbH & Co. KG. Online verfügbar unter https://www.wbv.de/fileadmin/webshop/pdf/6004699w_Leseprobe.pdf, zuletzt geprüft am 16.05.2022.
- SolarPower Europe (2021): Agrisolar Best Practice Guidelines. Version 1.0. 1. Aufl. Hg. v. SolarPower Europe. Online verfügbar unter <https://www.solarpowereurope.org/insights/thematic-reports/agrisolar-best-practice-guidelines>, zuletzt geprüft am 16.05.2022.
- Trommsdorff, Maximilian; Hopf, Michaela; Hörnle, Oliver; Berwind, Matthew; Schindele, Stephan; Wydra, Kerstin (2023): Can synergies in agriculture through an integration of solar energy reduce the cost of agrivoltaics? An economic analysis in apple farming. In: *Applied Energy*.
- Trommsdorff, Max; Kang, Jinsuk; Reise, Christian; Schindele, Stephan; Bopp, Georg; Ehmann, Andrea et al. (2021): Combining food and energy production: Design of an agrivoltaic system applied in arable and vegetable farming in Germany. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 140, S. 110694. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110694.
- Trommsdorff, Maximilian; Schindele, Stephan; Vorast, Maximilian; Durga, Neha; Patwardhan, Sachin Manohar; Baltins, Karolina et al. (2019): Feasibility and Economic Viability of Horticulture Photovoltaics in Paras, Maharashtra, India. Hg. v. Fraunhofer ISE. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/353333038_Feasibility_and_Economic_Viability_of_Horticulture_Photovoltaics_in_Paras_Maharashtra_India, zuletzt geprüft am 13.05.2022.

Weselek, Axel; Ehmann, Andrea; Zikeli, Sabine; Lewandowski, Iris; Schindele, Stephan; Högy, Petra (2019):
Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities. A review. In: *Agron. Sustain. Dev.* 39
(35), S. 1–20. DOI: 10.1007/s13593-019-0581-3.

Kapitel 4 Ergebnisse

„Allgemein gilt, dass eine Politik, die allen gibt und keinem erkennbar nimmt, sich auf eine breite öffentliche Zustimmung stützen kann.“

Fritz W. Scharpf (Rechts- und Politikwissenschaftler, Direktor emeritus Max-Planck-Institut für Gesellschaftsforschung, 1972)

„Im Endeffekt wird sich nur die Technologie durchsetzen können, die den höchsten Nettonutzen verspricht.“

Ortwin Renn (Direktor Potsdamer Institute for Advanced Sustainability Studies IASS, 1981)

„Agri-PV wird sich nur durchsetzen können, wenn das Bewusstsein gegenüber der globalen Ernährungskrise in unserer Gesellschaft steigt und die Politik den Beitrag der Agri-PV zur Steigerung des Nachhaltigkeitsniveaus erkennt und fördern will.“

Stephan Schindele (Head of Product Management Agri-PV, BayWa r.e. AG, 2022)

Hinsichtlich der Agri-PV-Markteinführung in Deutschland beantwortete ich im Rahmen des APV-RESOLA-Projekts die folgenden fünf wirtschaftspolitischen Fragestellungen:

4.1 Polity-Dimension: Welche bundesstaatlichen Ressorts sind durch das Querschnittsthema Agri-PV betroffen und welches ist federführend für eine Markteinführung politisch verantwortlich?

Die technische Ontogenese wird durch den sogenannten Technologiereifegrad (TRL) bewertet (EARTO 2014). In der Polity-Dimension sind zu unterschiedlichen Zeiten und Phasen im Innovationsprozess verschiedene Aktivitäten und politische Zuständigkeiten notwendig. Auch die Anzahl der involvierten Ressorts variiert in den Übergangsphasen der einzelnen

Innovationsschritte. Für die Entwicklung einer Idee und Vision sind die Grundlagen- und angewandte Forschung und somit das bundesstaatliche Ressort BMBF zuständig. In der Weiterentwicklung von Idee zu Invention steigt der TRL und der Verantwortungsumfang weitet sich aus sowie mehrere Ressorts werden im Koordinationsprozess konsultiert. Speziell in interdisziplinären Anwendungsgebieten sind in der Forschungsförderung die jeweils betroffenen Ressorts in der Koordination miteinzubeziehen. Im Fall der Agri-PV fanden ressortübergreifende Gruppenfachgespräche statt, bspw. mit Teilnehmenden aus dem BMBF und BMEL (am 26.06.2018) oder BMBF und BMWK (am 31.09.2019). Spätestens im Jahr 2019, als die Agri-PV den Status einer Invention erreichte, lag die Erkenntnis vor, dass die Qualitätsmerkmale eines Agri-PV-Systems durch Mindestanforderungen an die landwirtschaftliche Hauptnutzung gestellt werden. Im Vordergrund der multifunktionalen Agrarflächennutzung steht somit eine quantitativ sichere und qualitativ hochwertige Agrarproduktion mit einer zusätzlichen, sekundären Solarstromproduktion – nicht umgekehrt. In den Jahren zwischen 2011 und 2022 wurden durch das Fraunhofer ISE und in meiner Verantwortung zunächst das APV-RESOLA-Projekt durch das BMBF und anschließend das Agri-PV-Obstbau-Projekt mit BMEL-Unterstützung finanziert. Das BMEL folgte mehrmals den Einladungen, der APV-RESOLA-Beiratssitzung beizuwohnen, und initiierte im Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei, dem Thünen-Institut, das Projekt „PV-Freiflächenanlagen in der Landwirtschaft“ (Thünen 2022). Sowohl das BMBF als auch BMEL kamen und kommen ihrer politischen Verantwortung nach, um den Erkenntnisgewinn zu Agri-PV zu erhöhen und eine mögliche Markteinführung vorzubereiten. Das Bundesumweltministerium (BMUV) wurde in den Jahren von 2011 bis 2019 (und auch schon in den Jahren zwischen 1981 und 2010) mehrfach darum gebeten, ein Agri-PV-Forschungsprojekt zu unterstützen, lehnte die Projektideen jedoch stets ab mit den Begründungen, nicht für Landwirtschaft zuständig zu sein, oder ab 2014 mit der Begründung, weder für Landwirtschaft noch für den PV-Ausbau zuständig zu sein. Das BMUV verpasste insbesondere in den Jahren von 2014 bis 2018 die Chance, als es durch einen neuen Ressortzuschnitt zeitgleich für Umwelt und Bau zuständig war, die Agri-PV als Lösungsweg für das Dilemma PV-FFA-Ausbau und täglicher Siedlungsflächenanstieg zu erachten. Bis heute ist das BMUV für Boden und Nachhaltiges Landmanagement zuständig, kam aber erst im Jahr 2021 zu dem Entschluss, über dessen Umweltinnovationsprogramm die Umsetzung einer Agri-PV-Anlage zu finanzieren (BMUV 2021). Eine umfangreiche wissenschaftliche Begleitung ist in diesem Projekt allerdings nicht vorgesehen. Rückblickend ist zu bemerken, dass zwischen

2005 und 2015, also in der sehr frühen Phase der technischen Agri-PV-Ontogenese in Deutschland, das BMUV es versäumte, seiner Verantwortung für Bodenmanagement, Klimaschutz und PV-Ausbau nachzukommen, um die Potentiale des Querschnittsthemas Agri-PV bewerten zu können.

Seit Dezember 2013 ist das BMWi/BMWK für den EE-Ausbau zuständig. Im Jahr 2014 organisierte das BMWi die Konsultation „Eckpunkte für ein Ausschreibungsdesign für PV-Freiflächenanlagen“. Bereits damals forderten das Wuppertal-Institut und Fraunhofer ISE unterstützt von der Universität Hohenheim und Hans-Josef Fell, dass bei der Legaldefinition von PV-FFA die Agri-PV nicht definitiv ausgeschlossen wird und dass für die Integration von Agri-PV im PV-FFA-Ausschreibungsdesign aufgrund der unterschiedlichen Kostenstruktur der PV-Anwendungen getrennte Lose für Agri-PV ausgeschrieben werden. Dadurch könnten auch in Deutschland die ersten Agri-PV-Anlagen umgesetzt werden und wissenschaftliche Begleitforschung stattfinden (Wuppertal Institut 2014). Das BMWi kam diesen Forderungen und Verantwortungen nicht nach. Dem BMWi war das Agri-PV-Forschungs- und Entwicklungsthema nicht wichtig genug, es hatte keine Ressourcen, um sich darum zu kümmern, und konzentrierte sich stärker auf andere energiepolitische Entscheidungen, bspw. Atomausstieg, Netzausbau, EU-Beihilferechtsverletzungen durch EEG, Vorbereitungen zum Kohleausstieg sowie Sektorenkopplung (Wärme-Verkehr-Strom). Das BMWi bemühte sich zwar um die Transformation des Energiesystems, schaffte es im Zeitraum zwischen 2014 und 2021 jedoch nicht, den EE-Ausbau so voranzutreiben, dass die völkerrechtlich verbindlich zugesagten Klimaschutzziele aus dem Parisabkommen eingehalten wurden (Bundesverfassungsgericht 2021). Durch die internationale Agri-PV-Marktentwicklung, die vielen wissenschaftlichen Agri-PV-Publikationen, die zwischen 2014 und 2021 weltweit veröffentlicht wurden, und durch die umfangreiche Medienberichterstattung erlangte die Agri-PV in den Jahren 2020/2021 den Innovationsschritt der Innovation. Die technische Funktionsfähigkeit der Agri-PV wurde mehrfach unter Beweis gestellt und weitere soziale, landwirtschaftliche und wirtschaftliche Vorteile durch Erkenntnisse untermauert. Gleichzeitig verstärkte sich das Krisenbewusstsein gegenüber den Themen Anpassung an den Klimawandel aufgrund der Flut im Ahrtal im Jahr 2021 und Ernährungskrise aufgrund des Ukraine-Kriegs im Jahr 2022. Die EU-Kommission reduzierte die EU-Greening-Maßnahmen in der Farm-to-Fork Strategie, damit mehr Nahrungsmittel in der EU erzeugt werden können, und stellt somit Ernährungssicherheit über Naturschutz (Europäische Kommission 2022). Die

ressourceneffiziente Landnutzung gewinnt an politischer Bedeutung und die Agri-PV-Markteinführung somit an Befürwortern.

Die Agri-PV-Markteinführung beschreibt den Innovationsschritt von Innovation zu Diffusion und ist in der untenstehenden Abbildung durch einen rot-gestrichelten Kasten gekennzeichnet, siehe Abbildung 4-1:

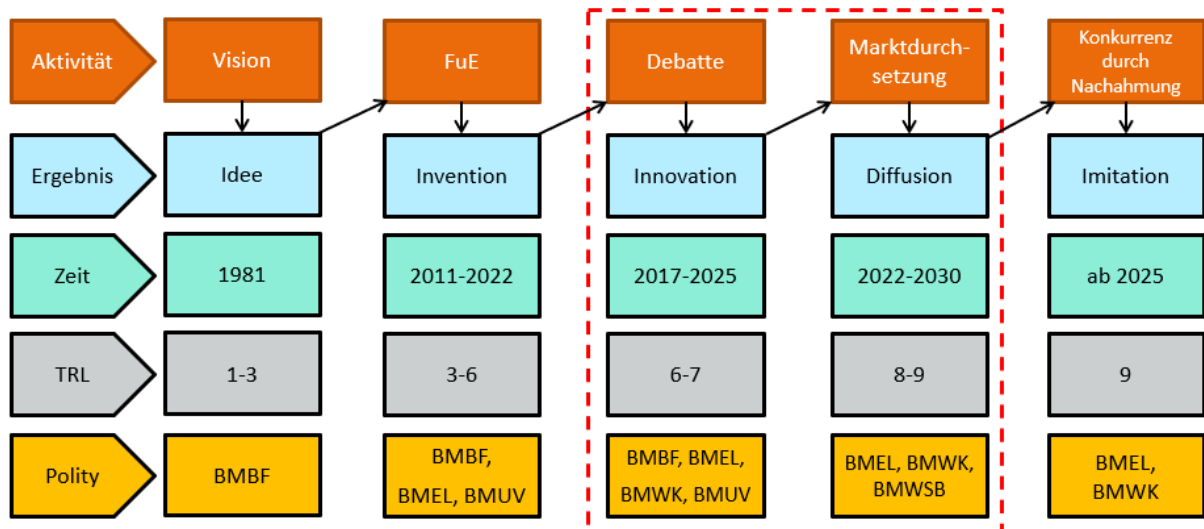


Abbildung 4-1: Agri-PV-Innovationsprozess und politische Verantwortlichkeiten in bundesstaatlichen Ressorts in Deutschland (eigene Darstellung)

Auf bundesstaatlicher Ebene sind zwei Ressorts federführend für die Agri-PV-Markteinführung zuständig. Das BMEL ist zuständig für den landwirtschaftlichen Teil im Agri-PV-System. Hierbei gilt es, einerseits alle rechtlichen Rahmenbedingungen zu beachten, die für die Einhaltung der Agri-PV-Qualitätsstandards relevant sind, und andererseits Fördermechanismen für die landwirtschaftliche Tätigkeit im Agri-PV-System bereitzustellen, damit politische Ambiguitäten ausgeschlossen werden. Kein landwirtschaftlicher Betrieb sollte zweifeln müssen, ob in einem Agri-PV-System die Direktzahlungen noch zur Verfügung stehen oder nicht, wenn eine hauptsächlich landwirtschaftliche Nutzung auf der Agrarfläche stattfindet. Für die Incentivierung der Agri-PV-Investitionen ist das BMEL zuständig, wenn der Strom direkt auf der Hofstelle verbraucht werden soll. Investorenzielgruppe sind hier landwirtschaftliche Betriebe. Für Agri-PV-Investitionen, die eine Solarstromproduktion ermöglichen, die weit über den Strombedarf eines landwirtschaftlichen Betriebes hinausgehen und der ausschließlichen Netzeinspeisung dienen, ist das BMWK zuständig. Investorenzielgruppen sind hier neben den

landwirtschaftlichen Betrieben auch Energieversorgungsunternehmen und Solarparkprojektierer, die ihre Finanzierungskompetenz in eine gemeinsame und partnerschaftliche Projektentwicklung einbringen. Weitere bundesstaatliche Ressorts sind zwar nicht in der Federführung, sollten jedoch die Agri-PV-Markteinführungsphase mit Anpassungen der gesetzlichen Rahmenbedingungen in ihren Zuständigkeiten unterstützen, bspw. das BMWSB, indem die Baunutzungsverordnung angepasst und somit eine multifunktionale Landnutzung auf Agrarflächen baurechtlich ermöglicht wird, sowie das BMUV, damit im angedachten Bodenmonitoringzentrum PV-FFA und Agri-PV-Anlagen statistisch erfasst werden und der Beitrag der Agri-PV zum Erhalt der Agrarflächen bewertet werden kann. Zudem sollte das BMUV ebenfalls Interesse daran haben, den Naturschutz zu fördern, indem die DNS-Ziele 2.1.b „Ausbau des ökologischen Landbaus“ mit dem Ziel des „Nachhaltigen Landmanagements“ 11.1.a mittels Agri-PV verknüpft werden und im EEG-Förderregime bevorzugt bezuschlagt. Nur durch eine eng abgestimmte Politikkoordination in der Agri-PV-Markteintrittsphase lässt sich der PV-Ausbau auf Agrarflächen in einen Einklang mit Landwirtschaft und Naturschutz bringen. Der Haupttreiber und Moderator hinter diesem Koordinationsprozess sollte das BMEL sein, weil der primäre Zweck der Agrarfläche die Biomasseproduktion ist.

In der Übergangsphase von Innovation zu Diffusion ist die größte Anzahl an Ressorts im Koordinationsprozess involviert. In dieser Phase ist die Orchestrierung der Agri-PV-Markteinführung aus einem Guss besonders wichtig. Jedes Ressort ist angehalten, seinen Beitrag zum politischen Erfolg – der Marktwachstumsphase – zu leisten oder im Zweifelsfall die Ambivalenz/Konflikte offenzulegen, damit Kompromissbereitschaften ausgelotet werden können. Im Sinne von Scharpf sollten in diesem Momentum alle betroffenen Policy-Inhalte auf möglichst wenige Ressorts konzentriert und in Transformationspfade orchestriert werden, um innerhalb eines Policy-Clusters das Agenda Setting und die Prioritätsfindung zu vereinfachen. Ideologische Distanzen sind in Policy-Clustern geringer und die Wahrscheinlichkeit auf eine effektive und effiziente Policy-Umsetzung im Transformationspfad zur Begünstigung der Marktwachstumsphase steigt. Zugleich sollte die Politikverflechtung im föderalistischen Mehr-Ebenen-System bedacht und die zuständigen Ressorts auf Landesebene in den Innovationsprozess involviert werden, damit die Marktdurchsetzung nicht an der Informations- und Kompetenzlücke auf regional- oder kommunalpolitischer Ebene scheitert. Für die Integration der unterschiedlichen Belange der Ressorts und Politikebenen könnte als Politikinstrument ein temporäres Agri-PV-Koordinationsgremium eingesetzt werden, das über

den Abteilungsleiterausschuss und die Ressortbesprechungen der Staatssekretäre auf Bundesebene hinausgeht. Aus der Kabinettsitzung könnte eine Agri-PV-„Kümmerer:in“ in der Ministerialverwaltung der Bundesebene eingesetzt werden, um die Aufgabenzuteilungen und Transformationspfade in dem Policy-Cluster im Mehr-Ebenen-System zu koordinieren. Diese Funktion könnte auch den Dialog zwischen weiteren Akteuren, bspw. Verbände und Parteien, unterstützen, um Ambivalenzen und Ambiguitäten hinsichtlich der Agri-PV-Diffusion zu mildern. Konkret könnten Hilfestellungen gegeben werden, damit bspw. die DIN SPEC 91434 fortgeschrieben und regelmäßig aktualisiert wird, wodurch politische Pfadabhängigkeiten gestärkt werden könnten und sich der Agri-PV-Qualitätsstandard zu einem Konsens und dadurch von einer Vornorm zu einer Norm entwickelt. Das Agri-PV-Koordinationsgremium sollte im BMEL auf Bundesebene angesiedelt sein und dort in Abteilung 5, Wald, Nachhaltigkeit, nachwachsende Rohstoffe, Unterabteilung 52, Klimaschutz, Biodiversität, Nachhaltigkeit, Bioökonomie, im Referat 525, Energie, Bioökonomie, nachwachsende Rohstoffe, damit bestehende Netzwerke in die EEG-Regime im BMWK und zum Naturschutz im BMUV optimal genutzt werden können.

4.2 Politics-Dimension: Welche ideologischen Distanzen bestehen zwischen den Akteuren hinsichtlich der Agri-PV-Markteinführung? Positionen von Ministerien, Fraktionen, Parteien und Verbänden im Agri-PV-Abstimmungsprozess

Im Zusammenhang mit den theoretischen Hintergründen zur Koordination von Regierungshandeln und der Agri-PV-Markteinführung, siehe Kapitel 2.3, werden im Abstimmungsprozess zur Politikumsetzung Konfliktpotentiale (Ambivalenzen) und Unklarheiten (Ambiguitäten) der einzelnen Ressorts abgefragt. Dadurch können die resultierenden Konfliktniveaus identifiziert und im Verhandlungssystem Ressourcen zur Kompromissbildung abgeleitet werden. Dem politischen Entscheidungsprozess vorgelagert

sind die Abstimmungen der Interessensvertretungen der einzelnen Sektoren sowie die innerparteilichen Debatten zu Politikinhalten. In der nachfolgenden Akteursanalyse wurde der Versuch unternommen, die Ambivalenzen und Ambiguitäten im Koordinationsprozess mit Blick auf die Agri-PV-Markteinführung offenzulegen, damit gemäß dem „Ambiguity-Conflict Model“ ein Koordinationsparadigma erkannt wird und entsprechende Handlungsempfehlungen abgeleitet werden können.

Die Agri-PV-Markteinführung liegt in den bundesstaatlichen Zuständigkeiten des BMEL und BMWK. Das BMEL ist dafür verantwortlich, die regulatorischen Bedingungen für den landwirtschaftlichen Teil zu koordinieren. Das BMWK ist dafür zuständig, den Solarstromteil zu koordinieren. Vor diesem Hintergrund wurden zusätzlich zu den Experteninterviews und Gruppenfachgesprächen zwei Verbändeanhörungen zu Kabinettsentwürfen der jeweiligen Ressorts analysiert und ausgewertet. Für den landwirtschaftlichen Teil wurde die Verbändeanhörung zur Anpassung der Direktzahlungsdurchführungsverordnung im Oktober 2021 analysiert. Hierin ist zur Gewährleistung von EU-GAP-Beihilfen in Verbindung mit Agri-PV eine Ausnahme vorgesehen. Für den Solarstromteil wurde die BNetzA-Konsultation im Juni 2021 zur Festsetzung der Innovationsausschreibung für besondere Solaranlagen untersucht. Hierin wurden elf Parameter hinsichtlich der Agri-PV-Festsetzung abgefragt. Abschließend wurden der aktuelle Koalitionsvertrag 2021 „Mehr Fortschritt wagen“ und die im Vorfeld zur Bundestagswahl 2021 veröffentlichten Wahlprogramme der im Bundestag vertretenen Parteien begutachtet.

4.2.1 Parteienanalyse

In der Parteienanalyse wurden die Wahlprogramme zur Bundestagswahl im Jahr 2021, der Koalitionsvertrag sowie Aktivitäten und Äußerungen der Fraktionen im Bundestag analysiert. Im Koalitionsvertrag ist das Ziel festgeschrieben, die installierte PV-Leistung von derzeit rund 60 GWp auf 200 GWp bis 2030 zu erhöhen. Dazu sollen u. a. Hemmnisse abgebaut werden, die Vergütungssätze angepasst, innovative Solarenergie wie Agri- und Floating-PV gestärkt und die Ko-Nutzung ermöglicht werden (SPD und Bündnis 90/Die Grünen und FDP 2021, S. 44). Dass die Agri-PV Gegenstand im Koalitionsvertrag geworden ist, liegt auch daran, dass sich die Regierungsparteien bereits im Vorfeld zur Bundestagswahl mit der Agri-PV befasst hatten und deren Markteinführung und Förderung in ihren jeweiligen Wahlprogrammen teilweise als Ziel festlegten. Die SPD formulierte das Ziel, innovative Formen der erneuerbaren

Stromerzeugung wie integrierte Photovoltaik auf landwirtschaftlichen Flächen gezielt zu fördern und neue strategische Energiepartnerschaften aufzubauen (SPD 2021, S. 9). Bündnis'90/Die Grünen möchten „Neue Flächenkonkurrenzen“ vermeiden und stellen „den Mehrfachnutzen für Energieerzeugung, Biodiversität und Landwirtschaft in den Vordergrund. Agri-PV-Anlagen, d. h. Stromproduktion und landwirtschaftliche bzw. gartenbauliche Nutzung auf einer Fläche, können einen wichtigen Beitrag für Klimaschutz und Ökologie leisten“ (Bündnis 90 / Die Grünen 2021, S. 7). Die FDP unterstützt den PV-Zubau, äußert sich in ihrem Wahlprogramm zur Bundestagswahl 2021 jedoch nicht explizit zur Agri-PV oder anderen innovativen Solartechnologien (FDP 2021). Allerdings stellte die FDP-Fraktion im Bundestag im Mai 2021 eine kleine Anfrage an die damalige Bundesregierung mit dem Titel „Potentiale von Agri-Photovoltaik“. Darin wertet die FDP-Fraktion die vom Bund geförderten Agri-PV-Forschungsanlagen als „Schritt in die richtige Richtung“, merkt jedoch an, dass diese Schritte noch nicht ausreichen werden, um die Agri-PV-Potenziale zu erschließen. Die FDP benennt „das Fehlen entsprechender rechtlicher Rahmenbedingungen“ als größtes Hindernis bei der Agri-PV-Markteinführung (Bauer 2021). Für den Erfolg der Agri-PV-Politikumsetzung ist auch entscheidend, wie sich die größte Oppositionspartei gegenüber der Agri-PV-Markteinführung positioniert. Im Parteiprogramm der CDU/CSU-Union ist das Ziel festgehalten, „Nachhaltigkeit in der Land- und Forstwirtschaft sichtbar, messbar und bezahlbar zu machen“. Hierzu sollen Landwirte mit besonders nachhaltigen Bewirtschaftungsformen, wie z. B. Agri-PV, Geld verdienen können (CDU/CSU 2021, S. 52). Da die CDU/CSU-Union in manchen Bundesländern ebenfalls regierende Partei ist, bspw. in BaWü, NRW, Sachsen, Schleswig-Holstein und Bayern, und die Agri-PV-Diffusion speziell auf regionaler Ebene einen Beitrag zur Entschärfung des Flächennutzungskonflikts erbringen kann, erwirkt die explizite Erwähnung der Agri-PV im CDU/CSU-Bundeswahlprogramm eine Eindeutigkeit, wodurch tendenziell mit Unterstützung als mit Widerstand bei der Agri-PV-Markteinführung auf allen Politikebenen zu rechnen ist. Rückblickend sollte bei der Analyse der CDU/CSU-Union auch berücksichtigt werden, dass Bundestagsabgeordnete der CSU im Jahr 2020 im Koordinationsprozess um das EEG 2021 den Impuls gegeben haben, dass „besondere Solaranlagen wie die Agri-PV und Floating-PV“ überhaupt in das EEG-Förderregime aufgenommen wurden. Die beiden CDU-Ministerinnen Anja Karliczek (BMBF) und Julia Klöckner (BMEL) verfassten in der ersten Ausgabe des Agri-PV-Leitfadens vom Fraunhofer ISE im Oktober 2020 das Vorwort (Fraunhofer ISE 2020). Die AfD will „Landschaft erhalten und lehnt deswegen den Neubau von Photovoltaikanlagen aufgrund des hohen

Flächenverbrauchs, der Entwertung landwirtschaftlicher Produktionsflächen und der Störung des Mikroklimas ab“ (AfD 2021, S. 206). Die Linke erwähnte die Agri-PV in ihrem Wahlprogramm zur Bundestagswahl 2021 nicht, gab im März 2022 in einer Debatte zu den Agri-PV-Plänen der Bundesregierung den Hinweis, dass sie einen PV-Ausbau auf Agrarflächen nicht unterstützt, wenn dadurch die Lebensmittelerzeugung eingeschränkt wird (Solarserver 2022).

Im parteipolitischen Vergleich widmen sich Bündnis‘90/Die Grünen am intensivsten der Agri-PV. Die Koordinationskonzentration der Themen Nachhaltigkeit, Umwelt, Landwirtschaft, Klima und Wirtschaft innerhalb der Koalition auf den Grünen-Bündnispartner wurde nach der Bundestagswahl durch die Veröffentlichung des Eckpunktepapiers zu Agri-PV untermauert. Allerdings wurde im Koordinationsprozess unter der Grünen-Federführung versäumt, das SPD-geführte Ressort BMWSB in die Ausformulierung des Eckpunktepapiers miteinzubinden. Potenzielle Konflikte und Mehrdeutigkeiten hätten durch die Integration der SPD als Partner der Eckpunkte-Initiative im Vorfeld der externen Kommunikation im Inneren der Koalition geklärt werden können und somit die Wahrscheinlichkeit erhöht, dass seitens der SPD mit einem geringeren Widerstand zu erwarten ist. Die Einbindung des SPD-geführten BMWSB ist vor dem Hintergrund wichtig, dass Hemmnisse aufgrund des Baurechts im Baugenehmigungsverfahren zeitnah abgebaut werden sollten. Hierzu wäre die Umsetzung einer neuen Landnutzungskategorie „landwirtschaftliche Nutzfläche mit integrierter PV“ in der Baunutzungsverordnung hilfreich, damit die unteren Baurechtsbehörden die multifunktionale Landnutzungsform „Agri-PV“ in den Flächennutzungsplänen abbilden können. Das Eckpunktepapier der drei Grünen-geführten Ministerien hätte dadurch weniger nach Alleingang, Profilierungsdrang der Grünen-Partei und parteipolitischem Symbolcharakter gewirkt, sondern mehr nach überparteilicher Kooperation, Koordination und „Agri-PV-Markteinführung aus einem Guss“, was dem Anspruch aus dem Koalitionsvertrag gerecht geworden wäre. In der Gesamtbetrachtung herrscht in der Parteienlandschaft, insbesondere zwischen den Regierungsparteien der Ampelkoalition und der CDU/CSU-Union als größte Oppositionspartei, große Einigkeit, dass die Agri-PV-Markteinführung und der PV-Ausbau im Einklang mit der Landwirtschaft politisch unterstützt werden sollten.

4.2.2 Analyse der BnetzA-Konsultation zur InnAusV für besondere Solaranlagen 2021

Aus den 34 Stellungnahmen von Bundes- und Landesministerien, Agrar-, Umwelt- und Energieverbänden sowie Unternehmen, Stiftungen und Einzelpersonen konnten die folgenden zwölf Parameter für die Agri-PV-Festsetzung identifiziert werden:

- i) Sollte eine Pflicht zur Anlagenkombination aus Agri-PV mit Energiespeicher oder anderen EE-Quellen bestehen?
- ii) Sollte die maximale Projektgröße von 2 MWp erhöht werden?
- iii) Sollte das Ausschreibungsvolumen von 150 MWp erhöht werden?
- iv) Sollte das Ausschreibungsvolumen nur einmalig im Jahr oder auf mehrere Termine verteilt werden?
- v) Sollte die Ausschreibung am 01.04.2021 in den Folgejahren wiederholt werden?
- vi) Sollten Agri-PV-Anwendungen der Kat. 2 gemäß DIN SPEC 91434 aus der Innovationsausschreibung herausgenommen werden?
- vii) Sollte die Einschränkung der Flächenkulisse auf benachteiligtes Gebiet und Randstreifen entlang von Transportwegen für Agri-PV-Kat.-2-Anwendungen aufgehoben werden?
- viii) Sollten Dauerkulturflächen in die förderfähige Flächenkulisse aufgenommen werden?
- ix) Sollen Dauergrünlandflächen in die förderfähige Flächenkulisse aufgenommen werden?
- x) Reicht eine einmalige Nachweispflicht im Baugenehmigungsprozess aus, um den landwirtschaftlichen Anbau über den gesamten Förderzeitraum zu gewährleisten?
- xi) Ist der Agri-PV-Qualitätsstandard DIN SPEC 91434 als Nachweis geeignet?
- xii) Der Stromeigenverbrauch der Agri-PV-Anlage sollte nicht über das InnAusV-Verfahren erfolgen.

Aus der Perspektive, dass die Agri-PV ähnlich einer PV-FFA im bis dato ersten Anlagensegment gefördert wird, bei gleichzeitiger Honorierung der Agri-PV-Alleinstellungsmerkmale gegenüber PV-FFA, wurde ein Level Playing Field Szenario als Referenz entwickelt. Die 34 Stellungnahmen wurden dieser Referenz gegenübergestellt, wobei eine Zustimmung zu den zwölf Parametern mit jeweils einem Pluspunkt, Ablehnung mit einem Minuspunkt und keine Punktzahl vergeben wurde, wenn keine Auskunft über die Position vorhanden war. Durch dieses Prinzip konnte quantitativ berechnet werden, welche ideologischen Distanzen zu welchen

Parametern zwischen welchen Akteuren und Akteursgruppen hinsichtlich der Agri-PV-Markteinführung bestehen. Wirtschaftspolitisch von Interesse sind die Vergleiche zwischen den Extrempositionen im Vergleich zum Referenzszenario. Die Positionspapiere ermöglichen Einblicke in die Sichtweisen der einzelnen Akteursgruppen, bspw. Umweltverbände und Agrarverbände, die mittels ihrer Netzwerke wiederum Einfluss auf den Koordinationsprozess zur Agri-PV-Markteinführung in den jeweils zuständigen Bundesressorts nehmen, bspw. BMUV und BMEL, sowie der verantwortlichen Ausschussteilnehmenden im Bundestag, bspw. Agrarausschuss. Die Stellungnahmen können zur Referenz gegenübergestellt und in einem Radarchart visualisiert werden. Dadurch können Konfliktpotentiale, Zustimmungen und Ablehnungen (gemäß Matland „Ambivalenzen“, siehe Kapitel 2.3 „Koordination von Regierungshandeln in Deutschland – Theorie“) sowie widersprüchliche Auffassungen und Informationslücken („Ambiguitäten“) zwischen den Akteuren direkt aufgezeigt werden. In den folgenden beiden Abbildungen 4-2 und 4-3 sind die Gegenüberstellungen des Level Playing Field Szenarios mit dem Deutschen Bauernverband (DBV) und dem Bundesamt für Naturschutz (BfN) sowie dem Bundesverband für Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) und dem Umwelt Bundesamt (UBA) dargestellt. Der DBV setzt sich dafür ein, dass Agri-PV auch auf Dauergrünland und Dauerkulturflächen eingesetzt werden kann, während das BfN die Flächenkulisse allein auf Ackerflächen begrenzen will (und somit Dauergrünland und Dauerkulturflächen in der Agri-PV-Markteinführung ausschließt). Das BfN setzt sich dafür ein, dass Agri-PV-Kat.-2-Anwendungen Teil der InnAusV-Festlegung bleiben, doch der DBV möchte Kat.-2-Anwendungen nicht als Gegenstand der InnAusV wissen. Der DBV erachtet die DIN SPEC 91434 für die Abgrenzung von Agri-PV gegenüber PV-FFA und als Qualitätsstandard als unzutreffend und setzt sich dafür ein, dass eine Teilstrommenge aus dem Agri-PV-Projekt auch für die Stromeigenversorgung des landwirtschaftlichen Betriebs verwendet werden darf (BnetzA 2021b).

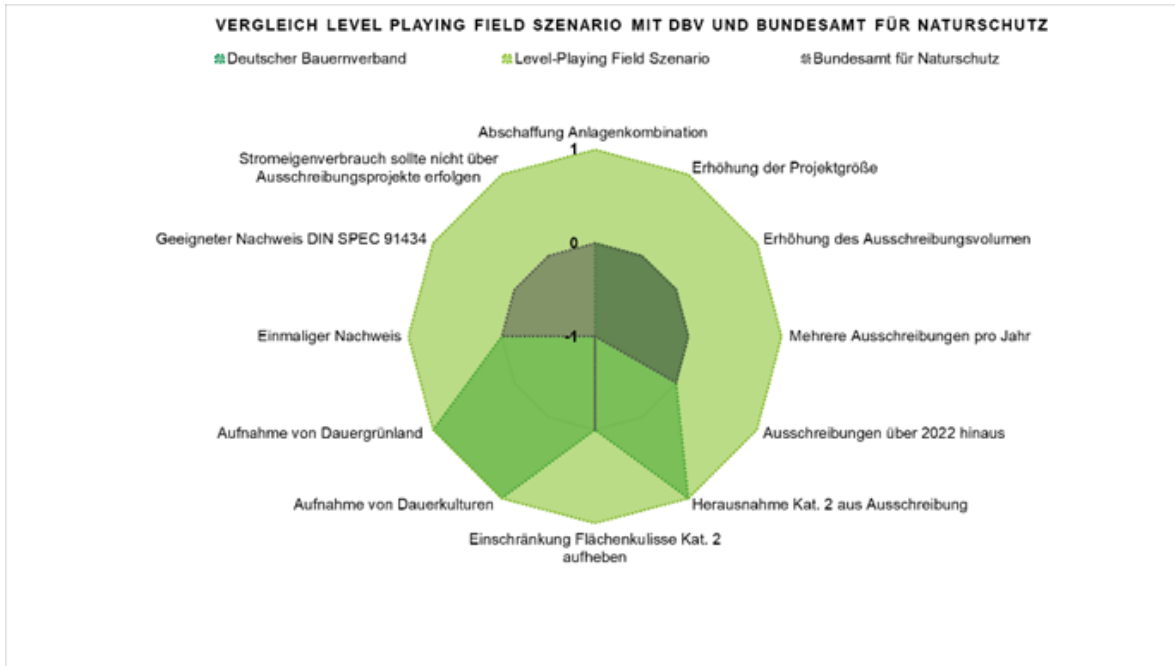


Abbildung 4-2: Parametervergleich Agri-PV-Markteinführung zwischen dem Referenzszenario, dem Deutschen Bauernverband (DBV) und dem Bundesamt für Naturschutz (BfN); (eigene Darstellung)

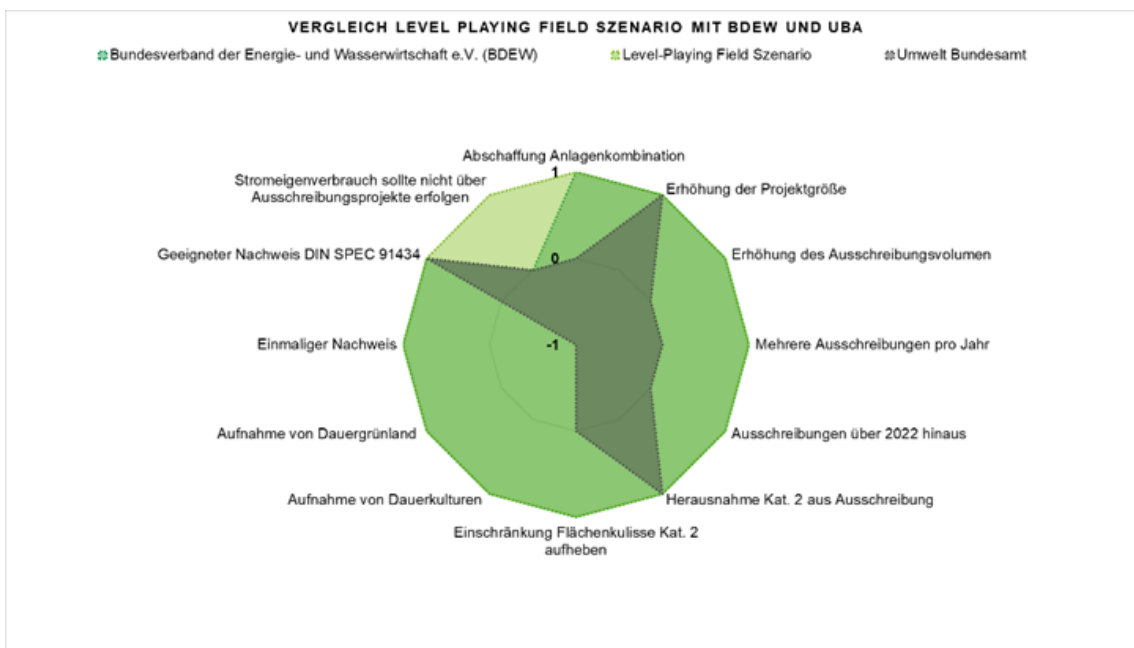


Abbildung 4-3: Parametervergleich Agri-PV-Markteinführung zwischen dem Referenzszenario, dem Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) und dem Umwelt Bundesamt (UBA); (eigene Darstellung)

Das UBA setzt sich dafür ein, dass Agri-PV-Kat.-2-Interspace-PV-Anwendungen aus der InnAusV ausgenommen werden, was im Sinne des DBVs ist, jedoch der BfN-Position gegenübersteht, wodurch ein Widerspruch innerhalb der Akteursgruppe „Umwelt“ aufgezeigt werden kann. Im Vergleich zwischen UBA und BDEW fällt auf, dass dem BDEW ein einmaliger Nachweis zur Agri-PV-Qualitätskontrolle vor Anlagenerrichtung durch die BnetZA genügt, während das UBA vorschlägt, alle drei bis fünf Jahre ein Monitoring und eine Prüfung der Anlagenvoraussetzung vorzunehmen. Die UBA setzt sich ähnlich wie das BfN dafür ein, dass weder Dauergrünland noch Dauerkulturflächen in die zugelassene Flächenkulisse aufgenommen werden. Der BDEW hat die höchste Übereinstimmung mit dem Level Playing Field Szenario von allen Stellungnahmen. Die Akteure BfN und UBA zeigen die geringste Übereinstimmung mit dem Referenzszenario und dem BDEW.

Wirtschaftspolitisch sind besonders die Verbände aus der Energiewirtschaft und dem Umweltsektor gefragt, aus ihren konträren Positionen einen Kompromiss zu erarbeiten. Im Vergleich zwischen BDEW und DBV fällt auf, dass der DBV keine ablehnende Haltung zur Agri-PV-Markteinführung einnimmt (wenig Konfliktpotential), aber zu nur wenigen Policy-Parametern Stellung bezieht. Der DBV gibt durch seine Stellungnahme kaum Einblicke in sein Grundverständnis und seine Sichtweise gegenüber der Agri-PV, was im Koordinationsprozess zu einer hohen Ambiguität führt und die Notwendigkeit einer klaren Agri-PV-Definition sowie Abgrenzung zu herkömmlichen PV-FFA einmal mehr untermauert. In der Gesamtbetrachtung wird festgestellt, dass sich Agrar- und Energieverbände überwiegend einig hinsichtlich der Sinnhaftigkeit der Agri-PV-Markteinführung sind. Der größte Widerstand zur Agri-PV-Markteinführung scheint aus den Interessensvertretungen des Umwelt- und Naturschutzes zu kommen. Zwei Hauptargumente sprechen aus deren Perspektive gegen die Agri-PV-Markteinführung: 1) der Landschaftsbildschutz im ländlichen Raum und 2) dass im Agri-PV-System die konventionelle und intensive Agrarflächennutzung erhalten bleibt. Gegen das Argument Landschaftsbildschutz kann angeführt werden, dass lediglich 2 % der Agrarflächen benötigt werden, um einen sehr umfangreichen Beitrag zum Klimaschutz und zur Energiewende zu leisten. 98 % der Agrarflächen bleiben unbebaut. Gegen das zweite Argument können zwei Gegenargumente angeführt werden: a) Deutschland und die EU sind heute Nahrungs- und Futtermittelimporteure. Eine Verringerung der inländischen Produktion verschiebt das Biodiversitätsproblem ins außereuropäische Ausland, wo Umweltschutzbestimmungen oftmals geringer sind als in der EU, aber die Artenvielfalt (noch)

höher, und b) sollten PV-Biodiversitätsprojekte auf den ertragsniedrigen Agrarflächen umgesetzt werden, damit dort die landwirtschaftliche Tätigkeit zur intensiven Biomasseproduktion eingestellt wird. Diese Projektflächen sollten zur Zielsetzung der 4%-Stilllegungsflächen für den Artenschutz gemäß EU-GAP herangezogen werden, wodurch keine zusätzlichen Agrarflächen für den PV-Ausbau auf Agrarflächen beansprucht werden würden. Auf ertragsreichen Agrarflächen sollte dahingegen weiterhin die landwirtschaftliche Tätigkeit für die Primärproduktion stattfinden. Auf diesen Flächen sollte die Errichtung von Agri-PV-Anlagen zulässig sein, damit die Agrarimportüberschüsse nicht anwachsen und der Artenschutz im außereuropäischen Raum gewährleistet wird. Im EEG-Förderregime sollten Agri-PV-Gebote, die in Verbindung mit ökologischem Landbau abgegeben werden, bevorzugt bewilligt werden, damit auch hier die Interessen der Umweltverbände und des Naturschutzes im Abstimmungsprozess zwischen BMEL und BMWK berücksichtigt sind.

4.2.3 Analyse der BMEL-Verbändeanhörung zur Anpassung der Direktzahlungen-Verordnung (GAPDZV)

Insgesamt gingen 32 Stellungnahmen beim BMEL zum Kabinettsentwurf zur EU-GAP-Direktzahlungen-Verordnung (GAPDZV) ein. In diesem Gesetzesentwurf ist u. a. der Vorschlag enthalten, die Beihilfefähigkeit für die landwirtschaftliche Tätigkeit im Agri-PV-System pauschal mit 85 % zu erhalten, wenn bestimmte Qualitätskriterien eingehalten sind, bspw. darf sich die landwirtschaftliche Nutzfläche unter Zugrundelegung der DIN SPEC 91434 nicht mehr als 15 % verringern. Nur die drei Stellungnahmen von BayWa r.e., dem Bundesverband Neue Energiewirtschaft (BNE) sowie der Vereinigung Deutscher Landesschafzuchtverbände (VDL) gehen auf diese Inhalte im Kabinettsentwurf ein (BMEL 2021c). Zwar begrüßen alle drei die Beihilfefähigkeit für die GAP-Direktzahlungen zu 85 % für die landwirtschaftliche Tätigkeit im Agri-PV-System, allerdings sehen die drei Akteure weiteren Handlungsbedarf im BMEL, um die Agri-PV-Markteinführung effizienter und effektiver zu gestalten.

i) Neue Flächenkategorie im BauGB für multifunktionale Landnutzung: BayWa r.e. macht darauf aufmerksam, dass das BMEL darauf hinwirken sollte, im Baugesetzbuch (BauGB) die Flächenkategorie „landwirtschaftliche Nutzfläche mit integrierter Solarstromerzeugung“ für Agri-PV-Systeme und biodiversitätsfördernde Solarparks zu etablieren. Diese BauGB-Anpassung ist notwendig, damit neben der EU-GAP-Beihilfefähigkeit auch der Flächenstatus

„landwirtschaftliche Nutzfläche“ im Rahmen der Bauleitplanung (Bplan und FNP) erhalten bleibt und die Fläche nicht als Sondergebiet dem täglichen Siedlungsflächenanstieg zugeordnet wird. Nur wenn die Agri-PV-Fläche landwirtschaftliche Nutzfläche bleibt, bleiben auch andere für den landwirtschaftlichen Betrieb essenzielle Regelungen erhalten, bspw. die Berufshaftpflichtversicherung, die nur für Tätigkeiten auf landwirtschaftlichen Betriebsflächen greift, oder die Privilegien für Landwirte in der Erbschaftssteuer, damit bei Hofübergabe nicht der reguläre Erbschaftssteuersatz auf die Ländereien berechnet werden muss.

ii) Beweidung und Nutztierhaltung auf Grünlandflächen in Kombination mit PV-FFA und Agri-PV sollte ebenso EU-GAP-beihilfefähig sein: Die Vereinigung Deutscher Landesschafzuchtverbände (VDL) setzt sich dafür ein, dass auch die Flächenkulisse Dauergrünland und Grünland beihilfefähig ist, und verweist auf das Urteil des Bayerischen Verwaltungsgerichtshof in München, das die Förderfähigkeit von landwirtschaftlicher Tätigkeit in Verbindung mit Weidehaltung in Solarparks entschieden hat. Demnach sind mit „Grünpflanzen bewachsene Flächen einer PV-FFA beihilfefähig im Sinne der Verordnung (EU) Nr. 1307/2013, wenn sie als Schafweide benutzt werden und die Schafbeweidung durch die Anlage nicht stark eingeschränkt ist oder werden kann“ (VGH München 2021). Die VDL fordert daher die GADZV-Beihilfefähigkeit nicht nur für Agri-PV, sondern auch von „normalen“ PV-FFA.

iii) Öko-Regelung sollte auch für Agri-PV greifen: Der BNE fordert in seiner Stellungnahme, dass landwirtschaftliche Tätigkeiten in einem Agri-PV-System im Sinne der Öko-Regelung (Eco-Scheme Measurement) anerkannt und entsprechend aus der 2. Säule der EU-GAP zusätzlich gefördert werden sollten. Hierdurch könnten Anreize an Landwirte gesetzt werden, damit 1) die Betriebsflächen für den Klimaschutz mittels Agri-PV-Doppelnutzung zur Verfügung gestellt werden und 2) etwaige Mehraufwände und Nachteile für Landwirte bspw. durch langsamere Feldbearbeitung im Agri-PV-System oder einen erhöhten Kommunikations- und Koordinationsaufwand kompensiert werden könnten. Ähnlich wie die VDL regt auch der BNE an, dass herkömmliche PV-FFA, die einen zusätzlichen positiven Beitrag zu Klimaschutz, Biodiversität, Natur- und Umweltschutz sowie der ländlichen Entwicklung leisten, ebenfalls im Sinne der „Öko-Regelung“ anerkannt und gefördert werden sollten (BMEL 2021c, S. 46).

4.2.4 Analyse der Experteninterviews, Gruppenfachgespräche und diversen Diskussionsrunden

Weitere ideologische Distanzen in der Koordination der Agri-PV-Markteinführung kamen in Experteninterviews, Gruppenfachgesprächen und diversen Agri-PV-Diskussionsrunden wie bspw. in einem Agri-PV-Workshop des EU Joint Research Centers oder in einer Informationsveranstaltung der Agrarausschussmitglieder der SPD-Fraktion im Bundestag zum Vorschein. Im Folgenden werden Argumente aus diesem Diskurs in die Bereiche Landwirtschaft, Solarwirtschaft, Umwelt sowie entwicklungspolitische Ziele subsumiert:

Landwirtschaft:

i) Landwirte als Hauptprofiteure der Agri-PV-Markteinführung. Externe Investoren fernhalten: Des Öfteren wird von landwirtschaftlichen Akteuren argumentiert, bspw. von Agrarverbänden und einzelnen Landwirten, dass Landwirte nicht nur den landwirtschaftlichen Teil im Agri-PV-System verantworten sollten, sondern als alleiniger Investor auch Betreiber der Agri-PV-Anlage sein sollten. Dies hätte den Vorteil, dass die Abstimmung über das optimale Verhältnis von Agrar- und Solarstromertrag im Projekt obsolet wäre, wenn der gesamte wirtschaftliche Nutzen in eine Personalunion fallen würde. Oftmals wird im selben Argumentationsstrang ergänzt, dass dadurch auch eher kleine bis mittelgroße Agri-PV-Anlagen < 10 Hektar umgesetzt werden und nicht Großanlagen, die gesellschaftlich und agrarstrukturell schwer vermittelbar sind. Zudem sei dadurch auch der teilweise Stromeigenverbrauch auf der Hofstelle möglich. In dieser Argumentationskette soll der Landwirt zum Hauptprofiteur der Agri-PV-Markteinführung werden und nicht Energieinvestoren, die nur daran interessiert seien, möglichst günstig Großprojekte auf Agrarflächen zu realisieren sowie die Partizipationskosten der Landeigentümer und Landwirte in den Projekten gering zu halten, um somit möglichst hohe Profitraten abzuschöpfen.

ii) Alibi- und Pseudo-Agri-PV-Anlagen sollen verhindert werden, indem landwirtschaftliche Mindesterträge erfasst und berichtet werden: Damit gewährleistet ist, dass ein landwirtschaftlicher Mindestertrag auf der Agrarfläche im Agri-PV-System erwirtschaftet wird, sollten die Solarstromverkaufserlöse an den Erfolg oder Misserfolg der landwirtschaftlichen Tätigkeit im Agri-PV-System gekoppelt werden. Dadurch können Alibi- und Pseudo-Agri-PV-Anlagen verhindert werden und die gesellschaftliche Akzeptanz für die

Agri-PV wird gewährleistet. Die Bnetza-Festsetzung der InnAusV für Agri-PV verpflichtet die Angebotssteller jedes Jahr, die Agrarerträge zu dokumentieren und alle drei Jahre einen Agrarbericht an den Netzbetreiber zu entsenden. Sollte der Agrarertrag unter den Minimalanforderungen bleiben, kann der Netzbetreiber es verweigern, den Angebotspreis an die Betreibergesellschaft zu entrichten. In einem Investorenmodell wäre der Eigentümer der Betreibergesellschaft dazu verpflichtet, einen Ersatz für den Landwirt zu finden, der aufgrund persönlicher Einschränkungen, bspw. Krankheit, Todesfall, oder sonstiger Unwägbarkeiten, bspw. höhere Gewalt wie Starkwetterereignis, Insektenplage, oder im Streitfall aus Vorsatz nicht in der Lage ist, die landwirtschaftlichen Mindestanforderungen im Agri-PV-Projekt zu erfüllen.

Solarwirtschaft:

i) Investitionen aus der Energiewirtschaft in die Landwirtschaft lenken, um landwirtschaftliche Betriebe wirtschaftlich zu stärken: Den Agri-PV-Projektierern ist bewusst, dass ein erfolgreiches Agri-PV-Projekt nur durch eine wirtschaftliche Stärkung des teilnehmenden landwirtschaftlichen Betriebs erzielt werden kann. Die wirtschaftlichen Vorteile ergeben sich bei einer Personalunion von Landeigentümer und Landwirt durch vier Einkommensbereiche: 1) ein positiver Deckungsbeitrag aus dem Verkauf der Agrarerträge inklusive der EU-GAP-Zahlungen, 2) eine zusätzliche Flächenpacht überkompensiert einen etwaigen Minderertrag in der Agrarernte, 3) in der technischen Betriebsführung der Agri-PV-Anlage wird der Landwirt, bspw. für die Grünpflege auf der Projektfläche und die PV-Modulreinigung, mit einem Dienstleistungsvertrag einbezogen und 4) der Landwirt kann als Co-Investor in die Agri-PV-Betreibergesellschaft auch von den Stromerlösen profitieren, trägt jedoch nicht das Investitionsrisiko auf seiner Bilanz. Durch diese partnerschaftliche und vertraglich zugesicherte Projektentwicklung kann der Landwirt sein Einkommen steigern und diversifizieren, was die Resilienz gegenüber dem Klimawandel erhöht. In dieser Projektstruktur stehen eher mittelgroße bis große Agri-PV-Projekte > 10 Hektar im Fokus. Der Landwirt kann dadurch seinem Kerngeschäft der Nahrungs- und Futtermittelproduktion treu bleiben und in einem ausgewogenen Verhältnis zu seiner gesamten Betriebsfläche Agrarflächen in die Projektentwicklung einbringen. Die Betriebsflächeninanspruchnahme sollte für PV-FFA und Agri-PV-Anlagen stets weniger als 50 % der gesamten Betriebsfläche eines einzelnen landwirtschaftlichen Betriebs sein.

ii) Finanzierbarkeit von Agri-PV-Projekten ist nur gegeben, wenn das wirtschaftliche Risiko der Agri-PV-Betreibergesellschaft nicht ausschließlich dem landwirtschaftlichen Betrieb zugeteilt wird: Die derzeitige BnetzA-Festsetzung zur InnoAus für besondere Solaranlagen knüpft die Beihilfefähigkeit der Solarstromerlöse an die Agrarerträge im Projekt. Was vordergründig zur Vermeidung von Alibi- und Pseudo-Agri-PV-Anlagen dienen soll, führt im Endeffekt dazu, dass allein der im Projekt teilnehmende landwirtschaftliche Betrieb das wirtschaftliche Risiko der Agri-PV-Betreibergesellschaft trägt. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass die Agri-PV-Betreibergesellschaft zwar das Risiko tragen soll, das Projekt zu finanzieren, aber im technischen Betrieb die Renditeerwartung in die Verantwortung des Landwirts gelegt wird. Der von der BnetzA vorgeschlagene Kontrollmechanismus verhindert die „Bankability“ von Agri-PV-Projekten und schafft darüber hinaus Zusatzstrukturen bei der Datenerfassung und Berichterstattung der Agrarerträge. Die EU-GAP-Dokumentationspflicht über die Schlagkartei in Verbindung mit dem in der Bauleitplanung erbrachten DIN SPEC 91434-Nachweis eines externen Sachverständigen, dass eine dauerhaft, wirtschaftlich tragfähige landwirtschaftliche Tätigkeit im Agri-PV-System möglich ist, sollte genügen, um in der Agri-PV-Markteintrittsphase für hohe Qualitätsstandards in der Projektumsetzung zu sorgen. Eine Bundestagsabgeordnete nannte als Lösung für dieses ideologische Kontrolldilemma „Mut zu Ineffizienzen“. Eine Markteinführung ohne Risiken ist nur durch erhöhte Bürokratisierung zu erreichen, droht ohnehin, neuartige Lösungsansätze im Keim zu ersticken, und verzögert die Agri-PV-Potentialerschließung. In Anlehnung an die theoretischen Hintergründe zur Koordination von Regierungshandeln am Praxisbeispiel Nachhaltigkeits- und Agri-PV-Politik könnten in einer „experimentellen Umsetzung“ zu einem späteren Zeitpunkt in der Diffusionsphase immer noch Gegenmaßnahmen ergriffen und strengere Restriktionskriterien eingeführt werden, sollte tatsächlich vermehrt Fördermissbrauch durch Pseudo-Agri-PV-Projekte in Erscheinung treten. Der Dialog zwischen Wissenschaft, Industrievertretern und den politischen Entscheidungsträger:innen ist daher in der frühen Phase der Agri-PV-Markteinführung von hoher Bedeutung, um den Balanceakt zwischen angemessener Förderung und der Risikominimierung durch die Vermeidung von Mehrdeutigkeiten, Ambivalenzen und weiteren Konfliktpotentialen erfolgreich umzusetzen.

Umwelt:

i) Ausweitung der Flächenkulisse auf Weide- und Dauergrünland: Sowohl die Agrar- als auch die Solarverbände sind sich einig, dass Agri-PV-Projekte auch in der Kombination mit

Weidehaltung auf Dauergrünland ermöglicht werden sollten. Teilweise sind sich auch die Umweltverbände darüber einig, siehe Stellungnahme des BfN zur BnetzA-Konsultation oben. Bei der BnetzA-Festsetzung hat sich die Position des UBAs durchgesetzt, sowohl was die Verknüpfung der Solarstromerlöse an die landwirtschaftlichen Erträge angeht als auch die Einschränkung der Flächenkulisse bei der Agri-PV-Markteinführung. Begründet wird die Einschränkung in der UBA-Stellungnahme nicht. „Rangevoltaic“-Projekte, bei denen Nutztierhaltung, bspw. Rinder- und Geflügelhaltung, für das Tierwohl sinnvoll mit Solartechnologie verknüpft werden, sind daher in Deutschland vom EEG-Ausschreibungsmechanismus förder technisch ausgeschlossen. Beispiele für eine Agri-PV-Rinder- bzw. Geflügelhaltungsanlage sind in den folgenden Abbildungen 4-4 und 4-5 zu sehen:



Abbildung 4-4: Kühe weiden unter einer hochaufgeständerten Agri-PV-Trackeranlage (Quelle: Zimmermann PV-Stahlbau)



Abbildung 4-5: Geflügel scharren unter einer bodennah aufgeständerten Agri-PV-Anlage (Quelle: SunFarming)

ii) Agri-PV-Anlagen fördern nicht die Biodiversität, weil intensive Landwirtschaft beibehalten wird: Der Vorwurf, dass in Agri-PV-Systemen die landwirtschaftliche Tätigkeit nicht wie im Vergleich zu PV-FFA extensiviert wird, sondern die intensive Landwirtschaft mit ihrem Einsatz von Agrochemikalien erhalten bleibt, wird nicht nur aus Umweltverbänden, sondern auch aus der Solarbranche selbst immer wieder angeführt. Dabei verkennt dieser Vorwurf zwei Gegenargumente: erstens, dass dieses Argument nur in einem geschlossenen nationalen System richtig wäre. Deutschland und die EU sind Netto-Nahrungsmittelimporteure und die Stilllegung oder der Verlust von Agrarflächen erhöhen die Importbilanz und verlagern die Agrarproduktion ins außereuropäische Ausland, wo oftmals geringere Umweltstandards vorherrschen, aber ein höherer Anteil an originärer Biodiversität vorhanden ist. Global

betrachtet ist der Nettoverlust an Biodiversität bei genauerer Betrachtung höher, sobald die Agrarproduktion hierzulande reduziert wird – ganz zu schweigen von der Reduktion der Ernährungssicherheit und Nahrungsmittelpreissteigerung in der Exportnation. Zweitens wird einmal mehr verkannt, dass die Zielsetzungen Ausbau der herkömmlichen PV-FFA auf Agrarflächen und Ausweitung der ökologisch bewirtschafteten Agrarflächen von derzeit knapp 10 % auf mindestens 30 % im Jahr 2030 nicht komplementär sind. Die beiden DNS-Zielsetzungen PV-Ausbau und Bioflächenausweitung könnten jedoch kombiniert werden, weil der Agri-PV-Ausbau nicht in Konkurrenz mit Bioflächen tritt, sondern im Gegenteil die Zusatzeinkommen aus der Agri-PV-Beteiligung die wirtschaftlich herausfordernde Umstellungszeit unterstützen könnten.

iii) Agri-PV-Anlagen haben eine negative Auswirkung auf das Landschaftsbild: Im Dezember 2015 fanden parallel die Klimakonferenz in Paris und die Landesdelegiertenkonferenz von Bündnis90/Die Grünen Baden-Württemberg in Reutlingen statt. Am 12. Dezember 2015 führte ich vormittags auf dem Deutschland Pavillon in Paris ein Experteninterview mit Annalena Baerbock und Anton Hofreiter. Baerbock war damals Sprecherin für Klimapolitik der Bundestagsfraktion, Bündnis90/Die Grünen, und hörte erstmalig von der Agri-PV-Idee. Sie erkannte den Nutzen, den diese Idee der Landwirtschaft zur Anpassung an den Klimawandel, aber auch gleichzeitig zur Dekarbonisierung des Agrarsektors leisten konnte, und lud mich in die Bundesarbeitsgemeinschaft Energie ihrer Partei für einen Vortrag nach Berlin ein. Am selben Tag wurde in Reutlingen über einen Antrag abgestimmt, ob die Grünen im Wahlprogramm zur Landtagswahl 2013 das Ziel aufnehmen möchten, die Agri-PV-„Forschung“ in Baden-Württemberg zu unterstützen. Hans-Peter Behrends, MdL der Grünen-Landtagsfraktion in BaWü, war damals Sprecher der Landesarbeitsgemeinschaft Ökologie und sprach sich für die Agri-PV-Forschung aus. Gegen den Antrag sprach der damalige Minister für Ernährung, Ländlichen Raum und Verbraucherschutz in BaWü, Alexander Bonde. Als Hauptargument gegen die Agri-PV-Forschung führte dieser die negative Auswirkung auf das Landschaftsbild in BaWü an. Die Landesdelegiertenkonferenz (LDK) stimmte für Bonde und lehnte die Agri-PV-Forschung⁵ in

⁵ An dieser Stelle soll nochmals betont werden, dass der Antrag die Unterstützung für die Agri-PV-Forschung forderte. Es ging dabei nicht um die Agri-PV-Markteinführung in BaWü. Bonde lenkte die Debatte jedoch auf letzteres und die LDK stimmte gegen den Antrag. In seiner Rede zeigte Bonde ein Foto einer herkömmlichen PV-FFA und verwies darauf, dass diese Art von

BaWü ab. Dieses Beispiel soll verdeutlichen, dass innerhalb einzelner Akteure und Akteursgruppen die Meinungen divergieren können und dass das finale Argument gegen die Agri-PV stets das Argument des Landschaftsbildschutzes ist. Dabei unterscheiden sich die Landschaftsbilder zwischen bestehenden Hagelschutzvorrichtungen, Regenhaubenschutzsystemen und Agri-PV-Anwendungen der Kat. 1 kaum, wie die Abbildungen 4-6, 4-7 und 4-8 veranschaulichen.



Abbildung 4-6: Landschaftsbild mit Hagelschutznetzen am Bodensee (Quelle: BayWa AG)



Abbildung 4-7: Regenhauben als Beerenchutzsystem in Babberich, Niederlande (Quelle: BayWa r.e. AG)



Abbildung 4-8: Agri-PV als Beerenchutzsystem in Babberich, Niederlande (Quelle: BayWa r.e. AG)

Entwicklungspolitische Ziele:

i) Unterstützung der Agri-PV-Diffusion aus dem BMZ: Nachdem das BMZ im Jahr 2013 die Unterstützung eines Agri-PV-Pilotvorhabens bei der Entwicklungsinitiative SEKEM in Ägypten abgelehnt hatte (siehe Kapitel 1, Entwicklungsgeschichte der Agri-PV in Deutschland), fand in den Folgejahren ein Umdenken statt. Im Jahr 2017 besuchte BMZ-Minister Dr. Gerd Müller (CSU) die Agri-PV-Pilotanlage auf Versuchsflächen der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf und sprach sich dort für die Umsetzung weiterer Agri-PV-Projekte in Afrika aus. Die Grundidee von Agri-PV-Anlagen stützt die entwicklungspolitische Zielsetzung der BMZ-Sonderinitiative „EINEWELT ohne Hunger“. Die vom BMZ geförderten 14 Grünen

PV-Technik den „Feldhasen“ und die „Feldlerche“ vertreibe. Paradoxerweise wurde bei der Agri-PV-Anlagenumsetzung in Heggelbach die Feldlerche erfasst und im Umweltbericht positiv bewertet, dass die Nistplätze im Feld durch die Agri-PV-Technik erhalten bleiben. Ebenso wurde positiv bewertet, dass für die Wildtiere, die im angrenzenden Wald leben, die Futtermittelverfügbarkeit auf dem Feld im Agri-PV-System erhalten bleibt, bspw. Kartoffeln, Klee gras und Weizen. Hiervon dürfte auch der von Bonde genannte Feldhase profitieren. Bonde lieferte durch seine Rede ein Paradebeispiel für nicht evidenzbasierte Politik und verstärkte dadurch den Widerstand gegen den PV-FFA- und Agri-PV-Ausbau in Deutschland.

Innovationzentren der Agrar- und Ernährungswirtschaft könnten zur Umsetzung von Agri-PV-Anlagen beisteuern (Radlmayr und Kohlrausch 2017). Zwischenzeitlich erhielt das Fraunhofer ISE Förderzusagen für die Umsetzung von Agri-PV-Projekten in Vietnam, Mali und Gambia durch das BMBF-Förderprogramm Client 2 (Fraunhofer ISE 2022b) sowie in Algerien durch das EU-Förderprogramm EU PRIMA-H2020 (Fraunhofer ISE 2022c). Die KfW finanzierte eine umfangreiche Machbarkeitsstudie für die Umsetzung einer großflächigen Agri-PV-Anlage im Bundesstaat Maharashtra in Indien (Trommsdorff et al. 2019) und weitere internationale Organisationen aus der Entwicklungszusammenarbeit förderten den Agri-PV-Technologietransfer, bspw. die Koreanische Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (KOICA) gemeinsam mit dem Green Climate Fund (GCF) zur Umsetzung einer Agri-PV-Anlage in Fiji (Green Climate Fund 2020).

ii) Unterstützung der Agri-PV-Diffusion aus dem Auswärtigen Amt (AA): Im Rahmen meiner Promotion führte ich kein Fachgespräch mit Vertretenden aus dem AA. Entwicklungspolitische Fragestellungen im Bereich der Agri-PV-Diffusion in Schwellen- und Entwicklungsländern sind nicht im Fokus der vorliegenden Arbeit. Im Kabinett Scholz verantwortet das AA die internationale Klimapolitik der Bundesregierung. Das AA führt die deutsche Delegation zu den UN-Klimakonferenzen und koordiniert gemeinsam mit dem BMZ die Klimapartnerschaften (Auswärtiges Amt 2022). Die Internationale Klimaschutzinitiative (IKI) wird zwar vom BMWK koordiniert, stimmt die Umsetzung jedoch eng mit dem BMUV und dem AA ab (BMWK 2022b). Vor dem Hintergrund der Parteizugehörigkeit von Ministerin Baerbock (Bündnis90/Die Grünen), dem Wahlprogramm der Grünen-Partei im Jahr 2021 und dem Koalitionsvertrag der Ampel-Regierung ist im ressortübergreifenden Koordinationsprozess zur Agri-PV-Markteinführung in Deutschland mit hoher Wahrscheinlichkeit eine Unterstützung durch das AA zu erwarten. Die Glaubwürdigkeit der Bundesregierung steigt in der Außenpolitik, wenn die nationalen Klimaschutzziele eingehalten werden sowie der PV-Ausbau im Einklang mit der Landwirtschaft umgesetzt wird und gleichzeitig Innovationen unterstützt.

iii) Absehbare Hungerskrise in den Jahren 2023 und 2024 aufgrund Ernterückgang in der Ukraine: Im Juli 2022 wurde zwischen Russland, der Ukraine, Türkei und den UN eine Vereinbarung getroffen, die den sicheren Transport von Getreide und Lebensmitteln aus ukrainischen Häfen gewährleisten soll (UN 2022). Die von der Ukraine auszuführende Ernte im Jahr 2022 wurde bereits im Jahr 2021 landwirtschaftlich bestellt und im Frühsommer 2022

geerntet. Trotz widriger Umstände aufgrund des russischen Angriffskrieges konnten die ukrainischen Landwirte ihren Anteil zur Welternährung im Jahr 2022 beisteuern und dank der genannten Vereinbarung konnte die Ernte auch gehandelt und logistisch verteilt werden. Während des 17. Internationalen Kongresses für Erzeugerorganisationen im Bereich Obst und Gemüse (ICOP) in Weiz, Österreich, im Oktober 2022, berichtete ein ukrainischer Bauernvertreter, dass sich die Situation zwischenzeitlich für die ukrainischen Landwirte sehr verschlechtert hat. Viele Landwirte können ihre Felder aufgrund von Diesellengpässen nicht mehr bestellen. Diesel wird für den Betrieb von Notstromaggregaten und für militärische Zwecke, bspw. Treibstoff für Panzer und Militärfahrzeuge, benötigt. Gleichzeitig fehlen den landwirtschaftlichen Betriebsleiter:innen unzählige Erntehelfer:innen und Junglandwirte wurden zur Verteidigung der Ukraine zum Wehrdienst einbezogen. Der Ukrainische Bauernverband rechnet mit einem Ernterückgang von über 50 % im Jahr 2023, was zu einer deutlichen Abnahme der Ernährungssicherheit in vielen Getreide-Importländern führen wird sowie zu steigenden Weltmarktpreisen. Die Wahrscheinlichkeit von Hungersnöten in den Jahren 2023 und 2024 steigt dadurch. In der EU und Deutschland führen diese Hintergründe dazu, dass Flächenstilllegungen von 4 % des Ackerlandes eines Betriebs teilweise mit dem Anbau bestimmter Kulturen erfüllt werden können, u. a. dürfen auf Brachflächen zusätzlich Getreide (ohne Mais), Leguminosen (ohne Sojabohne) oder Sonnenblumen angebaut werden, damit der Agrarminderertrag aus der Ukraine zumindest teilweise durch die EU kompensiert werden kann (MLR BaWü 2022a). Für die PV-Umsetzung auf Agrarflächen ist zu erwarten, dass die gesellschaftliche und politische Akzeptanz von mono-funktionalen PV-Anwendungen tendenziell abnimmt und die Zustimmung gegenüber multi-funktionalen Ansätzen, die zum Erhalt der Nahrungsmittelproduktion und zum Biodiversitätsschutz beitragen und somit im Einklang mit Landwirtschaft und Naturschutz sind, gesellschaftspolitisch eher steigt.

4.2.5 Agenda Setting und Spin-Doctoring: Ergänzungen zur Agri-PV-Markteinführung

Für eine erfolgreiche Politikkoordination, wie in diesem Fall die „Agri-PV-Markteinführung aus einem Guss“, sind gemäß Fritz W. Scharpf zwei Aspekte entscheidend (siehe Kapitel 2.3 „Koordination von Regierungshandeln in Deutschland – Theorie“): 1) Wie groß ist das Konfliktpotential im ressortübergreifenden Koordinationsprozess? Und 2) wie groß sind der Problemlösungsdruck und das Krisenbewusstsein in der Öffentlichkeit? Der erste Aspekt wurde

in den Kapiteln 4.2.1–4.2.4 beantwortet. Der zweite Aspekt beinhaltet eine gesellschaftspolitische Debatte über unterschiedliche Lösungsoptionen zum Nachhaltigen Landmanagement und dadurch zur Welternährungskrise. In diesem Zusammenhang spielen das Agenda Setting und Spin-Doctoring eine entscheidende Rolle. In mehreren Fachgesprächen wurde angemerkt, dass in Relation zu den Agri-PV-Wirkungspotenzialen folgende Themen im politischen Agenda Setting priorisiert angegangen werden müssten, weil sie über eine höhere Wirksamkeit auf den Agrarflächenerhalt, Nachhaltiges Landmanagement und/oder die Steigerung der globalen Ernährungssicherheit verfügen. In dieser Logik wird zwar die Agri-PV als ein Lösungsbeitrag zur ressourceneffizienten Landnutzung erachtet und gewürdigt, doch wird darauf hingewiesen, dass zusätzliche und effektivere Lösungen bereitstehen. Diese sachlich wirksameren Ansätze bergen jedoch ein größeres Konfliktpotential als die Agri-PV und resultieren damit in höheren politischen Kosten.

i) Geringerer Fleischkonsum zur Reduktion des Futtermittelanbaus: In Deutschland wurde im Jahr 2021 auf etwa 16,6 Millionen Hektar Landwirtschaft betrieben. Davon wird auf rund 10 Millionen Hektar, ca. 60 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche, Futter für Nutztiere angebaut, wobei hierzu je zur Hälfte Grünland oder Ackerland genutzt wurde (Bundesinformationszentrum Landwirtschaft 2021). Zum Vergleich, bis zum Jahr 2018 wurden in Deutschland ca. 17.100 Hektar landwirtschaftliche Nutzfläche für die Installation von PV-FFA beansprucht, darunter 13.300 Hektar Ackerland und 3.800 Hektar Grünland. Dies entspricht einem Anteil von rund 0,1 % der gesamten landwirtschaftlichen Nutzfläche (Böhm 2022). In dieser Argumentation führt ein geringerer Fleischkonsum zu einem reduzierten Bedarf an Futteranbaufläche. Diese freigewordenen Anbauflächen könnten einerseits für die direkte Erzeugung von Nahrungsmitteln herangezogen werden und andererseits für PV-FFA mit Biodiversitätsmaßnahmen (BioDiv-Maßnahmen) auf Ackerflächen mit geringer Bodenqualität. Allerdings machte im Bundeswahlkampf 2013 die Grünen-Partei die negative Erfahrung mit dem „Veggie-Day“ und beschloss auf einer Bundesdelegiertenkonferenz im November 2014, sich vom „Veggie-Day“ zu verabschieden (Kade 2014). Der politische Appell zur Reduktion von Fleischkonsum bleibt bei den Grünen zwar bestehen, allerdings erscheint das politische Risiko, gesellschaftliche Akzeptanz und Wählerstimmen zu verlieren, als zu hoch, als dass die zuständigen Grünen-Minister:innen dieses Thema erneut auf die Agenda setzen.

ii) Reduktion des Biokraftstoffanbaus, insbesondere für Bioethanol (E5, E10) und Biodiesel, und mehr direkte Solarstromerzeugung für die Elektromobilität: In

Deutschland wurden im Jahr 2019 auf 727.500 Hektar Pflanzen für Bioethanol und Biodiesel auf Ackerflächen angebaut (FNR 2022). Anstelle der Beimischung von Biokraftstoffen könnte die Ackerfläche direkt für PV-BioDiv-Anlagen und Agri-PV beansprucht werden und dadurch würde die Flächennutzungseffizienz wesentlich erhöht. Seit Jahrhunderten erzeugen Landwirte Energie: vor der Industrialisierung durch Futtermittelproduktion für Pferde- und Ochsenespanne sowie Forst- und Kohlewirtschaft, zwischenzeitlich durch die Biokraftstoffproduktion (E5, E10, Biodiesel) während des fossilen Zeitalters. In Zukunft und bedingt durch die fortschreitende Elektrifizierung durch die Sektorenkopplung sollte es zum Berufsbild der Landwirte gehören, dass auf einem untergeordneten Teil ihrer landwirtschaftlichen Betriebsfläche mittels PV-Anwendungen auch Solarstrom geerntet wird. Sowohl der Agrarsektor als auch der EE-Sektor haben nur geringfügiges Interesse daran, unterschiedliche EE-Technologien gegeneinander auszuspielen. Dementsprechend „ruhig“ gestaltet sich die Debatte über die Reduktion des Biokraftstoffanbaus in der Verbandspolitik. Auf Bundesebene der Ministerialverwaltung haben sich die beiden von Grünen geführten Ministerien BMUV (Ministerin Lemke) und BMEL (Minister Özdemir) darauf geeinigt, die Verwendung von Biokraftstoffen aus Anbaubiomasse bis 2030 zu beenden, wodurch rund 1,1 Millionen Hektar Anbaufläche der Nahrungs- und Futtermittelproduktion zugeführt werden können (agrarheute 2022). Durch die politische Zielsetzung, den PV-Ausbau in den Einklang mit Landwirtschaft und Naturschutz zu bringen, können Landwirte an der Energiewende teilhaben, ohne dass ökologische und ökonomische Nachteile auf ihren Betriebsflächen entstehen.

iii) Entkopplung des Wirtschaftswachstums und Wohlstandssteigerung von weiterer Agrarflächeninanspruchnahme: Wirtschaftswachstum und steigender Wohlstand führen zu steigendem Bedarf an Agrarflächennutzung für die Ausweisung von Gewerbe-, Freizeit- Wohn- und Verkehrsflächen. Dadurch steigt der Anteil der Siedlungsfläche an der Gesamtfläche Deutschlands. Nachdem die DNS-Ziele für ein Nachhaltiges Landmanagement und die Reduktion des täglichen Siedlungsflächenanstiegs bereits 2020 verfehlt wurden und auch absehbar ist, dass im Jahr 2030 die Ziele nicht erreicht werden, stellt sich die Frage, ab wann die kommunale Ebene und Baubranche in die Pflicht genommen werden, neue Nutzflächen nicht in der Breite und somit auf Agrarflächen im Umland urbaner Ballungsräume zu entwickeln, sondern mehr in die Höhe und auf bereits vorhandenen Siedlungsflächen. Indem der tägliche Siedlungsflächenanstieg tatsächlich reduziert wird, entstehen weniger Landnutzungskonkurrenzen auf kommunaler Ebene und der PV-BioDiv-Ausbau kann mit

geringeren Widerständen genehmigt werden. Im Vierjahresdurchschnitt zwischen 2016 und 2019 ist die Siedlungs- und Verkehrsfläche täglich um durchschnittlich 52 Hektar am Tag gewachsen bzw. rund 19.000 Hektar im Jahr (Destatis 2021). Baugenehmigungen für neue Siedlungs- und Verkehrsflächen werden auf Ebene der Kommune und Landkreise erteilt. Die kommunalpolitischen Interessen laufen den bundespolitischen Interessen zuwider und die „Politikverflechtungsfalle“ nach Arthur Benz (siehe Kapitel 2.3) bringt die Unfähigkeit des föderalistischen Systems zum Ausdruck, dass keine einfachen Lösungen zur Reduktion des täglichen Siedlungsflächenanstiegs zu erwarten sind. Im Frühjahr 2021 lösten kritische Äußerungen des Grünen-Politikers Anton Hofreiter zum Thema Einfamilienhäuser eine politische Debatte über das „Verbot von Einfamilienhäusern“ aus (Hirsch 2021). Ähnlich wie bei der Diskussion um den „Veggie-Day“ steht die Grünen-Partei vor der Herausforderung, eine sachlich richtige Kritik in eine politisch unbeliebte Konsequenz umzusetzen. Die politisch verantwortlichen und betroffenen Ministerien BMUV, BMEL, BMWK und BMWSB werden in absehbarer Zeit kaum eine Lösung finden (wollen), um dem Agrarflächenverlust durch die Einschränkung der kommunalen Planungshoheit Einhalt zu gebieten.

Zwischenfazit der Akteursanalyse Kapitel 4.2.: Die Regierungsparteien der Ampelkoalition und die CDU/CSU-Union als größte Oppositionspartei sind sich einig, dass die Agri-PV-Markteinführung politisch unterstützt werden sollte. Auch die Ministerialverwaltung auf Bundesebene scheint sich einig zu sein und sowohl das BMEL als auch BMWK haben die Agri-PV in ihre jeweiligen Agrar- und Energie-Förderregime integriert. Die Auswertungen der Konsultationen im Gesetzgebungsprozess ergaben, dass sich auch die Agrar- und Energieverbände überwiegend einig sind. Der größte Widerstand zur Agri-PV-Markteinführung scheint aus den Interessensvertretungen des Umwelt- und Naturschutzes zu kommen. Zwei Hauptargumente, sprechen aus deren Perspektive gegen die Agri-PV-Markteinführung: 1) der Landschaftsbildschutz im ländlichen Raum und 2) dass im Agri-PV-System die konventionelle und intensive Agrarflächennutzung erhalten bleibt. Gegen das Argument Landschaftsbildschutz kann angeführt werden, dass lediglich 2 % der Agrarflächen benötigt werden, um einen sehr umfangreichen Beitrag zum Klimaschutz und zur Energiewende zu leisten. 98 % der Agrarflächen bleiben somit un bebaut. Gegen das zweite Argument können zwei Gegenargumente erwähnt werden: a) Deutschland und die EU sind heute Nahrungs- und Futtermittelimporteure. Eine Verringerung der inländischen Produktion verschiebt das Biodiversitätsproblem ins außereuropäische Ausland, wo Umweltschutzbestimmungen oftmals geringer sind als in der EU, aber die Artenvielfalt (noch

höher. b) PV-Biodiversitätsprojekte sollten auf den ertragsniedrigen Agrarflächen umgesetzt werden, damit dort die landwirtschaftliche Tätigkeit zur intensiven Biomasseproduktion eingestellt wird. Diese Projektflächen sollten zur Zielsetzung der 4%-Stilllegungsflächen für den Artenschutz gemäß EU-GAP herangezogen werden, wodurch keine zusätzlichen Agrarflächen für den PV-Ausbau auf Agrarflächen beansprucht werden würden. Auf ertragsreichen Agrarflächen sollte dagegen weiterhin die landwirtschaftliche Tätigkeit für die Primärproduktion stattfinden. Auf diesen Flächen sollte die Errichtung von Agri-PV-Anlagen zulässig sein, damit die Importüberschüsse nicht anwachsen und der Artenschutz im außereuropäischen Raum gewährleistet wird. Raumplanerisch sollte anerkannt werden, dass nicht immer dort, wo ertragsniedrige Agrarflächen liegen, auch ein Netzanschluss in Reichweite liegt, der eine wirtschaftliche Umsetzung eines PV-Projekts ermöglichen würde. Umgekehrt erhöht die Ermächtigung von Agri-PV-Umsetzung auf ertragsreichen Agrarflächen die Wahrscheinlichkeit, geeignete Netzanschlüsse für die Stromabnahme zu identifizieren. Im EEG-Förderregime sollten Agri-PV-Gebote, die in Verbindung mit ökologischem Landbau abgegeben werden, bevorzugt bewilligt werden, damit auch hier die Interessen der Umweltverbände und des Naturschutzes im Abstimmungsprozess zwischen BMEL und BMWK berücksichtigt sind. Besonders in der frühen Phase der Agri-PV-Markteinführung bedarf es „Mut zu Ineffizienz“ im Koordinationsprozess. Gemäß Matland und seinem „Ambiguity-Conflict Model“ entspricht die Agri-PV-Markteinführung einer „experimentellen Politikumsetzung“, mit relativ geringem Konfliktniveau, aber einer hohen Ambiguität zur Agri-PV-Definition, bspw. was die Zulassung der Agri-PV auf unterschiedlichen Agrarflächenkulissen angeht. Die DIN SPEC 91434 könnte durch die Mindestanforderungen an die landwirtschaftliche Tätigkeit die Ambiguität und somit den Widerstand insbesondere aus den Agrarverbänden reduzieren. Bei einer experimentellen Politikumsetzung sind politisches Lernen und die Bereitschaft zur Politikanpassung in den Folgejahren nach der Einführungsphase obligatorisch.

4.3 Policy-Dimension: Welche gesetzlichen Rahmenbedingungen im Mehr-Ebenen-System stehen der Agri-PV-Markteinführung innovationshemmend entgegen?

In der folgenden Tabelle 4-1 sind relevante gesetzliche Rahmenbedingungen im Mehr-Ebenen-System angeführt, die von der Agri-PV-Markteinführung betroffen sind. Zudem gibt die Tabelle Auskunft über die Innovationsbewertung der Gesetzgebung und darüber, weshalb ein Gesetz möglicherweise innovationshemmend gegenüber der Agri-PV-Markteinführung wirkt. Die Agri-PV-Innovationsbewertung wird in drei Kriterien unterschieden: „+1“ bedeutet überwiegend positive Policy-Inhalte für die Agri-PV-Markteinführung, „0“ meint indifferent, d. h. weder positive noch negative Auswirkungen, und „-1“ bedeutet negative Auswirkungen auf die Agri-PV-Markteinführung und Policy-Anpassungen sind notwendig. Für die Bewertung, ob ein Gesetz innovationsfördernd „+1“ oder innovationshemmend „-1“ ist, wurden im Wesentlichen vier Parameter evaluiert: i) Ambivalenz: ist die Zielsetzung des Gesetzes mit dem Wirkungspotential der Agri-PV-Diffusion im Einklang oder im Widerspruch; ii) Komplementarität: sind die Policy-Inhalte, bspw. technischer oder bürokratischer Natur, für die Agri-PV-Diffusion hinderlich oder ineffizient; iii) Ambiguität: sind Deutungsspielräume enthalten, ob und wie die Agri-PV im Gesetz berücksichtigt ist, bspw. wird die Agri-PV explizit genannt, um Mehrdeutigkeit und somit Unsicherheit und Willkür in der Verwaltung zu vermeiden; und iv) Budget: ist für die Agri-PV im Förderregime eine Mengen- oder Preissteuerung berücksichtigt, damit die Diffusion unterstützt wird.

Aus der Multi-Level-Policy-Analyse gehen zwei Erkenntnisse hervor: erstens, dass sich Gesetzgebungen aus der EU in den nationalen und kommunalen Gesetzgebungen widerspiegeln und somit die Beanstandungen auf EU-Ebene hinunterbrechen bis auf die regionalpolitische Ebene. Für die Agri-PV-Markteinführung ist es wichtig, dass möglichst klare Zielsetzungen und Gesetzgebungen zur Agri-PV in Brüssel beschlossen werden, damit die politischen und rechtlichen Weichen in den Mitgliedstaaten, bis hinunter zu den regionalen und kommunalen Entscheidungsträgern, richtiggestellt werden können. Dieses Prinzip entspricht der Top-Down-Politikumsetzung, siehe Kapitel 2.3.2 „Theoretische Grundlagen Teil 2“. Zweitens sind manche politischen Zielsetzungen, bspw. die Einführung einer Flächenkreislaufwirtschaft ab 2050, weder auf EU-Ebene noch auf nationaler Ebene gesetzlich verordnet worden. Bisher sind diese

Nachhaltigkeitsziele zwar formuliert und öffentlich kommuniziert, aber Stand heute noch nicht rechtlich verbindlich einzuhalten. In der Multi-Level-Policy-Analyse wurde nur eine politische Zielsetzung – der „Fahrplan für ein ressourcenschonendes Europa“ aus dem Jahr 2011 – aufgenommen, weil sich diese Zielsetzung im europäischen Green Deal, der Farm-to-Fork Strategie und im nationalen Klimaschutzplan wiederfindet und daher über eine hohe politische Wirksamkeit verfügt. Seit der Umsetzung des APV-RESOLA-Pilotvorhabens im Jahr 2016 sind insgesamt 17 Gesetzgebungen mit Relevanz auf die Agri-PV-Markteinführung identifiziert worden. Die Umsetzung einer Agri-PV-Anlage als Fallstudie im realitätsnahen Umfeld hilft, die Widersprüche im Mehr-Ebenen-System offenzulegen und die Top-Down-Zielsetzungen mit den lokalen Begebenheiten und Herausforderungen abzugleichen. Fallstudien unterstützen somit eine „Bottom-Up“-Politikumsatzung. Im Unterkapitel 4.4.2 wurden das Politikziel Agri-PV-Markteinführung in den Mittelpunkt gestellt und die Gesetzgebungen in vier Transformationsbereiche, Landwirtschaft, Energie, Umwelt und Bau, eingeordnet. Drei der vier Transformationsbereiche werden gemäß dem Ressortprinzip der bundesstaatlichen Ministerialverwaltung unter Federführung des Grünen-Koalitionspartners koordiniert (BMEL, BMWK, BMUV), wodurch eine Koordinationskonzentration und ein Kompetenz-Cluster bei der Grünen-Partei zugewiesen werden können. Seit 2016 haben sich einige der 17 Gesetze weiterentwickelt und wurden bereits auf die Agri-PV-Lösung angepasst, einige befinden sich derzeit in der parlamentarischen Abstimmung, bspw. die GAPDZV oder das EEG 2023. Zwölf Gesetzgebungen sind in der Agri-PV-Innovationsbewertung als innovationshemmend („-1“) bezeichnet und aus Sicht einer möglichst ambitionierten Agri-PV-Markteinführung sind in diesen Gesetzen Nachbesserungen möglich, um den Schritt von der Innovation zur Diffusion zu erleichtern. Wie genau sich die einzelnen gesetzlichen Rahmenbedingungen ändern sollten, damit die „Agri-PV-Markteinführung aus einem Guss“ unterstützt wird, ist in Unterkapitel 5.1.2 beantwortet. Hierin werden in absteigender Priorität sechs Gesetzesanpassungen empfohlen, die in der folgenden Übersichtstabelle in der Spalte Agri-PV-Innovationsbewertung mit „-1*“ gekennzeichnet sind.

Tabelle 4-1: Übersichtstabelle Mehr-Ebenen-Policy-Analyse der Agri-PV-Markteinführung in Deutschland (eigene Darstellung)

Nr.	Policy-Ebene	Policy-Name	Policy-Abkürzung	Datum	Agri-PV Innovationsbewertung	Begründung Agri-PV-Innovationshemmnis
1	EU	Fahrplan für ein ressourcenschonendes Europa	KOM(2011) 571	20.09.2011	+1	
2		Europäisches Klimagesetz: Verordnung zur Schaffung des Rahmens für die Verwirklichung der Klimaneutralität und zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 401/2009 und (EU) 2018/1999	32021R1119	09.07.2021	+1	
3		Finanzierung GAP-Strategiepläne: Verordnung (EU) 2021/2115 mit Vorschriften für die Unterstützung der von den Mitgliedstaaten im Rahmen der gemeinsamen Agrarpolitik zu erstellenden und durch den EU-Garantiefonds für die Landwirtschaft (EGFL) und den EU-Landwirtschaftsfonds für die Entwicklung des ländlichen Raums (ELER) zu finanzierenden Strategiepläne (GAP-Strategiepläne) und zur Aufhebung der Verordnung (EU) Nr. 105/2013 sowie Nr. 1307/2013	32021R2115	02.12.2021	+1/0/-1	-Agri-PV wird nicht als mögliches Eco-Scheme Measurement angeführt -Bei der Kommentierung der EU-Kommission der nationalen GAP-Strategiepläne könnte auf die Agri-PV als Beitrag zu Nachhaltigem Landmanagement hingewiesen werden
4		Richtlinie zur Erhaltung der natürlichen Lebensräume sowie der wildlebenden Tiere und Pflanzen	EU-Richtlinie 92/43/EWG	21.05.1992	-1	-Agri-PV-ÖkoL und PV-BioDiv werden nicht als Ausgleichsflächen betrachtet, sondern müssen durch die Eingriffsregelung bei baurechtlichen Vorhaben im Außenbereich Ausgleichsflächen ausweisen, wodurch weitere Agrarflächen beansprucht werden
5		Horizon Europe Work Programme 2021-2022 8. Climate, Energy and Mobility	C(2021)9128, HORIZON-CL5-2022-D3-01-06: Novel Agro-Photovoltaic systems	15.12.2021	+1/0/-1	-Agri-PV-Normierung und -Standardisierung kann nicht über diese Forschungsförderung finanziert werden und keine anderen Töpfe stehen hierzu derzeit bereit
6	Bund	Bundes-Klimaschutzgesetz	19/30230	02.06.2021	+1	
7		Richtlinie zur Förderung der Energieeffizienz und CO ₂ -Einsparung in Landwirtschaft und Gartenbau. Teil A – Landwirtschaftliche Erzeugung, Wissenstransfer	-	18.08.2021	+1/-1*	-Als Grundlage zum Fördermittelantrag wird ein Energiekonzept für den landwirtschaftlichen Betrieb benötigt, das durch einen auf Landwirtschaft spezialisierten Energieberater erarbeitet werden muss. Oftmals haben die Energieberater keine Agri-PV-

4.3 Policy-Dimension: Welche gesetzlichen Rahmenbedingungen im Mehr-Ebenen-System stehen der Agri-PV-Markteinführung innovationshemmend entgegen?

						Kompetenz und können somit diese Technologie nicht in das Energiekonzept für den Hof berücksichtigen -Für die Finanzierung der Investitionen in die Umsetzung des Energiekonzepts wird Fremdkapital benötigt. Die landwirtschaftliche Rentenbank stellt keine Zinsvergünstigungen für Agri-PV-Investitionen zur Verfügung bzw. nennt die Agri-PV nicht explizit
8	Bund	Verordnung zur Durchführung der im Rahmen der GAP finanzierten Direktzahlungen (GAP-Direktzahlungen-Verordnung – GAPDZV)	GAPDZV	24.11.2021	+1	
9		GAP-Strategieplan für die Bundesrepublik Deutschland	2023DE06AFSP001	Version 1	+1/0/-1*	-Agri-PV wird nicht als mögliches Eco-Scheme Measurement angeführt -Agri-PV und Ausbau-Ökolandbau werden nicht kombiniert betrachtet -Agri-PV könnte ähnlich wie Gewächshäuser und Kulturschutzsysteme als Strategie zur Anpassung an den Klimawandel erachtet werden
10		Referentenentwurf Entwurf eines Gesetzes zu Sofortmaßnahmen für einen beschleunigten Ausbau der erneuerbaren Energien und weiteren Maßnahmen im Stromsektor	EEG2023	04.03.2022	+1/0/-1*	-Bonuszahlung für Agri-PV Kat. 1 ist nicht ausreichend hoch für wirtschaftliche Markterschließung; eigene Ausschreibung als Alternative nicht enthalten -Bezugnahme auf die BNetzA-Festlegung InnAusV zu Agri-PV: Solarstromerlöse werden in Abhängigkeit der Agrarerträge gestellt -Flächenkulisse Dauergrünland wird von der Agri-PV-Markteinführung ausgeschlossen
11		Bundesnetzagentur Festlegung Anforderungen für besondere Solaranlagen	Az.: 8175-07-00-21/1	01.10.2021	-1*	-Solarstromerlöse werden in Abhängigkeit der Agrarerträge gestellt -Alle drei Jahre Nachweispflicht gegenüber Netzbetreiber durch gutachterliche Bestätigung -Ausschluss von Dauergrünland, Dauerkulturen und Flächen unter Gewächshäusern bei der Agri-PV-Markteinführung
12		Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung zuletzt geändert durch Gesetz vom 26.04.2022 (BGBl. I S. 674) m. W. v. 30.04.2022	Energiewirtschaftsgesetz – EnWG	26.04.2022	+1/0/-1	-Bei Netzengpässen könnten besondere Solaranlagen wie multifunktionale Floating-, Agri- oder Carport-PV-Lösungen einen Vorrang zur Netzeinspeisung gegenüber monofunktionalen PV-Technologien erhalten

4.3 Policy-Dimension: Welche gesetzlichen Rahmenbedingungen im Mehr-Ebenen-System stehen der Agri-PV-Markteinführung innovationshemmend entgegen?

13	Bund	Baunutzungsverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 21. November 2017 (BGBl. I S. 3786), die durch Artikel 2 des Gesetzes vom 14. Juni 2021 (BGBl. I S. 1802) geändert worden ist	Baunutzungsverordnung BauNVO	14.06.2021	-1*	-Keine Flächenkategorie festgelegt, die eine multifunktionale Landnutzung für die simultane Agrarproduktion und Solarstromerzeugung auf einer landwirtschaftlichen Nutzfläche ermöglicht, bspw. „Landwirtschaftliche Nutzfläche mit integrierter Solarstromerzeugung“
14		Bundesnaturschutzgesetz vom 29. Juli 2009 (BGBl. I S. 2542), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 18. August 2021 (BGBl. I S. 3908) geändert worden ist	BNatSchG	18.08.2021	-1	-Naturschutzrechtliche Eingriffsregelung im Außenbereich bei baurechtlichen Vorhaben im Außenbereich sieht keine Ausnahme für PV-BioDiv/Agri-PV-Projekte vor, obwohl diese positiven Beitrag zum Natur- und Klimaschutz leisten
15		Baugesetzbuch in der Fassung der Bekanntmachung vom 3. November 2017 (BGBl. I S. 3634), das zuletzt durch Artikel 2 des Gesetzes vom 26. April 2022 (BGBl. I S. 674) geändert worden ist	BauGB	26.04.2022	-1	-Keine Verpflichtung zur Einschränkung des täglichen Siedlungsflächenanstiegs -Keine Flächenkategorie festgelegt, die eine multifunktionale Landnutzung in der Bauleitplanung (Bebauungsplan und Flächennutzungsplan) in der BauNVO vorsieht -Keine Ausnahme zur Überkopfverglasung bei PV/Agri-PV, ähnlich den Ausnahmen bei Gewächshäusern -Keine Ausnahme für naturschutzrechtliche Kompensationen bzw. Ökokonto im Naturschutzrecht für PV-BioDiv/Agri-PV-Projekte
16	Land	Landesbauordnung Baden-Württemberg	LBO BW		-1	-Keine Ausnahme zur Überkopfverglasung bei PV/Agri-PV, ähnlich den Ausnahmen bei Gewächshäusern
17		Verordnung des Umweltministeriums über die Anerkennung und Anrechnung vorzeitig durchgeführter Maßnahmen zur Kompensation von Eingriffsfolgen	Ökokonto-Verordnung ÖKVO		-1	-Keine Ausnahme für naturschutzrechtliche Kompensationen bzw. Ökokonto im Naturschutzrecht für PV-BioDiv/Agri-PV-Projekte
18	Region	Fortschreibung des Regionalplans Bodensee-Oberschwaben, Teilregionalplan Energie	Teilregionalplan Energie RVBO	25.04.2022	+1	

4.4 Politics- und Policy-Dimension: Wie müssten sich der bundesstaatliche Koordinationsprozess und gesetzliche Rahmenbedingungen ändern, damit die Agri-PV-Markteinführung gelingen kann?

4.4.1 Politics: Änderung im bundesstaatlichen Koordinationsprozess der Agri-PV-Markteinführung

In Kapitel 2.3 wurden die theoretischen Grundlagen zur Koordination von Regierungshandeln in Deutschland erläutert. Renate Mayntz fordert 1980, dass Koordinations- und Integrationsmechanismen auf Regierungsebene etabliert werden sollten, damit sektoral übergreifende, vorausschauende, abgestimmte und längerfristig orientierte Politik gefördert wird (Mayntz 1980, S. 1342). Damit Abstimmungswege kurz und die ideologischen Distanzen gering sind, schlägt Scharpf vor, betroffene Policy-Inhalte in einem oder auf wenige Ressorts zu konzentrieren (Scharpf 1972). Indem unterschiedliche Policy-Ziele und Ressortzuständigkeiten zusammengefasst werden, entstehen Kompetenz-Cluster. Innerhalb dieser Kompetenz-Cluster werden die Kompromissfindung und Agenda Setting einfacher und ein Transformationspfad vom Status quo zum eigentlichen Politikziel kann sowohl nach außen als auch nach innen in den Staatsapparat effektiver kommuniziert werden.

Neuer Ressortzuschnitt mit Kompetenz-Cluster Klimaschutz

Durch die Abschaffung der EEG-Umlage im Sommer 2022 werden die Fördermittel für den PV-Ausbau nicht mehr indirekt als ordnungspolitisches Förderregime und somit auf die Stromverbraucher umgelegt, sondern als direkte Subvention aus dem Jahreshaushalt der Bundesregierung bezahlt. Diese Policy-Anpassung birgt weiteres Konfliktpotential, weil das BMF als zusätzlicher Akteur den Jahreshaushalt verantwortet und die Budgetverhandlungen zwischen den einzelnen Ressorts koordiniert. Bei der Verteilungsdebatte spielen ebenfalls die Positionierung des Kanzlers sowie die Koalitionskonstellation eine gewichtige Rolle. Konflikte in der inhaltlichen Ausrichtung des Regierungs- und Verwaltungssystems ergeben sich durch

unterschiedliche Blickwinkel, Wirklichkeitsinterpretationen und Interessensorientierung (Mayntz und Scharpf 1973). „Diese unterschiedlichen Blickwinkel stören nicht, im Gegenteil: im Interesse der inhaltlichen Politikqualität sollten diese unterschiedlichen Sichtweisen (und daraus resultierenden Konflikte) aktiv gefördert werden“ (Buhr 2010, S. 167). In der Regierungsbildung sichern sich Koalitionspartner ihren Wählerstimmenumfang entsprechend einer angemessenen Anzahl an Ressorts. Die Auswahl der Ressorts und die Besetzung der Ministerposten bestimmen die Koalitionspartner autonom und versuchen, in den Koalitionsverhandlungen ihre Position durchzusetzen. Das Ressortprinzip gewinnt durch diesen Prozess an Bedeutung und ein neuer Kompetenzzuschnitt sowie die Reorganisation der Verwaltungen reduzieren im täglichen Politikgeschäft die interministerielle Koordination, wenn Kompetenz-Cluster von einem Koalitionspartner besetzt sind. Bei der Bildung der rot-grün-gelben Regierung 2021 (Ampel-Koalition) änderte Olaf Scholz die Kompetenzzuständigkeiten, um einen Durchbruch bei den Koalitionsverhandlungen zu erzielen. Das BMWi wurde durch die Kompetenz Klimaschutz ergänzt. Der Verbraucherschutz wurde aus dem Justizministerium in das Umweltministerium überführt. Dem Ressort BMI wurde die Kompetenz Bauen und Wohnen entzogen und das eigenständige Ressort BMWSB wurde neugegründet. Für die Agri-PV-Markteinführung ist entscheidend, dass der Klimaschutz ins BMWK angesiedelt wurde und dass drei von vier relevanten Ressorts durch einen (grünen) Koalitionspartner geführt werden. Die folgende Tabelle 4-2 beschreibt die Besetzung der für die Agri-PV-Markteinführung relevanten Ressorts seit Kabinett Schröder I im Jahr 1998:

Tabelle 4-2: Bundesstaatlicher Ressortzuschnitt im Bereich Klimaschutz und die Parteizuordnung der Zuständigkeiten zwischen 1998 und 2024 (eigene Darstellung)

	Nationale Klimaschutzkompetenz			
	Landwirtschaft	Wirtschaft/Energie	Umwelt/Klima	Bau
Kabinett	BMEL	BMWi/BMWK	BMU/BMUB/BMUV	BMVBW/BMWSB
Schröder I	SPD/Grüne	Parteilos	Grüne	SPD
Schröder II	Grüne	SPD	Grüne	SPD
Merkel I	CSU	CSU	SPD	SPD
Merkel II	CSU	FDP	CDU	CSU
Merkel III	CSU	SPD	SPD	
Merkel IV	CDU	CDU	SPD	CSU
Scholz	Grüne	Grüne	Grüne	SPD

Der neue Ressortzuschnitt und die Kompetenzkonzentration der DNS-Transformationsbereiche nachhaltige Agrar- und Ernährungssysteme, Energiewende und Klimaschutz sowie

Kreislaufwirtschaft (Die Bundesregierung 2020b, S. 59) auf nur einen Koalitionspartner, Bündnis90/Die Grünen, ist ein Novum in der jüngeren Governance-Struktur für Klimaschutz und verringert hierzu auf bundesstaatlicher Ebene den Koordinationsaufwand im Kabinett. Der Abstimmungsprozess findet allerdings nicht ausschließlich im Kabinett, sondern auch in informalen Entscheidungszentren im Machtdreieck Regierung, Fraktion und Partei statt (Rudzio 2019).

Umsetzung der Agri-PV-Ziele aus dem Koalitionsvertrag

In der Wirkungskette zur Entscheidungsfindung nimmt die Parteibasis Einfluss auf die Fraktionsmitglieder und diese wiederum auf die Ministerposten. Der Kommunikations- und Abstimmungskanal verläuft dabei in beide Richtungen und ist nicht einseitig zu verstehen. Aus dem Verhandlungssystem werden die Kompromissbereitschaft und der Entscheidungsspielraum von den Regierungsvertretenden zurück an die Fraktion und Parteibasis kommuniziert, bis die partei-interne Position mit der Fraktion und dem Kabinett mehrheitlich beschlossen ist. In einer solchen „Koordinationsdemokratie“ (Jäger 1988) ist „das Regierungssystem vor allem auf Stabilität ausgerichtet und radikale Politikwechsel sind dementsprechend unwahrscheinlich“ (Buhr 2010, S. 170).

Das Eckpunktepapier zum PV-Ausbau auf landwirtschaftlichen Flächen (Die Bundesregierung 2022b), das durch die drei vom grünen Koalitionspartner geführten Ministerien BMWK, BMUB und BMEL veröffentlicht wurde, nimmt die Zielsetzungen aus den Wahlprogrammen der Grünen- und SPD-Partei auf (siehe Unterkapitel 4.2.1 „Parteienanalyse“). Gleichzeitig konkretisiert das Eckpunktepapier den Anspruch aus dem Koalitionsvertrag („Auch innovative Solarenergie wie Agri- und Floating-PV werden wir stärken und die Ko-Nutzung ermöglichen“) und entfaltet dadurch eine Symbolwirkung gegenüber der grünen Parteibasis, den betroffenen Ministerialverwaltungen, der Gesellschaft sowie den Marktteilnehmenden im Agrar- und PV-Sektor. Die für das Kompetenz-Cluster Klimaschutz relevanten von Grünen besetzten Ministerien zeigen durch die gemeinsame Initiative, dass sie ressortübergreifend denken und handeln können und dass komplexe, interdisziplinäre Herausforderungen nur gelöst werden können, wenn sektorales Silodenken überwunden wird. Tatsächlich sind in den Politikbereichen Landwirtschaft und Energie die Weichen für die Agri-PV-Diffusion bereits in der Vorgängerregierung gestellt worden, indem der Referentenentwurf GAPDZV und das EEG 2021 durch die InnAusV die Agri-PV als besondere Solaranlage bereits berücksichtigten. Diese

Politikpfade zur Integration der Agri-PV in existierende Policy schreitet die Regierung fort. Vielmehr noch – bereits im Titel des Eckpunktepapiers „Ausbau der Photovoltaik auf Freiflächen im Einklang mit landwirtschaftlicher Nutzung und Naturschutz“ – erfährt das Umweltressort (BMUV) eine Aufwertung und wird mit dem BMWK und BMEL auf Augenhöhe gestellt. Diese Policy-Integration berücksichtigt die Widerstände aus den Interessensvertretungen des Umwelt- und Naturschutzes zur Agri-PV-Markteinführung (siehe Kapitel 4.2.2 und 4.2.3), verringert dadurch das Konfliktniveau und steigert die Kompromissbereitschaft. Neben der Korrektur und Fortschreibung einzelner Politikinhalte, bspw. was die Bonuszahlung für die Agri-PV Kategorie 1 im EEG 2023 betrifft oder die noch nicht verfügbare Eco-Scheme-Förderung für Agri-PV in der EU-GAP, fehlt im Eckpunktepapier insbesondere die Policy-Einbindung des Agri-PV-Transformationsbereichs „Bau“ als wichtiger Beitrag für die „Agri-PV-Markteinführung aus einem Guss“. Denn das BMWSB ist für das Baugesetzbuch und die Baunutzungsverordnung zuständig und hierin sollte die neue Flächennutzungskategorie „landwirtschaftliche Nutzfläche mit integrierter Solarstromerzeugung“ geschaffen werden, damit eine multifunktionale Agrarflächennutzung ohne die Einschränkung steuerlicher Privilegierungen landwirtschaftlicher Betriebe ermöglicht wird. Auch die naturschutzrechtlichen Kompensationen der Eingriffsregelungen für Bauvorhaben im Außenbereich und Bauvorschriften, wie bspw. das Thema Überkopfverglasung, fallen in die Zuständigkeit des BMWSB. Gemessen daran, dass das BMWSB keinen finanziellen und inhaltlichen Verlust durch die Agri-PV-Markteinführung zu befürchten hat, sondern nur gewinnen kann, dass das politische Gewicht der drei Ressorts BMWK, BMEL und BMUV in Summe höher sein dürfte als das des neugegründeten BMWSB und dass die SPD in ihrem Wahlprogramm innovative PV-Anwendungen auf landwirtschaftlichen Nutzflächen ebenso unterstützt, wäre die Chance zur „Agri-PV-Markteinführung aus einem Guss“ gestiegen, wenn das Eckpunktepapier nicht nur ressort-, sondern auch parteiübergreifend beschlossen und veröffentlicht worden wäre. Die Glaubwürdigkeit und das politische Gewicht der Initiative wären gestiegen, wenn das SPD-geführte BMWSB mit den drei grünen Ministerien BMWK, BMEL und BMUB im Koordinations- und Kommunikationsprozess des Eckpunktepapiers hätte eine Teilhabe haben können, und die ressortübergreifenden Verhandlungen zum Abbau von Hemmnissen im Baugenehmigungsprozess von Agri-PV-Anlagen wären mit hoher Wahrscheinlichkeit mit einem geringeren Koordinationsaufwand umsetzbar gewesen. Insgesamt betrachtet scheinen die Polity- und Politics-Strukturen eine erfolgreiche Agri-PV-Markteinführung in Deutschland

zu unterstützen und der bundesstaatliche Koordinationsprozess wirkt dank des neuen Ressortzuschnitts, des Kompetenz-Clusters für den Transformationsbereich Klimaschutz auf die Grünen-Partei sowie durch die Beschlüsse in den Wahlprogrammen und im Koalitionsvertrag gut organisiert und engagiert. Mit Blick auf die Zunahme der Akteure im Koordinationsprozess bei Fortschreiten der Agri-PV-Markteintrittsphase könnte unter der Federführung des BMEL ein „Agri-PV-Koordinationsgremium“ temporär eingesetzt werden, das sich neben der Koordination auf bundespolitischer Ebene auch um die Belange der Länder, EU sowie insbesondere des BMF kümmert, wenn es darum geht, die steuerlichen Privilegierungen der Landwirte im Agri-PV-System zu erhalten.

4.4.2 Policy: Änderung der gesetzlichen Rahmenbedingungen in den Transformationsbereichen zur Agri-PV-Markteinführung

Abbildung 4-9 stellt das Politikziel Agri-PV-Markteinführung in den Mittelpunkt und fasst die vier Agri-PV-Transformationsbereiche Landwirtschaft, Energie, Umwelt und Bau zusammen. Die Ergebnisse der Multi-Level-Policy-Analyse werden als Policy-Inhalt den vier Transformationsbereichen und gemäß Ressortprinzip den bundesstaatlichen Federführungen der Ministerialverwaltung zugeordnet. Die Koordinationskonzentration der Agri-PV-Markteinführung ist als Kompetenz-Cluster dem Koalitionspartner Bündnis90/Die Grünen zugewiesen. Einzig der Agri-PV-Transformationsbereich Bau liegt in der Federführung der SPD.

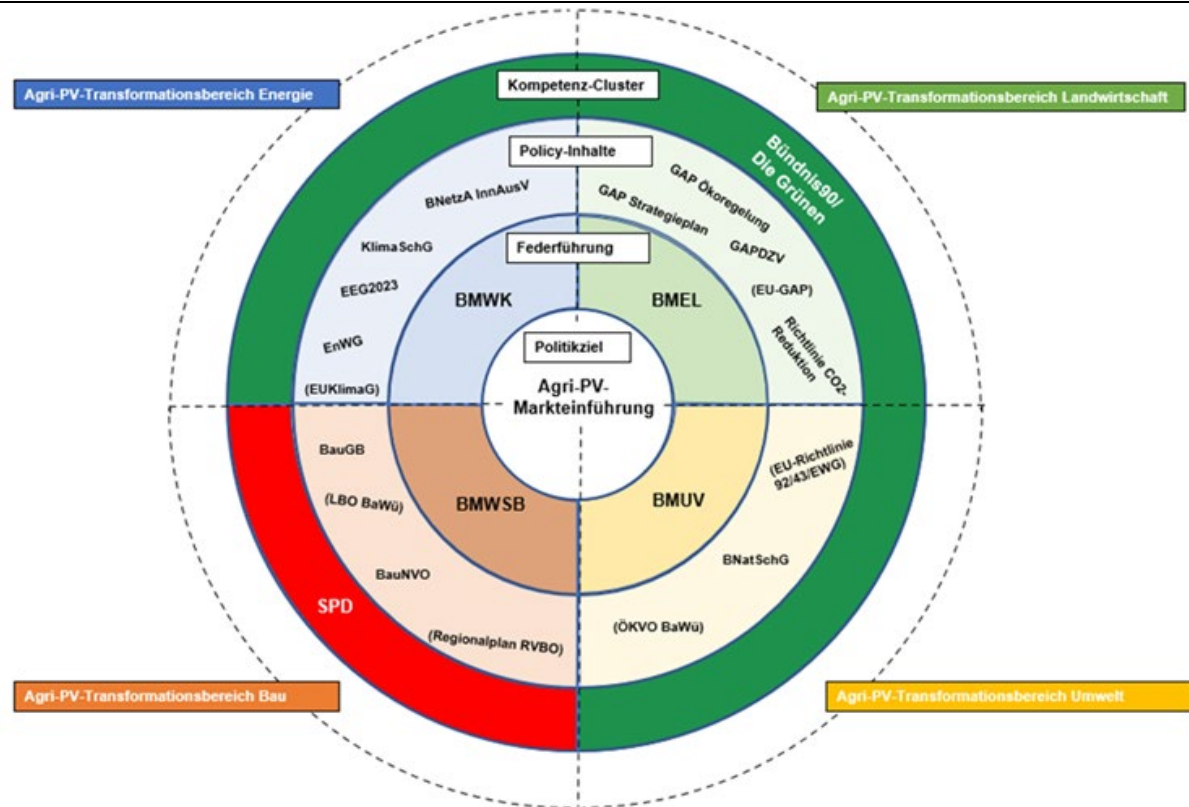


Abbildung 4-9: Federführung der Agri-PV-Transformationsbereiche, Policy-Inhalte und Kompetenz-Cluster des Politikziels Agri-PV-Markteinführung (eigene Darstellung)

Für die Agri-PV-Markteinführung sind Anpassungen der Policy-Inhalte in den jeweiligen Transformationsbereichen notwendig. Im Folgenden werden die zwölf innovationshemmenden Policy-Inhalte, die in der Übersichtstabelle in Kapitel 4.3, Spalte Agri-PV-Innovationsbewertung mit einem „-1“ gekennzeichnet sind, im Koordinations- und Verhandlungsprozess eingeordnet und Anpassungsempfehlungen ausgesprochen.

Anpassung Policy-Inhalte Transformationsbereich Landwirtschaft:

Im nationalen GAP-Strategieplan (BMEL 2022) findet die Agri-PV keine Erwähnung. Der Beitrag der Agri-PV zur Steigerung der Flächennutzungseffizienz, zum nachhaltigen Landmanagement und zur Resilienzsteigerung der landwirtschaftlichen Betriebe in Zeiten des Klimawandels sollten erwähnt werden. Ebenso könnte die Anpassung der Direktzahlungsdurchführungsverordnung (BMEL 2021d) angeführt werden, die 85 % der üblichen Direktzahlungen an die landwirtschaftliche Tätigkeit im Agri-PV-System aus der

1. EU-GAP-Säule ermöglicht. Die landwirtschaftliche Tätigkeit im Agri-PV-System könnte zusätzlich durch die Öko-Regelung aus der 2. Säule gefördert werden. Landwirte würden dadurch einen Anreiz erhalten, damit sie Teile ihrer Betriebsflächen für den Klimaschutz mittels Agri-PV bereitstellen. Zugleich würden die Mehraufwände des Landwirts in der Projektentwicklung und in der technischen Betriebsführung zumindest ansatzweise kompensiert werden, bspw. die langsamere Feldbearbeitung im Agri-PV-System, der höhere Koordinationsaufwand im Vorfeld und Nachgang der Agri-PV-Installation sowie die höheren Betriebsrisiken und Versicherungskosten, die durch eine multi-funktionale Landnutzung entstehen. Die EU-Kommission sollte in ihrer Kommentierung der nationalen GAP-Strategiepläne die Erfahrungen aus dem deutschen Agri-PV-Koordinationsprozess mit anderen EU-Mitgliedstaaten teilen und als Multiplikator und Informationsplattform die Agri-PV-Markteinführung in der EU unterstützen. Das BMEL sollte sich auf EU-Ebene für einen europäischen Agri-PV-Standardisierungs- und Normierungsprozess stark machen und in Co-Finanzierung mit dem BMBF Fördermittel für diesen Prozess bereitstellen. Die Methoden und Arbeitsergebnisse aus dem DIN SPEC 91434 Agri-PV-Standardisierungsprozess könnten auf Cen und CenElec übertragen und angepasst werden. Das BMEL könnte analysieren, inwieweit sich der Agri-PV-Ausbau mit dem DNS-Ziel, den Ökolandbau auszuweiten, kombinieren lässt, weil im Gegensatz zum PV-FFA-BioDiv-Ausbau der Agri-PV-Ausbau nicht im Widerspruch zu diesem Ziel steht. In der strategischen Ausrichtung des nationalen GAP-Plans könnten hochaufgeständerte Agri-PV-Kat.-1-Anwendungen, gemäß DIN SPEC 91434, ähnlich wie Gewächshäuser und Kulturschutzsysteme zur Anpassung an den Klimawandel beachtet und über die Ökoregelung aus der 2. Säule gefördert werden. Agri-PV-Anlagen, die der Eigenstromerzeugung für landwirtschaftliche Betriebe dienen, werden bereits heute über die BMEL-Richtlinie zur CO₂-Reduktion in der Landwirtschaft gefördert. Voraussetzung für die Beihilfefähigkeit ist ein schlüssiges Energiekonzept, das durch Energieberater für Landwirte ausgearbeitet werden muss. Das BMEL könnte die Energieberater zur Agri-PV schulen und deren Agri-PV-Kompetenz erweitern, damit mehr Agri-PV-Förderanträge in diesem Förderinstrument eingehen. Die im EEG 2023 vorgesehene Bonuszahlung für das hochaufgeständerte Agri-PV-Kat.-1-Segment könnte durch das BMEL und EU-GAP-Beihilfen finanziert oder zumindest ergänzt werden, schließlich ist das BMEL auch Nutznießer, wenn

fruchtbare Böden für die Nahrungsmittelproduktion in Deutschland erhalten bleiben.⁶ Weitere positive Externalitäten, wie bspw. die Reduktion von Plastikmüll in der Landwirtschaft, wenn Regenhauben aus Folie, Hagelnetze oder Folientunnel durch Agri-PV substituiert werden, ein geringerer Wasserbedarf im Agri-PV-System, Wind- und Bodenerosionsschutz und andere techno-ökologische Synergien sollten durch wissenschaftliche Begleitvorhaben in der Agri-PV-Markteinführung erfasst und perspektivisch in der Projektumsetzung optimiert werden. Ein bundesweites Agri-PV-Mess- und Auswertungsprogramm (Agri-PV-MAP) wäre ein geeignetes Instrument, um die Agri-PV-Markteinführung zu begleiten, und dies könnte auch Umweltauswirkungen erfassen.

Anpassung Policy-Inhalte Agri-PV-Transformationsbereich Umwelt:

Der Hauptnutzen einer Agri-PV-Markteinführung entsteht im BMEL, gefolgt vom BMUV, das für die Themen Bodenwertigkeit, Nachhaltiges Landmanagement und Kreislaufwirtschaft zuständig ist. Sowohl in der DNS (Die Bundesregierung 2020b, S. 326) als auch im Koalitionsvertrag (SPD und Bündnis 90/Die Grünen und FDP 2021, S. 33) ist Bodenschutz ein Schlüsselindikator für nachhaltige Entwicklung. In der Bewertung der sogenannten „Land Degradation Neutralität“ beurteilen Experten die PV-FFA-BioDiv-Lösungen für die Bodenregenerierung als hochwertiger als konventionelle, intensive Landwirtschaft. Der ökologische Landbau wird jedoch in der Bodenwertigkeit höher als PV-FFA-BioDiv bewertet (Wunder et al. 2018, S. 74). Die Kombination aus Agri-PV mit Ökolandbau wird als die Landnutzungsart mit dem höchsten Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung hinsichtlich Klima-, Boden-, Umwelt- und Biodiversitätsschutz erachtet. Der PV-FFA-Ausbau auf Agrarflächen

⁶ Rechenbeispiel: Goetzberger und Zastrow erkannten bereits 1981, dass wenn sowohl das PV-System als auch der Nutzpflanzenanbau „auf einem gegebenen Stück Land für sich allein wirtschaftlich sind, die einzigen zusätzlichen Kosten bei der Kombination beider Nutzungen diejenigen für die Anhebung der Kollektoren auf ein genügend stabiles Gestell sind“. Heute wissen wir, dass die Mehrkosten auch höhere Logistik- und Installationskosten sowie ein spezielles, lichtdurchlässiges PV-Modul umfassen. Die Mehrkosten für ein hochaufgeständertes Agri-PV-Beerenschutzsystem gegenüber einer PV-FFA liegen bei etwa 3 €/ct/kWh. Auf einem Hektar Dauerkulturflächenland können rund 700 kWp Agri-PV-Leistung installiert werden. Angenommen, die solare Einstrahlung ermöglicht einen spezifischen Solarstromertrag von 1.000 kWh/kWp/a und der Förderzeitraum würde 20 Jahre betragen, so würden je Hektar folgende Förderkosten anfallen: $0,03 \text{ €/kWh} * 700 \text{ kWp/ha} * 1.000 \text{ kWh/kWp/a} * 20 \text{ a} = 420.000 \text{ €}$. Nehmen wir weiter an, dass die deutsche Bundesregierung über das BMEL den Obst- und Fruchterzeugern zur Anpassung an den Klimawandel einmalig einen Subventionstopf von 2 Mrd. € als ELER-Kofinanzierung zur Verfügung stellt, damit durch die Öko-Regelung (2. Säule EU-GAP) die Agri-PV-Fruitvoltaic-Umsetzung gefördert wird, so könnten $2 \text{ Mrd. €} : 420\text{k€}/\text{ha} = \text{rd. } 4.762 \text{ Hektar}$ Obst- und Beerenanbaufläche durch Agri-PV umgesetzt werden. Der Förderzeitraum könnte die kommende EU-GAP-Förderperiode vom 01.01.2023 bis zum 31.12.2027 sein. Das wirtschaftlich-erschließbare „Fruitvoltaic“-Potential wird durch BayWa r.e. auf 15.532 Hektar bewertet. Die 400 Mio. € jährlich würden im Verhältnis zu den jährlichen 6,3 Mrd. € EU-GAP-Förderung inkl. Kofinanzierung aus Deutschland das Förderbudget um rd. 6 % steigern. Aufgrund der vermiedenen Investitionen in Plastikfolien, des geringeren Wasserbedarfs und der geringeren Arbeitskosten im Betrieb der Agri-PV-Anlage gegenüber herkömmlichen Kulturenschutzsystemen würde die Kaufkraft der Landwirte steigen, wodurch weitere Investitionen in klimafreundliche Technologien, bspw. zur Reduktion der CO₂-Emissionen auf der Hofstelle, freiwerden würden.

erfolgt aufgrund der bauleitplanerischen Vorgaben als Sondergebiet im Außenbereich und zählt somit zum täglichen Siedlungsflächenanstieg. Ohne die Anpassung der gesetzlichen Rahmenbedingungen für die PV-FFA oder die Agri-PV-Markteinführung, die den PV-FFA-Ausbau auf Agrarflächen teilweise substituiert, sind die Zwischenziele für 2030 und die Einführung einer Flächenkreislaufwirtschaft mit einem Nettonull-Siedlungsflächenanstieg ab 2050 nicht möglich. In Kohärenz und Abstimmung mit dem Transformationsbereich Bau (basierend auf dem BNatSchG und dem BauGB) sollte verhindert werden, dass der Agri-PV-Ausbau im Zusammenspiel mit ökologischer Landwirtschaft Ausgleichsflächen aufgrund der Eingriffsregelung bereitstellen muss, weil dadurch zusätzliche Agrarflächen der Nahrungs- und Futtermittelproduktion entzogen werden. Die multifunktionale Agri-PV-Landnutzung in Verbindung mit Ökolandbau ist aus ökologischen Gründen der monofunktionalen Landnutzung mittels PV-FFA-BioDiv und konventioneller Landwirtschaft zu bevorzugen und entsprechend regulatorisch besserzustellen, um Anreize für die Marktentwicklung zu bewerkstelligen. Die Projektflächen für Agri-PV-Ökolandbau könnten als Ausgleichsfläche für baurechtliche Vorhaben im Außenbereich gelten, die tatsächlich die Flächenversiegelung verursachen, bspw. Gewerbe-, Wohn- und Verkehrsbauten. Der im Agri-PV-System beteiligte Biolandwirt könnte somit wirtschaftlich von der Ökokontoverordnung auf Landesebene profitieren. PV-BioDiv-Projekte sollten dem EU-GAP-Ziel der 4%-Stilllegungsflächen je Betrieb zugerechnet werden, damit keine zusätzlichen Agrarflächen für den PV-Ausbau auf Agrarflächen beansprucht werden.

Anpassung Policy-Inhalte Agri-PV-Transformationsbereich Energie:

Den beiden Agri-PV-Befürwortern BMEL und BMUV stehen die Interessen des BMWK und des BMWSB gegenüber. Das BMWK hat ein Interesse daran, die Klimaschutzziele und einen möglichst schnellen PV-Ausbau zu erzielen. Seine finanziellen Ressourcen zum PV-Ausbau möchte das BMWK möglichst kosteneffizient einsetzen. Die günstigste Art der Stromerzeugung in Deutschland sind PV-FFA auf Agrarflächen, die bereits heute in Deutschland regelmäßig mittels Stromdirektvermarktungsverträgen subventionsfrei umgesetzt werden können. Mit dem PV-FFA-Ausbau auf Agrarflächen einhergehende negative Externalitäten, wie bspw. die Reduktion der inländischen Agrarproduktion und daraus resultierende steigende Importüberschüsse, die Verringerung der weltweiten Nahrungsmittelerzeugung bei steigendem Nahrungsmittelbedarf und daraus resultierende

Kosten zur Hungerskrisenintervention sowie der Biodiversitätsrückgang im Ausland, wenn die Agrarproduktion ins außereuropäische Ausland verschoben wird, sind in dieser Kosten-Nutzen-Kalkulation im BMWK nicht berücksichtigt, sondern Verhandlungsmasse im Abstimmungsprozess der anderen Kabinettsmitglieder und Ressorts. Das BMWK ist daran interessiert, keine neuen PV-Anwendungen in ein Förderregime aufzunehmen, was höhere Kosten als die heute teuerste Art der Solarstromerzeugung verursacht – womit PV-Dachanlagen mit einer Kapazität von kleiner 10 kWp als höchster förderfähiger Zuwendungssatz die obere Förderkostengrenze bei der Agri-PV-Markteinführung definieren. Da die Installation und der Betrieb von Agri-PV-Anlagen stromseitig finanziert werden und die Geschäftsmodelle der landwirtschaftlichen Tätigkeit und der Solarstromerzeugung getrennt sind, ist das BMWK aus Sicht der Agri-PV-Markteinführung und -Einbettung in existierende Förderregime das wichtigste Ressort.

In der BNetzA-Festlegung der InnAusV für besondere Solaranlagen sollte die Kopplung der Solarstromerlöse an die Agrarerträge zwingend aufgehoben werden. Aus der Analyse ideologischer Distanzen zwischen den Akteuren hinsichtlich der Agri-PV-Markteinführung (siehe Kapitel 4.2) geht hervor, dass Umwelt- und Agrarverbände ein großes Interesse daran haben, dass die landwirtschaftliche Tätigkeit im Agri-PV-System möglichst dauerhaft sowie qualitativ und quantitativ hohe Erträge abwirft. Der Sorge und dem Risiko, dass die Solarwirtschaft über einen höheren Fördersatz für die Agri-PV Mitnahmeeffekte generiert, indem sie Alibi- und Pseudo-Agri-PV-Anlagen umsetzt, wird entgegengewirkt, indem Monitoring- und Berichterstattungspflichten über Agrarmindesterträge eingefordert werden, die der Agri-PV-Betreiber jährlich zu dokumentieren und alle drei Jahre gegenüber dem Netzbetreiber vorzuweisen hat. Das wirtschaftliche Risiko der Agri-PV-Betreibergesellschaft trägt somit ausschließlich der landwirtschaftliche Betrieb. Die Finanzierbarkeit („Bankability“) für die Agri-PV-Investitionskosten ist damit nicht gegeben. Für die Agri-PV-Qualitätsstandards muss die Solarwirtschaft Sorge tragen und in der Projektumsetzung im Baugenehmigungsprozess die dauerhaft, wirtschaftlich tragfähige landwirtschaftliche Tätigkeit im Agri-PV-System durch einen externen Sachverständigen nachweisen. Der beteiligte Landwirt muss, wenn er Agrarsubventionen aus der 1. und 2. Säule für die Flächennutzung im Agri-PV-System erhalten will, ohnehin jährlich seine Tätigkeiten in der InVeKos-Schlagkartei dokumentieren. Eine Agri-PV-Markteinführung ohne Risiken ist lediglich durch eine erhöhte Bürokratisierung zu erreichen, droht allerdings, die neuartige Lösung im Keim zu ersticken,

und verzögert die Agri-PV-Potentialerschließung. Sollten tatsächlich vermehrt Agri-PV-Fördermissbrauch und Pseudo-Agri-PV-Projekte in Erscheinung treten, könnten zu einem späteren Zeitpunkt in der Diffusionsphase immer noch Gegenmaßnahmen ergriffen und strengere Restriktionskriterien eingeführt werden. Im EEG 2023 sind für hochaufgeständerte Agri-PV-Anwendungen der Kat. 1 gemäß DIN SPEC 91434 Bonuszahlungen je eingespeister kWh vorgesehen. Diese Bonuszahlungen in Höhe von 1,2 €-Cent/kWh werden nicht ausreichen, um wirtschaftliche Projekte auf Dauerkultur- oder Ackerflächen umzusetzen, die den hohen Qualitätsanforderungen der Agrar- und Umweltverbände entsprechen. Die niedrigen Bonuszahlungen erhöhen den wirtschaftlichen Druck auf die Agri-PV-Projekte, wodurch ein hoher Solarstromertrag an Bedeutung gewinnt und die Agrarerträge gefährdet. Ökonomisch betrachtet steht die gesetzgebende Instanz vor der Herausforderung, bei der Markteinführung einer Innovation mit steiler Lernkurve und relativ hohen Differenzkosten die Preisregulierung (in diesem Fall Bonuszahlung) so zu wählen, dass eine ausreichende Menge des erhofften Gutes (in diesem Fall Agri-PV) gefördert wird. Das Risiko einer Überförderung ist in der Markteintrittsphase allerdings gering. Umgekehrt kann bei einer flachen Lernkurve und geringen Differenzkosten in der Diffusion eine nur leicht zu hoch angesetzte Preisförderung eine große Veränderung auf die Zubaumenge haben. Eine Hybridförderung, bei der eine bestimmte Menge mit einer hohen maximalen Preisförderung in der Markteinführung zugelassen ist, verspricht die effizienteste Risikoabwägung und den effektivsten Politikerfolg (Weizmann 1974). Zusätzlich ruft eine zu gering gewählte Preisförderung eine Endogenität in der Governance-Struktur hervor. Denn je niedriger der Förderpreis in der Markteinführung ausfällt, desto höher ist der Druck, die Kosten zu senken, und die Wahrscheinlichkeit von Pseudo- und Alibi-Agri-PV nimmt zu, weil die Solarstromerzeugung auf Kosten der Agrarerträge erhöht wird – eine Situation, die politisch verhindert werden möchte. Die Bonuszahlung für hochaufgeständerte Agri-PV-Anlagen sollte daher auf mindestens 3,0 €-Cent/kWh erhöht werden oder alternativ ein eigenes Ausschreibungssegment mit einem begrenzten Mengenvolumen, bspw. 150 MWp im Jahr, etabliert werden, damit die Förderkosten zur Markteinführung in diesem Segment nicht maßlos überschritten werden. Ein solches Agri-PV-Kat.-1-Ausschreibungssegment könnte in den ersten Markteinführungsjahren auch dazu dienen, die Agri-PV-Projektqualität zu begutachten und die notwendigen Förderzuschlagssätze genauer zu analysieren. Die Einschränkung der Flächenkulisse, indem Dauergrünlandflächen von der Agri-PV-Projektumsetzung und Beihilfefähigkeit im EEG 2023 ausgeschlossen werden, ist weder von den Agrar- und Umwelt- noch Solarverbänden nachzuvollziehen und

sollte dringend aufgehoben werden. In der Netzanschlussprüfung könnten über das EnWG die Stromnetzbetreiber angehalten werden, in der Bewertung der Netzanfragen besonderen Solaranlagen gegenüber konventionellen PV-FFA-Projekten den Vorrang einzuräumen, damit die multifunktionale Landnutzung stimuliert und die monofunktionale de-stimuliert wird.

Anpassung Policy-Inhalte Agri-PV-Transformationsbereich Bau:

Das neugegründete Ressort BMWSB verantwortet den wichtigen Agri-PV-Transformationsbereich Bau. Verliert die Agri-PV-Projektfläche ihren Status als landwirtschaftliche Nutzfläche, verliert der Landwirt und Landeigentümer in dieser Konsequenz seine steuerlichen Privilegien bei der Hofübergabe (Rolink 2021).⁷ In der BauNVO sollte daher für die multifunktionale Agrarflächennutzung ein rechtlicher Rahmen geschaffen werden, indem eine neue Flächennutzungskategorie „landwirtschaftliche Nutzfläche mit integrierter Solarstromerzeugung“ etabliert wird. Diese Policy-Innovation würde auch den unteren Baurechtsbehörden auf Landkreisebene helfen, die Agri-PV-Baugenehmigungsanfragen einzuordnen und die Fläche so festzusetzen, dass dies dem Agri-PV-Charakter gerecht wird. Bisher müssen sich die kommunalen Entscheidungsträger entscheiden, ob die Projektfläche entweder als landwirtschaftliche Fläche oder als ein Sondergebiet ausgewiesen wird. Obwohl im Agri-PV-System die Solarstromerzeugung zweckgemäß sekundär und die hauptsächliche Flächennutzung weiterhin die Agrarproduktion ist, wird in der Regel ein Sondergebiet festgesetzt, weil Elektrizität auf der Fläche erzeugt wird. Somit zählt die Projektfläche nicht mehr zu den Agrarflächen, sondern als Sondergebiet im Außenbereich zu den Gewerbeflächen und steigert dadurch den täglichen Siedlungsflächenanstieg in der Region. Die Regionen sind jedoch durch die DNS dazu angehalten, den Siedlungsflächenanstieg zu senken, und müssen abwägen, welche Bauvorhaben im Außenbereich zukünftig zugelassen werden und welche nicht. Eine neue Flächennutzungskategorie für multifunktionale Landnutzung kann die Landnutzungskonkurrenz entschärfen und den lokalen Genehmigungsprozess der Agri-PV-Markteinführung beschleunigen. Ein weiteres Agri-PV-Innovationshemmnis in der

⁷ In Österreich stellen Grundstücke laut dortigem Finanzministerium landwirtschaftliches Betriebsvermögen dar, wenn die Fläche einem landwirtschaftlichen Hauptzweck dient. Der Hauptzweck wurde an bestimmte Minimalagrarerträge gekoppelt, bspw. müssen in der Nutztierhaltung mindestens 1.650 Masthühner oder 660 Legehennen oder 1.460 Mastenten oder 100 Weidegänse je Hektar PV-Fläche (umzäunte Fläche) gehalten werden, oder bei einer Fläche mit Sonderkulturen müssen die Module als Überdachung dienen, bei Ackerflächen müssen die Module mindestens in 4,5 m Höhe montiert sein, oder wenn Ackerbau zwischen den PV-Modulen stattfindet muss die Mindestbreite zwischen den Modulreihen 6 m lichte Weite betragen sowie die Modulfläche nicht mehr als 25 % der Gesamtfläche übersteigen (Landwirtschaftskammer Oberösterreich 2021).

Zuständigkeit des BMWSB ist die naturschutzrechtliche Eingriffsregelung für baurechtliche Vorhaben im Außenbereich. Obwohl Agri-PV-Anlagen, vorzugsweise in Verbindung mit ökologischem Landbau, einen positiven Beitrag zum Klima-, Boden- und Naturschutz leisten, werden Kompensationsauflagen an den Agri-PV-Projektentwickler gestellt, wodurch entweder die Projektfläche vergrößert wird oder andernorts zusätzliche Naturschutzmaßnahmen umgesetzt werden müssen. Diese Ausgleichsflächen beanspruchen weitere Agrarflächen, die in der Grundidee der Agri-PV jedoch erhalten bleiben sollten. Agri-PV-Projekte in Verbindung mit ökologischer Landwirtschaft sollten daher nicht mit naturschutzrechtlichen Kompensationsverpflichtungen belastet werden, sondern im Gegenteil als Kompensationsmaßnahme für andere Bauvorhaben im Außenbereich gelten dürfen, bspw. wenn neue Gewerbe-, Wohn- oder Verkehrswege festgesetzt werden. Auf Landesebene könnte dieser Kompensationsmechanismus über die Ökokontoverordnung zu wirtschaftlichen Vorteilen für den Biolandwirt führen, der im Agri-PV die landwirtschaftliche Tätigkeit durchführt.⁸ Ähnlich wie bei landwirtschaftlich genutzten Gewächshäusern sollten Agri-PV-Systeme in den Landesbauordnungen von den Zulassungsvoraussetzungen für Überkopferverglasung ausgelassen werden. Aus Versicherungsgründen sind ohnehin auf einer Agri-PV-Fläche Gesundheits- und Sicherheitsunterweisungen für den Landwirt im Zusammenhang mit der Agri-PV-Elektrik durchzuführen, sodass Risiken für Personenschaden unter der Agri-PV-Anlage reduziert und abgedeckt sind. Der Agri-PV-Transformationsbereich Bau mit seinen Policy-Inhalten zum Baugenehmigungsprozess, zu Bauvorschriften, Flächennutzungskategorien und naturschutzrechtlichen Eingriffsregelungen ist sowohl vom Kabinett Merkel IV als auch von der aktuellen Bundesregierung bis dato unterschätzt und vernachlässigt worden. Policy-Anpassungen im Agri-PV-Transformationsbereich Bau können die Effizienz und Effektivität in der Projektentwicklung steigern. Vor dem Hintergrund der globalen Erderhitzung, der diesjährigen Trockenheit sowie der Ernährungs- und Energiekrise seit dem Krieg in der Ukraine sind derartige Politikanpassungen und der Bürokratieabbau in der Energiewende dringend geboten.

⁸ In Italien sieht der Gesetzesentwurf zur Agri-PV-Förderung es vor, dass Baugenehmigungsanträge für die Agri-PV-Projektumsetzung im Umkreis von 3 km von Industriegebieten innerhalb von sechs Monaten abgeschlossen sein müssen. Dadurch werden Agri-PV-Projekte im Umfeld von vorbelasteten Landschaftsbildern gefördert und die Energieerzeugung nahe an den Energiebedarf gebracht, wodurch Netzausbaukosten eingespart werden sollen.

4.5 Policy-Dimension: Welche Auswirkungen könnte eine Agri-PV-Diffusion auf den absoluten und täglichen Agrarflächenerhalt in Deutschland bis Jahresende 2050 haben?

Um die Wirkung der Agri-PV-Markteinführung und -Diffusion auf den Agrarflächenerhalt in Deutschland bis Jahresende 2050 zu berechnen, muss im ersten Schritt abgeschätzt werden, wie viel Agrarfläche der PV-Ausbau in Deutschland bis dahin beansprucht. Dieses Szenario dient als Referenzszenario. Im zweiten Schritt können unterschiedliche Handlungsoptionen simuliert und evaluiert werden. Eine Option zur Vermeidung des DNS-Zielkonflikts zum PV-FFA-Ausbau und zur Reduktion des Siedlungsflächenanstiegs bestünde darin, die PV-FFA-BioDiv baurechtlich als landwirtschaftliche Nutzfläche zu definieren – ähnlich wie dies für die Agri-PV empfohlen wird. Dadurch würde für alle Arten der PV-Anwendung auf Agrarflächen, die der Landwirtschaft oder dem Naturschutz dienlich sind, der Status „Landwirtschaftliche Landnutzung“ erhalten bleiben und somit auch die steuerrechtlichen Privilegierungen der Landwirte, bspw. im Erbschaftsrecht und in der Einkommensteuerregelung. Die EU-GAP-Beihilfefähigkeit steht nicht in Abhängigkeit der baurechtlichen Bewertung der Landnutzungsart, sondern einzig durch die Bewertung der landwirtschaftlichen Tätigkeit. Eine zweite Option ist, den PV-FFA-Zubau mit agrarflächenneutralen PV-Technologien, wie die Floating- und Agri-PV, zunächst zu ergänzen, um ihn anschließend gänzlich durch die Agri-PV zu substituieren, um den PV-FFA-Zubau bis 2050 im Einklang mit der Lebensmittelproduktion zu ermöglichen. In meiner Szenarioanalyse zur Inanspruchnahme landwirtschaftlicher Nutzflächen durch Photovoltaik in Deutschland bis 2050 wurde die zweite Option analysiert (Schindele 2021b). Seit dem Ukraine-Krieg wurden die PV-Ausbauziele nochmals angehoben und das Umsetzungsziel von 2050 auf 2045 vorgezogen. Abgesehen von meinen detaillierten Berechnungen zur Agri-PV-Wirkungsanalyse auf den Agrarflächenerhalt in Deutschland wird im Folgenden eine grobe Abschätzung gemäß den aktuellen PV-Zubauzielen berechnet.

4.5.1 Szenario 1: Inanspruchnahme Agrarflächen durch PV in Deutschland bis 2045 ohne Agri-PV

Ende 2021 waren in Deutschland ca. 59 GWp PV-Leistung installiert. Bis Ende 2030 sollen 215 GWp PV-Leistung installiert sein, was einem absoluten Zuwachs der PV-Leistung von 156 GWp in neun Jahren oder 17,33 GWp im Jahr entspricht.⁹ Aufgrund der Sektorenkopplung von Strom, Wärme und Transport und der fortlaufenden Dekarbonisierung unseres Energiesystems bis ins Jahr 2045 wird davon ausgegangen, dass der jährliche PV-Zubau in den Jahren 2031 bis Jahresende 2045 auf ähnlich hohem Niveau erfolgen muss, damit die Klimaschutzziele erreicht werden. In den 24 Jahren von 2022 bis Ende 2045 werden insgesamt 416 GWp PV-Leistung installiert, was einer PV-Gesamtleistung von 475 GWp entspricht.

Die Bundesregierung nimmt an, dass 50 % der PV-Leistung auf Dachflächen und 50 % auf Agrarflächen installiert werden. Daraus resultiert ein PV-FFA-Ausbau auf landwirtschaftlichen Nutzflächen zwischen 2022 und Ende 2045 von 208 GWp. Für die Installation von 1 MWp PV-FFA-Leistung wird etwa 1 Hektar Agrarfläche beansprucht. 208.000 MWp entsprechen 208.000 Hektar Agrarfläche. 24 Jahre entsprechen 8.765 Tagen. Durchschnittlich werden somit 23,73 Hektar Agrarfläche am Tag durch den PV-FFA-Ausbau beansprucht – umgerechnet 33 Fußballplätze am Tag für 24 aufeinanderfolgende Jahre.¹⁰ Bis Ende 2018 wurden in Deutschland ca. 17.100 Hektar landwirtschaftliche Nutzfläche für die PV-FFA beansprucht – davon 13.300 Hektar auf Ackerland und 3.800 Hektar auf Grünland. Dies entspricht einem Anteil von rund 0,1 % der gesamten landwirtschaftlichen Nutzfläche Deutschlands (Böhm 2022). Die bis Ende 2021 von PV-FFA beanspruchte landwirtschaftliche Nutzfläche wird im Vergleich der Szenarien mit und ohne Agri-PV-Diffusion vernachlässigt, weil aus Gründen der Simulationsvereinfachung nicht davon ausgegangen wird, dass bisherige PV-FFA-Projektflächen in die Agri-PV-Agrarproduktion überführt werden. Allein der Zuwachs an PV-FFA-Flächeninanspruchnahme zwischen 2022 und Ende 2045 entspricht bis dahin etwa 2 bis 3 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche und steht im Zusammenhang damit, wie viel

⁹ Zum Vergleich zu den 17,33 GWp pro Jahr in Deutschland: Im Jahr 2020 betrug der PV-Zubau 4,9 GWp und im Jahr 2021 rd. 5,3 GWp in Deutschland. Der bisherige Höchstwert pro Jahr betrug 7,9 GWp im Jahr 2011 (Enhardt 2022).

¹⁰ Ein Fußballfeld entspricht in dieser Berechnung 0,714 Hektar. 208.000 Hektar PV-FFA-Flächeninanspruchnahme entsprechen rd. 291.316 Fußballplätzen. In Deutschland gibt es ca. 50.000 Fußballplätze. Für den Klimaschutz müssten wir neben jedem Fußballplatz rd. sechs Fußballfelder als PV-Solarpark platzieren.

Agrarfläche für den Zubau von Gewerbe-, Wohn-, Freizeit- und Verkehrsfläche im selben Zeitraum beansprucht wird. Der tägliche Siedlungsflächenanstieg soll gemäß der EU-Zielsetzung für ein ressourceneffizientes Europa und des Klimaschutzplans der Bundesregierung bis 2050 Nettonull betragen. Ab dem Jahr 2051 dürfen keine weiteren Agrarflächen für den Siedlungsflächenanstieg herangezogen werden und eine Flächenkreislaufwirtschaft soll etabliert sein. Die DNS definiert als Zwischenziel die Reduktion des täglichen Siedlungsflächenanstiegs von derzeit rund 52 Hektar (ohne PV-FFA-Ausbau) auf unter 30 Hektar. Der PV-FFA-Ausbau zählt baurechtlich zum Siedlungsflächenanstieg. Der entscheidende Aspekt für die PV-FFA-Umsetzung ist nicht die Verfügbarkeit von Agrarflächen, sondern die Flächenkonkurrenz auf regionalplanerischer Ebene, die abwägen muss, für welche Landnutzungsart sie den sinkenden täglichen Siedlungsflächenanstieg festsetzen will. Die 23,73 Hektar Agrarfläche, die ab 2022 jeden Tag durch den PV-FFA-Ausbau beansprucht wird, würde 2030 knapp 80 % der unter 30-Hektar-DNS-Zielvorgabe beanspruchen. Abbildung 4-10 veranschaulicht diese Annahmen.

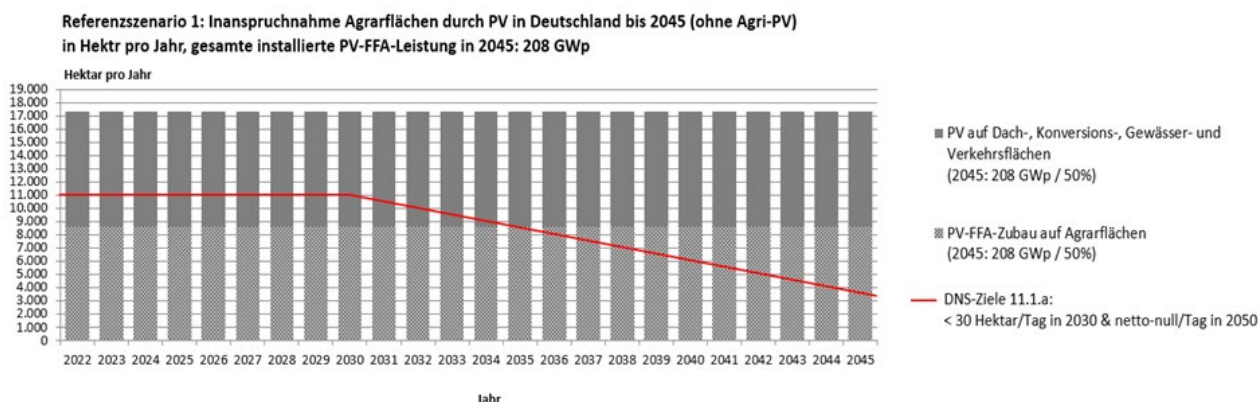


Abbildung 4-10: Referenzszenario 1: Inanspruchnahme Agrarfläche durch PV in Deutschland bis 2045 (ohne Agri-PV) in Hektar pro Jahr, gesamte installierte PV-FFA-Leistung in 2045 beträgt 208 GWp; (eigene Darstellung)

Ab dem Jahr 2035 würde das DNS-Ziel zur Senkung des täglichen Siedlungsflächenanstiegs aufgrund des linearen Zubaus von PV-FFA auf Agrarflächen nicht mehr erreicht. Nach heutiger Gesetzgebung dürften ab dem Jahr 2035 keine weiteren Gewerbe-, Wohn-, Freizeit- und Verkehrsflächen zusätzliche Agrarflächen beanspruchen – oder der PV-FFA-Ausbau müsste eingeschränkt werden. In den Jahren zwischen 2045 und 2050 müsste der PV-FFA-Zubau aufgrund der Flächenkreislaufwirtschaft beendet werden, was den Handlungsdruck erklärt, die PV-FFA entweder baurechtlich nicht mehr als Siedlungsflächenanstieg zu bewerten oder nach

Substitutionen zu suchen, die im Einklang mit der Agrarproduktion stehen und zweckmäßig nicht zum Siedlungsflächenanstieg zählen. Dadurch könnte bei Bedarf ein weiterer PV-Zubau bewerkstelligt werden, ohne den Siedlungsflächenanstieg zu erhöhen oder gegen die Flächenkreislaufwirtschaft zu verstoßen.

4.5.2 Szenario 2: Inanspruchnahme Agrarflächen durch PV in Deutschland bis 2045 mit Agri-PV

Für die gesellschaftspolitische Entscheidung zur Förderung der Agri-PV-Diffusion ist die Beurteilung wichtig, ob Agri-PV in Summe einen Beitrag zur Steigerung des Nachhaltigkeitsniveaus in Deutschland leisten kann. Hierbei wird gefragt, welche der Agri-PV-Eigenschaften gegenüber bestehenden PV-Technologien einen zusätzlichen Nutzen für die nachhaltige Entwicklung bedeuten und somit eine Aufnahme in ein Förderregime rechtfertigen. In meiner Publikation „Feldfrüchte und Strom von Agrarflächen: Was ist Agri-PV und was kann sie leisten?“ wurden die Eigenschaften der Agri-PV an deutschen Nachhaltigkeitszielen gemessen. Insgesamt werden sechs SDGs und acht DNS-Schlüsselindikatoren (englisch: Key-Performance-Indicators KPIs) direkt von einer Agri-PV-Diffusion beeinflusst. Zwei KPIs betreffen Alleinstellungsmerkmale der Agri-PV im Vergleich zu sonstigen PV-Anwendungen: KPI 11.1.a „Nachhaltige Landnutzung“ und KPI 9.1 „Zukunft mit neuen Lösungen gestalten“. Für die Bewertung, welche Auswirkung die Agri-PV-Diffusion auf den absoluten und täglichen Agrarflächenerhalt und somit auf den KPI 11.1.a in Deutschland bis 2050 hat, wurde deshalb der PV-FFA-Ausbau auf Agrarflächen mit dem Agri-PV-Ausbau sukzessiv ersetzt. Wie hoch die Substitutionsquote im Jahr ist, kann variieren und wurde in Abbildung 4-11 wechselseitig linear angenommen. Die PV-FFA-Leistung, die weniger auf Agrarflächen angenommen wird, wurde beim Agri-PV-Zubau hinzugezählt. Die Agri-PV-Markteinführung erstreckt sich hierbei über die Jahre von 2022 bis 2030 und würde in einem solchen Szenario nur 16,3 GWp bzw. rund 20 % der PV-FFA-Leistung aus dem Referenzszenario substituieren. Gleichzeitig würde sich jedoch die Chance ergeben, die Agri-PV zu testen, um gegenüber der Gesellschaft, Politik und der Agrar- und Solarwirtschaft ihre Zweckmäßigkeit in Deutschland zu überprüfen. In Szenario 2 würde der PV-FFA-Ausbau das DNS-Ziel Nachhaltiges Landmanagement in keinem

Jahr signifikant beanspruchen und müsste ebenso wie der Siedlungsflächenanstieg durch Gewerbe-, Wohn-, Freizeit- und Verkehrsflächenzubau Jahr für Jahr gesenkt werden.

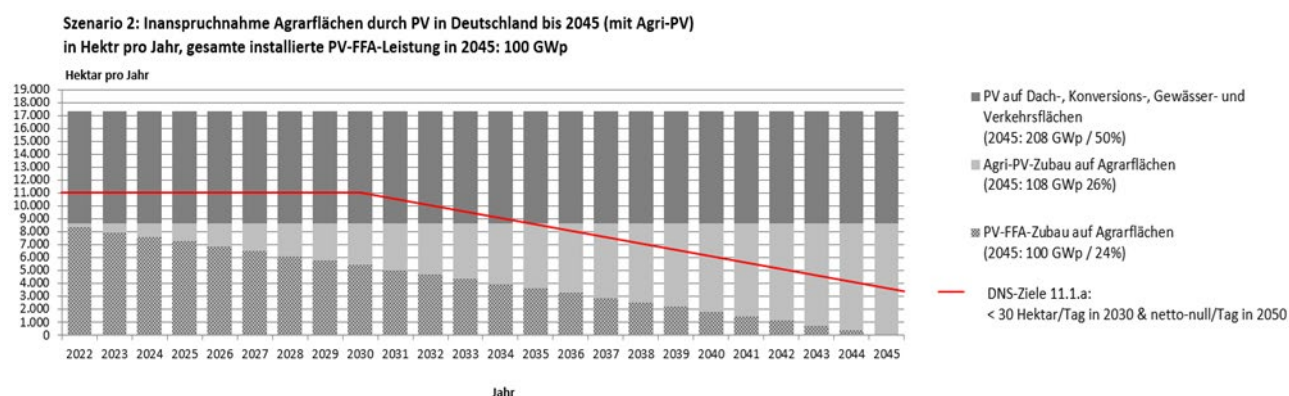


Abbildung 4-11: Szenario 2: Inanspruchnahme Agrarfläche durch PV in Deutschland bis 2045 (mit Agri-PV) in Hektar pro Jahr, gesamte installierte PV-FFA-Leistung beträgt 100 GWp; (eigene Darstellung)

Fazit: Vergleich der Szenarien definiert Agri-PV-Auswirkung auf den Agrarflächenerhalt

Ob und wie viel Wirkung die Agri-PV-Markteinführung und -Diffusion in Deutschland entfalten kann, ist stark von der politischen Ambition abhängig, wie viel Agrarflächen für die Nahrungsmittelproduktion erhalten bleiben sollen. Die PV-Ausbauziele, von ca. 6 GWp im Jahr 2021 auf über 17,33 GWp ab 2022 zu erhöhen, sind für die PV-Branche sehr herausfordernd und werden „starke Wachstumsschmerzen“ verursachen. Eine parallele Agri-PV-Markteinführung überfordert viele PV-Projektierer, weil sie ohnehin kaum mit dem Wachstum ihrer bisherigen Geschäftsmodelle hinterherkommen. Selbst wenn die Politik moderate Zielsetzungen für den Agrarflächenerhalt stellt und in etwa die Hälfte der PV-FFA-Leistung auf Agrarflächen durch Agri-PV ersetzt wird, könnten rund 108.000 Hektar für die Nahrungsmittelproduktion erhalten bleiben, was bis 2045 etwa 12,3 Hektar täglich entspricht – oder 17 Fußballplätze am Tag für 24 Jahre in Folge. Bei dieser Annahme liegen die nach heutiger Gesetzgebung notwendigen Ausgleichs- und Kompensationsflächen für den naturrechtlichen Eingriff im Außenbereich und die damit verbundene zusätzliche Agrarflächeninanspruchnahme ist nicht beinhaltet.

4.6 Referenzen

- AfD (2021): Deutschland. Aber normal. Programm der Alternative für Deutschland für die Wahl zum 20. Deutschen Bundestag. Online verfügbar unter https://www.afd.de/wp-content/uploads/sites/111/2021/06/20210611_AfD_Programm_2021.pdf, zuletzt geprüft am 01.09.2022.
- Bauer, Nicole (2021): Kleine Anfrage zu Potentiale von Agri-Photovoltaik. Antwort der Bundesregierung. 11.05.2021. Hg. v. FDP Bundestagsfraktion. Online verfügbar unter <https://www.fdpbt.de/anfrage/kleine-anfrage-potentiale-agri-photovoltaik>, zuletzt aktualisiert am 17.05.2022, zuletzt geprüft am 17.05.2022.
- BMEL (2021a): Richtlinie zur Förderung der Energieeffizienz und CO₂-Einsparung in Landwirtschaft und Gartenbau. Teil A – Landwirtschaftliche Erzeugung, Wissenstransfer. Hg. v. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). BMEL. Online verfügbar unter https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/Projektfoerderung/BuPro_Energieeffizienz/A-Richtlinie.pdf?__blob=publicationFile&v=2, zuletzt aktualisiert am 18.08.2021, zuletzt geprüft am 18.05.2022.
- BMEL (2021b): GAP-Direktzahlungen-Verordnung (GAPDZV). Verbändestellungnahmen zum Referentenentwurf. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). Online verfügbar unter https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Glaeserne-Gesetze/Stellungnahmen/GAPDZV.pdf?__blob=publicationFile&v=2, zuletzt geprüft am 18.05.2022.
- BMEL (2021c): Verordnung zur Durchführung der GAP-Direktzahlungen. GAP-Direktzahlungen-Verordnung – GAPDZV. Unter Mitarbeit von Schneider Charlotte. BMEL. Online verfügbar unter https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Glaeserne-Gesetze/Kabinettfassung/GAPDZV.pdf?__blob=publicationFile&v=3, zuletzt aktualisiert am 24.11.2021, zuletzt geprüft am 31.05.2022.
- BMEL (2021d): Landwirtschaftliche Flächenverluste. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). Online verfügbar unter <https://www.bmel.de/DE/themen/landwirtschaft/flaechennutzung-und-bodenmarkt/flaechenverluste-landwirtschaft.html>, zuletzt aktualisiert am 21.12.2021, zuletzt geprüft am 16.05.2022.
- BMEL (2022): GAP-Strategieplan für die Bundesrepublik Deutschland. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). Online verfügbar unter <https://www.bmel.de/DE/themen/landwirtschaft/eu-agrarpolitik-und-foerderung/gap/gap-strategieplan.html>, zuletzt aktualisiert am 04.04.2022, zuletzt geprüft am 16.05.2022.
- BMUV (2021): Bundesumweltministerium fördert innovative Agro-Photovoltaik. Pressemitteilung Nr. 127/21. BMUV. Online verfügbar unter <https://www.bmu.de/pressemitteilung/bundesumweltministerium-foerdert-innovative-agro-photovoltaik/>, zuletzt aktualisiert am 11.06.2021, zuletzt geprüft am 01.09.2022.
- BnetzA (2021a): Verwaltungsverfahren Az.: 8175-07-00-21/1. Festlegung der Anforderungen besonderer Solaranlagen nach §15 Innovationsausschreibungsverordnung. Hg. v. Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen. BnetzA. Online verfügbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/Ausschreibungen/Innovations/GezeichneteFestlegungOktober2021.pdf?__blob=publicationFile&v=3, zuletzt geprüft am 26.04.2022.
- BnetzA (2021b): Ein-ge-gan-ge-ne Stel-lung-nah-men im Fest-le-gungs-verfah-ren zu den be-son-de-ren So-lar-an-la-gen. Bundesnetzagentur (BNetzA). Online verfügbar unter <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Ausschreibungen/Innovation/BesondereSolaranlagen/StellungnahmenFestlegungsverfahren/start.html>, zuletzt aktualisiert am 18.05.2022, zuletzt geprüft am 18.05.2022.

- Böhm, Jonas (2022): Wie viele landwirtschaftlichen Flächen sind bereits durch PV-Freiflächenanlagen aus der Produktion genommen? Hg. v. Thünen-Institut für Betriebswirtschaft. Online verfügbar unter https://www.dlg-mitteilungen.de/fileadmin/img/content/cover/heft/2022/22-02/DLG0222_Flaechennutzung_PV-FFA_Boehm.pdf, zuletzt geprüft am 27.05.2022.
- Buhr, Daniel (2010): Chaos oder Kosmos? Die Koordination der Innovationspolitik des Bundes - Probleme und Lösungsansätze. 1. Auflage. Baden-Baden: Nomos Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG (Wirtschafts- und Sozialpolitik, 4). Online verfügbar unter <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflicht-1202145>.
- Bundesinformationszentrum Landwirtschaft (2021): Was wächst auf Deutschlands Feldern? Online verfügbar unter <https://www.landwirtschaft.de/landwirtschaft-verstehen/wie-arbeiten-foerster-und-pflanzenbauer/was-waechst-auf-deutschlands-feldern>, zuletzt aktualisiert am 27.05.2022, zuletzt geprüft am 27.05.2022.
- Bundesverfassungsgericht (2021): Verfassungsbeschwerden gegen das Klimaschutzgesetz teilweise erfolgreich. Pressemitteilung Nr. 31/2021 vom 29. April 2021. 1 BvR 2656/18, 1 BvR 288/20, 1 BvR 96/20, 1 BvR 78/20. Online verfügbar unter <https://www.bundesverfassungsgericht.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2021/bvg21-031.html>, zuletzt geprüft am 17.05.2022.
- Bündnis 90/Die Grünen (2021): Deutschland. Alles ist drin. Bundestagswahlprogramm 2021. Online verfügbar unter https://cms.gruene.de/uploads/documents/Wahlprogramm-DIE-GRUENEN-Bundestagswahl-2021_barrierefrei.pdf, zuletzt geprüft am 01.09.2022.
- CDU/CSU (2021): Das Programm für Stabilität und Erneuerung. Gemeinsam für ein modernes Deutschland. Online verfügbar unter <https://www.csu.de/common/download/Regierungsprogramm.pdf>, zuletzt geprüft am 01.09.2022.
- Destatis (2021): Siedlungs- und Verkehrsfläche wächst jeden Tag um 52 Hektar. Pressemitteilung Nr. 209 vom 30. April 2021. Statistisches Bundesamt (Destatis). Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2021/04/PD21_209_412.html, zuletzt aktualisiert am 30.04.2021, zuletzt geprüft am 27.05.2022.
- Die Bundesregierung (2020a): Die Nationale Wasserstoffstrategie. Hg. v. BMWK. BMWi. Online verfügbar unter https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=20, zuletzt geprüft am 17.05.2022.
- Die Bundesregierung (2020b): Die deutsche Nachhaltigkeitsstrategie. Weiterentwicklung 2021. Online verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/998194/1875176/3d3b15cd92d0261e7a0bc8f43b7839/deutsche-nachhaltigkeitsstrategie-2021-langfassung-download-bpa-data.pdf>, zuletzt geprüft am 16.05.2022.
- EARTO (2014): The TRL Scale as a Research & Innovation Policy toll, EARTO Recommendations.
- Enkhardt, Saskia (2022): Photovoltaik-Zubau in Deutschland 2021 brutto bei 5263,2 Megawatt. In: PV Magazine, 31.01.2022. Online verfügbar unter <https://www.pv-magazine.de/2022/01/31/photovoltaik-zubau-in-deutschland-2021-brutto-bei-52632-megawatt/>, zuletzt geprüft am 27.05.2022.
- Europäische Kommission (2022): Short-term outlook for EU agricultural markets in 2022. Spring 2022. Edition N°32. DG Agriculture and Rural Development. Brüssel. Online verfügbar unter https://agriculture.ec.europa.eu/system/files/2022-04/short-term-outlook-spring-2022_en_0.pdf, zuletzt geprüft am 01.09.2022.
- FDP (2021): Nie Gab es mehr zu tun. Wahlprogramm der Freien Demokraten. Bundestagswahl 2021. Hg. v. FDP. Beschluss des 72. Ord. Bundesparteitag der Freien Demokraten vom 14.-16. Mai 2021 (Seite 60). Online verfügbar unter https://www.fdp.de/sites/default/files/2021-06/FDP_Programm_Bundestagswahl2021_1.pdf.
- FNR (2022): Tabelle der Anbaufläche für nachwachsende Rohstoffe 2021. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR). Online verfügbar unter <https://mediathek.fnr.de/grafiken/daten-und-fakten/anbauflaeche-fur-nachwachsende-rohstoffe-tabelle.html>, zuletzt aktualisiert am 27.05.2022, zuletzt geprüft am 27.05.2022.
- Jäger, Wolfgang (1988): Von der Kanzlerdemokratie zur Koordinationsdemokratie: Für Wilhelm Hennis zum 65. Geburtstag. In: Zeitschrift für Politik 35 (1), S. 15–32. Online verfügbar unter <http://www.jstor.org/stable/24226667>.

- Landwirtschaftskammer Oberösterreich (2021): Steuerliche Konsequenzen von PV-Anlagen auf landwirtschaftlichen Flächen. Grundlage: Einkommensteuerrichtlinien Rz 5189 ff. Online verfügbar unter <https://ooe.lko.at/steuerliche-konsequenzen-von-pv-anlagen-auf-landwirtschaftlichen-fl%C3%A4chen+2400+3421151>, zuletzt geprüft am 27.05.2022.
- Matland, Richard E. (1995): Synthesizing the Implementation Literature: The Ambiguity-Conflict Model of Policy Implementation. In: *Journal of Public Administration Research and Theory: J-PART 5* (2), S. 145–174. Online verfügbar unter <http://www.jstor.org/stable/1181674>.
- Mayntz, Renate (Hg.) (1980): *Implementation politischer Programme II*. Neue Wissenschaftliche Bibliothek Soziologie. Verlagsgruppe Athenäum, Hain, Scriptor, Hanstein.
- Mayntz, Renate; Scharpf, Fritz (Hg.) (1973): *Planungsorganisation. Die Diskussion um die Reform von Regierung und Verwaltung des Bundes*. München: R. Piper & Co. Verlag (Piper-Sozialwissenschaft Reader zur Politologie, Soziologie und Ökonomie, 17).
- Rudzio, Wolfgang (2019): *Das politische System der Bundesrepublik Deutschland*. 10. Aufl. 2019. Wiesbaden: Springer VS (Springer eBook Collection).
- Scharpf, Fritz W. (1972): Komplexität als Schranke der politischen Planung. In: Erwin Faul (Hg.): *Gesellschaftlicher Wandel und politische Innovation Tagung der Deutschen Vereinigung für Politische Wissenschaft in Mannheim, Herbst 1971*. Opladen, Westdeutsche Verlag: VS Verlag für Sozialwissenschaften (Politische Vierteljahresschrift./Sonderheft 4/1972), S. 168–192.
- Schindele, Stephan (2021a): 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, Stephan (2021b): Nachhaltige Landnutzung mit Agri-Photovoltaik: Photovoltaikausbau im Einklang mit der Lebensmittelproduktion: Szenarioanalyse zur Inanspruchnahme landwirtschaftlicher Nutzflächen durch Photovoltaik in Deutschland bis 2050. In: *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society 30* (2), S. 96–105. DOI: 10.14512/gaia.30.2.7.
- SPD (2021): *Das Zukunftsprogramm der SPD. Wofür wir stehen. Was uns antreibt. Wonach wir streben*. Online verfügbar unter <https://www.spd.de/fileadmin/Dokumente/Beschluesse/Programm/SPD-Zukunftsprogramm.pdf>, zuletzt geprüft am 01.09.2022.
- SPD; Bündnis 90/Die Grünen und FDP (2021): *Mehr Fortschritt wagen. Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit*. Online verfügbar unter https://www.spd.de/fileadmin/Dokumente/Koalitionsvertrag/Koalitionsvertrag_2021-2025.pdf, zuletzt geprüft am 13.05.2022.
- Thünen (2022): *PV-Freiflächenanlagen in der Landwirtschaft*. Johann Heinrich von Thünen-Institut. Online verfügbar unter <https://www.thuenen.de/de/fachinstitute/betriebswirtschaft/projekte/pv-freiflaechenanlagen-in-der-landwirtschaft>, zuletzt aktualisiert am 01.09.2022, zuletzt geprüft am 01.09.2022.
- VGH München (2021): *Zahlungsansprüche für Flächen, auf denen ein Solarpark errichtet ist und die zugleich als Schafweide genutzt werden*. VGH München. Online verfügbar unter <https://www.gesetze-bayern.de/Content/Document/Y-300-Z-BECKRS-B-2021-N-16272?hl=true>, zuletzt aktualisiert am 01.06.2021, zuletzt geprüft am 31.05.2022.
- Wunder, Stephanie; Kaphengst, Timo; Frelid-Larsen, Ana; McFarland, Keighley; Albrecht, Stefanie (2018): *Land Degradation Neutrality. Handlungsempfehlungen zur Implementierung des SDG-Ziels 15.3 und Entwicklung eines bodenbezogenen Indikators*. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-02-21_texte_15-2018_land-degration-nutrality_de.pdf, zuletzt geprüft am 17.05.2022.
- Wuppertal Institut (2014): *Stellungnahme zur BMWi-Konsultation "Eckpunkte für ein Ausschreibungsdesign für Photovoltaik-Freiflächenanlagen"*. Agrophotovoltaik (APV) als ressourceneffiziente Landnutzung. Hg. v. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. Wuppertal. Online verfügbar unter <https://epub.wupperinst.org/frontdoor/index/index/docId/5547>, zuletzt geprüft am 26.04.2022.

Kapitel 5 Schlussfolgerungen

„Die reinste Form des Wahnsinns ist es, alles beim Alten zu lassen und gleichzeitig zu hoffen, dass sich etwas ändert.“

Albert Einstein (Physiker, 1879–1955)

5.1 Gesamtfazit und Politikempfehlungen

5.1.1 Gesamtfazit

Weltweit: In der politischen Genese der UN-Nachhaltigkeitsziele ergab eine Umfrage unter den UN-Mitgliedstaaten im Jahr 2012, dass elf Themenfelder für die nachhaltige Entwicklung von großer Bedeutung sind. Als die wichtigsten vier Themen wurden in absteigender Priorität Frieden, Ernährungssicherheit, Wasser und Energie genannt (UN 2012). In der Wirkungskette der UN-SDGs ist ein intaktes Ökosystem Grundvoraussetzung für ein friedliches soziales Miteinander auf unserer Erde. Frieden ist Bedingung für steigenden Wohlstand und Wirtschaftswachstum (Neville D. Crossman et al. 2018). Gerät diese Grundstruktur aus dem Gleichgewicht, ist der Entwicklungsprozess zur Steigerung des globalen Nachhaltigkeitsniveaus gefährdet. Aktuell setzt Russland Nahrungsmittel und Energie als politisches Druckmittel ein, um seine Ziele im Ukraine-Krieg durchzusetzen. Drei der vier wichtigsten Themenfelder für nachhaltige Entwicklung werden missachtet. Versorgungsengpässe sorgen für steigende Nahrungsmittel- und Energiepreise. Menschen können sich ihr tägliches Brot nicht mehr leisten und hungern. Der soziale Frieden ist vor Ort gefährdet, der Migrationsdruck an den EU-Außengrenzen steigt und demokratische Strukturen geraten ins Schwanken – sowohl außerhalb der EU als auch innerhalb der EU. Der Klimawandel führt zu extremer Trockenheit. Wasserknappheit sorgt für Ernteaufschläge und

verringert zusätzlich die Nahrungsmittelsicherheit. Die globalen CO₂-Emissionen erreichen 2022 einen neuen Rekordwert (IEA 2022). Der sogenannte „Earth Overshoot Day“ tritt seit 1961 jährlich früher in Erscheinung (Welthungerhilfe 2022). Zweifelsohne steht die Menschheit vor umfangreichen, generationsübergreifenden Herausforderungen: Klimaschutz durch Dekarbonisierung unserer Weltwirtschaft, Armutsbekämpfung, Anpassung des Städtebaus und der Landwirtschaft an den Klimawandel, ressourceneffiziente Wasser- und Agrarflächennutzung für Ernährungssicherheit einer wachsenden Weltbevölkerung, Müllreduktion und die Einführung einer Kreislaufwirtschaft. Unsere Ökosysteme stehen kurz vor dem Kollaps oder sind bereits kollabiert. „Schon jetzt haben wir der Atmosphäre wahrscheinlich genug CO₂ hinzugefügt, um damit die ansonsten in 50.000 Jahren fällige nächste Eiszeit zu verhindern“ (Rahmstorf 2022). Wir sind dazu angehalten, nicht mehr natürliche Ressourcen zu verbrauchen, als die Erde innerhalb eines Jahres wiederherstellen kann. In rechtstaatlichen Demokratien wird gesellschaftlich verlangt, dass die Transformation zu einer nachhaltigen Weltwirtschaft sozialgerecht gesteuert wird, bspw. der Strukturwandel durch den Kohleausstieg in Deutschland. Nicht nur durch den Krieg in der Ukraine, sondern insbesondere durch die stets fortschreitende Klimaerhitzung in den vergangenen Jahrzehnten sind das Krisenbewusstsein und Verständnis für eine effiziente und nachhaltige Nutzung natürlicher Ressourcen wie Nahrungsmittel, Wasser und Energie gesellschaftlich gestiegen.

EU und Deutschland: Bis 2050 soll Europa zum ersten klimaneutralen Kontinent werden. Deutschland ist das bevölkerungsreichste Land und die größte Volkswirtschaft der EU. Mit einem Anteil von 22,8 % der Treibhausgas-Emissionen in der EU ist Deutschland der mit Abstand größte CO₂-Verursacher. Auch die Pro-Person-CO₂-Emissionen liegen in Deutschland über 20 % höher als der EU-Durchschnitt. Der Ausstieg aus der Nuklearstromerzeugung wird in den Jahren 2022 und 2023 vollzogen. Die Kohleverbrennung soll möglichst vor 2030 beendet werden, die Erdgasverbrennung im Jahr 2036. In den kommenden Jahrzehnten werden massive Investitionen in die Strom- und Gasnetzinfrastruktur erfolgen müssen, wenn Deutschland seine Klimaschutzziele einhalten möchte. Die installierte PV-Leistung in Deutschland soll sich von ca. 60 GWp Ende 2021 auf 215 GWp Ende 2030 sowie auf 475 GWp Ende 2045 verachtfachen. Der jährliche PV-Zubau soll sich von derzeit 6 GWp pro Jahr auf etwa 18 GWp im Jahr verdreifachen. Die Hälfte des PV-Zubaus, ca. 208 GWp, soll durch PV-FFA umgesetzt werden, was in etwa 208.000 Hektar entspricht. Jeden Tag werden somit 23,73 Hektar Agrarfläche (umgerechnet 33 Fußballplätze/Tag) für 24 aufeinanderfolgende Jahre durch den PV-FFA-

Ausbau beansprucht. Die 208.000 Hektar werden im Jahr 2050 schätzungsweise 1,28 % der verfügbaren Agrarfläche beanspruchen. Zusätzlich zum PV-FFA-Ausbau werden weitere Agrarflächen für die Ausweisung von Industriegebieten, Wohn-, Freizeit- und Verkehrsflächen beansprucht. In der Annahme, dass der Siedlungsflächenanstieg ohne Berücksichtigung des PV-FFA-Ausbaus zwischen den Jahren 2022 und der Einführung einer Flächenkreislaufwirtschaft ab 2051 täglich linear degressiv verläuft, werden zusätzlich 250.390 Hektar bzw. 1,54 % Agrarfläche beansprucht. Zwischen Anfang 2022 und Ende 2050 werden in Summe mit hoher Wahrscheinlichkeit 458.390 Hektar, also ca. 2,82 % der Agrarfläche für den Siedlungsflächenanstieg inkl. des PV-FFA-Ausbaus beansprucht. Dies entspricht flächenmäßig in Summe den Bundesländern Saarland, Bremen, Hamburg und Berlin zusammen. Dieser Siedlungsflächenanstieg und der Verlust der inländischen Nahrungsmittelproduktion führen ceteris paribus zu einem Anstieg des regionalen Flächendrucks, zur Erhöhung des Nahrungsmittelimports und der Nahrungsmittelpreise im Exportland, zur Reduktion der Nahrungsmittelsicherheit in weniger zahlungsstarken Märkten sowie zur Bedrohung des Artenbestands aufgrund geringerer Umweltauflagen im landwirtschaftlichen Prozess. Das Ziel, überdurchschnittlich fruchtbare Böden für die Nahrungsmittelproduktion zu erhalten, stellt eine ethisch-moralische Verpflichtung dar. Wirtschafts- und Wohlstandswachstum scheinen in Deutschland einen höheren Stellenwert zu genießen als Umwelt- und Agrarflächenschutz. Sektorübergreifende Lösungen, die einen Beitrag zur Entschärfung von Flächenkonkurrenzen leisten können, werden benötigt, um das Nachhaltigkeitsniveau in Deutschland in den Transformationsbereichen nachhaltige Agrar- und Ernährungssysteme, Kreislaufwirtschaft sowie Energiewende und Klimaschutz zu steigern.

Agri-PV-Politik in Deutschland: Für die Agri-PV-Markteinführung in Deutschland sind auf Bundesebene zwei Ministerien federführend verantwortlich: unter anderem das BMEL für den landwirtschaftlichen Teil im Agri-PV-System und für die Dekarbonisierung des Agrarsektors, wozu auch die Elektrifizierung landwirtschaftlicher Betriebe mittels Solarstromeigenversorgung zählt. Das BMWK ist für den Solarstrom-Teil im Agri-PV-System zuständig. Im Gegensatz zum BMEL gibt das BMWK Investitionsanreize für Agri-PV-Anlagen, die weit über den Strombedarf eines landwirtschaftlichen Betriebs hinausgehen und ausschließlich der Netzeinspeisung dienen. Weitere bundesstaatliche Ressorts sind zwar nicht in der Federführung, sollten jedoch die Agri-PV-Markteinführungsphase mit Anpassungen der gesetzlichen Rahmenbedingungen in ihren Zuständigkeiten unterstützen, bspw. das BMWSB,

indem die Baunutzungsverordnung angepasst wird und somit eine multifunktionale Landnutzung auf Agrarflächen baurechtlich ermöglicht. Das BMUV ist an der Agri-PV-Markteinführung politisch interessiert, weil es die Einführung einer Flächenkreislaufwirtschaft und Bodenschutz verantwortet und somit das DNS-Ziel „11.1.a Nachhaltiges Landmanagement“. Das BMUV muss zusätzlich die Widerstände zur Agri-PV-Markteinführung der Umwelt- und Naturschutzverbände berücksichtigen und kann durch zwei Kompromissvorschläge einen Ausweg aus dem Dilemma „Bread or Bird“¹¹ aufzeigen: i) PV-Biodiversitätsprojekte auf ertragsniedrigen Agrarflächen sollten den EU-GAP-Zielen der 4%-Stilllegungsflächen je landwirtschaftlichem Betrieb angerechnet werden und ii) könnten Agri-PV-Projekte auf ertragsreichen Agrarflächen in Kombination mit ökologischer Landwirtschaft im EEG-Förderregime bevorzugt bewilligt werden. Die Unterstützung der Agri-PV ist im Koalitionsvertrag und in den Wahlprogrammen der Grünen und SPD festgehalten. Drei der vier relevanten Bundesministerien sind im Kompetenz-Cluster durch Grüne-Minister:innen geführt. Das BMWSB wird durch die SPD geleitet. Drei der vier wichtigsten Politikfelder der Agri-PV-Diffusion können somit innerhalb der Grünen-Partei verhandelt werden, wodurch die Transaktionskosten zu einer Agri-PV-Politik aus einem Guss im Koordinationsprozess verringert werden. Die Veröffentlichung des Eckpunktepapiers zum PV-Ausbau im Einklang mit der Landwirtschaft durch die Ministerien BMEL, BMWK und BMUV untermauert dieses Kompetenz-Cluster und den Anspruch der Grünen, die Transformationsbereiche nachhaltige Agrar- und Ernährungssysteme, Kreislaufwirtschaft sowie Energiewende und Klimaschutz gesellschaftspolitisch zu verantworten. Seit der Umsetzung des APV-RESOLA-Pilotvorhabens im Jahr 2016 sind insgesamt 17 Gesetzgebungen mit Relevanz auf die Agri-PV-Markteinführung identifiziert worden. Einige Gesetze haben sich seitdem weiterentwickelt und wurden bereits auf die Agri-PV-Lösung angepasst, bspw. befinden sich derzeit die Gesetzesentwürfe für das EEG 2023 und die GAPDZV in der parlamentarischen Abstimmung. Zwölf der 17 Gesetzgebungen werden in der Agri-PV-Innovationsbewertung als innovationshemmend bezeichnet und aus Sicht einer möglichst ambitionierten Agri-PV-Markteinführung ist eine Nachbesserung notwendig, um den Schritt von Innovation zu Diffusion zu erleichtern.

¹¹ Mit „Bread or Bird“ meine ich das politische Spannungsfeld, ob ertragsreiche, intensive genutzte Agrarflächen für den Artenschutz stillgelegt werden sollten („Bird“) oder weiterhin für die Erzeugung von Nahrungs- und Futtermittel verwendet werden („Bread“). Der Beschluss aufgrund des Ukraine-Kriegs, Stilllegungsfläche ausnahmsweise doch für die Nahrungsmittelproduktion heranzuziehen, zeigt das Dilemma auf. Das Politikziel, den PV-Ausbau mit Landwirtschaft und Naturschutz in Einklang zu bringen, ist der Versuch, das Konfliktniveau in diesem Spannungsfeld abzubauen.

Genese der Doppelernte-Idee: Die ursprüngliche Idee von Goetzberger und Zastrow war 1981, auf einen drohenden Landnutzungskonflikt zwischen dem PV-Ausbau auf Agrarflächen und der Nahrungsmittelproduktion hinzuweisen. Als Lösung dieser Landnutzungskonkurrenz schlugen die Autoren vor, die PV-Module hochaufzuständern, damit eine landwirtschaftliche Tätigkeit darunter ermöglicht wird (Goetzberger und Zastrow 1981). Der Rahmen dieser Grundidee umfasst den „Food-Energy Nexus“ sowie den Anspruch an das Doppelernte-System, dass für die landwirtschaftliche Tätigkeit unter den PV-Modulen die Lichtverfügbarkeit ausreichend und gleichmäßig ist.

40 Jahre später bedarf diese Grundidee einer Anpassung an heutige Realitäten. Neben der Krise zur globalen Ernährungssicherheit und der sich daraus ableitenden ethisch-moralischen Verpflichtung zum ressourceneffizienten Umgang mit unseren Agrarflächen haben sich zusätzliche Krisen entwickelt, u. a. die Klimaerhitzung, Wasserknappheit und die Biodiversitätskrise. Heute stellen die Gesellschaft und die Politik den Anspruch an die Landwirtschaft, negative Auswirkungen auf das natürliche Umfeld möglichst zu verhindern bzw. einen positiven Lösungsbeitrag zur Bewältigung der Poly-Krise zu leisten. Der Agrarsektor ist dazu angehalten, seine CO₂-Emissionen zu reduzieren, der Wasserbedarf sollte gesenkt und das Grundwasser nicht negativ belastet werden. Der Plastikeinsatz im Agrarbereich der Sonderkulturen, bspw. bei Hagelnetzen und Folientunneln, sollte verringert werden. Die Erosion des trockenen Bodens sollte vermieden werden und ertragsniedrige Agrarflächen, die nur noch mit hohem technologischem Aufwand agrarreich bleiben, sollten gemäß EU-GAP-Richtlinien in Stilllegungsflächen überführt werden, damit sich die lokale Artenvielfalt erhöht. Mit den gestiegenen Ansprüchen an die Landwirtschaft sollte auch die Grundidee der Doppelernte angepasst werden. Damit der PV-Ausbau auf Agrarflächen im Einklang mit der Landwirtschaft erfolgen kann, müssen die Anforderungen an die Agri-PV-Systemtechnik umfassender sein als der bloße „Food-Energy Nexus“. Die Agri-PV-Definition sollte die Dimensionen des „Food-Energy-Water-Biodiversity Nexus“ abdecken und die Agri-PV-Diffusion sollte sich im Wesentlichen zwei Ziele setzen: i) einen Lösungsbeitrag zur Poly-Krise leisten und ii) im Konsens mit dem Agrarsektor und Naturschutz erfolgen, indem sichergestellt wird, dass die Agri-Diffusion der Landwirtschaft und dem Naturschutz dienlich ist. Landwirte sollten durch die PV-Umsetzung auf Agrarflächen keine negativen Auswirkungen erfahren, bspw. was den Zugang zu Agrarsubventionen, die steuerliche Bewertung der Agrarfläche oder die Wirtschaftlichkeit ihrer Betriebe angeht, solange durch die PV-Integration in den

landwirtschaftlichen Prozess techno-ökologische Synergien entstehen. Im Folgenden werden einige Beispiele von PV-Anwendungen auf Agrarflächen genannt, die gemäß einer angepassten Grundidee heute als Agri-PV-Anlage gelten müssten:

- a) Eine PV-FFA, die durch die Integration von Biodiversitätsmaßnahmen (BioDiv-PV-Anlagen) die lokale Artenvielfalt im Vergleich zur vorherigen Landnutzung erhöht und bei der die Grünpflege durch den Landwirt erfolgt, sollte als Stilllegungsfläche gemäß EU-GAP anerkannt und dadurch als Agri-PV-Anlage bewertet werden.
- b) Eine PV-FFA auf Dauergrünland, die innerhalb der Vegetationsphase mit Schafbeweidung oder sonstiger Nutztierhaltung für die Grünflächenpflege betrieben wird, ist nach diesem Verständnis eine Agri-PV-Anlage („Rangevoltaic“) und der Status der Agrarfläche sollte baurechtlich erhalten bleiben.
- c) Eine PV-FFA auf Ackerflächen, bei der die PV-Modulreihenabstände erweitert wurden, damit die Zwischenräume mit Landmaschinentchnik bewirtschaftet werden können, sollte als Agrarfläche gelten und nicht mit der Qualität eines Industriegebiets gleichgesetzt werden.
- d) Hochaufgeständerte PV-Anlagen, die eine landwirtschaftliche Tätigkeit unter den PV-Modulen ermöglichen und ggf. die Nutzpflanzen vor Starkwetterereignissen schützen, sollten bei der Bewertung der Landnutzungsform nicht den Status Agrarflächen verlieren und dem landwirtschaftlichen Betrieb zugehörig sein.

Bei all diesen Beispielen von PV-Anwendungen auf Agrarflächen gilt, dass die Intensität der Zusammenwirkung zwischen Landwirtschaft und PV zunimmt, je stärker eine technische Anpassung des PV-Systems vorgenommen wurde, um die PV-Technologie in den landwirtschaftlichen Erzeugungsprozess zu integrieren. Das Niveau der PV-Technikanpassung schlägt sich in der Kostenstruktur der Agri-PV-Anlage nieder, wobei das Prinzip gilt: je ausgeprägter die PV-Technikanpassung gegenüber einer PV-FFA, je höher sind die Systemkosten, desto höher sind die techno-ökologischen Synergien im Agri-PV-System. Beispiele für die PV-Technikanpassung, um Synergieeffekte herbeizuführen, sind bspw. lichtdurchlässige PV-Module, eine höhere Unterkonstruktion, ein höherer Aufwand in der Installation der Anlage aufgrund längerer Kabelgräber oder die Verwendung von mobilen Fahrstraßen in der Anlagenerrichtung zur Vermeidung von Bodenverdichtung sowie die Integration von einer Wasserauffang- und Bewässerungstechnik ins PV-System. Schlussendlich

obliegt es der Gesellschaft und Politik, zu entscheiden, welche Agri-PV-Anwendungen in welchem Agrarsegment und in welchem Umfang durch die Implementierung eines entsprechenden Förderregimes unterstützt werden.

5.1.2 Politikempfehlung

In Unterkapitel 4.3 „Policy-Dimension: Welche gesetzlichen Rahmenbedingungen im Mehr-Ebenen-System stehen der Agri-PV-Markteinführung innovationshemmend entgegen?“ wurden sechs Policies identifiziert, die für eine „Agri-PV-Markteinführung aus einem Guss“ von politischen Entscheidungsträgern angepasst werden müssten. Diese Policies wurden in Tabelle 4-1: „Übersichtstabelle Mehr-Ebenen-Policy-Analyse der Agri-PV-Markteinführung in Deutschland“ in der Spalte „Agri-PV-Innovationsbewertung“ mit „-1*“ gekennzeichnet. Im Folgenden werden diese sechs Gesetzgebungen in absteigender Priorität genannt und jeweils im Detail erläutert, wie eine Policy-Anpassung ausgestaltet werden sollte:

1) **EEG 2023: Finanzierbarkeit von Agri-PV-Betreibergesellschaften nicht gegeben, wenn Solarstromvergütung gesetzlich an Agrarerträge gekoppelt ist**

Das EEG 2023 beruft sich im Agri-PV-Fördermechanismus auf die Innovationsausschreibung für besondere Solaranlagen im EEG 2021 und auf die darin verordnete Festsetzung der Agri-PV-Definition und Kontrollmechanismen durch die BNetzA. Die BNetzA reguliert u. a.: „Nach Inbetriebnahme ist in jedem dritten Jahr die Weiterführung der landwirtschaftlichen Tätigkeit (Nutzpflanzenanbau bzw. Anbau von Dauerkulturen oder mehrjährigen Kulturen) im Sinne des §15 Nummer 2a) und b) InnAusV auf den Flächen in den vergangenen drei Jahren gegenüber dem Netzbetreiber durch eine gutachterliche Bestätigung nachzuweisen. Der Gutachter muss in der gutachterlichen Bestätigung auch bescheinigen, dass die landwirtschaftliche Tätigkeit nicht in einem offensichtlichen Widerspruch zum Stand der Technik durchgeführt wird. Die Bestätigung des Gutachtens kann auf Grundlagen von Luftbildern, sonstigen Fotografien oder durch Auszüge aus den Schlagkarteien erfolgen“ (BnetzA 2021a). Diese Regulierung bewirkt, dass der Netzbetreiber anhand der nachgewiesenen Agrarerträge entscheiden kann, ob die Solarstromerlöse in der Höhe wie im EEG-Bieterverfahren bezuschlagt an die Agri-PV-Betreibergesellschaft ausbezahlt werden oder ob die Stromverkaufserlöse reduziert oder gar nicht ausbezahlt werden und nur der Marktwert des eingespeisten Stroms an die Agri-PV-Betreibergesellschaft bezahlt wird. Die gültige Regulierung veranlasst die Banken dazu,

anzunehmen, dass nur der Marktwert und nicht der Angebotspreis im Bieterverfahren für 20 Jahre ausbezahlt wird, weil das stromseitige Geschäftsmodell an die Agrarerträge gekoppelt ist und der Landwirt den Hauptteil der Verantwortung zur Finanzierung der getätigten Investition trägt. Äußere und unvorhergesehene Umstände können jedoch dazu führen, dass der Landwirt unbeabsichtigt Agrarerträge auf der Agri-PV-Fläche einbüßt und somit auch die einkalkulierten Solarstromerlöse gefährdet. Trockenheit, Starkregenereignisse oder Insektenplagen könnten die Agrarerträge gefährden. Der Landwirt könnte erkranken, verunglücken oder in den vorzeitigen Ruhestand gehen müssen, ohne dass die Hofübergabe vollends geklärt ist. Auch eine Kombination aus den genannten Risiken auf die Agrarerträge ist denkbar. Finanzierende Banken tragen dieses Risiko nicht mit. Eine Bankability ist in Deutschland aufgrund dieser Verordnung nicht gegeben. Zusätzlich untergräbt die Verknüpfung der Solarstromerlöse an den Agrarertrag die Idee, das Einkommen der Landwirte zu diversifizieren. Denn steigende Klimawandelrisiken, bspw. Hitze und Trockenheit, gefährden die Agrarerträge und somit auch die Zusatzeinkünfte aus der Solarstromerzeugung.

Aus der Analyse ideologischer Distanzen zwischen Akteuren hinsichtlich der Agri-PV-Markteinführung (siehe Kapitel 4.2) geht hervor, dass Umwelt- und Agrarverbände ein hohes Interesse daran haben, dass durch die landwirtschaftliche Tätigkeit im Agri-PV-System möglichst dauerhaft sowie qualitativ und quantitativ hohe Agrarerträge erzielt werden. Die Sorge und das Risiko, dass die Solarwirtschaft über einen höheren Fördersatz für die Agri-PV Mitnahmeeffekte generiert, indem sie Alibi- und Pseudo-Agri-PV-Anlagen umsetzt, sind politisch nachvollziehbar und die Förderung von Solargewächshäusern in Italien und Frankreich hat bereits Fördermissbrauch ermöglicht. Eine Lösung zur Gewährleistung eines akzeptablen Maßes an Sicherheit bietet die Einführung eines Mindeststandards mit Qualitätsanforderungen an die landwirtschaftliche Tätigkeit im Agri-PV-System (siehe DIN SPEC 91434) in Verbindung mit der 1. und 2. Säule der EU-GAP-Agrarsubventionen. Die erste Prüfinstanz zur Agri-PV-Anlagenqualität ist die Baugenehmigung. Wie in der DIN SPEC 91434 vorgeschlagen, sollte bereits bei der Planung der Agri-PV-Anlage ein Sachverständiger hinzugezogen werden, um herauszufinden, ob im angedachten Agri-PV-System eine dauerhaft wirtschaftliche landwirtschaftliche Tätigkeit möglich ist. Die BNetzA sollte im Fördermechanismus ausschließlich überprüfen, ob im Aufstellungsbeschluss zur Agri-PV-Anlage der DIN SPEC Qualitätsstandard festgehalten wurde. Die untere Baurechtsbehörde auf Landkreisebene und der Gemeinderat vor Ort sind dann in der Verpflichtung, die

bautechnischen Voraussetzungen der Agri-PV-Anlage zu überprüfen. Im operativen Betrieb der Agri-PV-Anlage kann das Monitoring der Agrarerträge, wie bei allen Agrarflächen üblich, durch die Schlagkartei der EU-GAP erfolgen. Landwirte müssen jeden Arbeitsgang (Pflügen, Sähen, Spritzen, Düngen, Ernten etc.) in der Schlagkartei dokumentieren. Wieder die unteren Behörden auf Landkreisebene sind für die stichprobenartige Überprüfung der EU-GAP-Dokumentation zuständig. Welche Art von landwirtschaftlicher Tätigkeit der Landwirt im Agri-PV-System betreibt, entscheidet der Landwirt selbst. Ein Landwirt kann sich unmöglich für 20 Jahre vertraglich festlegen, welchen Ackerbau oder Beerenbau er in diesem Zeitraum auf der Projektfläche betreiben wird. Das technische Design der Agri-PV-Anlage sollte allerdings gewährleisten, dass das ursprünglich angedachte landwirtschaftliche Konzept im Agri-PV-System techno-ökonomisch durchführbar ist. Die Landratsämter, die sowohl das Bauamt als auch das Landwirtschaftsamt beherbergen, werden speziell in der Umsetzung der ersten Agri-PV-Anlagen in ihrem Landkreis besonders gut auf die Qualität der landwirtschaftlichen Praxis in der Agri-PV-Anlage achten. Bei einem Verstoß kann das Landratsamt dem Landwirt die zugesprochenen EU-GAP-Agrarsubventionen kürzen oder gänzlich entsagen. Dies würde auch dem Verursacherprinzip gerecht: Der Verursacher von Missständen ist auch für die Konsequenzen haftbar. Dieses Prinzip könnte noch verstärkt werden, wenn die Agrarfläche im Agri-PV-System nicht nur über die 1. Säule der EU-GAP gefördert wird, die sogenannten Direktzahlungen, sondern auch über die 2. Säule, die sogenannten Ökoregelungen. Wenn der Landwirt über die Ökoregelung für die Agri-PV-Fläche eine zusätzliche Prämie erhält, weil er seine Flächen für den Klimaschutz zur Verfügung stellt und einen Mehraufwand im operativen Betrieb in Kauf nimmt, dann ist der finanzielle Anreiz für den Landwirt höher, seine Agrarflächen für die multifunktionale Landnutzung bereitzustellen – desto höher ist auch die Wirkung eines Kontrollmechanismus über die EU-GAP. Ein Restrisiko, dass ein Landwirt die Agrarfläche im Agri-PV-System nicht optimal nutzt, wird trotzdem bestehen bleiben. Eine Agri-PV-Markteinführung ohne Restrisiko ist nur durch eine erhöhte Bürokratisierung und steigende Verwaltungskosten zu erreichen. Ein Kontrollmechanismus, der überverhältnismäßig ein partnerschaftliches Landnutzungskonzept unmöglich macht, wie im jetzigen Fall mit der Kopplung der Solarstromerlöse an die Agrarerträge, droht, die ohnehin neuartige Lösung im Keim zu ersticken, und verzögert die Agri-PV-Potentialerschließung. Ein Mitglied der SPD-Fraktion im aktuellen Bundestag meinte diesbezüglich, dass sowohl die Legislative als auch die Exekutive in einer solch frühen Phase der Agri-PV-Markteinführung „Mut zu Ineffizienzen“ benötigen, um überhaupt die Umsetzung der ersten Agri-PV-Anlagen anzuschieben. Sollten

tatsächlich vermehrt Agri-PV-Fördermissbrauch und Pseudo-Agri-PV-Projekte in Erscheinung treten und die oben genannten Qualitätskontrollen über die DIN SPEC 91434 und EU-GAP nicht greifen, könnten im Sinne einer experimentellen Politikumsetzung (siehe Kapitel 2.3.2) zu einem späteren Zeitpunkt in der Diffusionsphase immer noch Gegenmaßnahmen ergriffen und strengere Restriktions- und Qualitätskriterien eingeführt werden.

2) BauGB/BauNVO: Neue Flächenkategorie für multifunktionale Landnutzung in der Baunutzungsverordnung einführen, damit Agrarflächen erhalten bleiben

Im Baugenehmigungsverfahren müssen sich die kommunalen Entscheidungsträger und die unteren Baurechtsbehörden entscheiden, wie sie die multifunktionale Agri-PV-Fläche im Flächennutzungsplan und in der Bauleitplanung festsetzen möchten. Die Agrarfläche bleibt im Fall einer Agri-PV-Anlage überwiegend landwirtschaftlich nutzbar und der Status landwirtschaftliche Nutzfläche müsste eigentlich erhalten bleiben. Allerdings wird Solarstrom auf der Agrarfläche produziert, was Stand heute als eine gewerbliche und nicht landwirtschaftliche Tätigkeit angesehen wird. In diesem Denkmuster muss zwischen einem Entweder bzw. einem Oder entschieden werden, obwohl die Agri-PV beides auf einer Agrarfläche ermöglicht. Derzeit wird Agri-PV, ähnlich wie PV-FFA-BioDiv, als Sondergebiet im Außenbereich ausgewiesen. Der Status landwirtschaftliche Nutzfläche geht somit verloren und die Fläche zählt zum täglichen Siedlungsflächenanstieg in der Region. Durch diese baurechtliche Festsetzung verlieren die Landwirte auch die damit einhergehenden steuerlichen Privilegierungen einer landwirtschaftlichen Nutzfläche, bspw. was die Erbschaftssteuer bei Hofübergabe oder die Einkommenssteuer betrifft (Rolink 2021). Sowohl der kommunal- als auch der bundespolitischen Ebene wäre geholfen, wenn in der Baunutzungsverordnung (BauNVO) als Teil des Baugesetzbuchs (BauGB) eine neue Flächennutzungskategorie etabliert wird – „landwirtschaftliche Nutzfläche mit integrierter Solarstromerzeugung“. Diese Policy-Innovation würde allen Verfahrensbeteiligten, d. h. dem Landwirt, Landeigentümern, den unteren Baurechtsbehörden und Kommunen sowie den Bauherren und Agri-PV-Betreibergesellschaften, dahingehend helfen, wie mit einem Bauantrag zur Installation einer Agri-PV-Anlage umzugehen ist. Zudem würde diese neue Flächenkategorie dem multifunktionalen Charakter der Agri-PV-Systemtechnik gerecht und würde auch regulatorisch die Realität besser abbilden. Die hauptsächliche Flächennutzung ist weiterhin Agrarproduktion, deswegen bleibt der Status „landwirtschaftliche Nutzfläche“ erhalten. Die Solarstromerzeugung ist zweckmäßig sekundär. Sie wird deshalb in den landwirtschaftlichen

Prozess integriert und hat sich den landwirtschaftlichen Anforderungen anzupassen. Das wesentliche Alleinstellungsmerkmal der Agri-PV gegenüber der PV-FFA ist, dass der PV-Ausbau nicht auf Kosten der Ernährungssicherheit geht und die Nahrungsmittelproduktion höher ist als in einer monofunktionalen Landnutzung bei gleicher Flächenverfügbarkeit. Dabei können techno-ökologische Synergien beider Produktionssysteme genutzt werden, damit die Agri-PV-Anlage dem landwirtschaftlichen Betrieb dienlich ist. Die Interaktion zwischen Agrarproduktion und Stromerzeugung wird intensiviert und soll möglichst im Einklang statt im Kontrast zueinander erfolgen. Mit Blick auf den DNS-Transformationspfad Kreislaufwirtschaft und Nachhaltiges Landmanagement hätte die neue Flächennutzungskategorie den Vorteil, dass sie anders als Sondergebiete nicht mehr dem täglichen Siedlungsflächenanstieg zugerechnet werden würde. Regionen sind durch das DNS-Ziel 11.1.a dazu angehalten, den täglichen Siedlungsflächenanstieg bis 2030 auf unter 30 Hektar am Tag zu reduzieren. Kommunen sollten bereits heute möglichst wenig Siedlungsflächenanstieg verursachen. Damit der PV-FFA-Ausbau auf Ackerflächen nicht in einen Widerspruch mit dem Ziel der Reduktion des Siedlungsflächenanstiegs gerät, wird eine neue Flächenkategorie für Agri-PV-Anlagen benötigt, um Landnutzungskonkurrenzen zu entschärfen und den lokalen Genehmigungsprozess der Agri-PV-Markteinführung zu unterstützen. Als Alternative zur neuen Flächennutzungskategorie „landwirtschaftliche Nutzfläche mit integrierter Solarstromerzeugung“ könnte jegliche Solarstromerzeugung auf Agrarflächen im FNP nicht mehr als Sondergebiet ausgewiesen werden, sondern der Status landwirtschaftliche Nutzfläche einfach bestehen bleiben, solange die beanspruchte Agrarfläche für das PV-Projekt der gesamten Betriebsfläche des Landwirts untergeordnet ist, bspw. nicht mehr als die Hälfte der Betriebsfläche beansprucht. Landwirte haben bereits vor der Industrialisierung Energie auf ihren Agrarflächen erzeugt, indem Futtermittel für Pferde- und Ochsengespanne produziert wurde. Im fossilen Zeitalter wurde die Biomasse-Energie als Agrokraftstoff den Verbrennungsmotoren beigemischt (E5, E10, Biodiesel). Durch die Sektorenkopplung und fortschreitende Elektrifizierung sollten Landwirte die baurechtliche Chance erhalten, weiterhin durch Solarstromerzeugung als Energieproduzenten tätig zu sein, ohne dass finanzielle Nachteile für ihren landwirtschaftlichen Betrieb entstehen. Bei der Integration von Biodiversitätsmaßnahmen in das PV-FFA-Projekt könnte die Projektfläche bei den EU-GAP-Zielen 4%-Stilllegungsfläche je landwirtschaftlichem Betrieb miteinkalkuliert werden. Auch dadurch würden zusätzliche Agrarflächeninanspruchnahmen durch den PV-Ausbau verringert und die PV-Umsetzung im Einklang mit Landwirtschaft und Naturschutz ermöglicht. Das

zuständige Ressort für die Etablierung einer neuen Flächennutzungskategorie oder Änderung der bisherigen baurechtlichen Handhabung von PV-FFA und Agri-PV-Anlagen ist das neugegründete und von der SPD geführte BMWSB, das in Abstimmung mit dem für Boden zuständigen BMUV eine Einigung koordinieren sollte.

3) EEG 2023: Flächenkulisse im ersten PV-Segment sollte für Agri-PV nicht nur Ackerflächen, sondern auch Grün- und Weideland umfassen

Im Entwurf des EEG 2023-Förderregimes sind PV-Projekte des ersten Segments nur auf benachteiligten Gebieten und entlang von Transportwegen vorgesehen. Für Agri-PV wurde diese Flächenkulisse um Dauerkultur- und Ackerflächen ausgeweitet. Die Umsetzung von Agri-PV-Projekten auf klassischen Grün- und Weideflächen (auch außerhalb von benachteiligten Gebieten und Transportwegen) ist derzeit nicht vorgesehen. Unter Berücksichtigung der Bodengefährdungen und der Wertigkeitshierarchie für Böden ist diese Einschränkung nicht nachzuvollziehen. Bodenwertigkeit wird durch sechs Qualitätskriterien bestimmt: 1) Versiegelung, 2) Erosion, 3) Humusverlust, 4) Verdichtung, 5) Schadstoffbelastung und 6) Nährstoffüberschuss. Die Studie „Land Degradation Neutrality“ des Umweltbundesamts erstellt folgende Wertigkeitshierarchie für den Boden. Im folgenden Auszug der Tabelle sind nur die landwirtschaftlichen Landnutzungskategorien festgehalten, nicht aber die forstwirtschaftlichen und gewerblichen (Wunder et al. 2018):

Tabelle 5-1: Bodenwertigkeit auf Basis von Hemerobiestufen und unter Einbezug der Bodengefährdungen für verschiedene Landnutzungskategorien (Quelle: (Wunder et al. 2018); eigene Darstellung)

Wertigkeit für Boden	Landnutzungs-kategorie	Ver-siegelung	Erosion	Humus-verlust	Ver-dicht-ung	Schadstoff-belastung	Nähr-stoff-über-schuss
4,5	Ökologische (extensive) Grünlandbe-wirtschaftung	↑	↑	↑	↗	↗	↗
3,5	Konventionelle (intensive) Grünlandbe-wirtschaftung	↑	↗	↗	↗	↗	→
3,0	Ökologischer Ackerbau und stillgelegte Ackerfläche	↑	→	→	→	↗	→
2,0	SUV versiegelt mit Vegetation und PV-Flächen	↗	↗	→	↘	→	→
1,5	Konventioneller Ackerbau	↑	↘	↘	↘	→	↘

Durch die Errichtung einer Agri-PV-Anlage ergeben sich auf die vier Landnutzungskategorien aus dem Agrarsektor folgende Änderungen: Die Versiegelung verschlechtert sich von sehr gut auf gut, weil durch die Aufständigung der PV-Technik ein geringfügiger Teil der bestehenden Agrarfläche versiegelt wird. Die Erosion könnte sich aufgrund von Windschutz bei abgeernteten ökologischen Ackerflächen von befriedigend auf gut verbessern bzw. bei konventionellem Ackerbau von ausreichend auf befriedigend. Bei der Verdichtung würde sich eine Verschlechterung ergeben, da sich im Jahr der Anlagenerrichtung sowie durch die vorgegebenen Durchfahrtsbreiten zwischen den PV-Modulreihen mehr Fahrspuren ergeben. Agrar-, Umwelt- und Solarverbände sind sich einig, dass die Agri-PV-Integration auf Grün- und Weideland mit den geringsten Auswirkungen auf die Bodenwertigkeit erfolgen kann, bei gleichzeitiger Bereitstellung von positiven Synergieeffekten auf landwirtschaftliche Tätigkeiten, bspw. indem Agri-PV-Verschattung den Hitzestress für das Weidevieh reduziert oder in der Freilandgeflügelhaltung ein Schutz von Wildvögeln in die Agri-PV-Technik integriert und somit das Risiko zur Infektion mit der Geflügelpest minimiert wird.

4) EEG 2023: Bonus für hochaufgeständerte Agri-PV sollte höher als 3 €-Cent/kWh liegen oder ein eigenes Fördervolumen für dieses Marktsegment ausgewiesen werden

Die DIN SPEC 91434 und die Agri-PV-Fachliteratur unterscheiden prinzipiell drei Agri-PV-Anwendungsgebiete: 1) Kategorie 1, Overhead PV, hochaufgeständerte PV-Anlagen, die eine Doppelnutzung von Agrarfläche ermöglichen. Gemäß DIN SPEC 91434 muss die lichte Höhe zwischen Boden und Unterkante der Aufständerung oder PV-Modul mindestens 2,10 m betragen, damit Personen und Landmaschinen darunter landwirtschaftlich tätig sein können; 2) Kategorie 2, Interspace PV, bodennah installierte PV-Anlagen, bei denen zwischen den Modulreihen eine landwirtschaftliche Tätigkeit ermöglicht wird. Diese Art von Parallelnutzung gleicht einem Agroforstsystem, indem zwischen Baumreihen die Agrarfläche bearbeitet wird; 3) Kategorie 3, SolarGewächshäuser, in denen bei einer sogenannten Controlled Environmental Atmosphere (CES) unabhängig einer Vegetationsperiode ganzjährig Nahrungsmittel angebaut werden können. Zwischen den drei unterschiedlichen Agri-PV-Anwendungsmöglichkeiten bestehen erhebliche Differenzen in der Kostenstruktur. Anwendungen der Kat. 2 sind günstiger als Anwendungen der Kat. 1 und Kat. 3. Die Synergieeffekte zwischen Agrar- und Solarstromerzeugung sind allerdings speziell in Kat. 1 und 3 höher als bei Kat. 2. Wird im EEG-Förderregime keine Unterscheidung der Kostenstruktur zwischen den Agri-PV-Anwendungen gemacht, wird sich nur Kat. 2 mit den geringeren Synergieeffekten durchsetzen und insbesondere Anwendungen im Bereich der Sonderkulturen wären in einem Auktionsmechanismus ohne unterschiedliche Handhabung nicht wettbewerbsfähig. Der Gesetzgeber hat sich deshalb dazu entschlossen, für hochaufgeständerte Agri-PV einen Bonus je eingespeister kWh zu bezahlen. Zunächst lag dieser Bonus bei 0,5 €-Cent/kWh und wurde dann auf 1,2 €-Cent/kWh angehoben. Zwei Probleme ergeben sich daraus: Erstens reichen in den meisten Agri-PV-Kat.-1-Anwendungen auch 1,2 €-Cent/kWh bei weitem nicht aus, um die Mehrkosten gegenüber einer herkömmlichen PV-FFA auszugleichen. Die höhere Aufständerung führt zu höheren Materialkosten. Die Montagekosten sind aufwendiger und die lichtdurchlässigen PV-Module erzeugen nur halb so viel Strom wie PV-Module ohne Lichtmanagement, was zu einem doppelten Einkaufspreis führt. Angenommen die Stromgestehungskosten einer herkömmlichen PV-FFA liegt derzeit bei rund 6 €-Cent/kWh, dann liegen die Mehrkosten für Agri-PV-Anwendungen der Kat. 1 rund 50 % höher, bei rund 9 €-Cent/kWh. Der Bonus sollte daher mindestens etwa 3 €-Cent/kWh betragen, damit Angebote für hochaufgeständerte Agri-PV-Anlagen abgegeben werden. Anstelle einer

Preisregulierung könnte für die Agri-PV-Anwendungen der Kat. 1 und Kat. 3 auch eine Mengenregulierung greifen. Indem ein bestimmtes Volumen für ausschließlich diese Anwendungstypen ausgewiesen wird, könnten die Mehrkosten für dieses Fördersegment gedeckelt werden und das Risiko von ausufernden Mitnahmeeffekten über das EEG-Förderregime würde somit ebenfalls gedeckelt. Zweitens führt ein politisch initiiertes Kostendruck auf die Agri-PV-Angebote tendenziell dazu, dass in der Agri-PV-Markteinführungsphase Projekte angeboten werden, bei denen der Fokus stärker auf eine möglichst hohe Solarstromerzeugung liegt, um die Kosten bzw. die Renditeerwartung zu optimieren (primärer Zweck wäre dann die Solarstromerzeugung und nicht die landwirtschaftliche Tätigkeit im Agri-PV-System), als auf der Agrarproduktion. Dies erhöht in der frühen Phase der Markterschließung das Risiko von Pseudo-Agri-PV-Anlagen und konterkariert das Ziel, durch die Agri-PV langfristig weitere Flächenpotentiale für die Energiewende und den Klimaschutz zu erschließen, bei gleichzeitig hoher Akzeptanz in der Landwirtschaft und Gesellschaft.

5) GAPDZV: Agri-PV-Beihilfen für die Landwirtschaft in der 1. und 2. Säule der EU-GAP integrieren

Im nationalen GAP-Strategieplan (BMEL 2022) findet die Agri-PV keine Erwähnung. Der Beitrag der Agri-PV zur Steigerung der Flächennutzungseffizienz, zum Nachhaltigen Landmanagement und zur Resilienzsteigerung der landwirtschaftlichen Betriebe in Zeiten des Klimawandels sollten Erwähnung finden. Ebenso könnte die Anpassung der Direktzahlungsdurchführungsverordnung (BMEL 2021d) angeführt werden, die 85 % der üblichen Direktzahlungen an die landwirtschaftliche Tätigkeit im Agri-PV-System aus der 1. EU-GAP-Säule ermöglicht. Die landwirtschaftliche Tätigkeit im Agri-PV-System könnte zusätzlich durch die Öko-Regelung aus der 2. Säule gefördert werden. Landwirte würden dadurch einen Anreiz erhalten, damit sie Teile ihrer Betriebsflächen für den Klimaschutz mittels Agri-PV bereitstellen. Zugleich würden die Mehraufwände des Landwirts in der Projektentwicklung und in der technischen Betriebsführung zumindest ansatzweise kompensiert werden, bspw. die langsamere Feldbearbeitung im Agri-PV-System, der höhere Koordinationsaufwand im Vorfeld und Nachgang der Agri-PV-Installation und die höheren Betriebsrisiken und Versicherungskosten, die durch eine multi-funktionale Landnutzung entstehen. Eine nationale Kofinanzierung über das BMEL in das ELER-Programm durch die Anerkennung der landwirtschaftlichen Tätigkeit im Agri-PV-System als Öko-Regelung in der

2. EU-GAP-Säule könnte mit einem Fördervolumen von rd. 2 Mrd. Euro in den Jahren 2023 bis 2027 dazu führen, dass ca. 4.600 Hektar Obstanbauflächen mit Agri-PV-Projekten entwickelt werden. Ein solches Förderprogramm würde die bisherigen jährlichen ELER-Mittel in Deutschland um 6 % erhöhen. Die EU-Kommission sollte in ihrer Kommentierung der nationalen GAP-Strategiepläne die Erfahrungen aus dem deutschen Agri-PV-Koordinationsprozess mit anderen EU-Mitgliedstaaten teilen und als Multiplikator und Informationsplattform die Agri-PV-Markteinführung in der EU unterstützen. Indem die Agri-PV in die 2. Säule und Öko-Regelung integriert wird, würde auch der Anreiz für die landwirtschaftliche Tätigkeit steigen, dauerhaft und wirtschaftlich tragfähig die Agrarfläche im Agri-PV-System zu bewirtschaften. Eine Agri-PV-Öko-Regelung könnte die Umstellung von konventioneller auf ökologische Landwirtschaft begünstigen, indem weitere Grundrenten für den landwirtschaftlichen Betrieb über die EU-GAP zur Verfügung gestellt und dadurch die finanziellen Risiken speziell in den ersten Umstellungsjahren abgemildert werden.

6) BMEL-Förderrichtlinie CO₂-Reduktion in der Landwirtschaft: Energieberater für Landwirte sollten zu Agri-PV geschult werden und Ergänzung durch günstige Darlehenszinsen für Landwirte

Damit sich landwirtschaftliche Betriebe auf Fördermittel zur CO₂-Reduktion in der Landwirtschaft aus der gleichnamigen BMEL-Richtlinie bewerben können, müssen sie ein Energiekonzept für ihren Hof vorweisen. Dieses Energiekonzept wird in der Regel von Energieberatern erarbeitet, die sich auf landwirtschaftliche Betriebe spezialisiert haben. Solange jedoch Energieberater für Landwirte keine Detailkenntnisse zu Agri-PV-Anwendungen vorweisen können, können sie Agri-PV nicht als Baustein ins Energiekonzept einplanen. Ohne die Einplanung von Agri-PV-Anlagen bei der Eigenstromversorgung können Agri-PV-Anwendungen nicht über die BMEL-Richtlinie gefördert werden. Der dominante Aspekt ist demnach die Kompetenz der Energieberater, die noch wenig, bis keine Erfahrung mit der Umsetzung von Agri-PV-Anlagen haben. Das BMEL sollte daher wissenschaftliche Institutionen mit Erfahrungswerten im Bereich Agri-PV, bspw. das Fraunhofer ISE und die Universität Hohenheim oder Hochschule Weihenstephan-Triesdorf (HSWT), mit der Durchführung von Agri-PV-Seminaren für landwirtschaftliche Energieberater beauftragen. Denn wer eine Lösung nicht kennt, kann sie auch nicht empfehlen. Zusätzlich sollte berücksichtigt werden, dass Landwirte die Umsetzung der Energiekonzepte nicht ausschließlich aus Eigenkapital finanzieren können. Das BMEL-Förderprogramm könnte durch ein

Förderprogramm für günstige Kreditkonditionen für Agri-PV durch die landwirtschaftliche Rentenbank ergänzt werden, indem diese für die Umsetzung der Energiekonzepte und explizit auch für die Umsetzung von Agri-PV-Anlagen ein Mindest-Darlehenszins garantiert.

Fazit politische Koordination der Agri-PV-Diffusion in Deutschland

Eine Agri-PV-Diffusion würde sechs der 17 SDGs, acht der 72 DNS-Nachhaltigkeitsindikatoren und vier der sechs DNS-Transformationsbereiche direkt beeinflussen. Gegenüber anderen PV-Anwendungen sind insbesondere die Indikatoren „11.1.a Nachhaltige Landnutzung“ und „9.1 Zukunft mit neuen Lösungen gestalten“ Alleinstellungsmerkmale der Agri-PV. Ob eine Agri-PV-Diffusion durch Regierungshandeln gefördert wird, hängt einerseits davon ab, ob die Agri-PV in Summe einen Beitrag zur Steigerung des Nachhaltigkeitsniveaus in Deutschland leisten kann und diese Leistungen durch Akteure wie Wissenschaft, Interessensvertretungen und Parteien von der Politik eingefordert werden. Andererseits ist die Agri-PV-Diffusion davon abhängig, ob die Regierung in der Lage ist, sich auf eine „Agri-PV-Markteinführung aus einem Guss“ zu einigen. Dabei sind die Anzahl der Verhandlungsteilnehmenden und die Auswirkung der Agri-PV-Diffusion auf die einzelnen Ressortziele sehr wichtig. „Allgemein gilt, dass eine Politik, die allen gibt und keinem erkennbar nimmt, sich auf eine breite öffentliche Zustimmung stützen kann“ (Scharpf 1973). Schlussendlich hängt der Erfolg des Regierungshandelns und der damit verbundenen Agri-PV-Diffusion auch davon ab, ob ein Krisenbewusstsein zum Agrarflächenverlust und Mangel an Ernährungssicherheit der Weltbevölkerung bis 2050 in der Öffentlichkeit ausreichend vorhanden ist, ob eine geeignete Koordinationsform in der bundesstaatlichen Ministerialverwaltung gefunden wird und ob die Hürden im Mehr-Ebenen-System durch Politikverflechtung überwindbar sind. Um die Abstimmungsprozesse zu erleichtern, plädiert Scharpf deshalb, Politikfelder zu gruppieren. Er verwendet dafür eine Politik-Umwelt-Matrix (Scharpf 1972). Dabei wird analysiert, welcher Politikbereich durch welchen Policy-Inhalt betroffen ist. Die betroffenen Politikbereiche und Policy-Inhalte werden dann gruppiert und möglichst in ein oder zumindest auf wenige Ressorts und politische Entscheidungsträger konzentriert. Innerhalb eines Policy-Clusters oder Transformationspfads wird dann das Agenda Setting einfacher, da Abstimmungswege verkürzt und die ideologischen Distanzen geringer werden. Die Koordinationskonzentration der Agri-PV-Markteinführung obliegt in Deutschland weniger einem entscheidenden Ressort, sondern dem Koalitionspartner Bündnis90/Die Grünen. Als parteiliches Kompetenz-Cluster werden drei der vier relevanten Häuser für die Agri-PV-

Markteinführung durch die Grünen federführend geleitet. Ebenso werden drei der vier Agri-PV-Transformationsbereiche – Landwirtschaft, Energie, Umwelt und Bau – durch die grünen Ministerien BMWK, BMEL und BMUV geführt. Einzig der Transformationsbereich Bau befindet sich in der Federführung der SPD. Da diese in ihrem Wahlprogramm 2021 die Förderung der Agri-PV explizit als Ziel formuliert hat und auch die CDU/CSU-Union als größte Oppositionspartei die Agri-PV-Markteinführung unterstützt, stehen in Deutschland die Chancen gut, dass ein Koordinationsprozess zur Einführung und Diffusion der Agri-PV in Deutschland erfolgreich abgeschlossen wird und entscheidende Policy-Innovationen und -Anpassungen in den kommenden Jahren verabschiedet werden. Das Eckpunktepapier zum PV-Ausbau im Einklang mit der Landwirtschaft und Naturschutz im Februar 2022 untermauert diese Beobachtung.

5.2 Herausforderungen, Unzulänglichkeiten und weiterführende Forschungsbedarfe

5.2.1 Herausforderungen in meinen Forschungsarbeiten

Herausforderung Nr. 1: Trans- und interdisziplinäre Forschung dauert länger, mangelt disziplinärer Anerkennung und Bedarf eine kritische Reflexion der Science-Policy-Schnittstelle

Das BMBF als Fördermittelgeber im APV-RESOLA stellte als Fördervoraussetzung an die Projektvorhaben die Einbindung der lokalen und/oder regionalen Entscheidungsträger im Bereich Landmanagement. Im APV-RESOLA wurde der Regionalverband Bodensee-Oberschwaben (RVBO) als assoziierter Projektpartner in die Innovationsgruppe integriert. Gleichzeitig wurde die Hofgemeinschaft Heggelbach als Landnutzer und Praxispartner im Forschungsverbund aufgenommen. Die BayWa r.e. war Innovationsgruppenmitglied und für die technische Entwicklung der Agri-PV-Anlage mitverantwortlich. Transdisziplinarität als Methode für einen integrativen Forschungsansatz, der ein reales, in der Praxis auftretendes Problem lösen soll, bspw. Landnutzungskonkurrenzen und -Konflikte auf regionaler Ebene, benötigt einen intensiven Diskurs zwischen wissenschaftlichem Jargon und Fachterminologie in der Praxis. In der Innovationsgruppe APV-RESOLA und in den Forschungstandems zwischen Wissenschaft und Praxispartner, die jeweils einen Arbeitsschwerpunkt gemeinsam verantworteten, mussten zunächst eine gemeinsame Sprache sowie ein Sach- und Problemverständnis entwickelt werden. Zusätzlich sollten die Innovationsgruppen interdisziplinär strukturiert sein. Im APV-RESOLA-Projekt arbeiteten Agrar-, Energie- und Sozialwissenschaftler gemeinsam an der Agri-PV als Lösung für Landnutzungskonkurrenzen und Beitrag zur ressourceneffizienten Landnutzung. Diese fächerübergreifende Arbeitsweise muss für die Beantwortung der gemeinsamen wissenschaftlichen Fragestellungen ihre jeweiligen Methoden abstimmen. Als Politikwissenschaftler musste (oder durfte) ich verstehen, wie die Agrarwissenschaftler:innen die Ernteergebnisse erheben und analysieren, damit in Experteninterviews mit Politiker:innen faktenbasiert argumentiert werden konnte. Umgekehrt mussten die Agrarwissenschaftler:innen verstehen, wie sich die Agrarergebnisse auf existierende Policies, bspw. auf die Agrarsubventionen, auswirken. Diese

fachgebietsübergreifende Zusammenarbeit benötigt mehr Austausch und die Entwicklung einer gemeinsamen Sprache, ähnlich wie im transdisziplinären Kontext. Die Abhängigkeiten zwischen den Ergebnissen der Einzelwissenschaften benötigten mehr Zeit als in einem voneinander unabhängigen rein disziplinären Forschungsprozess. Aus Sicht des BMBFs waren die Ansprüche an die Innovationsgruppen sehr hoch, weshalb sowohl die Projektlaufzeiten als auch die Fördervolumen je Forschungsvorhaben überdurchschnittlich hoch waren. Das APV-RESOLA-Projekt wurde vom 01.03.2015 bis zum 31.07.2021 sogar länger als die ursprünglich geplanten fünf Jahre gefördert. Das Projektbudget lag insgesamt bei 3.527.333 €, von denen 2.365.624 € am Fraunhofer ISE bewilligt wurden. Gleichzeitig wird eine trans- und interdisziplinäre Promotion wissenschaftlich weniger honoriert als eine wissenschaftliche Fragestellung, die in ihrem spezifischen Fachgebiet den methodischen oder theoretischen Horizont erweitert. Agri-PV stellt ein klassisches Querschnittsthema dar. Als Doktorand und Innovationsgruppenleiter APV-RESOLA erhielt ich weitreichende Einblicke in die Agrar-, Energie- und Politikwelt. Als Science-Policy-Schnittstelle wurde ich durch meine Forschungsaktivitäten zum Vermittler und zur Brücke zwischen den Politikfeldern und zwischen den Entscheidungsträgern im Mehr-Ebenen-System. Dadurch besteht die Gefahr, dass die Grenzen zwischen Forschungsobjekt (Wie kann eine Agri-PV-Markteinführung aus einem Guss politisch koordiniert werden?) und dem Forschungssubjekt (Inwiefern greife ich als Wissenschaftler durch meinen Wissensvorsprung in den politischen Agri-PV-Koordinationsprozess ein?) verschwimmen. Das wissenschaftliche Bias aus dieser Gratwanderung zwischen „Beobachtender Teilnehmer“ und „Teilnehmender Beobachter“ konnte reduziert werden, indem die wissenschaftlichen Ergebnisse durch den Mixed-Method-Ansatz (Denzin 2017) erarbeitet und veröffentlicht wurden. Beispielsweise wurde interdisziplinär und im Team gearbeitet. Zudem wurden die Ergebnisse mit der internationalen Agri-PV-Marktentwicklung verglichen und sowohl quantitative (Artikel 1, 3 und 4) als auch qualitative Methoden (Artikel 2) angewandt. Fachliteratur zur Methodik der Politikwissenschaften (Lauth et al. 2015) und Politikberatung (Wehling et al. 2014) (Kohns 2008) wurden vor der Umsetzung von Experteninterviews sowie Gruppenfachgespräche mit Akteuren aus der Politik und Ministerialverwaltung konsultiert.

Herausforderung Nr. 2: Entscheidung zwischen wissenschaftlichem Impact und Umsetzung Impact; Warum ich meine GAiA-Beiträge auf Deutsch verfasst habe und nicht auf Englisch

Neben der Definition und Qualitätssicherung von Agri-PV-Projekten ist die Forschungsfrage, welchen Beitrag die Agri-PV zur Steigerung unseres Nachhaltigkeitsniveaus leisten kann, sehr wichtig. Dieser Beitrag hängt stark damit zusammen, wie viel landwirtschaftliche Nutzfläche wir durch die Agri-PV erhalten können, wenn wir herkömmliche PV-FFA durch Agri-PV substituieren oder BioDiv-PV in die 4 % EU-GAP-Stillegungsflächen berücksichtigen. Die Ergebnisse der durchgeführten Agri-PV-Wirkungsanalyse auf den absoluten und täglichen Agrarflächenerhalt in Deutschland bis zur Einführung einer Flächenkreislaufwirtschaft im Jahr 2050 und in Verbindung mit dem DNS-Ziel 11.1.a „Nachhaltiges Landmanagement“ habe ich in deutscher und nicht in englischer Sprache verfasst. Das Ziel meines zweiten und dritten Fachartikels bestand nicht darin, ausschließlich die Wissenschaftsgemeinde zu erreichen, sondern ich wollte explizit Entscheidungsträger:innen in Verwaltung und Politik mit meinen Erkenntnissen zeitnah erreichen. Die Redaktion der GAIa-Zeitschrift ist mit inter- und transdisziplinären Fragestellungen und deren Herausforderungen in der Science-Policy-Kommunikation vertraut und die Zielleserschaft stimmt mit meinen Ansprüchen überein. Zweifelsohne hätten die Ergebnisse der Wirkungsanalyse auf den Agrarflächenerhalt auch in international renommierten Journalen platziert werden können. Das hätte zwar für einen höheren wissenschaftlichen Impact gesorgt, aber der Transfer der Ergebnisse und somit der Impact auf die Umsetzung hätten sich erfahrungsgemäß aufgrund von Sprachbarrieren um zwei bis drei Jahre verzögert.

5.2.2 Unzulänglichkeiten in meinen Forschungsarbeiten

Unzulänglichkeit Nr. 1: Berechnungsfehler in meiner ersten Publikation im Applied Energy Journal

In meiner ersten Publikation „Implementation of agrophotovoltaics: techno-economic analysis of the price-performance ratio and its policy implications“, die im Applied Energy Journal 2021 veröffentlicht wurde, befindet sich auf Seite 10, „Table 4, Annual land use price in €/ha of APV and PV-GM implementation“, folgender Fehler. Der Land use price wurde für Agri-PV mit 59.329,81 €/ha/a angegeben, obwohl dieser nur 55.263,39 €/ha/a beträgt. Der Wert ist deswegen falsch, weil in der Excel-Kalkulation anstelle von 0,0829 €/kWh LCOE der Wert 0,089 €/kWh LCOE eingesetzt wurde. Der erste Folgefehler, der sich daraus ergab, war die Berechnung des

Preises für den Erhalt der Agrarproduktion, siehe Absatz „4.6 Price (p) results of APV implementation“. Als Preis für die Agri-PV-Umsetzung wurden die Differenzkosten zwischen einer herkömmlichen PV-FFA und der Agri-PV-Anlage angenommen.¹² Mit dem aktualisierten Ergebnis liegt die Differenz nicht mehr bei 9.051,73 €/ha/a, sondern nur noch bei 4.985,31 €/ha/a. Der zweite Folgefehler in der Publikation ist somit die Berechnung der „Price-Performance Ratio“ (ppr), siehe Absatz „4.8 Price-performance ratio (ppr) results of APV implementation“. Die Performance-Werte für Kartoffel- und Winterweizenanbau unter Agri-PV sind korrekt und bleiben unverändert. Das Preis-Leistungs-Verhältnis der Agri-PV-Umsetzung im Zusammenhang mit Kartoffelanbau beträgt somit nicht 0.85, sondern 0.47. Das Verhältnis im Zusammenhang mit Winterweizenanbau liegt nicht bei 4.62, sondern 2.54. In der Konsequenz haben der Berechnungsfehler der Differenzkosten zwischen PV-FFFA und Agri-PV und die sich daraus ergebenden Folgefehler in der Berechnung der Preis-Leistungs-Analyse die Agri-PV schlechter erscheinen lassen als sie tatsächlich ist. Denn im idealen Fall versuchen die Akteure aus Wirtschaft, Politik und Wissenschaft, die Preis-Leistungs-Analyse gegen Null zu lenken, d. h. möglichst minimale Differenzkosten bei maximalen Differenznutzen. Wenn die Leistung (der Nutzen), der Wert der Agrarproduktion gleich bleibt, aber der Preis (die Kosten) geringer ist, dann schneidet die Agri-PV besser als zunächst vermutet ab. Auch in der Tendenz bleiben die Ergebnisse gleich. Bei der Kat. 1 Agri-PV-Technik, die im APV-RESOLA-Projekt verwendet wurde, schneidet der Kartoffelanbau im Verhältnis von Winterweizen besser ab, weil dieser einen höheren finanziellen Umsatz ermöglicht als Weizenanbau. Dadurch können sich die Mehrkosten, die in einem hochaufgeständerten Agri-PV-System entstehen, ökonomisch leichter rechtfertigen. Sinken die Agri-PV-Umsetzungskosten aufgrund verbesserter Technik weiter und steigt der Wert der darunter angebauten Früchte, dann sinkt das Verhältnis weiterhin gegen Null. Die Kombination, die in der Preis-Leistungs-Analyse am weitesten gegen Null resultiert, erbringt volkswirtschaftlich die größten Vorteile und sollte in der Agri-PV-Politik am ehesten erschlossen werden. Seit der Veröffentlichung des Artikels erhielt ich drei unabhängige Nachrichten von VWL-Studenten, die auf den Fehler aufmerksam gemacht haben. So sehr ich mich über den Fehler ärgere, so sehr freue ich mich auch, dass sich Studierende intensiv mit meinen Forschungsergebnissen befassen und aktiv den wissenschaftlichen Dialog durch ihre Kontaktaufnahme fördern.

¹² Wie von Goetzberger et al. 2006 vorgeschlagen.

Unzulänglichkeit Nr. 2: Gefahr der rückwirkenden Kontinuität „Retcon“

In der hier vorliegenden Dissertationsschrift habe ich versucht, in Kapitel 1 „Entwicklungsgeschichte der Agri-PV in Deutschland und mein Promotionsvorhaben“ die Rolle des Fraunhofer ISE, meine Forschungsaktivitäten und meine Auswirkung auf den Innovationsprozess zwischen 1981 und 2022 zu beschreiben. Als zentraler Akteur in diesem noch jungen Forschungsfeld möchte ich jedoch nicht Gefahr laufen, eine rückwirkende Kontinuität zu erschaffen. Ich habe versucht, meine Wahrnehmungen auf die damaligen Begebenheiten mit denen meiner Kolleg:innen und Weggefährten abzugleichen. Ich nehme allerdings keinen Anspruch auf Vollständigkeit und sollte ich eine oder einen zentralen Akteur:in oder eine wichtige Begebenheit vergessen und nicht genannt haben, tut mir dies aufrichtig leid. In einem solchen Fall bitte ich um Hinweise und Rückmeldung, damit die Genese der Agri-PV möglichst vollumfänglich und korrekt dokumentiert werden kann. Ich habe all meine wissenschaftlichen Artikel als Open Access publiziert und lege persönlich viel Wert auf Transparenz. Ich habe stets versucht, in der Erzählung und in der methodischen Erarbeitung meiner Ergebnisse sauber, selbstkritisch und objektiv zu bleiben.

5.2.3 Empfehlungen zu weiterführenden Forschungsarbeiten

Ich konzentriere mich an dieser Stelle auf Empfehlungen für weitere Forschungsarbeiten mit Schwerpunkt auf Wirtschafts- und Sozialwissenschaften. Es sind auch u. a. technische, geografische und ökologische Fragestellungen aufgekommen, die es sich lohnt, weiter zu verfolgen. Die Ausführungen zu nicht wirtschafts- und sozialwissenschaftlichen Fragestellungen im Zusammenhang mit Agri-PV würden jedoch an dieser Stelle den Rahmen der Dissertationsschrift überschreiten.

Empfehlung Nr. 1: Analyse, weshalb die erste Innovationsausschreibung für besondere Solaranlagen ein politischer Misserfolg war

Am 01.04.2022 wurde in Deutschland durch die BNetzA die Innovationsausschreibung für besondere Solaranlagen durchgeführt. Hierbei konnten erstmals Floating-, Carport- und Agri-PV an einem Fördermechanismus teilnehmen. Von den 150 MWp Fördervolumen wurden allerdings nur 22 MWp bzw. rund 15 % abgerufen. Es wurde kein Gebot für Floating-PV

abgegeben und nur ein Gebot für Carport-PV im Umfang von 1 MWp. Die verbleibenden 21 MWp wurden durch zwölf Zuschläge an Agri-PV vergeben (BNetzA 2022a). Bereits im Vorfeld wurde die Ausgestaltung der Innovationsausschreibung stark kritisiert, bspw. dass die maximale Anlagengröße inkl. der Anlagenkombination mit einem Batteriespeicher nur 2 MWp betragen darf oder dass kein Unterschied zwischen Agri-PV Kat.1 und Kat. 2 gemacht wurde und dass die Solarstromerlöse an die Agrarerträge gekoppelt sind. Damit zukünftige Fördermechanismen für Floating- und Agri-PV erfolgreicher sind, sollte im Detail seitens des BMWK und der BNetzA untersucht werden, weshalb die Innovationsausschreibung für besondere Solaranlagen ein Misserfolg war und welche gesetzlichen Rahmenbedingungen geändert werden müssten, damit mehr Angebote in diesen neuen Marktsegmenten abgegeben werden. Dabei sollte beachtet werden, dass aus betriebswirtschaftlichen Gründen und vor dem Hintergrund begrenzter Personal- und Kapitalverfügbarkeit Floating-PV und Agri-PV-Projekte hinsichtlich der spezifischen und absoluten Profiterwartung mit etablierten PV-Geschäftsmodellen wettbewerbsfähig sein sollten. Die Projektgrößen, das Fördervolumen und die Förderhöhe sollten in der Markteintrittsphase dieser neuen Technologien eher größer als kleiner gegenüber bestehenden PV-Marktsegmenten sein, damit zusätzliche interne Ressourcen für diese neuen Lösungen aufgebaut werden. Die Forschungsfragen aus Sicht der politischen Entscheidungsträger könnten daher lauten: Wie müssen die Förderbedingungen für Agri-PV ausgestaltet sein, damit Marktteilnehmer:innen zusätzliche Ressourcen aufbauen, damit diese neuartigen und agrarflächenneutralen Marktpotentiale erschlossen werden? Welche Lehren können aus der Innovationsausschreibung für besondere Solaranlagen im April 2022 gezogen werden?

Empfehlung Nr. 2: Vergleichende Agri-PV-Politiken in der EU, China, Japan und USA. Entwicklung eines Best Practice Guide Agri-PV-Policy-Making

Die EU-Mitgliedstaaten haben zum 01.01.2022 ihre nationalen EU-GAP Strategiepläne bei der EU-Kommission eingereicht. Bis zum 30.06.2022 hatte die EU-Kommission Zeit, diese Pläne zu kommentieren und an die Mitgliedstaaten zurückzusenden. Bis zum 31.12.2022 müssen die Pläne finalisiert und ratifiziert werden, damit sie ab dem 01.01.2023 bis zum 31.12.2027 in Kraft treten. Das EU JRC hat die Entwürfe der eingereichten nationalen EU-GAP-Strategiepläne auf Agri-PV und PV geprüft. Nur zwei Mitgliedstaaten nehmen direkt Bezug auf Agri-PV und nur sieben behandeln PV-Anwendungen in der Landwirtschaft generell (CHATZIPANAGI et al. 2022). Obwohl die Energieerzeugung schon seit jeher ein Teil der

landwirtschaftlichen Tätigkeit ist, früher in Form von Futtermittelerzeugung für Ochsen- und Pferdegespanne, dann im fossilen Zeitalter für Biokraftstoffe wie Ethanol und Biogas und zukünftig mit hoher Wahrscheinlichkeit noch stärker mittels PV-Anwendungen auf ihren Betriebsflächen, ignorieren 22 Mitgliedstaaten die Chance, den PV-Ausbau in den Einklang mit Landwirtschaft und Naturschutz zu bringen. Welche sieben Staaten behandeln PV-Anwendungen in ihrer Agrarpolitik und welche beiden explizit die Agri-PV? Was sind deren politische Hintergründe dazu? Was und wie können andere Mitgliedstaaten von diesen Initiativen lernen? Auch außerhalb der EU werden PV-Anwendungen in der Landwirtschaft politisch gesteuert. Was sind politische Hintergründe in China, Japan und den USA? Wie kann die Agri-PV-Politik in unterschiedlichen Ländern vergleichbar gemacht werden und wie könnte eine Best Practice Guide Agri-PV-Policy-Making aussehen? Wie sieht deren Baugenehmigungsprozess für Agri-PV aus? Wie ist die Agri-PV im Solarstromfördermechanismus eingebettet?

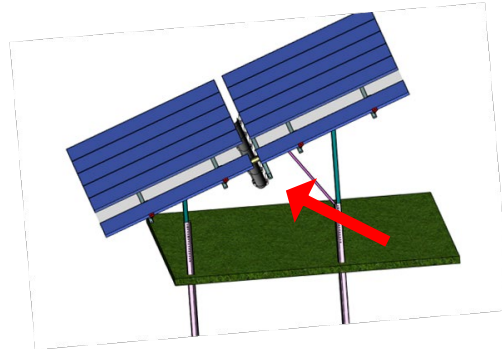
Empfehlung Nr. 3: Wasser-Governance im Zusammenhang mit dem PV-Ausbau auf Agrarflächen

Von den vier wichtigsten Themenfeldern für die nachhaltige Entwicklung (Frieden, Ernährungssicherheit, Wasser und Energie) wurde in der vorliegenden Dissertationsschrift der Arbeitsschwerpunkt auf Ernährungssicherheit und Energie gelegt. Das Themenfeld Wasser wurde in den politikwissenschaftlichen und Literaturhintergründen nicht behandelt. Im November 2011 lernte ich Prof. Joachim Sauerborn, Universität Hohenheim, auf der Konferenz „The Water, Energy and Food Security Nexus – Solutions for the Green Economy“ kennen und die Zusammenarbeit zwischen dem Fraunhofer ISE und der Universität Hohenheim im Agri-PV-Forschungsfeld hat genau an diesem WEF-Nexus ihren Ursprung. Der Landwirtschaftssektor ist der mit Abstand größte Wasserverbraucher. Gleichzeitig belastet insbesondere die konventionelle Landwirtschaft die Wasserqualität, bspw. zu hohe Nitratwerte im Grundwasser. Im sehr heißen und trockenen Jahr 2018 konnte die Universität Hohenheim gesteigerte Agrarerträge für Kartoffeln, Winterweizen und Sellerie unter der Agri-PV-Anlage im Vergleich zur Referenzfläche ohne Agri-PV feststellen. Voraussichtlich die höhere Bodenfeuchtigkeit und ein verbessertes Mikroklima mit geringerer Temperatur führten zu weniger Evaporation und Transpiration. Bei weniger Wasserbedarf wurde ein höherer Agrarertrag erzielt. Diese Forschungsergebnisse wurden durch die Forschungsarbeiten von Marraou in Südfrankreich bei der Salatproduktion ebenso nachgewiesen (Marrou et al. 2013).

Technisch ist es möglich, dass Agri-PV-Anlagen (und auch herkömmliche PV-FFA) durch die PV-Module Regenwasser auffangen und in einen Wasserspeicher einführen. Die folgenden beiden Darstellungen zeigen ein solches Agri-PV-System mit integriertem Regenauffangsystem.



Quelle: GroenLeven/BayWa r.e.



Quelle: Zimmermann PV-Stahlbau

Abbildung 5-1: PV-integriertes Regenauffangsystem zur saisonalen Wasserspeicherung

Dadurch kann Bodenerosion an der Abtropfkante reduziert und gleichzeitig die Wasserverfügbarkeit von regenreichen in regenarme Monate umverteilt werden. In Südeuropa, wo bereits heute die Landwirtschaft aufgrund von wenig Wasserverfügbarkeit eingeschränkt werden muss, bspw. in Italien und Spanien 2022, könnten PV-Kraftwerke gezielt dafür eingesetzt werden, um Regenwasser saisonal zurückzuhalten, damit der Boden vor einem Regenereignis angefeuchtet werden kann, sodass die Regenaufnahmefähigkeit der ausgetrockneten Böden steigt. Dies hätte Vorteile für die Grundwasserverfügbarkeit, Flutprävention, die Vegetation und damit die verbundene CO₂-Speicherbarkeit in den Böden. Damit Anknüpfungspunkte zwischen der Wasser-, Agrar- und Agri-PV/PV-Politik in Deutschland identifiziert werden können, müssten in einer Policy-Analyse alle drei Themenfelder beinhaltet und Schnittmengen analysiert werden. Gibt es Wassereinsparpotentiale in der Landwirtschaft durch Agri-PV-Anwendungen? Wie hoch sind diese Potentiale? Wie könnte die Nutzung techno-ökologischer Synergieeffekte mit Schwerpunkt Wasser, Nahrungs- und Energieerzeugung politisch stärker gefördert werden? Wie ist das Kosten-Nutzen-Verhältnis auf Projektebene und volkswirtschaftlich? Wasser ist bereits Gegenstand der DNS, bspw. DNS-Indikator 6.1.a „Phosphor in Fließgewässern“ und 6.1.b „Nitrat im Grundwasser“. Die Anpassung des Landwirtschaftssektors an den Klimawandel und die Bereitstellung von Wasser für den Landwirtschaftssektor sind (noch) kein DNS-Indikator. Ein weiteres Alleinstellungsmerkmal der Agri-PV gegenüber anderen PV-Anwendungen ist jedoch, dass

Agri-PV-Anlagen die Agrarerzeugung vor Starkwetterereignissen schützen können, bspw. als Kulturschutz in der Obsterzeugung, und dass der Wasserbedarf im Agri-PV-System aufgrund der Verschattungseffekte, des Windschutzes und verbesserten Mikroklimas abnimmt. Ob und wie diese Synergieeffekte Gegenstand einer Wasserpolitik in Deutschland werden, ist die Aufgabe weiterer Forschungsarbeiten.

Empfehlung Nr. 4: Repräsentative Umfragen zu den Eigenschaften der Agri-PV-Anwendern und den Eigenschaften der Agri-PV-Innovation in den Bereichen Landwirtschaft, Solarwirtschaft, Regionalpolitik und Gesellschaft

Innerhalb der PV-Branche gibt es Agri-PV-Kritiker, die an der Sinnhaftigkeit der Agri-PV zweifeln. Zwei Kritikpunkte werden angeführt: 1) Die technische und rechtliche Komplexität der Agri-PV verursacht Kosten, die den Zusatznutzen nicht rechtfertigen. 2) Ist es hinsichtlich der interspace Agri-PV-Lösungen (Kat. 2 in der DIN SPEC 91434) ökologisch und ökonomisch sinnvoller, die gleiche Menge Solarstrom wie eine multifunktionale Agri-PV-Nutzung auf einem Teil der Projektfläche zu installieren, während der andere Teil die landwirtschaftliche Nutzung unberührt lässt. Der erste Kritikpunkt kann durch eine ökonomische Kosten-Nutzen-Analyse entkräftigt werden und der zweite Kritikpunkt mit Blick auf die Ökologie durch eine Berechnung der Flächennutzungseffizienz (engl. Land Equivalent Ratio). Der ökonomische Kritikpunkt kann allerdings nicht entkräftigt werden, denn eine monofunktionale Landnutzung mit dem primären Zweck der Solarstromerzeugung kann stets mehr Flächenpacht erzielen und einen vielfach höheren finanziellen Erlös erwirtschaften als die Produktion von Biomasseerträgen.¹³ Zudem hat der Landwirt, wenn er oder sie einen Teil der Betriebsfläche für die Umsetzung einer BioDiv-PV-Anlage zur Verfügung stellt, insgesamt weniger Arbeit. Mehr Geld für weniger Arbeit – diese ökonomischen Vorteile der BioDiv-PV können in Agri-PV-Projekten kaum aufgeholt werden. Die Kritiker ignorieren dabei, dass es Landwirte gibt, die ihren landwirtschaftlichen Betrieb nicht ausschließlich nach ökonomischen Prinzipien ausrichten, sondern im Gesamtheitlichen nach einer ausgewogenen Weiterentwicklung ihrer Betriebsflächen suchen. Es ist denkbar, dass die Umsetzung einer PV-FFA oder von

¹³ Auch physikalisch betrachtet ist die Nutzungseffizienz der solaren Einstrahlung beim photoelektrischen Effekt um über das 15-Fache höher als bei der Photosynthese. In den allermeisten Fällen (ausgenommen von den sogenannten Cash-Crops wie bspw. Beeren und Sonderkulturen) lässt sich daher ein größerer Umsatz je Hektar und Jahr mittels PV erzielen als durch die Primärproduktion.

Stilllegungsflächen nicht gewollt ist, aber die Umsetzung einer Agri-PV schon. Die Kritiker verkennen, dass beide Marktsegmente ihre Daseinsberechtigung haben. Die BioDiv-PV können auf minderwertigen Agrarflächen mit geringer Bodenwertigkeit im Rahmen der EU-GAP 4%-Stilllegungsflächen installiert werden und Agri-PV-Anlagen können auf hochwertigen Agrarflächen errichtet werden, damit der Großteil der furchtbaren Böden für die Agrarproduktion erhalten bleibt. Die Frage lautet: Wie groß ist die Strömung der Agri-PV-Kritiker innerhalb der Solarwirtschaft? Wie stehen die Vertreter der Landwirtschaft zur Agri-PV? Bis heute gibt es m. E. keine repräsentative Umfrage in den Bereichen Landwirtschaft, Solarwirtschaft, Regionalpolitik und Gesellschaft, ob und wie diese Betroffenen eine Agri-PV-Markteinführung und Diffusion begrüßen oder ablehnen würden und wie die Agri-PV gegenüber anderen erneuerbaren und konventionellen Energieträgern hinsichtlich der Akzeptabilität bewertet wird. Wie ist die Wahrnehmung auf regionalpolitischer Ebene? Gibt es Landnutzungskonkurrenzen zwischen PV-FFA und Agrarproduktion? Wenn ja, in wie vielen Landkreisen in Deutschland und wie ausgeprägt ist die Konfliktwahrnehmung? Ist die Agri-PV-Technik als Lösung bekannt und wird sie als Lösungsoption bereits heute in Betracht gezogen? Welche Bedarfe bestehen auf der lokalpolitischen Ebene, den PV-Ausbau auf Agrarflächen möglichst im Einklang mit der Bevölkerung und den Landwirten vor Ort umzusetzen? Eigenschaften der Agri-PV, die einen relativen Vorteil gegenüber PV-FFA und BioDiv-PV vorweisen, sollten untersucht werden und die Kompatibilität mit den unterschiedlichen landwirtschaftlichen Betrieben analysiert, damit gemäß der Diffusionsforschung die Innovatoren und Frühen Übernehmer der Agri-PV-Innovation eine Diffusion antreiben können. Sozio-ökologische Fragestellungen der Akzeptabilität bei den Agri-PV-Anwendern, bpsw. ökonomische und persönliche Merkmale sowie Kommunikationsverhalten, könnten erforscht werden, damit eine persuasive Kommunikationsstrategie erarbeitet werden kann. Für die Beobachtung, Überprüfung und das Wissensmanagement von Agri-PV-Anlagen in Europa könnte ein europäisches Agri-PV-Kompetenzzentrum gegründet werden, damit Best Practice Beispiele aufgezeigt werden, Vororttermine und Begehungen organisiert werden und die öffentliche Gesellschaft sowie das Fachpublikum gezielt mit geeigneten Kommunikationskanälen erreicht werden kann.

5.3 Referenzen

- BMEL (2021): GAP-Direktzahlungen-Verordnung (GAPDZV). Verbändestellungnahmen zum Referentenentwurf. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). Online verfügbar unter https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Glaeserne-Gesetze/Stellungnahmen/GAPDZV.pdf?__blob=publicationFile&v=2, zuletzt geprüft am 18.05.2022.
- BMEL (2022): GAP-Strategieplan für die Bundesrepublik Deutschland. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). Online verfügbar unter <https://www.bmel.de/DE/themen/landwirtschaft/eu- agrarpolitik-und-foerderung/gap/gap-strategieplan.html>, zuletzt aktualisiert am 04.04.2022, zuletzt geprüft am 16.05.2022.
- BnetzA (2021): Verwaltungsverfahren Az.: 8175-07-00-21/1. Festlegung der Anforderungen besonderer Solaranlagen nach §15 Innovationsausschreibungsverordnung. Hg. v. Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen. BnetzA. Online verfügbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/Ausschreibungen/Innovations/GezeichneteFestlegungOktober2021.pdf?__blob=publicationFile&v=3, zuletzt geprüft am 26.04.2022.
- BnetzA (2022): Ergebnisse der Ausschreibungen für innovative Anlagenkonzepte und für Solaranlagen auf Gebäuden und Lärmschutzwänden. 11.05.2022. Bundesnetzagentur (BNetzA). Online verfügbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2022/20220511_Solar.html, zuletzt aktualisiert am 11.05.2022, zuletzt geprüft am 01.09.2022.
- CHATZIPANAGI, Anatoli; TAYLOR, Nigel; THIEL, Christian; JAEGER-WALDAU, Arnulf; DUNLOP, Ewan; KENNY, Robert (2022): Agri-photovoltaics (Agri-PV): how multi-land use can help deliver sustainable energy and food. JRC129225. Hg. v. European Commission und Joint Research Centre (JRC). Online verfügbar unter <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC129225>.
- Denzin, Norman K. (2017): *The Research Act. A Theoretical Introduction to Sociological Methods*. First edition. London: Taylor and Francis. Online verfügbar unter <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.4324/9781315134543/research-act-norman-denzin>
- Feuerbacher, Arndt; Laub, Moritz; Högy, Petra; Lippert, Christian; Pataczek, Lisa; Schindele, Stephan 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.
- IEA (2022): Global CO2 emissions rebounded to their highest level in history in 2021 - News - IEA. International Energy Agency (IEA). Online verfügbar unter <https://www.iea.org/news/global-co2-emissions-rebounded-to-their-highest-level-in-history-in-2021>, zuletzt aktualisiert am 08.03.2022, zuletzt geprüft am 02.09.2022.
- Kohns, Stephan (2008): *Politikberatung*. Stuttgart: Lucius & Lucius (UTB, 8351)
- Lauth, Hans-Joachim; Pickel, Gert; Pickel, Susanne (2015): *Methoden der vergleichenden Politikwissenschaft. Eine Einführung*. 2., aktualisierte Aufl. Wiesbaden: Springer VS (Grundwissen Politik, Bd. 60).
- Marrou, H.; Guilioni, L.; Dufour, L.; Dupraz, C.; Wery, J. (2013): Microclimate under agrivoltaic systems. Is crop growth rate affected in the partial shade of solar panels? In: *Agricultural and Forest Meteorology* 177, S. 117–132. DOI: 10.1016/j.agrformet.2013.04.012.
- Neville D. Crossman; Onil Banerjee; Luke Brander; Peter Verburg; Jennifer Hauck (2018): Global socio-economic impacts of future changes in biodiversity and ecosystem services: State of play and approaches for new modelling. The Integrated Economic-Environmental Modelling (IEEM) Platform. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/323129926_Global_socio-economic_impacts_of_future_changes_in_biodiversity_and_ecosystem_services_State_of_play_and_approaches_for_new_modelling.
- Rahmstorf, Stefan (2022): Klima und Wetter bei 3 Grad mehr. Eine Erde, wie wir sie nicht kennen (wollen). In: Klaus Wiegandt (Hg.): *3 Grad mehr. Ein Blick in die drohende heißzeit und wie uns die Natur helfen kann, sie zu verhindern*: oekom. Online verfügbar unter <http://www.pik-potsdam.de/~stefan/Publications/Klima%20und%20Wetter%20bei%203%20Grad%20mehr.pdf>, zuletzt geprüft am 01.09.2022.

- Rolink, Diethard (2021): Steuerfalle: „Die Freiflächenanlage wird für uns zur Steuerbombe“. In: *top agrar online*, 22.09.2021. Online verfügbar unter <https://www.topagrar.com/energie/news/steuerfalle-die-freiflaechenanlage-wird-fuer-uns-zur-steuerbombe-12691115.html>, zuletzt geprüft am 27.05.2022.
- Scharpf, Fritz W. (1972): Komplexität als Schranke der politischen Planung. In: Erwin Faul (Hg.): *Gesellschaftlicher Wandel und politische Innovation Tagung der Deutschen Vereinigung für Politische Wissenschaft in Mannheim, Herbst 1971*. Opladen, Westdeutsche Verlag: VS Verlag für Sozialwissenschaften (Politische Vierteljahresschrift./Sonderheft 4/1972), S. 168–192.
- Scharpf, Fritz W. (1973): *Planung als politischer Prozess. Aufsätze zur Theorie der planenden Demokratie*. 1. Aufl. Frankfurt am Main: Suhrkamp (Theorie), zuletzt geprüft am 18.05.2022.
- UN (2012): Secretary-General’s Initial Input to the Open Working Group on Sustainable Development Goals. Sixty-seventh session. United Nations General Assembly. Online verfügbar unter <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/1494sgreportsdgs.pdf>, zuletzt geprüft am 01.09.2022.
- UNFCCC (2022): Introduction to Climate Finance. United Nations Climate Change. Online verfügbar unter <https://unfccc.int/topics/climate-finance/the-big-picture/introduction-to-climate-finance/introduction-to-climate-finance>, zuletzt aktualisiert am 01.09.2022, zuletzt geprüft am 01.09.2022.
- Wehling, Hans-Georg; Weber, Reinhold; Riescher, Gisela; Große Hüttmann, Martin; Renn, Ortwin (Hg.) (2014): *Politikberatung*. Stuttgart: Kohlhammer (Brennpunkt Politik).
- Welthungerhilfe (2022): Earth Overshoot Day - Eine Erde reicht nicht. Welthungerhilfe. Online verfügbar unter <https://www.welthungerhilfe.de/informieren/themen/klimawandel/earth-overshoot-day-welthungerhilfe>, zuletzt aktualisiert am 01.09.2022, zuletzt geprüft am 01.09.2022.
- Weselek, Axel; Ehmann, Andrea; Zikeli, Sabine; Lewandowski, Iris; Schindele, Stephan; Högy, Petra (2019): Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities. A review. In: *Agron. Sustain. Dev.* 39 (35), S. 1–20. DOI: 10.1007/s13593-019-0581-3.
- Wiegandt, Klaus (Hg.) (2022): 3 Grad mehr. Ein Blick in die drohende Hitzezeit und wie uns die Natur helfen kann, sie zu verhindern: oekom. Online verfügbar unter <https://www.oekom.de/buch/3-grad-mehr-9783962383695>, zuletzt geprüft am 01.09.2022.
- Wunder, Stephanie; Kaphengst, Timo; Freluh-Larsen, Ana; McFarland, Keighley; Albrecht, Stefanie (2018): Land Degradation Neutrality. Handlungsempfehlungen zur Implementierung des SDG-Ziels 15.3 und Entwicklung eines bodenbezogenen Indikators. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-02-21_texte_15-2018_land-degradation-neutrality_de.pdf, zuletzt geprüft am 17.05.2022.

Appendix A: Publikation „Applied Energy”



Implementation of agrophotovoltaics: Techno-economic analysis of the price-performance ratio and its policy implications



Stephan Schindele^{a,*,1}, Maximilian Trommsdorff^a, Albert Schlaak^{a,1}, Tabea Obergfell^a, Georg Bopp^a, Christian Reise^a, Christian Braun^a, Axel Weselek^b, Andrea Bauerle^c, Petra Högy^b, Adolf Goetzberger^a, Eicke Weber^{a,2}

^a Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg im Breisgau, Germany

^b Institute of Landscape and Plant Ecology, University of Hohenheim, 70593 Stuttgart, Germany

^c Institute of Crop Science, University of Hohenheim, 70593 Stuttgart, Germany

HIGHLIGHTS

- Coverage of current agrophotovoltaic (APV) promotion policies in several countries.
- Comparative cost of electricity evaluation of APV and ground-mounted photovoltaics.
- Cost of APV implementation related to the economic benefit of obtaining cropland.
- Price-performance ratio calculation applied to measure economic quality of APV projects.
- Potato production under APV is economically beneficial, winter wheat production not.

ARTICLE INFO

Keywords:

Evidence-based policy making
Price-performance ratio
Levelized cost of electricity
Energy policies and technology assessment
Innovation and new development in energy technology
Agrophotovoltaics/agrivoltaic

ABSTRACT

Rising demand for solar power generation will lead to increased land use competition, and thus to potential economic and social conflict. A solution to this challenge is to produce food and energy within an agrophotovoltaics (APV) system. Since 2017, governments in Japan, France, Massachusetts (USA), South Korea, and China have introduced policies supporting APV implementation. Governments considering APV implementation – e.g. in India and Germany – for evidence-based policy making are demanding information on how levelized cost of electricity (LCOE) of APV differs from that of conventional ground-mounted photovoltaics (PV), as well as on how additional costs associated with APV installation relate to the benefit of maintaining agricultural activity under APV. Data for a techno-economic price-performance ratio calculation has been retrieved from an inter- and transdisciplinary APV case study in Germany. We observed that the LCOE of APV with $\text{€}0.0828 \text{ kWh}^{-1}$ is 38% higher than that of ground-mounted PV, resulting in an annual cropland preservation price of $\text{€}9,052 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. The annual revenue of potato and winter wheat production under APV resulted in a performance of $\text{€}10,707 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ and $\text{€}1,959 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ respectively, leading to a beneficial price-performance ratio of 0.85 for potato production and, with a ratio of 4.62, a disadvantageous result for winter wheat. Overall, APV is not necessarily recommended in crop rotating systems. However, in combination with permanent cultures – e.g. berries, fruits, or wine grapes – as the price for these types of applications is lower, while at the same time providing higher performance by optimizing techno-ecological synergies.

* Corresponding author.

E-mail addresses: stephan.schindele@baywa-re.com (S. Schindele), maximilian.trommsdorff@ise.fraunhofer.de (M. Trommsdorff), albert.schlaak@baywa-re.com (A. Schlaak), tabea.obergfell@ise.fraunhofer.de (T. Obergfell), georg.bopp@web.de (G. Bopp), christian.reise@ise.fraunhofer.de (C. Reise), christian.braun@ise.fraunhofer.de (C. Braun), a.weselek@uni-hohenheim.de (A. Weselek), a.bauerle@uni-hohenheim.de (A. Bauerle), petra.hoegy@uni-hohenheim.de (P. Högy), goetzberger@yahoo.de (A. Goetzberger), weber@berkeley.edu (E. Weber).

¹ Present contact information: BayWa r.e. Solar Projects GmbH, Kaiser-Joseph-Straße 263, 79098 Freiburg i. Brg., Germany.

² Present contact information: International Solar Energy Society ISES, Wiesentalstraße 50, 79115 Freiburg i. Brg., Germany.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114737>

Received 22 October 2019; Received in revised form 19 February 2020; Accepted 23 February 2020

Available online 26 March 2020

0306-2619/© 2020 The Authors. Published by Elsevier Ltd. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Nomenclature			
a	year	ha	hectare
APV	agrophotovoltaics	IFES	Integrated Food-Energy Systems
BMBF	German Federal Ministry of Education and Research	kWh	kilowatt hours
BMEL	German Federal Ministry of Food and Agriculture	kWp	kilowatt-peak
BMWi	German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy	LCOE	levelized cost of electricity
BnetzA	German Bundesnetzagentur	MWp	megawatt-peak
CAPEX	capital expenditures	OPEX	operating expenses
ct	cents	p	price
€	euros	pb	performance/performed benefit
FM	Financial Mechanism of the UNFCCC	ppr	price-performance ratio
GM	ground-mounted	PV	photovoltaics
GWp	gigawatt-peak	RE	renewable energy
		\$	United States dollars

1. Introduction

Globally, ground-mounted photovoltaics (PV-GM) have become the most cost competitive source of power generation [1]. Accordingly, PV-GM represents a growing share in the PV marketplace [2]. Hardly discussed is the spatial aspect of PV-GM implementation, as well as the loss of cropland resulting from it. Land is the principal basis for human livelihood. It supplies food, fresh water and many other ecological resources. Yet due to socioeconomic development – e.g. infrastructure, industrial estate and housing development – as well as soil degradation and desertification, cropland is expected to decrease globally by between 50,000,000 ha (the size of Spain) and 650,000,000 ha (twice the size of India) by 2100 [3]. Consequently, cropland is becoming scarce. Accordingly, the availability of arable land per capita decreased by 48% between 1961 and 2016 due to the increase in global population [4]. Taking into account planetary boundaries [5] and the limited availability of cropland, it can be foreseen that the rising demand for PV-GM will lead to increased land use competition and thus result in potential economic, ecological, political, and social conflicts in the future. One approach to meeting the challenge in terms of sustainable land use is the Integrated Food-Energy System (IFES), which enables the simultaneous production of food and energy on the same plot of land. Moreover, it utilizes synergetic effects by optimally exploiting the potential offered by both production systems, as seen for instance in agroforestry systems or agrofuel production with cascade use [6]. One solution emerging from the PV sector for minimizing the impact of arable land grabbing is an agrophotovoltaic (APV)³ dual use of agricultural land, which was proposed for the first time by Goetzberger and Zastrow [7]. Since 2017, APV has been recognized as a strategy for avoiding or minimizing land impacts from PV systems in the Global Land Outlook, focusing on energy and land use by IRENA and UNCCD [8]. In Germany, a total of eight APV power plants have been in operation since 2004, three of which were built for research purposes. General information on the APV power plants in Germany is presented in Table 1.

In parallel to the innovation process of APV in Germany, several APV pioneers have implemented demonstration projects, e.g. Japan, 2004 [9,10], Massachusetts (USA), 2008 [11], Italy, 2011⁴ [12,13], Malaysia, 2015, Egypt, 2016,⁵ and Chile, 2017 [14]. Some advanced governments have already implemented APV dissemination policies, e.g. Japan [15], South Korea [16–18], China [19], France [20], and Massachusetts (DOER [21],⁶ while others are currently discussing the

implementation of APV, e.g. India [22,23] and Germany [24]. We estimate that approximately 2200 APV systems have been installed worldwide since 2014, leading to a capacity of about 2.8 GWp as of January 2020.⁷ Together with the increasing international APV market development, the scientific community has paid growing attention to APV, and a review of the applications, challenges, and opportunities presented by APV systems has recently been published [27]. Pearce (Michigan Technological University) presented a very comprehensive literature review on APV as part of his lecture entitled “Solar PV Science and Engineering.”⁸ The first international APV conference will be held in France in August 2020 to connect the scientific community and promote international exchange in a greater effort to advance APV system technology.⁹ Techno-ecological aspects of APV have also been discussed [28–31], and geographical APV research gaps have been closed by Adeg et al. [32] and Majumdar and Pasqualetti [33]. Publications on plant ecology as well as assessments of the agricultural productivity of agave, wine grapes, lettuce, corn, and Java tea in combination with APV have also been written [33–42]. Evaporation, transpiration and irrigation in the context of APV has been covered as well [30,35,37,43,44]. Social, economic, and political considerations of APV have also recently been researched [45–48]. The present study is concerned with the APV research facility in Heggelbach, Germany, 2016. As a contribution to resource-efficient land use and the simultaneous reduction of land use competition, the “Agrophotovoltaics Innovation Group Resource Efficient Land Use (APV-RESOLA, Grant No.: 033L098AN)” was established in 2015.¹⁰ An APV prototype was developed, installed, and tested under real-life conditions as part of an inter- and transdisciplinary project funded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF). APV-RESOLA defines APV as a system technology that evidently increases land use efficiency by simultaneously enabling main agricultural crop production and secondary solar PV power generation on the same cropland area, while optimally utilizing the techno-ecological and techno-economic synergy effects of both production systems. The research project is divided into five key work focus groups: (1) Technology Development, (2) Environment and Biodiversity, (3) Society, (4) Agriculture, and (5)

(footnote continued)

policy on APV dissemination, please see information boxes in the attachment.

⁷ By comparison, the total installed capacity of floating photovoltaics (FPV) worldwide is estimated at 1300 MWp SERIS [25] and the total installed capacity of concentrated photovoltaics (CPV) worldwide is estimated at 600 MWp and might reach 1.36 GWp by the end of 2020 IHS [26].

⁸ Source: https://www.appropedia.org/Dual_use_of_land_for_PV_farms_and_agriculture_literature_review (07.01.2020).

⁹ Source: <http://www.agrivoltaics-conference.org/home/about.html> (06.01.2020).

¹⁰ For more information on the APV-RESOLA project, see following link: www.agrophotovoltaik.de.

³ The name “agrophotovoltaics” is derived from FAO’s IFES methodology as well as the terms “agroforestry” and “agrofuels” [6].

⁴ Source: <https://www.youtube.com/watch?v=03HraAXcb4g> (01.10.2019).

⁵ Source: <https://www.gridparityag.com/> and claims by www.almaden-europe.com Dr. Erich Merkle as well as Maximilian Abouleish-Boes, <http://www.sekem.com/en/index/> (31.08.2019).

⁶ For more details on international APV market development and public

Table 1
General information on APV power plants in Germany.

No.	Location (Federal State)	Capacity in kWp	Agricultural products grown at the APV plant site	Operator	Year of installation
1	Warmisried (Bavaria)	70	Potatoes, winter wheat, spring barley, beetroot, leeks, celery	Elektro Guggenmos	2004
2	Birstadt (Hesse)	250	Flowers, e.g. peonies	Gärtnerei Haller	2010
3	Lampertheim Rosengarten (Hesse)	5000	Ginseng	Krug's Spargel	2013
4*	Freising (Bavaria)	28	Chinese cabbage, Pointed cabbage	Weihenstephan-Triesdorf University of Applied Sciences	2013
5	Birstadt (Hesse)	5000	Ginseng	Krug's Spargel	2015
6*	Hegelbach (Baden-Württemberg)	194.4	Potato, winter wheat, celeriac, clover	Fraunhofer ISE and Farm community Hegelbach	2016
7	Freising (Bavaria)	14	Chinese cabbage, pointed cabbage	Weihenstephan-Triesdorf University of Applied Sciences and SolarTube GmbH	2017
8*	Dresden (Saxony)	12.9	Spinach, peas, bush beans, chard, radishes	Dresden University of Applied Sciences	2018

* Research facilities.

Political and Economic Analysis. Here, we are presenting the output of activities stemming the fifth work focus group. In contrast to previous APV studies, cost data on APV implementation is published here for the first time and assessed in relation to the economic benefit of obtaining cropland. We apply and introduce the method of price-performance ratio calculation as an indicator to measure the techno-economic quality of an intended APV project within an APV permitting process. We thereby provide a decision support tool for policy makers in order to design public policies for the promotion and dissemination of APV. Results from our case study on APV implementation support evidence-based policy making and close research gaps as follows:

- (i) How does the levelized cost of electricity (LCOE) of APV differ from the cost of conventional ground-mounted PV installations in terms of capital expenditures (CAPEX) and operating expenses (OPEX)?
- (ii) How does the potential additional cost of APV implementation (price) relate to the benefit of maintaining agricultural activity under APV (performance)?
- (iii) What conclusions can be drawn from a techno-economic price-performance ratio analysis of APV implementation with regard to public policy design in terms of quality assurance, crop selection, land management, price, and level of quantity?

This is how we contribute to the current discussion on the social, economic, and policy aspects of APV.

2. Theory: Planning APV implementation based on the price-performance ratio

2.1. PV-GM land management in Germany: built-up area vs. arable land

Between 2004 and 2010, PV-GM dissemination was supported under Germany's Renewable Energy Act (EEG), having received a price-based feed-in tariff (FiT). To minimize ecological impacts, PV-GM implementation was governed in such a way that low-quality land, e.g. former military or landfill areas, was prioritized in PV-GM development. In 2005, the Nature and Biodiversity Conservation Union (NABU) published a planning guide for the environmentally sound implementation of PV-GM on arable land, including sheep and goat husbandry [49]. In 2010, however, conversion areas became scarce, and with the increasing share of PV-GM implementation on cropland, the German government decided to eliminate FiT support for PV-GM entirely. Between 2010 and 2014, no PV-GM projects were commissioned in Germany. In 2014, German policymakers decided to turn the former price-based FiT regulation for PV-GM dissemination into a quantity-based approval mechanism with an annual PV-GM capacity of 600 MWp, taking effect in 2015. This new support mechanism targeted institutional investors, financing utility-scale projects with capacities ranging from 750 kWp to 10 MWp and with a twenty-year FiT price set by a pay-as-bid, market-based auction rather than by the government itself.¹¹ Land availability was expanded to areas next to transportation infrastructure, e.g. 110-m strips along highways and railroads, as well as to less-favored areas – a subcategory of arable land characterized by low soil quality, for example. Furthermore, federal policymakers transferred decision-making power to the state level with regard to

¹¹ From a rational choice perspective and with all information available, for the policymaker, it would not matter if PV-GM dissemination is promoted via a price or quantity mechanism. Yet due to asymmetric information, lack of information, and non-rational behavior of policymakers and economic players, a restriction risk remains for policymakers when defining the 'right' price and quantity for the promotion of a certain good according to Weizmann [50]

utilizing less-favored areas¹² for PV-GM development, thereby justifying the principle of subsidiarity within a federal system [52,53]. From 2015 to 2018, the quantity-based PV-GM auctions were continuously oversubscribed, showing that there is sufficient cropland and demand for PV-GM development in Germany [54]. By the end of 2018, the total installed PV capacity had reached 45.4 GWp, of which 4.7 GWp were installed on 10,959 ha of arable land, leading to an average PV-GM land use efficiency of 2.33 ha/MWp between 2004 and 2018 [55]. Today, PV-GM covers 0.07% of Germany's arable land,¹³ [56] which appears very little compared to the 15% of cropland utilized for the production of agrofuels, e.g. E5, E10, biodiesel, and biogas [57]. The re-inclusion of PV-GM into the EEG 2014 promoted economies of scale and increased the competitiveness of PV. In a cross-technological 200-MWp auction with onshore wind power plants in 2018, PV-GM received all the bids, thus becoming the lowest-cost renewable energy source in Germany [58]. The first subsidy-free PV-GM project on cropland in Germany was inaugurated in 2019 [59]. Subsequently, PV-GM advocates, industry representatives, and policymakers in favor of rapid PV-GM dissemination claim that PV-GM will occupy less than 1% of arable land by 2050. Following this argument, German policymakers passed a law enabling additional PV-GM auctions with a cumulative capacity of 4 GWp to be surcharged between 2019 and 2021 [60]. Thus, a total of 5.2 GWp of PV-GM is set to be installed by 2021, doubling PV-GM capacity on arable land. With a current average land use efficiency of 1.45 ha/MWp for PV-GM implementation, this policy will demand 7,540 ha of arable land, or 10.3 ha per day. At the same time, the German government intends to limit the expansion of built-up area from approximately 65 ha day⁻¹ in 2018 to 30 ha minus × day⁻¹ by 2030 [61],¹⁴ and even to net zero by 2050 [62]. Since PV-GM is considered to be industrial estate area, as the main land functionality of PV-GM is not to produce biomass, but to generate solar PV power, the inclusion of PV-GM on arable land counteracts sustainable development policy targets. Evidently, the 10.3 ha day⁻¹ of PV-GM built-up area expansion affiliated with the additional four GWp of PV-GM auction would require approximately 34.3% of Germany's targeted 30 ha minus × days⁻¹ of sustainable land, making limitations to the expansion of built-up area obvious. Since 2015, cropland under PV-GM has no longer been eligible for subsidies from the common agricultural policy of the European Union (EU) in Germany [63], since PV-GM is considered an expansion of built-up area. Limitations to PV-GM dissemination do not correspond with the availability of cropland, but rather with its competition with socioeconomic development and the expansion of built-up areas for infrastructure, e.g. road construction, industrial estates, and housing developments. The first federal state that has taken political action to synchronize PV-GM land management with the expansion of built-up area is the Federal State of Bavaria. To push back "surface guzzling" and to protect the common good, arable land and landscape, Bavaria has initially set a quantity limit of 30 PV-GM projects each year in 2019, which will later rise to 70 [59,64]. Thus, it is important to compare PV-GM development with the expansion of built-up area rather than arable land availability within the context of the discussion surrounding land management for PV-GM dissemination. The unique selling point of APV in comparison to PV-GM is based on the simple fact that APV obtains cropland, and may even improve the agricultural yield production.

(footnote continued)

Hepburn [51].

¹² Less-favored areas are areas covered by Council Directive 86/465/EEC of 14 July 1986 concerning the Community list of less-favored farming areas within the meaning of Directive 75/268/EEC (ABI, (EC) No. L 273, S1) as amended by EU Commission Decision 87/172 / EC of 10 February 1997 (OJ L (L) 72, p 0.1).

¹³ Total agricultural land in Germany is 16,645,100 ha in 2018 [56].

¹⁴ Originally this target should have been achieved in 2020 [61], but as it became evident that Germany will fail meeting this target, the political solution was to postpone the time horizon of the target by 10 years to 2030.

Therefore, PV-GM and APV aim at different landscapes and qualities of cropland.

2.2. Governance of agrophotovoltaics: Theory of the price-performance ratio

In economic and innovation theories, it is believed that in an early stage of market penetration, products are often ineffective and expensive, targeting at wealthy innovators, first-movers, and early adopters. Gradually, with continuous improvement and re-design of the product on the one hand and market entries, competition, higher R&D investments, and economics of scale on the other hand, products become more effective and cheaper [65,66]. When implementing innovations such as APV, governments try to minimize risks and adapt promotion of the innovation according to the technology readiness level (TRL) scale [67]. In early development stages, policymakers fund research and demonstration projects to gather information, focus on evidence-based policymaking, and search for the best practice. In late TRLs with promising scientific results, policymakers establish a pre-standard and thoroughly establish market penetration using the valley of death principle [68]. Furthermore, in democratic regimes, and in line with the rational choice approach to increasing welfare, governments may only justify their governing action by achieving a benefit higher than the paid price (or cost). For instance, with respect to the support of renewable energy and the related cost of quantity or price regulation, performance is measured by accounting for the economic savings from fewer energy imports, jobs created, patents registered, or avoided harm to ecosystem services. Ministerial reports regularly monitor and publish the results [69]. In applying the theory of the price-performance ratio to APV applications, we come into contact with the great diversity of the agricultural sector, requiring different APV technology designs. Policymakers working with the governance of APV implementation on a macro level seek to maximize the benefit and minimize the cost of APV dissemination policies. Accordingly, on a micro level, APV projects are most likely to be permitted in an APV dissemination policy, resulting in high performance at the lowest price possible. The price-performance ratio is an economical decision-making aid for policymakers, whose methodology in terms of APV is explained in the following chapter.

3. Methodology

3.1. Calculation method for the price-performance ratio

The quotient takes on positive values larger than zero and is calculated as follows:

$$\text{ppr} = \frac{p}{\text{pb}} \quad (1)$$

where

ppr	=	price-performance ratio	
p	=	price	[€/ha/a]
pb	=	performance benefit	[€/ha/a]

The **general assumption of the price-performance ratio (ppr)** is that a ratio larger than 1 is not reasonable to support APV dissemination of the analyzed systems since the techno-economic synergies are not great enough. However, a ratio of 1 assumes that APV implementation is economically reasonable since the resilience of the farmer in question has been improved by income diversification, adaptation to global warming, contribution to the energy transition, and achievements in land use efficiency. If the price of maintaining cropland is lower than the economic performance of the same cropland (ratio less than 1, a result policymakers seek), the project-specific benefits are higher than the affiliated costs. Thus, through policy learning and adaptation, policymakers strive to minimize this ratio in order to maximize techno-economic and techno-ecological synergies, thereby improving the cost-

benefit relationship of the implemented policy.

Price of APV implementation (p): We have defined the price of APV implementation as the extra annual cost resulting from the adaptation of the PV-GM structure in order to maintain the cropland and enable techno-economic and techno-ecological synergies. The extra cost is deconstructed by the methodology of the levelized cost of electricity (LCOE) and separated into extra costs in capital expenditures (CAPEX) and operating expenses (OPEX). The annual price difference between a conventional PV-GM and an APV power plant installed on the same area of cropland under identical meteorological conditions is thus considered the price of arable land preservation and is expressed as follows:

$$p = LCOE_{APV} * M_{APV} - LCOE_{PVGM} * M_{PVGM} \quad (2)$$

where

p	=	price	[€/ha/a]
LCOE _{APV}	=	levelized cost of electricity for agrophotovoltaics	[€/kWh]
LCOE _{PVGM}	=	levelized cost of electricity for ground-mounted PV	[€/kWh]
M _{APV}	=	annual electrical yield per ha APV	[kWh/ha/a]
M _{PVGM}	=	annual electrical yield per ha PV-GM	[kWh/ha/a]

The price (p) of APV implementation per project is calculated by multiplying the LCOE by the respective annual electrical yields M per hectare occupied by the PV-system. The price (p) expressed in € ha⁻¹ a⁻¹ is predominantly affected by the type of farming process and the techno-economic performance, and thus by the LCOE of APV as well.

Performance of APV implementation (pb): The performed benefits (pb) from APV implementation are the preservation of cropland and the annual revenue from harvest under APV in € ha⁻¹. The resulting benefit depends on the value of the selected crops and on the impacts of the APV system, e.g. shading or land loss due to the construction. Here, the general economic assumption is that a greater expected annual farming revenue signifies a higher price for land preservation. Data for the calculation of the performance is derived from three sources: (a) revenue data for the organic potatoes and winter wheat at the Bavarian State Research Center for Agriculture (LfL)¹⁵ on over area without APV, (b) sales data from the Demeter-certified farm community Heggelbach, and (c) project results on yields of potatoes as well as winter wheat which shares space with APV at the University of Hohenheim.¹⁶ It is important to note that the price-performance ratio uses micro-economic data to pursue the principal course of thought. It is neither a profit assessment nor a macroeconomic cost-benefit analysis (CBA). The CBA is recommended in order to provide an estimated value of different methods of APV implementation comparing the total expected cost of each policy option. The CBA methodology is used for a holistic technology assessment including, e.g. impacts on the job market or environmental services [70]. Moreover, the CBA regulates public policies in several countries, e.g. in Canada where it is part of the National Guide for Regulatory Analysis [71], or in water resource development and healthcare regulations in the USA [72,73]. According to economic theory, the optimum result of a CBA of APV implementation can only be achieved if only APV projects are executed where the price-performance ratio is less than or equal to 1, or if the benefit of maintaining food production is higher than the cost of PV-GM adaptation. In the present APV case study, the farmer produced a relatively ineffective APV crop rotation culture including

¹⁵ Data Source: <https://www.stmelf.bayern.de/idb/oekospeseikartoffeln.html> (24.09.2019). Data Source: <https://www.stmelf.bayern.de/idb/oekowinterweizen.html> (24.09.2019).

¹⁶ The installation of the APV system did not impact the farm's typical crop rotation scheme. Data on the final harvest productivity and the agricultural research design are not presented in this manuscript since they will be published by the University of Hohenheim (manuscript in preparation).

winter wheat as a crop which requires a high light intensity to grow. The background is that the construction had to be adapted to allow a harvester to operate under APV, and at the same time, it did not substitute any supplementary type of crop growing systems, e.g. hail protection nets used in fruit production. Consequently, the price for cropland conservation here is very high, whereas the microeconomic performance of grain production in a crop rotating system is relatively low compared to other APV applications that might be feasible for permanent and special high-yield crops. Therefore, we consider our case study economically conservative, leaving the need for future APV ppr optimization. In the following, details of the applied LCOE and ppr calculation methods are explained, the data basis is referenced, and the estimation strategy is outlined.

3.2. Levelized cost of electricity calculation method

The LCOE calculation method is used to calculate and compare the specific costs per unit of electricity produced (€ k⁻¹ W h⁻¹). In practice, this method is the current cost comparison criterion of different electric power plant systems [74–76]. The calculations are made using Microsoft Excel software, and are based on the formula below:

$$LCOE = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^n A_t * (1+i)^{-t} - R_n}{\sum_{t=1}^n M_{t,el} * (1+i)^{-t}} \quad (3)$$

The basic idea of the calculation method is to contrast the capital expenditures I₀ (CAPEX) and all operating expenses A_t (OPEX) minus the residual value R_n available at the end of the useful life n of the total generated electrical energy. Both the cost and the annual average amount of electrical energy produced are reduced to a common reference date, using the calculation interest rate i. This seems unrealistic, but since the energy produced implicitly stands for the revenue generated by the energy, this method makes sense financially [77]. The electrical energy produced in a year M is expressed by the following formula:

$$M_{t,el} = \sum_{t=1}^n S * \eta * (1-d)^t \quad (4)$$

The electrical energy produced in a year M_{t,el} is calculated as the sum of the annual solar irradiation S multiplied by the system efficiency η and the annual efficiency losses d. It has been determined by the electricity yield certificates specific to the APV power plant in Heggelbach and a south-facing conventional PV-GM as a comparison value. It is assumed that the residual value R_n of the total APV system equals the dismantling costs, and can thus be neglected. Also, the costs for dismantling are not taken into account as a reserve against the annual operating costs [77].

3.3. The LCOE as a data basis

For the development, installation, and commissioning of the APV power plant Fraunhofer worked in close cooperation with project partners BayWa r.e. and the farm community Heggelbach to open a public call to tender procurements of the following products and services: ground surveys, building permission support, APV mounting structure including the associated logistics and installation, installation of the electrical system including the PV system, and electricity grid connection including a transformer station. As is common in German administration, the lowest bidder was awarded the contract. The offer for the APV mounting structure, including logistics and assembly, was obtained for the installation of an APV capacity of 0.2 MWp, 0.5 MWp, 1.0 MWp or 2.0 MWp in order to scrutinize scaling effects. To calculate the APV-LCOE, the data of an APV plant with a capacity of 1.04 MWp is used as a basis, corresponding to an area utilization of 2 ha. The costs incurred for the scientific support, including technical equipment such as sensors for agricultural and energy yield monitoring, microclimate stations, substrate development, and the creation of a time-lapse

video documenting the construction of the installation,¹⁷ are not included in the APV-LCOE calculation. Income from agricultural production is not taken into consideration in the APV-LCOE calculation. An annual fee for the partial use of agricultural land (land lease payment¹⁸) paid by the APV owner to the farmer for the dual use of the land is included in the APV-LCOE calculation.¹⁹ In the assumption that the lowest possible APV-LCOE increases the competitiveness of APV, thus increasing the likelihood of market introduction or the incorporation of APV into existing legislation, the purchase and installation of the APV system was always balanced by the lowest possible costs while maintaining compliance with the quality demanded and the agricultural requirements.

3.4. Time considerations

The APV prototype was installed in August and September 2016. The APV system is expected to be in operation for 25 years from its commissioning in September 2016. All cost data was updated to current market prices in June 2019.

3.5. LCOE comparison of APV to PV-GM

For the comparison of APV to PV-GM, the area was limited to 2 ha since it is assumed that APV power plants of this size can be realistically implemented in Southern Germany's small-scale agricultural structure. This area yielded an installed capacity of 689.66 kWp ha⁻¹ with PV-GM and 519.18 kWp ha⁻¹ with APV. The annual specific electricity yields of the PV-GM and the APV power plants were calculated in yield assessments conducted by Fraunhofer ISE. The yield assessment of the PV-GM was based on an energy system in close proximity to the APV trial area, so that the climatic and in particular the solar irradiation values are almost identical. In order to ensure comparability of the PV technologies, the annual specific electricity yield data was taken from the respective yield certification. More information on the accuracy of electricity yield certification and the underlying calculation method, e.g. the calculation of the performance ratio or degradation effects of the PV system and the bifacial PV modules, are discussed elsewhere [78–80].

3.6. Location and geography

The APV power plant was installed on a field of the Demeter-certified farm community Heggelbach in the municipality Herdwangen-Schönach, district of Sigmaringen, in the Lake Constance region of Upper Swabia. The APV complex is located about 400 m from the farming community. With a credit rating of 42, the field has an average soil quality, and is not located in a less-favored area. The field is slightly sloping, at elevations ranging from 655 to 670 m above sea level, and is exposed to relatively high wind and snow loads (snow zone 1). Extreme falling winds of up to 150 km h⁻¹ and a snow load of 0.93 kN/m⁻² at temperatures of -25° to +35 °C were assumed in the development of the mounting structure. A permit was required for the turnkey construction of the APV power plant and was granted by regional authority in the context of construction planning carried out by the local municipality.

¹⁷ Source: Fraunhofer ISE/AMA Films, <https://www.youtube.com/watch?v=NJnXSzvy-8> (01.10.2019).

¹⁸ A land lease in the true sense is not present, as the landowner and farmer can continue farming his area. It is legally controversial whether this initially constitutes a lease or rent. The contract as such is a sui generis contract, which is based on the land use contract, for example by having a notary public register the rights-of-way in the land register.

¹⁹ With regard to the additional costs for the farmer to manage the arable land in the APV power plant, it can be anticipated that the land lease payment will compensate for the cost of the additional effort. Details will be discussed in a separate study.

3.7. Technical parameters

The main technical parameters of the APV system technology are noted in Fig. 3 and can be summarized as follows: The PV modules are elevated with a clearance height of 5 m so that the work of the agricultural machinery, in particular of the combine harvester, is not hindered by the APV power plant. The overall height of the installation reaches 7.8 m. Each individual unit has a width of 19 m, having been chosen to be many times the width of the machine most frequently used for this particular cropland. This ensures that as little area as possible is lost and reduces the additional work for the farmer to a minimum. Overall, the APV system takes up seven units in width, adding up to a total width of 133 m. The length of each unit is 13 m and was also chosen by a multiple of the farm's most common machine, so that the farmer can process the field in both directions of the APV power plant in future. The power plant is two units long, resulting in a total length of 26 m. In order to ensure uniform crop growth, the APV installation must guarantee sufficient and homogeneous light distribution. The application of the Fraunhofer ISE patent EP2811819A1 "Method for simultaneously cultivating crop plants and utilizing the energy of sunlight" registered in 2012 ensures these conditions and controls exposure to sunlight during the plants' entire vegetative phase [81]. The results of a light simulation fundamentally influence the development and design of the APV substructure, e.g. the inclination of the PV modules, PV module row spacing, and the location-specific alignment to the sky.²⁰ To gather robust data of agricultural yields, a minimum size needed to be established for the APV system, taking boundary effects from light entering from the sides of the power plant into consideration. To reduce boundary effects in our case study, we applied Fraunhofer ISE patent application DE102014218458A1 "Solar module arrangement with reduced edge effects and use of the solar module arrangement for simultaneous cultivation of crops and energetic utilization of sunlight" [82]. Commercially available silicon-based PERC PV module technology was considered for both APV and PV-GM, but for the area of cereal and vegetable production where APV was employed, bifacial PV modules were selected, as this type of PV technology processes both direct and indirect light not only on the front, but also on the back sheet of the PV module. The back sheet is made of glass, thus ensuring that the light also reaches the solar cell from below. This means that this type of PV module achieves greater efficiency and partially compensates for the larger PV module row distances necessary for providing sufficient light to the agricultural production system. Further advantages of the bifacial modules include the fulfillment of the guidelines for overhead glazing of the state building regulations in Baden-Württemberg and the fact that no further construction measures, e.g. safety nets, were necessary for ensuring work safety in conjunction with the APV system. Moreover, crops grown under the APV benefit from diffused light instead of direct shading near the ground (see Figs. 1 and 2).

For the APV prototype, a total of 720 SolarWorld SW 270 duo bifacial PV modules were installed, resulting in a module area of 1206 m² and a total output of 194.4 kWp. The additional electrical yield depends predominantly on the installation height and the background reflectance (albedo factor) and was calculated for the APV plant at 8%, having been confirmed in the first year of operation.²¹ In total, the APV system has 30 PV module rows, consisting of two modules per row attached to one module rack. The module row spacing is 27% greater

²⁰ Detailed information and further data on the technical development, installation, and operation of the APV system, including land equivalent ratio calculations and measurements of boundary effects in light management, will be published by Fraunhofer ISE (manuscript in preparation).

²¹ APV power yield data is online available: <http://www.ise.solar-monitoring.de/system.php?system=apvh&untersystem=0&date=2017-05-03&lang=de> (24.09.2019).

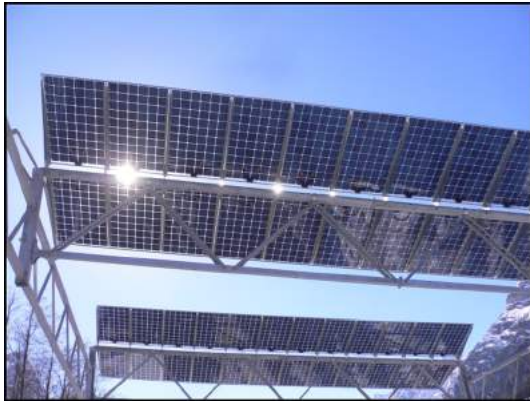


Fig. 1. Left: Bifacial glass-glass PV Modules from below (Source: [41]).



Fig. 2. Right: Diffuse shadows from bifacial PV modules near the ground (Source: [41]).

than that of a conventional PV-GM²². As a result, the annual average photosynthetically active radiation (PAR) available for crop production below the APV system is about 60%, rising to about 63% of the original available sunlight in the summer months. Yet depending on the light saturation point of the crops grown in APV, the impact of shading on PAR varies significantly, with the potential of having a positive or negative influence, or none at all [83,84].

The structural pillars were outfitted with a form of protection to prevent direct collisions between the agricultural machinery and the pillars of the APV mounting structure. The APV system is designed such that the system can stand freely without bracing. The supports are only secured by a sort of corkscrew bolt (spider anchor) in the ground, so that the entire system can forgo concrete foundations and be dismantled without leaving behind any residue. Mobile soil protection panels were laid for the heavy construction machinery and cranes were employed to protect the fertile soil from soil compaction during APV system installation (see Fig. 3).

3.8. Three land users, one business case

Cooperation between the three land users – the APV operator, the farmer, and the landowner – plays an important role in calculating the LCOE of the APV. Overall, five cooperative configurations (A–E) were identified, which all led to different cost structures (Table 2) (See Figs. 4–7).

To successfully implement an APV project, all three key land users must cooperate, where one type of land user can assume more than one land use role. The subject of the present study is represented by

scenario “A”, in which the APV investor cooperates with a farmer who is also owns the land on which the APV is installed. Accordingly, we suggest that APV power plants be designed to be smaller in size than the large conventional PV-GM, but greater in size than large private PV rooftop systems. In Germany, a realistic nominal capacity of an APV system is estimated at between 1 and 10 MWp. As the size of an APV system increases, it is assumed that APV cooperation scenarios C, D and E will become less practicable on account of the high investment costs, while scenarios A and B establish themselves as more common models, appealing to institutional financial organizations such as banks and insurance companies. Assuming that the APV operator is neither the farmer nor the landowner, the revenue and cost of food production in an APV system – including the additional costs and contribution margin from the fieldwork in conjunction with APV – are disregarded in the calculation of the LCOE of APV. From a purely microeconomic and rational-choice perspective, both the APV investor and the farmer-landowner strive for profit maximization in implementing APV on cropland. The price of the annual land lease which the APV operator pays to the landowner is included in the LCOE calculations, representing the business case for the farmer-landowner. Firstly, the annual land cost payment compensates for the diminished food production revenue due to land loss and an estimated decrease in average crop yield on account of increased shade. Secondly, it reimburses the farmer for the higher costs associated with land machinery operation in an APV system, which is more labor- and fuel-intensive compared to the reference area without APV. Finally, as the farmer continues to produce food on the land area under APV, the income received from the European Union (EU) Common Agricultural Policy (CAP) subsidy is maintained for the same area. This also means that the farmer-landowner benefits from additional income on top of the average estimated contribution margin for each hectare of APV. This land rent represents income diversification for the farmer, decreasing the operational risk, as the APV investor pays this annual land cost even if the farmer has a bad harvest, for instance due to drought or another extreme event. Generally, it is assumed that the expected annual average contribution margin including the EU CAP subsidy for each hectare under APV and the land rent from the APV investor is higher than the land rent paid by conventional PV-GM for the same area.²³ The business case for the APV investor is selling APV power at a higher price per kWh than the LCOE of APV.²⁴

4. Empirical application and data

4.1. Price of APV implementation

In the following, the investment, operating, and maintenance costs of the APV system technology for the case study in Heggelbach are compared with those of conventional PV-GM. LCOEs are calculated and the LCOE difference between APV and PV-GM is illustrated. Finally, the price of cropland preservation in conjunction with APV is defined based on a calculation of the annual LCOE difference between conventional PV-GM and APV built on identical land areas.

²³ In our case, the farmer additionally benefits from the self-consumption of APV power, allowing for a reduction of the electricity cost and thus decreasing the full cost calculation of the entire farm. However, we believe that the self-consumption of APV power will remain an exception in APV business case development and the cost and benefit will remain neglected in the calculation of the LCOE of APV.

²⁴ As there is no governmental support mechanism for APV implementation in Germany, for instance a feed-in tariff or tax credit, there is no business case for the APV investor. Since power prices on the electricity stock market are lower than the price of PV production, there is hardly any subsidy-free business case, and if there were, it would only be for conventional PV-GM due to a very low LCOE. This is why we see an intensifying land use conflict between PV-GM and food production on arable land.

²² With a PV module height factor of 2.8 instead of 2.2.

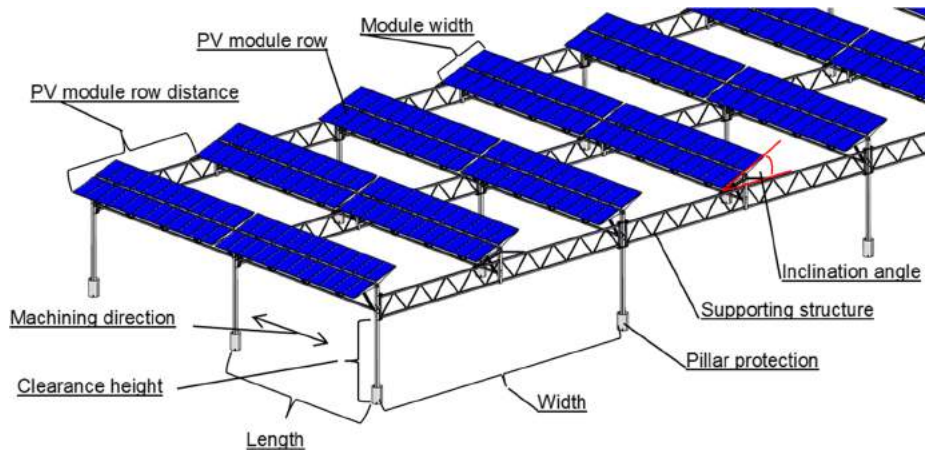


Fig. 3. Fundamental technical parameters of APV system technology (Source: Hilber Solar, [41]).

Table 2

Land user and APV cooperation scenario.

APV cooperation scenario	Land User		
	APV operator	Farmer	Land owner
A	APV investor	Farmer	
B	APV investor	Farmer	Land owner
C	Farmer		
D	Farmer		Land owner
E	Land owner	Farmer	Land owner



Fig. 4. (Left, source: BayWa r.e.): Installation of APV power plant with mobile soil protection panels in August 2016.



Fig. 5. (Right, source: farm community Heggelbach): Installation of APV power plant with mobile soil protection panels in August 2016.

4.2. Capital expenditures (CAPEX) of APV and PV-GM

Fig. 8 compares the additional or reduced CAPEX of APV and PV-GM and illustrates the different cost factors. Both systems examined reference an area of land of 2 ha, corresponding to an APV capacity of 1038.36 kWp and an installed PV-GM capacity of 1379.32 kWp. The total CAPEX for the installation and the commissioning of APV amounts to €1294.20 kWp⁻¹ (total cost of €1343849.53), and for PV-GM €747.50 kWp⁻¹ (total cost of €1031034.48). A table comparing specific investment costs for each cost factor for both APV and PV-GM is provided in Appendix A: Cost Data (see Fig. 8).

Of note are the higher specific investment costs of APV for the cost factors (1) PV modules, (3) mounting structure, (6) site preparation and installation, and (13) soil protection. As fencing is not necessary for the APV power plant, APV CAPEX is reduced slightly as regards cost factor (7) fence.



Fig. 6. (Left, source: BayWa r.e.): Scientific APV power plant from above with reference area next to it and in operation in 2018, producing Demeter-certified organic potatoes, winter wheat, clover, and celery.



Fig. 7. (Right, source: farm community Heggelbach): Scientific APV power plant from above with reference area next to it and in operation in 2018, producing Demeter-certified organic potatoes, winter wheat, clover, and celery.

4.3. Operating expenses (OPEX) of APV and PV-GM

Fig. 9 presents the additional or reduced OPEX of APV and PV-GM, as the case may be, and illustrates the different cost factors. The total OPEX of the 1038.36 kWp APV system are €16.25 kWp⁻¹ (total annual costs €16,873), equaling 1.1% of the CAPEX. For the 1379.32 kWp generated by PV-GM, the OPEX are €18.65 kWp⁻¹ (total annual costs €25,724), which corresponds to 2.2% of the CAPEX for PV-GM. A table comparing specific operational and maintenance costs for each cost factor for both APV and PV-GM is provided in Appendix A: Cost Data.

In terms of operating costs, it can be seen that cost factor (15) land cost per year is lower for APV than for PV-GM. Furthermore, the costs of (16) maintenance and mowing are significantly lower and (17) surveillance costs are somewhat lower. The higher (22) repair services costs have a cost-increasing effect for APV (Tables 3 and 4).

4.4. Input parameters for the electricity yield assumptions and the discount factors for calculating the LCOE of APV and PV-GM

Table 5 illustrates the input parameters for the electricity yield

assumptions and the discount factor calculation. For the discount factors, it is assumed that these input parameters are equally valid for both APV and PV-GM. An indication that the project-specific risks for APV are no larger than those for PV-GM are the identical costs of insurance, which also cover the risk of earning losses. If the risk of default on APV were higher, the banks would provide less leverage or offset them with higher insurance costs. Since the APV power plant was insured under the same terms as a PV-GM, it can be assumed that capital costs for debt are also at the same level. The inflation rate is assumed to be 2%. However, it is not deducted from the nominal WACC, but rather from the life cycle-adjusted annual OPEX (see Table 3).

4.5. LCOE results for PV-GM and APV

With a LCOE of €0.0829 kWh⁻¹ of APV and a LCOE of €0.0603 kWh⁻¹ of PV-GM, the LCOE of APV is €0.0226 kWh⁻¹ (38%) higher than that of PV-GM. In total, €0.0673 kWh⁻¹ (81%) of the LCOE of APV can be traced back to CAPEX and €0.0156 kWh⁻¹ (19%) to OPEX. The LCOE of PV-GM comprises €0.0413 kWh⁻¹ (68%) in CAPEX and €0.0190 kWh⁻¹ (32%) in OPEX Fig. 10.

4.6. Price (p) results of APV implementation

The total annual price (p) of obtaining cropland for food production is the difference between the land use price of APV and that of PV-GM: €59329.81 € ha⁻¹a⁻¹ minus €50278.08 € ha⁻¹a⁻¹, equaling €9051.73 ha⁻¹a⁻¹.

4.7. Performance (pb) results of APV implementation

In our case study, the performance of APV implementation is measured by the preservation of Demeter-certified organic potatoes and winter wheat growing under APV. The performance is expressed in € ha⁻¹ a⁻¹ and is derived from organic potato-growing data without APV from the Bavarian State Research Center for Agriculture (LfL). According to the farmers from the farm community Heggelbach, however, the producer price for organic potatoes and winter wheat can be increased by 15% due to Demeter-certification. At the same time, the average yield of the organic potato and winter wheat harvests

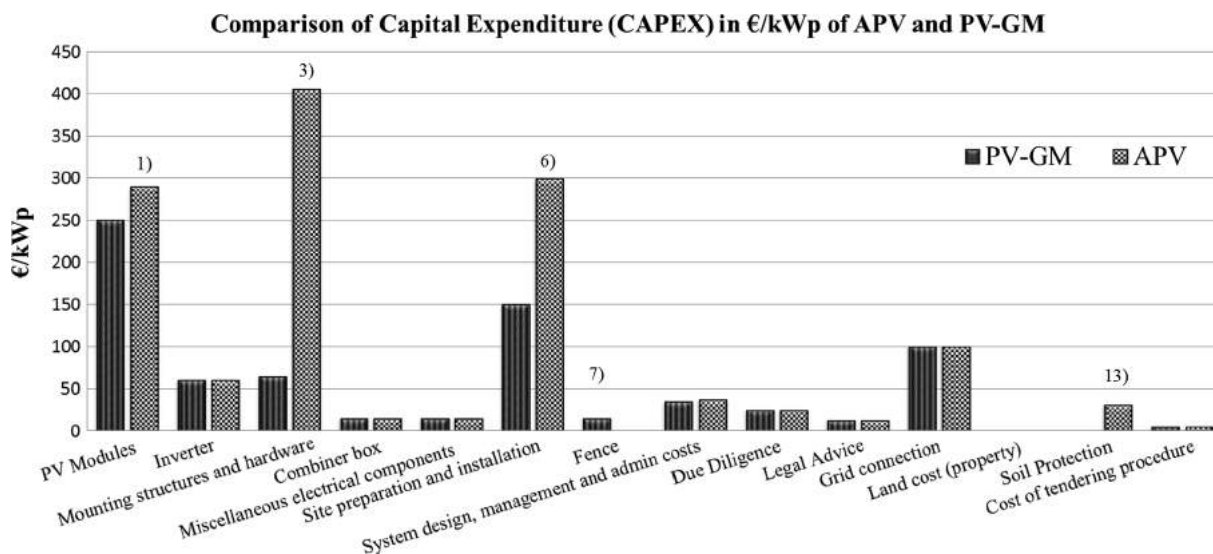


Fig. 8. Comparison of capital expenditure (CAPEX) associated with APV and PV-GM in € kWp⁻¹ (Source: Fraunhofer ISE).

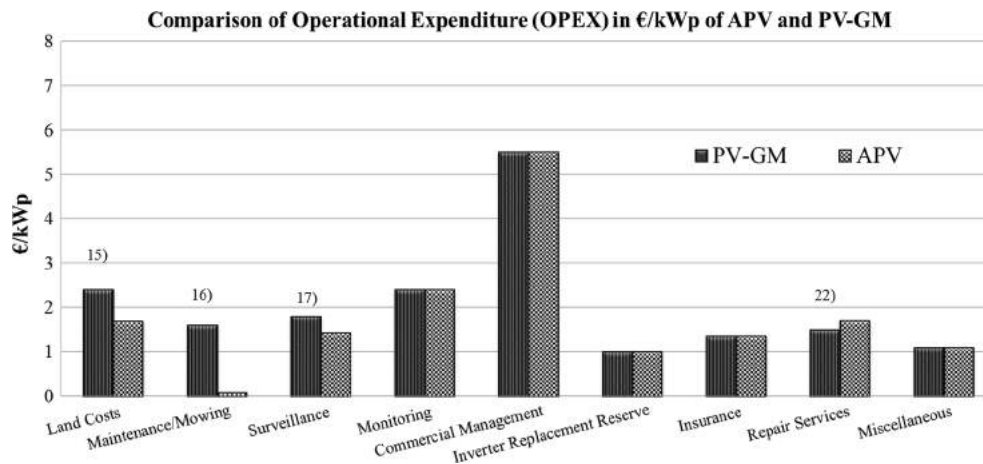


Fig. 9. Comparison of the OPEX of APV and PV-GM in € kWp⁻¹ (Source: Fraunhofer ISE).

Table 3

Input parameters and electricity yield assumptions.

No.	Input parameter	Value	Unit
1	Lifetime	25	a
2	Electricity yield PV-GM (standard PV modules)	1209	kWh/kWp/a
3	Electricity yield APV (bifacial PV modules)	1284	kWh/kWp/a
4	Annual regression of electricity yield	0.25	%
5	Area demanded PV-GM	14.5	m ² /kWp
6	Area demanded APV	19.3	m ² /kWp
7	Total land use (in each case)	2	ha
8	Installed capacity PV-GM	1379.31	kWp
9	Installed capacity APV	1038.36	kWp
10	Equity share	20	%
11	Debt capital share	80	%
12	Cost of equity capital	9.5	%
13	Cost of debt	4.0	%
14	Nominal weighted average cost of capital (WACC)	4.1	%
15	Inflation rate	2	%

Table 4

Annual land use price in € ha⁻¹ of APV and PV-GM implementation.

Type	LCOE in euro cents kWh ⁻¹	Installed capacity in kWp ha ⁻¹	Electricity yield in kWh kWp ⁻¹ a ⁻¹	Land use price in € ha ⁻¹ a ⁻¹
APV	8.29	519.18	1284	59329.81
PV-GM	6.03	689.66	1209	50278.08
Annual price (p) of obtaining cropland for food production				9051.73

decreased between 2017 and 2018 by 11.5%²⁵ and 16.15%²⁶ respectively due to APV effects such as shading and land loss. The data is summarized in Table 5.

In the cases of Demeter-certified organic potato and winter wheat production, the total annual pb of land use with APV was €10707.07 ha⁻¹ a⁻¹ and €1959.38 ha⁻¹ a⁻¹ respectively. Picture 11 depicts potato harvesting in 2017 Fig. 11.

²⁵ Organic potato harvest 2017: -18%; harvest 2018: +11%. Land loss in each year due to non-utilized land area between protection pillars: -8%. Average yield = 100% reference area -8% + (-18% + 11%/2a) = 88.5%, or an average yield decrease of 11.5% over a period of two years.

²⁶ Winter wheat harvest 2017: -19%; harvest 2018: +2.7%. Land loss in each year due to non-utilized land area between protection pillars: -8%. Average yield = 100% reference area -8% + (-19% + 2.7%/2a) = 83.9%, or an average yield decrease of 16.2% over a period of two years.

4.8. Price-performance ratio (ppr) results of APV implementation

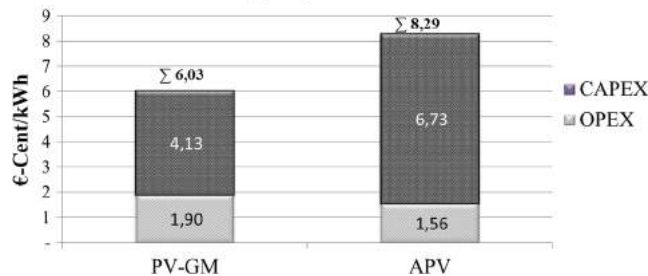
The total annual price of implementing APV to maintain arable land for the farmer's crop rotation of Demeter-certified organic potatoes and winter wheat is €9051.73 ha⁻¹ a⁻¹. The total annual pb of the land used for producing potato in conjunction with APV was €10707.07 ha⁻¹ a⁻¹ and €1959.38 ha⁻¹ a⁻¹ for winter wheat. Thus, in the case of the potato crops, pb of APV implementation was higher than p, whereas for winter wheat, p was higher than the achieved pb. Accordingly, the ppr equates to 0.85 for the potatoes grown under the APV installation and 4.62 for the Demeter-certified organic winter wheat.

5. Discussion

We have gained four key insights from the calculation of the ppr associated with this case study's APV implementation.

Table 5Total annual performance of organic and Demeter-certified organic potato and winter wheat production as affected by APV in € ha⁻¹ a⁻¹.

Crop type	Producer price in €dt ⁻¹	Yield in dt ha ⁻¹	Total annual performance of land use in € ha ⁻¹ a ⁻¹
Organic potato <i>without</i> APV	45.02	233.70	10521.17
Organic winter wheat <i>without</i> APV incl. €150 ha ⁻¹ a ⁻¹ of straw	45.96	39.70	1974.61
Demeter-certified organic potato <i>with</i> APV	51.77	206.82	10707.07
Demeter-certified organic winter wheat <i>with</i> APV incl. €200 ha ⁻¹ a ⁻¹ of straw	52.85	33.29	1959.38

Comparison Levelized Cost of Electricity in €-Cent/kWh of APV and PV-GM with split-up in CAPEX and OPEX**Fig. 10.** Comparison of the LCOE in euro cents per kWh of APV and PV-GM split into CAPEX and OPEX (Source: [40]).**Fig. 11.** Potato harvesting under APV panels in 2017 (Source: farm community Heggelbach).

5.1. Non-consideration of cost reduction potential from technological and policy learning

It is not surprising that, with €0.0829 kWh⁻¹, the LCOE of our APV prototype is higher than that of conventional PV-GM with €0.0603 kWh⁻¹. After all, the higher CAPEX, which are mainly due to the high elevation, outweighed the economic advantages offered by the synergies of dual land use which have a cost-reducing effect on OPEX. To improve the price-performance ratio of APV projects, the price of their implementation should be as low as possible. The largest cost-reducing potential for the CAPEX is when possible techno-ecological synergies and double functions are considered, for instance when the APV structure substitutes an existing supplementary growing structure such as hail protection nets used in fruit growing. But for strategic reasons, we optimized a crop rotation scheme with vegetables and cereals under APV, assuming the highest possible elevation cost with a harvester operating under the APV system. In the future, it will be easier to downscale the necessity of public and private funding for further research and APV implementation rather than to upscale both at a later date. However, our results confirm our expectations in terms of ppr and also provide information about cost-driving and cost-reducing factors that can be considered in future APV developments. It should also be taken into account that the comparison of the LCOE of an established PV-GM application and that of a relatively new APV system technology

with a relatively steep learning curve is not entirely fair, as neither technological nor political insights are considered in the APV results presented here. In addition to the endogenous parameters, namely that the drivers of new technology must learn to keep pace with political developments, exogenous parameters also affect ppr and the development of the LCOE of APV, for instance the impacts of EU CAP subsidy legislation on the calculation of the annual land cost per area that the APV investor pays to the farmer-landowner. We assumed that farmers do not receive EU CAP subsidies for grassland operation under PV-GM, but that they do receive agricultural subsidies for food production on cropland shared with APV. We made this assumption due to the fact that farmers and landowners will only provide access to cropland for APV investors if and only if the APV investor compensates the farmer for potential income loss resulting from lower agricultural yield per area and higher operational costs under APV. This principle favors the argument of the EU CAP that compensation for damage or cost incurred in restoring the previous condition of arable land as well as compensation for other expenses is equal to free use of land. Free use of arable land for non-agricultural purposes is an indication that the main purpose of land use is agricultural activity [85]. Accordingly, in APV co-operation scenario A, where the APV investor associates with a farmer who is also the landowner, the arable land under APV remains EU CAP-eligible area. Nonetheless, current legislation in Germany does not foresee any EU CAP subsidy on areas where PV or APV is installed [63]. Farmers continuing agricultural production under PV have taken legal action against this legislation and obtained justice in the first instance [86]. It is very likely that the legislative and executive authorities in Germany will be forced by the judiciary to adapt their laws in favor of APV in the near future. Further exogenous parameters affecting the ppr and LCOE of APV are political decisions that do not follow rational choice, but rather public choice. Nevertheless, the work at hand follows a line of thought originating from economic theory rather than the actual political economy. From a policymaker's point of view, optimal APV implementation might include much more steel for elevating the PV modules in order to support the steel industry. In 2018, Germany's first "steel summit" took place [87]. Many German and European steel manufactures are suffering from reduced steel prices. Thus, even though the economic theory of the ppr model would not recommend doing so, German policymakers might support APV systems with a ppr greater than 1, as was true in our case study with cereal farming, in conjunction with a harvester operating under APV in order to protect labor forces in the steel market. Another exogenous parameter could be a decreasing social acceptance of PV-GM and APV implementation in rural areas. Technological solutions, for example the use of colored PV modules in brown or green, could counteract this acceptability risk by camouflaging PV to match the landscape. However, this would lead to a higher price of implementing APV while performance would remain steady, thus resulting in a ppr greater than 1 – a clear indicator that it is not a good idea to implement such an APV project. For political reasons, and to increase the total sustainability level in Germany, the project could still potentially receive public support. In general, exogenous parameters affect the ppr's threshold limit value of 1, and yet the ppr model for APV implementation shows that, economically, it makes sense to strive for an APV implementation scenario in which the ppr outcome is as low as possible, aiming for APV solutions offering high performance at the lowest price possible. Macroeconomic impacts of

APV implementation such as the support of the labor market or effects from increases in land use efficiency as well as the preservation of environmental services are not taken into consideration in the ppr model and should be integrated in general equilibrium trade models or holistic CBAs of APV policy design.

5.2. Stable price and increasing performance to improve the effectiveness of APV implementation over time

Over a 25-year period, the price of APV implementation is predicted to remain relatively stable due to high CAPEX, whereas the agricultural performance is likely to increase due to increasing labor costs. With an increasing performance benefit value (pb) in relation to a relatively constant price value (p), today's critical APV projects might become economically favorable in the future. Furthermore, the shade provided by solar cells on the crops grown under APV installations has a positive impact on the harvestable crop yield as this also reduces evapotranspiration [44], resulting in less water evaporation and greater soil moisture compared to the reference area [37,43]. Due to climate change, extreme weather events are likely to become more frequent in the future, adding value to the secondary function of APV of protecting agricultural crops and improving agricultural performance and thus the price-performance ratio. In the present study, this beneficial effect on APV performance has been proven by agricultural results in the hot and dry summer of 2018 in Germany. Harvestable yields of winter wheat, potato, and celeriac grown under APV were greater than those of the reference field. Thus, APV may act as a climate change adaptation technology by combining new functions with already existing extreme event protection systems.

5.3. Effects of crop rotation vs. permanent crop planting on the price-performance ratio and missing long-term data

In our APV case study, the farm is Demeter-certified with agricultural processes conducted in an eight-year crop rotation, typical of the Demeter standard. Within the present research project, we were able to analyze the harvestable yield of four crops from this rotation: winter wheat, potato, clover grass, and celeriac. From each year's crop cultivation, it could be deduced that the pb of APV – and thus the price-performance ratio – varies annually. For a more robust ppr result, the average performance of the crop rotation for a particular farm should serve as a baseline order to justify its economic viability. In general, the baseline of crop yield under APV is rather small. Globally, no long-term study of APV impacts on crop physiology, soil, and agricultural production exists. The lifetime of an APV installation is estimated at about 25 years. The typical crop rotation of a conventional farm is based on a 3-year cycle [88], such that each crop is cultivated at least eight times when grown under an APV system. This offers the farmer opportunities to adapt the crop variety, thereby enhancing performance. In contrast, the ppr of APV in combination with permanent crops – e.g. apple, cherry, pear, wine grape, almond, peach, berry, tomato, hops – cannot be calculated with as much certainty, but ppr results are estimated to be much more promising. Here, special growing systems such as hail protection nets, hops gardens, or indoor farming systems with steel and foil can be substituted by APV mounting structures, decreasing the farm's operating costs since less foil (or no foil at all) would need to be repurchased. This also would also reduce annual foil waste. Figs. 12–14 present existing growing systems for special crops.

Furthermore, the special crops sector uses different and smaller types of land machinery, thereby decreasing the required height of APV systems and leading to lower costs in terms of materials, construction work, and logistics, allowing for reduced CAPEX. Many special crops have relatively high producer prices, increasing the value of APV performance. In France, wine producers offer up their land for APV use for free, with the benefit of not having to invest in hail protection and shade-growing systems, thus optimizing the techno-ecological synergies



Fig. 12. (Left, source: Pixabay): Indoor farming with foil tunnels.

and benefiting both land users. Accordingly, these farms become more resilient and annual land payments made to an APV investor are minimized or eliminated altogether.

5.4. Organic vs. conventional farming crop yields and their impact on the APV price-performance ratio

Agricultural crop yields from our case study have been criticized in the context of performance calculation for two main reasons. Firstly, conventional farming processes involving the use of chemical herbicides, insecticides, fungicides, and fertilizer are used on approximately 91% of Germany's agricultural land [89]. However, our case study was conducted on an agricultural land area where organic farming processes are employed, representing the remaining 9.1% of Germany's agricultural land. Secondly, since organic farming processes do not involve the use of chemical pesticides and fertilizer, agricultural crop yields may decrease by up to 50% per area [90,91]. This yield gap leads to doubt with regard to the transferability of our results to APV farms when comparing organic farming with conventional farming. We therefore decided to evaluate the data from our conventionally grown, Demeter-certified potato production, relying on the same controls (2 ha, from 2015 to 2017) and data source (Bavarian State Research Center for Agriculture (LfL)).²⁷ Table 6 presents the total annual performance of conventional APV and non-APV potato production expressed in $\text{€ ha}^{-1}\text{a}^{-1}$.

Compared with the data on the performance of APV implementation (see Section 4.3), we observed a gap of 44.1% between the $418.40 \text{ dt ha}^{-1}$ yield of conventionally grown potato tubers and the $233.70 \text{ dt ha}^{-1}$ yield of organic potato tubers. However, as the process in organic farming is more labor-intensive, e.g. with regard to weed control, and as consumer demand for organic food remains higher than supply in Germany [92], the producer price of organically grown potatoes ($\text{€}45.02 \text{ dt}^{-1}$) is more than two times (222.7%) higher than that of conventionally grown potatoes ($\text{€}13.95 \text{ dt}^{-1}$). To this end, the higher price of organic potatoes compensates for the yield gap between these and conventionally grown potatoes, resulting in a total annual performance of land use for conventional potato production of $\text{€}5836.68 \text{ ha}^{-1}\text{a}^{-1}$. This is 44.5% less than the performance of organically produced potatoes at $\text{€}10521.17 \text{ ha}^{-1}\text{a}^{-1}$. If we transfer these differences to the Demeter-certified APV potato production in our case study and pessimistically assume a drop in crop yield by an average of 20% for conventionally produced potatoes,²⁸ we find that the producer price of Demeter-certified potatoes ($\text{€}51.77 \text{ dt}^{-1}$) is more than 2.5 times higher (271.1%) than that of conventional potatoes ($\text{€}13.95 \text{ dt}^{-1}$). By contrast, the Demeter-certified potato tuber yield (206.82 dt

²⁷ Data Source: <https://www.stmelf.bayern.de/idb/speisekartoffeln.html> (24.09.2019).

²⁸ Compared to the recorded 11.5% average yield reduction for Demeter-certified potatoes.



Fig. 13. (Middle, source: BayWa AG): Fruit-growing systems in Southern Germany.



Fig. 14. (Right, source: Magnetic Magazine): Hops harvest in Oregon, USA.

ha^{-1}) was dropped by 38.2% in crops grown under APV compared to the assumed conventional potato tuber yield of $334.72 \text{ dt ha}^{-1}$. This results in an assumed total annual performance of $\text{€}4,669.34 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ for potatoes grown under an APV installation following otherwise conventional practices, which is 56.4% lower than Demeter-certified potato production under an APV installation ($\text{€}10,707.07 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$). At 1.94, the ppr of conventionally produced potatoes is non-beneficial compared to the positive price-performance ratio result of 0.85 seen in Demeter-certified potatoes under APV. Consequently, the performance of organically produced potatoes in terms of revenue per area seems to be higher than that of conventionally produced potatoes, leading to the assumption that APV implementation seems economically justifiable, especially in organic farming systems.

6. Policy implications: How to implement APV

Here, we present the policy implications of APV implementation which we have derived from our empirical results. According to the theory of price-performance calculation, policymakers seek to minimize the ratios calculated, looking for cases with the highest techno-economic and techno-ecological APV synergies. We explore the policy parameters (i) quality assurance, (ii) crop selection and land management, (iii) price level and (iv) quantity level. In Appendix B (see

information boxes on international APV implementation), we present recommendations for an APV policy design in Germany and provide additional information on APV markets and policies in Japan, South Korea, France, China, and Massachusetts (USA).

6.1. APV definition, funding guidelines, and quality assurance

6.1.1. APV definition

APV is an integrated food-energy system, utilizing its dual functionality by maintaining or even improving agricultural production. This allows policymakers to categorize land area under APV as agricultural land, whereas land area below PV-GM is considered built-up area since common agricultural practices are significantly hindered or disabled and techno-ecological synergies are not sufficiently utilized. To govern policy parameters of APV implementation, it appears necessary to establish a domestic legal definition for APV that includes or excludes certain agricultural practices and with them certain land areas. In our case study, we focused on cropland areas for vegetable and cereal production. Consequently, our definition of APV is limited to land areas for agricultural production processes involving agricultural crops. To differentiate between PV-GM and APV governance, we purposely excluded APV implementation on grassland which enable “rangevoltaic” applications [29] for animal husbandry under PV systems, such as sheep, goat, cattle, or chicken farming. These types of synergies are regularly found in conventional PV-GM implementation, as seen in Germany since 2005 [49], the UK [93], and France. A strict definition of clear land area boundaries is also recommended to establish an efficient command and control mechanism.

6.1.2. Funding guidelines

In nations where governments support their agricultural sector with subsidies, the subsidy regulation may act as a control mechanism to the functionality of an APV installation over its lifetime, as the farmer only receives subsidies if agricultural production is well-documented and maintained. In terms of funding guidelines, skepticism was expressed as regards the feasibility of receiving two public support schemes for one area, for example a price-regulating feed-in tariff for solar power and a subsidy for the agricultural operations on the land below. This critique seems unjustifiable for three reasons. Firstly, the business case of solar power and farming involves two operations with separate accounts and thus separate bookkeeping systems. Secondly, APV serves as a climate change mitigation tool *and* adaptation technology for the agricultural sector, offering mutual benefits for both businesses to cooperate thanks to techno-economic and ecological synergies, e.g. lower OPEX of APV and the increasing agricultural yields in 2018. APV can act as an adaptive technology, reducing the demand for governmental intervention in the case of total crop yield failure due to climate change impacts, e.g. extreme events such as droughts or hail storms, which were already subsidized in Germany in 2018 [94]. On an intergovernmental level, the Green Climate Fund (GCF) launched by the United Nations Framework Convention of Climate Change (UNFCCC) has been asked to develop an APV methodology which would allow APV projects to tap into funding from both the mitigation and adaptation budgets. In agreement, Goetzberger suggested that the Common Agricultural Policy of the European Union finance the implementation of APV systems [46]. Thirdly, the debate on funding guidelines is a politically motivated argument and a matter of political will. There are positions asking

Table 6

Total annual performance of conventional APV and non-APV potato farming in $\text{€ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$.

Type	Producer price in € dt^{-1}	Yield in dt ha^{-1}	Total annual performance of land use in $\text{€ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$
Conventionally grown potatoes without APV	13.95	418.40	5836.68
Conventionally grown potatoes under APV	13.95	334.72	4669.34

to entirely eliminate the funding guidelines for climate change mitigation and adaptation investments, suggesting that more investments in these sectors will lower the risk of falling behind in the urgency to act against global warming.

6.1.3. Quality assurance

A strict APV definition and a political debate on the funding guidelines lead to the necessity to establish APV quality assurance measures in the form of a permitting process. Certain aspects of APV quality assurance are not only important for the farmer and the APV investor for minimizing the technological risk in the installation and operational processes, but also for improving the bankability and the social acceptance of APV [47]. Here, we established a definition that APV should enable main agricultural crop production while optimally utilizing the synergetic effects of both production systems. In addition to a binary method of measurement (is crop growing feasible, yes or no?), this means assessing the expectations of crop yield needs that are to be fulfilled. In measuring the degree of expected crop growth under APV, APV systems must be clearly defined and a line must be drawn separating them from pseudo-APV systems, which potentially aim to gain windfall profits from the increased financial support for APV systems in comparison to regular PV-GM regulations. For APV market integration, we recommend that governments ask an independent APV expert to justify the theoretical feasibility of a given APV design in an early stage of the permitting process as a sort of support mechanism. This could involve the evaluation of key performance indicators (KPI), e.g. the relationship between the light saturation point of a certain crop within a crop rotation and the sufficient and homogenous light conditions according to the proposed APV design. The ppr calculation for an envisaged APV project as suggested in this article may also act as a KPI measurement in permitting processes. Countries with a longer history of APV implementation might ask their agricultural and PV sectors to jointly create and introduce an APV standard to guarantee a high level of APV quality assurance. An example of quality assurance in APV policy design is the "Guideline Regarding the Definition of Agricultural Solar Tariff Generation Units" introduced by the Solar Massachusetts Renewable Target Program. Here, the APV system design enforces a maximum reduction of direct sunlight of 50% during the entire crop growth period. Since this policy's measurements do not take into account the crops' light saturation point, we consider this restriction to be too extreme. The innovation potential of the APV market is restricted by the exclusion of certain plants such as fruit trees (e.g. kiwi, apple, pear, cherry), berries (e.g. raspberries, blackberries), tomatoes, sweet peppers, coffee, and ginseng, which are all able to cope with reductions of > 50% in solar radiation [27].

6.2. Crop selection and land area management

6.2.1. APV use with permanent special crops recommended

Thanks to the highly effective techno-economic synergies which emerge when APV installations replace existing separate agricultural climate change protection systems for permanent cultures such as fruits, berries, almonds, or hops, the extra price per area for the APV structure is reduced, thus improving the ppr. At the same time, these permanent cultures demonstrate a relatively high producer price, thereby improving the economic performance per area and also contributing to an increased ppr. Accordingly, APV projects with permanent cultures seem more economically suitable than applications with crop rotation schemes, including cereals. It is therefore recommended that policymakers consider these types of cultures in particular within the land area management of APV policy design.

6.2.2. APV use on organic farmland recommended

In particular with organically produced vegetables, e.g. potatoes, a higher producer price compensates for the crop yield gap experienced and therefore improves the revenue performance per area. As regards

the ppr of APV implementation scenarios, organic farming thus appears to be more suitable than conventional farming methods.

6.3. Price level

Our results show that the LCOE of APV is higher than that of PV-GM. Therefore, even if a price- or market-based regulation were to support PV-GM projects on arable land, APV would not be on a level playing field in terms of cost competitiveness, as it can hardly compete with PV-GM. Ergo, implementation thereof does not appear economically feasible. Correspondingly, policymakers have at least two options. One option would be to support APV implementation through a special support scheme and permitting process in parallel to the already existing PV-GM regulation, e.g. in France. Or, they could introduce additional special provisions for solar dual-use applications in agriculture, thereby offering additional financial support of the adaptation costs in PV-GM, e.g. in Massachusetts (USA).

6.3.1. Price floor

On the national level, if a new APV FiT or auction regulation is introduced, PV-GM project pipelines that have already received grants for implementation may be transformed into APV projects by accepting bids or paying an add-on price, for instance an additional €0.0300 kWh⁻¹. So, introducing a price floor within an APV support scheme in order to offer an APV add-on price within an existing FiT regulation is not recommended.

6.3.2. Price ceiling

In our case study, the LCOE of APV was €0.0829 kWh⁻¹, which is considered to be relatively high, and yet the LCOE of APV is less than the FiT support for rooftop PV installations (< 10 kWp), which amounts to €0.1033 kWh⁻¹ in Germany [95]. It is very likely that APV projects would be economically feasible if they received the FiT price that is already paid out for small rooftop PV installations. Bids for APV projects asking for a higher price than the FiT price for small rooftop PV would be refused at the national level in an APV auction.

6.4. Quantity

6.4.1. Market size

The quantity of APV implementations will increase in accordance with typical innovation processes and the development of technology readiness levels.

6.4.2. Research and showcase facilities

Only small quantities are required for showcasing and research purposes to promote public and institutional learning, raise awareness, and adapt APV implementation to regional demands first.

6.4.3. Small series

After these initial demands are met, small APV series can be defined. This will attract private R&D investments, promoting technological learning and supporting economies of scale in further enhancing the ppr of APV. In turn, this will also expand implementation opportunities, allowing the farming and PV sectors to find appropriate partners for cooperation and initiate the first minor APV rollout. In keeping with land management policy parameters, it could become an option to initiate an APV innovation cluster and fund a certain amount of APV installations for a region where APV implementation could be of particular interest. For policy learning and for research purposes, it is recommended that small APV series be accompanied by scientific evaluation in order to measure, analyze, report on, verify, and document the results and alter the policy parameters for the next innovation step accordingly.

6.4.4. Diffusion

Finally, once the prior steps have been successfully completed, APV diffusion with or without clearly defined quantity parameters – for example in combination with an APV land use ceiling of about 2% of cropland – could be introduced.

Furthermore, it is important to note the polity aspects of the APV innovation process. In different stages of APV implementation, different government officials and institutions are in charge of controlling the APV quantity. This is evidenced by the prototype being sponsored by the ministry of education and science, or small series by the ministry of agriculture and/or environment, and the diffusion by the ministry of climate change and energy. As APV is a cross-sector system technology, APV implementation is politically challenging to order and execute on account of changing governmental structures and the transfer of responsibilities. Therefore, it is recommended that governments develop a transparent rollout strategy that includes stakeholders from the relevant sectors and defines the PV market segments, and that they adopt policies in line with this strategy. A positive example comes from Korea, where the 30.8-GWp PV market is set to be developed in four segments by 2030 and the 10-GWp farmland APV sector will represent 33% of the overall market [17].

6.4.5. Project size

Similar to the market size, the project size will also differ in response to the innovation process. There is no need to sponsor public R&D budgets for a large-scale APV system. However, in order to gather robust data on agricultural yields, the APV plant would need to be a certain size to consider boundary effects on the light management design. Within the small series, a focus on medium- to large-scale (> 750 kWp–10 MWp) APV implementation is recommended. This would create economies of scale from which potential smaller APV projects (< 750 kWp) would also benefit. For the market rollout, a range of APV projects from small- and medium-scale to large-scale ones is recommended. APV projects smaller than 750 kWp shall be supported with a FiT price proportional to a small-scale rooftop PV installation. Projects with capacities from 750 kWp to 10 MWp shall be regulated within a market-based, pay-as-bid auction. APV capacities greater than 10 MWp are said to be subsidy-free and do not require any financial support from the government for their implementation. International experience has shown that the project size relates to secondary political purposes. In Japan and Korea, for example, policymakers intended to ensure that as many farmers and technicians benefit from APV as possible. In Japan, the original purpose of APV implementation was to counteract the exodus from rural areas and farmers' surrendering of their businesses because of income deficits due to contaminated agricultural crop yields following the Fukushima catastrophe. In Korea, policymakers aim to establish an APV pension scheme by considering the demographic change in an aging farming sector, with many farmers retiring in coming years, thereby suffering from reduced income and buying power as their agricultural land lies fallow. Solar dual-use will at least enable retired farmers to benefit from the additional income generated by selling solar electricity, while the cropland beneath APV installations remains preserved for potential agricultural use in the future. Furthermore, policymakers in Korea have designed their APV implementation regulation in such a way that projects are executed by farmers in cooperation with local technicians such as mechanics and electricians, thereby ensuring a decentralized, equal distribution of APV. With a market size goal of 10 GWp and an intended APV project size of 100 kWp, 100,000 APV projects are set to be implemented in Korea by 2030. By contrast, the project size of APV projects in France is relatively large, with a nominal capacity of up to 3 MWp, and in China, there is no limit. The main political impetus for APV implementation was to increase land use efficiency and to preserve agricultural land area. With respect to the ppr calculation, it is best to focus on medium- to large-scale projects, as economies of scale will lower the price of APV implementation, thus decreasing the ratios in keeping with

policymakers' intentions.

7. Conclusions

Rising demand for solar power generation will lead to increased land use competition and thus to potential economic, ecological, political, and social conflicts in the future. Agrophotovoltaic (APV) system technology provides a solution to the challenges of sustainable land use in terms of food and energy production. We have determined that APV increases land use efficiency primarily by enabling agricultural crop production and secondarily generating solar PV power simultaneously within the same agricultural area while optimally utilizing the synergetic techno-ecological and techno-economic effects of both production systems. Since 2017, governments in Japan, France, Massachusetts (USA), South Korea, and China have introduced policies supporting APV market implementation and diffusion. Nowadays, more than 2200 APV systems are installed worldwide, totaling an estimated APV capacity of 2.8 GWp. And some other governments are currently considering implementing APV, including those of India and Germany. But they are first demanding information on how the leveled cost of electricity (LCOE) of APV differs from that of conventional ground-mounted PV and how additional costs associated with APV implementation relate to the benefit of maintaining agricultural production activity under APV. Data for a techno-economic price-performance ratio calculation has been retrieved from an inter- and transdisciplinary APV case study in Germany, where a prototype has been installed and operational since 2016. We find that, at €0.0828 kWh⁻¹, the LCOE of APV is 38% higher than that of conventional ground-mounted PV systems, resulting in €0.0226 kWh⁻¹ extra LCOE, or an annual cropland preservation price of €9052 ha⁻¹ a⁻¹. The higher LCOE of APV in comparison to that of PV-GM is the result of CAPEX, predominantly due to extensive mounting structure costs and soil protection measures during the installation of the PV power plant. OPEX of APV are lower than those of PV-GM due to the synergetic effects of both production systems leading to cost reduction, for example due to a decreased demand for surface care and lower land costs. The annual revenue generated from the Demeter-certified production of organic potatoes and winter wheat under an APV installation results in a performance of €10,707 ha⁻¹ a⁻¹ and €1959 ha⁻¹ a⁻¹ respectively, leading to a beneficial price-performance ratio of 0.85 for potato production and a non-beneficial price-performance ratio of 4.62 for winter wheat. Overall, APV implementation is not necessarily recommended in crop rotating systems, but rather in combination with permanent organically grown cash crops, e.g. berries, fruits, herbs, nuts, pharmaceutical plants, hops, or wine grapes. Depending on the stage of APV market development, different government officials may be put in charge of setting certain quantity targets, from prototype installations to diffusion. Either an APV price regulation scheme could award an add-on to already commissioned PV-GM projects, making up for the price of technology adaptation as is the case in Massachusetts, or a separate APV funding program could be introduced like in Japan and France. To avoid windfall profits and to increase social acceptance and bankability, governments will be asked to legally define APV, introducing a national APV standard which will ensure high-quality APV implementation. Compared to PV-GM, the APV technology is relatively young, showing a steep learning curve, but offering the potential for many more techno-ecological synergies. APV's dual function of agricultural yield protection while simultaneously generating solar power increases the economic output per area and enhances farmers' resilience against the impacts of global warming by securing and diversifying their sources of income. From our international investigations we observed a variance in the political reasons to support APV implementation. In France, China, and Massachusetts (USA), financial support schemes for APV were introduced to preserve cropland. In South Korea and Japan, diversifying farmers' income sources and counteracting the exodus from rural areas were the motivating political objectives behind the

introduction of APV diffusion regulations.

Funding

This work was supported by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) Germany [grant number: 033L098AN].

CRedit authorship contribution statement

Stephan Schindele: Conceptualization, Methodology, Software, Formal analysis, Investigation, Data curation, Writing - original draft, Writing - review & editing, Visualization, Supervision, Project administration, Funding acquisition. **Maximilian Trommsdorff:** Software, Validation, Formal analysis, Investigation, Writing - review & editing, Project administration. **Albert Schlaak:** Software, Formal analysis, Investigation, Writing - review & editing, Visualization. **Tabea Obergfell:** Validation, Investigation, Data curation, Writing - review & editing, Project administration. **Georg Bopp:** Data curation, Writing - review & editing, Project administration, Funding acquisition.

Appendix A. Cost data

See Tables 7 and 8.

Table 7

Specific investment cost of each cost factor in € kWp⁻¹ for APV and PV-GM respectively.

CAPEX No.	Type of Cost	€ kWp ⁻¹		Δ in € kWp ⁻¹	Δ in %
		APV	PV-GM		
1	PV modules	290	250	+40	+16
2	Inverter	60	60	0	0
3	Mounting structures and hardware	405.1	65	+340.1	+523.2
4	Combiner box	15	15	0	0
5	Miscellaneous electrical components	15	15	0	0
6	Site preparation and installation	299	150	+149	+99.3
7	Fencing	0	15	-15	-100
8	System design, management, administration costs	36.8	35	+1.8	+5
9	Due diligence incl. yield certificate	25	25	0	0
10	Legal advice	12.5	12.5	0	0
11	Grid connection	100	100	0	0
12	Land cost (property)	0	0	0	0
13	Soil protection	30.9	0	+30.9	+100
14	Cost of tendering procedure	5	5	0	0
	Σ CAPEX	1294.20	747.50	+546.7	+73.1

Table 8

Operating expenses (OPEX) in € kWp⁻¹ a⁻¹ of APV and PV-GM respectively.

OPEX No.	Type of Cost	€ kWp ⁻¹ a ⁻¹		Δ in € kWp ⁻¹ a ⁻¹	Δ in %
		APV	PV-GM		
15	Land costs	1.68	2.40	-0.72	-30
16	Maintenance/Mowing	0.08	1.60	-1.52	-95
17	Surveillance	1.44	1.80	-0.36	-20
18	Monitoring	2.40	2.40	0	0
19	Commercial management	5.50	5.50	0	0
20	Inverter replacement reserve	1.00	1.00	0	0
21	Insurance	1.35	1.35	0	0
22	Repair services	1.70	1.50	+0.20	+13
23	Miscellaneous	1.10	1.10	0	0
	Σ OPEX	16.25	18.65	-2.40	-12.9

Christian Reise: Data curation. **Christian Braun:** Validation, Data curation, Writing - review & editing. **Axel Weselek:** Investigation, Data curation. **Andrea Bauerle:** Investigation, Data curation. **Petra Högy:** Conceptualization, Methodology, Validation, Formal analysis, Investigation, Data curation, Writing - original draft, Writing - review & editing, Visualization, Supervision, Project administration, Funding acquisition. **Adolf Goetzberger:** Validation, Formal analysis, Supervision, Funding acquisition. **Eicke Weber:** Conceptualization, Investigation, Writing - review & editing, Supervision, Funding acquisition.

Acknowledgements

Edgar Gimbel (BayWa r.e. Solar Projects); Georg Mair (Hilber Solar); Thomas Schmid, Florian Reyer (farm community Heggelbach); Sebastian Sladek (EWS Schönau); Florian Brahms (Brahms&Kollegen); Ines Zangl, Gerhard Willeke, Johannes Wüllner, Boris Farnung, Andreas Bett (Fraunhofer ISE); Josef Schmid, Daniel Buhr (University of Tübingen); Jil Munga.

Appendix B. Information boxes on international APV implementation

Japan

In 2013, the Japanese Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries adopted a law that allows PV systems to be installed on agricultural land if and only if at least 80% of agricultural yields of crops grown below PV modules continue to be generated. The law was introduced in response to the nuclear disaster in Fukushima and enables farmers to diversify their income through solar sharing, thereby counteracting the decline in Japanese agricultural exports due to the disruption of farming outputs as a consequence of the disaster and the related rural exodus of farmers who had given up their businesses and moved into cities. In total, 1654 APV projects were implemented between 2013 and 2018, each occupying a maximum area of 0.2 ha (ha), corresponding to an estimated total APV capacity of approximately 150 MWp, or 90.7 kWp per APV project [15].

South Korea

Faced with even less availability of arable land per capita than Japan, the government of South Korea has supported APV implementation since autumn 2018. The current policy goal is to increase the share of renewable energy (RE) from 7% in 2016 to 20% by 2030. The PV capacity is set to increase from 7.9 GWp in 2018 to 30.8 GWp by 2030, with the PV market being developed in four separate sectors: 2.4 GWp (8%) from private households via self-consumption regulation, 7.5 GWp (24%) from small-scale PV installations in the private and business sector, 10.9 GWp (35%) from large-scale ground-mounted and floating PV installations in the industrial sector, and 10 GWp (33%) of farmland APV from farmers and technicians [17]. Similar to Japan, the South Korean government supports rather small-scale APV projects with approximately 100 kWp on average, leading to 100,000 APV plants by 2030. In April 2019, a total of 18 APV systems were installed, leading to an estimated 2 MWp of APV. The average CAPEX of APV equal €1,520 kWp⁻¹ for a system size of 100 kWp. APV land use efficiency amounts to 435 kWp ha⁻¹ [18]. Besides the scarce availability of arable land in South Korea, further political reasons for APV promotion are the aging farmers and the issue of farm abandonment, since no descendants or newcomers are willing to take them over. Accordingly, it can be assumed that many agricultural areas will lie fallow, and the farmers' monthly pension will remain low since the land cannot be leased. Thus, APV will increase land use efficiency, providing farmers with an additional monthly income and preserving the potential of future crop cultivation on the arable land. With respect to crop selection, the Korean government considers the current account for agricultural goods as part of the balance of payments. The implementation of APV is subsidized for crops for which Korea records a current account surplus, with exports higher than imports. Therefore, reductions in agricultural crop yield due to APV do not have a negative effect on food security. The Korean Agrivoltaic Association (KAVA) receives governmental support, allowing farmers and technicians to be trained to use and become familiar with the APV technology [16].

China

By far the largest APV projects and the highest APV capacity installed can be seen in China. According to Jinlin Xue, an estimated 4.0 GWp of agricultural PV capacity was installed in China between 2015 and 2018 [19]. It is assumed that 2.3 GWp of this APV capacity was implemented as solar greenhouses, whereas APV as it is considered in the present study accounted for 1.7 GWp. The largest APV plant known to be successfully implemented is in Ningxia and was constructed by Huawei Fusion Solar in 2016. It boasts a capacity of over 700 MWp.²⁹ Other Chinese PV companies such as Talesun³⁰ and Jinko³¹ have also installed large-scale APV plants.

France

In the European Union (EU), France was the first country to implement an APV financial support scheme in September 2017. The French Energy Regulatory Commission (CRE) published the specifications for tendering a total APV capacity of 45 MWp (subfamily 4) under the French Energy Code (Code de l'Énergie). Divided into three auctions, 15 MWp of APV capacity was tendered between 2017 and 2019 [20]. The political context that has contributed to APV policy implementation was the loss of agricultural land and the farming sectors need to adapt to global warming and the effects resulting from climate change, in particular the impacts to food security and the water scarcity due to drought. The average bid price of the contracted APV projects in the initial 15 MWp auction in 2018 was €0.0865 kWh⁻¹, compared to €0.0596 kWh⁻¹ for PV-GM and €0.0808 kWh⁻¹ for large-scale rooftop PV installations [96].

Massachusetts, United States of America (USA)

In the USA, the first state to support dual land use with APV was Massachusetts in 2018. The Solar Massachusetts Renewable Target (SMART) program regulates incentives associated with new solar PV developments. Here, it is expected that, in most cases, individual crop yield (lbs/acre) or electricity output (kWh/acre) will be lower in dual-use systems than it would be if either activity was carried out alone, but that the combined value of crops and electricity produced will be equal to or higher than that of a singular use of the land for the production of crops or electricity alone.³² To qualify for compensation as an Agricultural Solar Tariff Generation Unit, an APV system must be installed on a property officially defined as land for agricultural use or prime agricultural farmland. The system parameters required are limited to 2 MWp and the lowest edge of a PV panel must be at least 8 feet above the ground for fixed tilt panel systems, or 10 feet in a horizontal position for tracking systems. During the growing season, the maximum sunlight reduction due to shading from the PV panels on any square foot of land under the dual-use system may be no more than 50%. The

²⁹ Source: <https://www.youtube.com/watch?v=abOabHj0K4A> (Min. 1:02; 24.09.2019).

³⁰ Source: https://www.youtube.com/watch?v=rJw_2zGTRdk (25.09.2019).

³¹ Source: <https://www.youtube.com/watch?v=lf2tN0oaX8A> (25.09.2019).

³² The methodology to measure this is called the land equivalent ratio (LER) and has been adopted from agroforestry. Fraunhofer ISE has published LER measurements of its APV harvest in 2017 and 2018: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases/2019/agrophotovoltaics-high-harvesting-yield-in-hot-summer-of-2018.html> (24.09.2019).

shading analysis must be completed using the Shading Analysis Tool, provided by the state.³³ Dual-use systems qualifying as Agricultural Solar Tariff Generation Units receive an additional \$0.0600 kWh⁻¹ on top of their base compensation rate of \$0.1400 kWh⁻¹ to \$0.2600 kWh⁻¹, depending on the size of the system and the local utility supplier.³⁴

References

- [1] IRENA. Renewable power generation costs in 2018; 2018. p. 9.
- [2] SolarPowerEurope. Global market outlook for solar power 2018–2022; 2018. p. 22.
- [3] IPCC. Climate change and land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems, 2,16, 37; 2019.
- [4] FAO. Arable land (hectares per person); 2019. Retrieved from <https://data.worldbank.org/indicator/AG.LND.ARBL.HA.PC>.
- [5] Rockström J, Steffen W, Noone K, Persson A, Chapin FS, Lambin EF, et al. A safe operating space for humanity. *Nature* 2009;461(7263):472–5. <https://doi.org/10.1038/461472a>.
- [6] FAO. Making integrated food-energy systems work for people and climate: An overview. FAO Books; 2014.
- [7] [Adolf] Goetzberger A, Zastrow A. On the coexistence of solar-energy conversion and plant cultivation. *Int J Sol Energy* 1982;1982(1):55–69.
- [8] Fritsche UR, Berndes G, Cowie AL, Kline KL, Dale VH, Johnson FX, et al. Global land outlook working paper energy and land use; 2017.
- [9] Movellan, Junko. Japan next-generation farmers cultivate crops and solar energy; 2013. Retrieved from <https://www.renewableenergyworld.com/articles/2013/10/japan-next-generation-farmers-cultivate-agriculture-and-solar-energy.html>.
- [10] PRI. Japanese farmers producing crops and solar energy simultaneously: revitalizing the farming sector for the next-generation and could provide more than enough electricity for the entire country. Permaculture Research Institute; 2013. <https://permaculturenews.org/2013/10/16/japanese-farmers-producing-crops-solar-energy-simultaneously/>.
- [11] Salon. Agrivoltaics: solar panels on farms could be a win-win: Massachusetts is leading the charge in dual-use solar installations; 2019. Retrieved from https://www.salon.com/2019/02/09/agrivoltaics-solar-panels-on-farms-could-be-a-win-win_partner/.
- [12] Praderio S, Perego A. Photovoltaics and the agricultural landscapes (Photovoltaics forms landscapes); 2017. Retrieved from <http://www.remtec.energy/en/2017/08/28/photovoltaics-form-landscapes/>.
- [13] REMTEC. CASTELVETRO Agrovoltaiico plant: Piacenza, Italy; 2011. Retrieved from <http://www.remtec.energy/en/agrovoltaiico-2/castelvetro-plant/>.
- [14] Fraunhofer CSET. FIC AgroPV: Presentacion del proyecto; 2017. Retrieved from https://www.smart-agrovp.com/principal/1/resultados_agropvr15/.
- [15] Sugibuchi K. Solar sharing: symbiosis of PV and agriculture in Japan. Intersolar conference Europe. Agrovoltaiics – sharing resources for multiple benefits, Munich. 2019. <https://www.intersolar.de/de/conference/session/18428/agrovoltaiics-sharing-resources-for-multiple-benefits-2276>.
- [16] Han KC. Korea's farming-type photovoltaic business and Association role. Green Energy Expo. Session 3: The 1st Solar Sharing Symposium - The Next Big Things (I) Moderator: Prof. Oh Soo Young, Yeungnam University, Daegu, Korea (04.04.2019); 2019. Retrieved from <http://greenconference.kr/eng/doc/program02.php>.
- [17] Hong SJ. Overview of Korean PV Market, Policies and Industry: Key note speech 2 (04.04.2019). Green Energy Expo. Session 2: Market Trend and Technology (Host: Prof. Jung Jae Hak), Daegu, Korea; 2019. Retrieved from <http://greenconference.kr/eng/doc/program02.php>.
- [18] Park J. Governmental measures and directions of renewable energy policy in Korea: Speaker (24.07.2019). Jeonnam Agricultural Research and Extension Service (JARES) South Korea. International symposium on solar energy in the form of farming, Naju-City, Republic of Korea. 2019.
- [19] Xue J. Photovoltaic agriculture – new opportunity for photovoltaic applications in China. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;73:1–9. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.098>.
- [20] DFBEW. Übersetzung Lastenheft der frz. Ausschreibung für die Errichtung und den Betrieb innovativer Stromerzeugungsanlagen mittels Sonnenenergie; 2017.
- [21] DOER MA. Agricultural solar tariff generation units guideline final: Last updated: 2018-04-26; 2018. Retrieved from <https://www.mass.gov/doc/agricultural-solar-tariff-generation-units-guideline-final>.
- [22] Hemalatha K. Govt plans to increase height of solar panels so farming can continue below: if India is to generate 100 GW of solar power by 2022, it is only a matter of time before agricultural land also goes under. *The Wire* 2019. <https://thewire.in/energy/govt-plans-to-increase-height-of-solar-panels-so-farming-can-continue-below>.
- [23] The Wire. Govt Plans to increase height of solar panels so farming can continue below: if India is to generate 100 GW of solar power by 2022, it is only a matter of time before agricultural land also goes under; 2019. Retrieved from <https://thewire.in/energy/govt-plans-to-increase-height-of-solar-panels-so-farming-can-continue-below>.
- [24] PV Magazine. Brandbrief von neun grünen Energieministern an Altmaier für mehr Photovoltaik; 2019. Retrieved from <https://www.pv-magazine.de/2019/08/26/brandbrief-von-neun-gruenen-energieministern-an-altmaier-fuer-mehr-photovoltaik/>.
- [25] SERIS. Where sun meets water: floating solar handbook for practitioners. 2019. Where sun meets water: floating solar handbook. Washington DC. World Bank; 2019. <http://www.seris.nus.edu.sg/publications/scientific-publications.html>.
- [26] IHS. Concentrated PV (CPV) report – 2013: concentrated photovoltaic solar installations set to boom in the coming years. Press Release; 2013. Retrieved from <https://benchmarking.ihsmarket.com/468482/concentrated-photovoltaic-solar-installations-set-to-boom-in-the-coming-years>.
- [27] Weselek A, Ehmann A, Zikeli S, Lewandowski I, Schindele [Stephan] S, Högy P. Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities. A review. *Agron Sustain Dev* 2019;39(4):545. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0581-3>.
- [28] Blankenship RE, Tiede DM, Barber J, Brudvig GW, Fleming G, Ghirardi M, et al. Comparing photosynthetic and photovoltaic efficiencies and recognizing the potential for improvement. *Science* 2011;332(6031):805–9. <https://doi.org/10.1126/science.1200165>.
- [29] Hernandez RR, Armstrong A, Burney J, Ryan G, Moore-O'Leary K, Diédhiou I, et al. Techno-ecological synergies of solar energy for global sustainability. *Nat Sustain*. 2019;2(7):560–8. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0309-z>.
- [30] Valle B, Simonneau T, Sourd F, Pechier P, Hamard P, Frisson T, et al. Increasing the total productivity of a land by combining mobile photovoltaic panels and food crops. *Appl Energy* 2017;206:1495–507. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.09.113>.
- [31] Younas R, Imran H, Riaz MH, Butt NZ. Agrivoltaic farm design: vertical bifacial vs. tilted monofacial photovoltaic panels. *Appl Phys* 2019. <https://arxiv.org/abs/1910.01076v1>.
- [32] Adeh EH, Good SP, Calaf M, Higgins CW. Solar PV Power potential is greatest over croplands. *Sci Rep* 2019;9. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47803-3>.
- [33] Majumdar D, Pasqualetti MJ. Dual use of agricultural land: Introducing 'agrivoltaics' in Phoenix Metropolitan Statistical Area, USA. *Landscape Urban Plann* 2018;170:150–68. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.10.011>.
- [34] Amaducci S, Yin X, Colauzzi M. Agrivoltaic systems to optimise land use for electric energy production. *Appl Energy* 2018;220:545–61. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.081>.
- [35] Barron-Gafford GA, Pavao-Zuckerman MA, Minor RL, Sutter LF, Barnett-Moreno I, Blackett DT, et al. Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands. *Nat Sustain* 2019;55:322. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0364-5>.
- [36] Dupraz C, Marrou H, Talbot G, Dufour L, Nogier A, Ferard Y. Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes. *Renewable Energy* 2011;36(10):2725–32. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.005>.
- [37] Elamri Y, Cheviron B, Lopez J-M, Dejean C, Belaud G. Water budget and crop modelling for agrivoltaic systems: application to irrigated lettuce. *Agric Water Manag* 2018;208:440–53. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.07.001>.
- [38] Malu PR, Sharma US, Pearce JM. Agrivoltaic potential on grape farms in India. *Sustain Energy Technol Assess* 2017;23:104–10. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2017.08.004>.
- [39] Marrou H, Wery J, Dufour L, Dupraz C. Productivity and radiation use efficiency of lettuces grown in the partial shade of photovoltaic panels. *Eur J Agron* 2013;44:54–66. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.08.003>.
- [40] Othman NF, Ya'acob ME, Abdul-Rahim AS, Shahwahid Othman M, Radzi MAM, Hizam H, et al. Embracing new agriculture commodity through integration of Java Tea as high Value Herbal crops in solar PV farms. *J Cleaner Prod* 2015;91:71–7. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.044>.
- [41] Ravi S, Lobell DB, Field CB. Tradeoffs and Synergies between biofuel production and large solar infrastructure in deserts. *Environ Sci Technol* 2014;48(5):3021–30. <https://doi.org/10.1021/es404950n>.
- [42] Sekiyama T, Nagashima A. Solar sharing for both food and clean energy production: performance of agrivoltaic systems for corn a typical shade-intolerant crop. *Environments* 2019;6(6):65. <https://doi.org/10.3390/environments6060065>.
- [43] Hassanpour Adeh E, Selker JS, Higgins CW. Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency. *PLoS ONE* 2018;13(11):e0203256. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203256>.
- [44] Marrou H, Dufour L, Wery J. How does a shelter of solar panels influence water flows in a soil–crop system? *Eur J Agron* 2013;50:38–51. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.05.004>.
- [45] Dinesh H, Pearce JM. The potential of agrivoltaic systems. *Renew Sustain Energy Rev* 2016;54:299–308. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.024>.
- [46] [Adolf] Goetzberger A, Richard Swanson, Werner T, Masafumi Yamaguchi. Energy Farming: Für einen intelligenteren Gebrauch von Agrarsubventionen. *Solarzeitaltelr* 2006;2006(4):44–8.

³³ In 2018, Fraunhofer ISE verified the quality of the Shading Analysis Tool developed by Blue Wave on behalf of the Department of Energy and Resources Massachusetts.

³⁴ Source: <https://www.mass.gov/doc/agricultural-solar-tariff-generation-units-guideline-final> (24.09.2019).

- [47] Ketzler D, Weinberger N, Rösch C, Seitz SB. Land use conflicts between biomass and power production – citizens' participation in the technology development of Agrophotovoltaics. *J Respons Innov* 2019;15(2):1–24. <https://doi.org/10.1080/23299460.2019.1647085>.
- [48] Kinney K, Minor R, Barron-Gafford G. Testing predictions used to build an agrivoltaics installation on a small-scale educational model; 2016. Retrieved from <http://digitalcommons.calpoly.edu/star/386/>.
- [49] NABU. Kriterien für naturverträgliche Photovoltaik-Freiflächenanlagen: Basierend auf einer Vereinbarung zwischen der Unternehmensvereinigung Solarwirtschaft e.V. (heute BSW-Solar) und NABU. NABU; 2005.
- [50] Weizmann ML. Prices vs quantities. *Rev Econ Stud* 1974;477–91.
- [51] Hepburn C. Regulation by prices, quantities, or both: a review of instrument choice. *Oxford Rev. Econ. Policy* 2006;22(2):226–47. <https://doi.org/10.1093/oxrep/grj014>.
- [52] BMWi. Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2017); EEG 2017; 2014.
- [53] UM BaWü. Verordnung der Landesregierung zur Öffnung der Ausschreibung für Photovoltaik-Freiflächenanlagen für Gebote auf Acker- und Grünlandflächen in benachteiligten Gebieten: Freiflächenöffnungsverordnung. Stuttgart: FFÖ-VO; 2017.
- [54] BMWi. Wettbewerbliche Ausschreibungen wirken kostensenkend: Durchschnittliche Zuschlagswerte der Ausschreibungsergebnisse für Photovoltaik-Freiflächenanlagen; 2018c. Retrieved from <https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Dossier/nationale-ausschreibungen-und-ergebnisse.html?cms.docId=577124>.
- [55] BnetzA. Bericht über die Flächeninanspruchnahme für Freiflächenanlagen: Nach §36 Freiflächenausschreibungsverordnung (FFAV). Stand: Dezember 2016; 2016.
- [56] BMEL. Landwirtschaft verstehen: Fakten und Hintergründe. Berlin: Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft; 2018 <https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Broschueren/Landwirtschaft-verstehen.html>.
- [57] FNR. Anbau und Verwendung nachwachsender Rohstoffe in Deutschland: Erstellt im Rahmen des BMEL-Auftrages FKZ 22004416; 2018.
- [58] Clearingstelle. Ergebnisse der 1. gemeinsamen Ausschreibungsrunde für Wind- und Solaranlagen: Ausschreibungen EEG Solarenergie 07.05.2018 [Press release]; 2018. Retrieved from <https://www.clearingstelle-eeg-kwkg.de/ausschreibung/4191>.
- [59] BayWa r.e., First subsidy-free solar park in Germany: 05.09.2019 [Press release]. Retrieved from <https://www.baywa-re.com/en/news/details/baywa-re-builds-first-subsidy-free-solar-park-in-germany/>.
- [60] BMWi. Gesetz zur Änderung des Erneuerbaren-Energien-Gesetzes, des Kraft-Wärme-Kopplungsgesetzes, der Energiewirtschaftsgesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften: Energiesammelgesetz; 2018a.
- [61] Bundesregierung. Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie: Neuauflage 2016; 2016.
- [62] BMUB. Climate Action Plan 2050: Principles and goals of the German government's climate policy. Berlin; 2016.
- [63] BMEL. Verordnung zur Durchführung der Direktzahlungen an Inhaber landwirtschaftlicher Betriebe im Rahmen von Stützungsregelungen der Gemeinsamen Agrarpolitik (Direktzahlungen-Durchführungsverordnung): DirektZahlDurchfV. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft; 2019b.
- [64] Bayerische Staatskanzlei. Nr. 119, Bericht aus der Kabinettsitzung: Erneuerbare Energien: Mehr Freiflächen-Photovoltaikanlagen für Bayern [Press release]. München; 2019. Retrieved from <http://www.bayern.de/bericht-aus-der-kabinettsitzung-vom-4-juni-2019/#1>.
- [65] Kurzweil R. The age of intelligent machines. Cambridge (Mass): The M.I.T. Press; 1992.
- [66] Tellis GJ, Golder PN. Will & vision: how latecomers grow to dominate markets. Los Angeles (CA): Figueroa Press; 2002.
- [67] EARTO. The TRL scale as a research & innovation policy toll. EARTO Recommendations; 2014.
- [68] UNDP. Handbook for conducting technology needs assessment for climate change; 2010.
- [69] BMWi. Renewable Energy Source in Figures: National and International Development, 2017; 2018b.
- [70] Renn O. Risk governance: Coping with uncertainty in a complex world (Repr., digital print). Earthscan risk in society series. London: Earthscan; 2010.
- [71] Government of Canada. Policy on cost-benefit analysis. Ottawa (Ontario): Treasury Board/Conseil du trésor; 2018.
- [72] Folland S, Goodman AC, Stano M. The economics of health and health care. 7th ed. Abingdon, Oxon, New York, NY: Routledge; 2016.
- [73] Regan MM, Eckstein O. Water resource development: the economics of project evaluation. *J Farm Econ* 1959;41(3):668. <https://doi.org/10.2307/1234891>.
- [74] Bano T, Rao KVS. Levelized electricity cost of five solar photovoltaic plants of different capacities. *Procedia Technol* 2016;24:505–12. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.05.086>.
- [75] Fraunhofer ISE. Current and future cost of photovoltaics: long-term scenarios for market developments, system prices and LCOE of utility-scale PV systems. Study on behalf of Agora Energiewende; 2015.
- [76] Schröder A, Kunz F, Meiss J, Mendelevitch R, Hirschhausen C von. Current and prospective costs of electricity generation until 2050 (data documentation no. 68); 2013.
- [77] Konstantin P. Praxisbuch Energiewirtschaft: Energieumwandlung, -transport und -beschaffung, Übertragungsnetzausbau und Kernenergieausstieg. Berlin (Heidelberg): Springer Berlin Heidelberg; 2013. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-37265-0>.
- [78] Müller B, Hardt L, Armbruster A, Kiefer K, Reise C. Yield predictions for photovoltaic power plants: Empirical validation, recent advances and remaining uncertainties. *Prog Photovoltaics Res Appl* 2016;24(4):570–83. <https://doi.org/10.1002/pip.2616>.
- [79] Müller B, Reise C [Christian], Heydenreich W, Kiefer K. Are yield certificates reliable? A comparison to monitored real world results; 2007.
- [80] Reise C [Christian], Schmid A. Realistic yield expectations for bifacial PV systems – an assessment of announced, predicted and observed benefits; 2015.
- [81] Bopp G [Georg], Goetzberger A [Adolf], Obergfell T [Tabea], Reise C [Christian]. Verfahren zur simultanen Kultivierung von Nutzpflanzen und energetischen Nutzung von Sonnenlicht (No. EP2811819B1).
- [82] Goetzberger A. [Adolf]. Solarmodulanordnung mit reduzierten Randeffekten und Verwendung der Solarmodulanordnung zur simultanen Kultivierung von Nutzpflanzen und energetischer Nutzung von Sonnenlicht: DE102014218458A1 (No. 17.03.2016); 2014.
- [83] Beck M, Bopp G, Goetzberger A, Obergfell T, Reise C, Schindele S. Combining PV and food crops to agrophotovoltaic – optimization of orientation and harvest. *Adv. Online Publ.* 2012. <https://doi.org/10.4229/27THEUPVSEC2012-5AV.2.25>.
- [84] Marrou H, Guilioni L, Dufour L, Dupraz C, Wery J. Microclimate under agrivoltaic systems: Is crop growth rate affected in the partial shade of solar panels? *Agric For Meteorol* 2013;177:117–32. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.04.012>.
- [85] BMEL. Leitfaden der Bund-Länder-Arbeitsgruppe, InVeKoS/Direktzahlungen“ zur Anwendung von Artikel 3 c der VO (EG) Nr. 795/2004 - Kriterien zur Abgrenzung von auf beihilfefähigen Hektarflächen zulässigen und nicht zulässigen nichtlandwirtschaftlichen Tätigkeiten: 424-40402/0002; 2009. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. Retrieved from https://www.thueringen.de/imperia/md/content/lwa-lei/blag_leitfaden.pdf.
- [86] VG Regensburg. Beihilfefähigkeit eines Solarparks: Urteil v. 15.11.2018 – RO 5 K 17.1331. Regensburg; 2018. Retrieved from <https://www.gesetze-bayern.de/Content/Document/Y-300-Z-BECKRS-B-2018-N-35338?hl=true&AspxAutoDetectCookieSupport=1>.
- [87] Xinhua. German states form new steel alliance to defend industry prospects; 2018. Retrieved from http://www.xinhuanet.com/english/2018-10/23/c_137552866.htm.
- [88] Diepenbrock W, Ellmer F, Léon J. Ackerbau, Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung: 101 Tabellen (2., korr. Aufl.). UTB: Vol. 2629. Stuttgart: Ulmer; 2009.
- [89] BMEL. Bundesagrarministerin veröffentlicht die neuen Strukturdaten zum ökologischen Landbau in Deutschland 2018: Pressemitteilung Nr. 137 vom 24.06.2019; 2019a. Bonn. Retrieved from Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft website: <https://www.bmel.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/2019/137-Oeko-Landbau.html>.
- [90] Feuerbacher A, Luckmann J, Boysen O, Zikeli S, Grethe H. Is Bhutan destined for 100% organic? Assessing the economy-wide effects of a large-scale conversion policy. *PLoS ONE* 2018;13(6):e0199025. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0199025>.
- [91] Seufert V, Ramankutty N, Foley JA. Comparing the yields of organic and conventional agriculture. *Nature* 2012;485(7397):229–32. <https://doi.org/10.1038/nature11069>.
- [92] BÖLW. Zahlen, Daten, Fakten. Die Bio-Branche 2018; 2018.
- [93] BRE. Planning guidance for the development of large scale ground mounted solar PV systems; 2013.
- [94] BMEL. Gemeinsame Dürrehilfe durch landwirtschaftliche Betriebe stark gefragt: Pressemitteilung Nr. 207 vom 17.12.2018. Bonn; 2018a.
- [95] BSW-Solar. EEG 2017 – feste Einspeisevergütungen im Überblick: Stand: Juli 2019; 2019.
- [96] Benard S. Förderstrategie der APV in Frankreich: Abschlusskonferenz APV-RESOLA am 06.05.2019 in Berlin. Berlin: Fraunhofer ISE; 2019.

Appendix B: Publikation „GAiA Teil 1 von 2”

Feldfrüchte und Strom von Agrarflächen: Was ist Agri-Photovoltaik und was kann sie leisten?

Agri-Photovoltaik bedeutet, dass Agrarflächen doppelt genutzt werden: zum Anbau von Feldfrüchten und zur Produktion von Strom. Aufgrund dieser „Doppelernte“ verliert die Landwirtschaft keine Anbauflächen – anders als bei Photovoltaik-Freiflächenanlagen, die überwiegend der Stromerzeugung dienen. Damit Subventionen jenen Nutzungen zugute kommen, die der Umwelt und der Nahrungsmittelproduktion gleichermaßen dienen, ist es wichtig, Agri-Photovoltaik von Freiflächenanlagen abzugrenzen und verschiedene Varianten der Agri-Photovoltaik zu unterscheiden.

Stephan Schindele¹ 

Crops and power from agricultural land: definition of agrivoltaics and its use

GAIA 30/2 (2021): 87–95

Abstract

“Agrivoltaics” denotes approaches to use agricultural areas simultaneously to produce food and to generate photovoltaic (PV) electricity. Social impact analysis shows that for a successful agrivoltaics dissemination, clear standards must be set for the agricultural activity on agrivoltaics sites, so that no subsidy abuse and pseudo-farming occur. Until today there is no internationally recognized definition of agrivoltaics, but since more governments are willing to include the technology in their policies, this article derives a generally valid agrivoltaics definition and puts it up for debate. In the first step, differentiation criteria of agrivoltaics from other PV applications were developed. In the second step, the derived properties were scrutinised with reference to the political reasons for agrivoltaics diffusion in Germany, and compared to Germany’s goals in terms of energy and environmental policy. Finally, a basic definition is derived that must meet certain mandatory requirements. This generally applicable definition of agrivoltaics can be supplemented in the national context by optional requirements to steer diffusion more purposefully. The results contribute to the debate on the definition of agrivoltaics in Germany and can also enrich the discourse in other governments and parliaments on agrivoltaics market introduction.

Keywords

agri-photovoltaics, impact analysis, land management, multi-level policy analysis, policy field analysis, sustainability politics

Dipl.-Betriebsw. (FH) Stephan Schindele, MBA | Eberhard-Karls-Universität Tübingen | Institut für Politikwissenschaft | Melanchthonstr. 36 | 72074 Tübingen | Deutschland und BayWa r.e. Solar Projects GmbH | Büro Freiburg | Kaiser-Joseph-Str. 263 | 79098 Freiburg im Breisgau | Deutschland | stephan.schindele@baywa-re.com

© 2021 S. Schindele; licensee oekom verlag. This Open Access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution License CC BY 4.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>). <https://doi.org/10.14512/gaia.30.2.6>
Received November 22, 2020; revised version accepted May 19, 2021 (double-blind peer review).

Der Ausbau erneuerbarer Energien steht in Deutschland vor großen Herausforderungen. Neben den technischen Problemen bezüglich der Systemintegration und der Debatte um die Sozialverträglichkeit der Energiewende gewinnt die Flächenverfügbarkeit in der gesellschaftspolitischen Diskussion an Bedeutung (Kühne 2018). Während bei der Windkraft und der energetischen Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen weniger die Flächenverfügbarkeit das begrenzende Kriterium ist, sondern vielmehr die Akzeptabilität in der Bevölkerung, kommt es beim Zubau von Photovoltaik-Freiflächenanlagen (PV-FFA) zu einem Siedlungsflächenanstieg.

Gemäß den derzeitigen gesetzlichen Rahmenbedingungen auf Bundesebene werden PV-FFA entsprechend als Flächeninanspruchnahme für Siedlungsfläche betrachtet (Bundesregierung 2019). Angesichts der eingeschränkten Verfügbarkeit landwirtschaftlich nutzbarer Böden und des Ziels, bis 2030 den Anstieg der Siedlungs- und Verkehrsfläche zu begrenzen (Bundesregierung 2021, S. 268) sowie ab 2050 eine „Nettonull“-Flächenkreislaufwirtschaft zu etablieren (BMUB 2016, S. 68) ist abzusehen, dass die steigende Flächennachfrage für den PV-FFA-Ausbau zu Flächennutzungskonkurrenz und damit zu Konfliktkonstellationen führen wird. 2019 hat als erstes Bundesland Bayern eine Zuschlagsmengenbegrenzung auf 70 PV-FFA-Projekte pro Jahr verabschiedet (Bayerische Staatsregierung 2019).

Eine Option zur Lösung dieses Konflikts haben Goetzberger und Zastrow (1982) vorgelegt: Sie haben ihr den Namen „Doppelernte“ gegeben. In Deutschland ist sie heute unter dem Namen Agri-Photovoltaik (Agri-PV) bekannt (Rösch 2016). In Frankreich wird sie „Agrivoltaic“ und in Japan „SolarSharing“ genannt. Der Grundgedanke ist in allen Ländern der gleiche: Auf einer Agrarfläche wird die Solarstromerzeugung an eine landwirtschaftliche Haupttätigkeit gekoppelt. Während bei PV-FFA die Maximierung der Solarstromerträge im Vordergrund steht, passt sich bei Agri-PV die PV-Technik den landwirtschaftlichen Anforderungen an,

>

¹ Dieser Artikel entstand im Rahmen eines Dissertationsprojekts am Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE in Freiburg im Breisgau.

um eine maximale Agrarproduktion bei simultaner Stromerzeugung zu erhalten. Indem techno-ökologische Synergien optimal genutzt werden, kann die Agri-PV für die Landwirtschaft als Instrument zur Anpassung an den Klimawandel dienen: Hochaufgeständerte Solarmodule können für die darunter praktizierte Landwirtschaft eine Schutzfunktion erfüllen und die Evaporation und Transpiration verringern. Bei zunehmender Trockenheit könnte dadurch die Ernährungs- und Wasserversorgungssicherheit erhöht werden.

Agri-PV als Gegenstand der EEG-Novelle 2020 und der Mangel einer Begriffsbestimmung

Mit der Novelle des *Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG)* am 17. Dezember 2020 hat der Deutsche Bundestag auch eine Änderung der *Innovationsausschreibungsverordnung (InnAusV)* beschlossen. Am 29.04.2021 veröffentlichte das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) zudem eine Formulierungshilfe für einen Änderungsantrag der Fraktionen der CDU/CSU und der SPD zum EEG und der InnAusV, wodurch am 01.04.2022 erstmals in Deutschland ein Segment von voraussichtlich 150 Megawatt Peak (MWp, maximal mögliche Leistung) für Parkplatz-, Floating- und Agri-PV reserviert wird, um erste Erfahrungen mit diesen „besonderen Solaranlagen“ zu sammeln (BMJV 2021, BMWi 2021). Zusätzlich trat im November 2020 die *Richtlinie zur Förderung der Energieeffizienz und CO₂-Einsparung in Landwirtschaft und Gartenbau* des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) in Kraft, nach der kleinflächige Agri-PV-Anlagen für die Energieeigenerzeugung gefördert werden (BMEL 2020, S. 12).

Für die Ausarbeitung der EEG-Innovationsausschreibung ist die Bundesnetzagentur (BNetzA) aufgefordert, bis Oktober 2021 eine genaue Definition für die drei besonderen PV-Anwendungsmöglichkeiten festzusetzen. Am 16. Juni 2021 eröffnete die BNetzA die Konsultation über die an die besonderen Solaranlagen nach § 15 der InnAusV zu stellenden Anforderungen. Für die Agri-PV konnte die BNetzA auf die Forschungsergebnisse des APV-RESOLA-Projekts zurückgreifen.² Erkenntnisse aus der Agri-PV-Akzeptanzforschung ergaben, dass die Bundesbehörden im Vorfeld einer bundesweiten Agri-PV-Markteinführung Kriterien zur Vermeidung einer „Pseudo-Landwirtschaft“ unter Agri-PV festlegen sollten (Ketzler et al. 2019). Vor diesem Hintergrund finanzierte das BMBF einen Agri-PV-Standardisierungsprozess im Rahmen eines DIN-SPEC-Verfahrens³. Hierin wurden Anforderungen an die landwirtschaftliche Hauptnutzung in der Koppelung mit Solarstromerzeugung ausgearbeitet (DIN 2020), etwa ein Minimalniveau an landwirtschaftlichen Erträgen oder ein maximaler Flächenverlust durch die Aufständigung der PV-Anlage. Nur wenn eine landwirtschaftliche Haupterzeugung unter oder zwischen den PV-Modulen erhalten bleibt und die Minimalanforderungen an diese landwirtschaftliche Tätigkeit erfüllt werden, ist von Agri-PV die Rede. Eine DIN SPEC ist ein erster Schritt zu einer Norm. In der Erarbeitungsphase werden Beschlüsse durch absolute Mehrheit und nicht wie bei einer Norm durch Konsens gefasst.

Weder in der Solarbranche noch sektorübergreifend zwischen Agrar- und Solarwirtschaft besteht ein Konsens zur Agri-PV-Definition. Die Abgabe von Stellungnahmen zur BNetzA-Konsultation zur Festlegung der Anforderungen an Agri-PV ist bis 16. Juli 2021 möglich. Dieser Artikel leistet einen Beitrag zur Debatte und zur Ausarbeitung einer Agri-PV-Definition.

In drei Arbeitsschritten zur Agri-PV-Definition

Im Folgenden wird in drei Arbeitsschritten eine Agri-PV-Definition hergeleitet. Im ersten Schritt werden die Eigenschaften von Agri-PV in Abgrenzung zu anderen PV-Nutzungsmöglichkeiten erläutert. Im zweiten Schritt wird auf dieser Grundlage untersucht, ob die Diffusion von Agri-PV in Deutschland zur Erreichung der energie- und umweltpolitischen Ziele beitragen kann. Im dritten Schritt wird die Agri-PV definiert und werden EEG-Förderkriterien festgelegt, denen diese Definition standhalten muss.

Die hier zu erarbeitende Definition dient als Grundlage für eine Wirkungsanalyse zur Agri-PV-Diffusion in Deutschland (Schindele 2021, in diesem Heft). Indem Ausbaupotenziale der PV-FFA durch Agri-PV substituiert werden, könnten bis ins Jahr 2050 knapp 60 000 Hektar landwirtschaftlicher Nutzfläche in Deutschland erhalten werden. Das entspricht der Anbaufläche für die inländische Produktion von Äpfeln, Birnen, Süßkirschen, Pflaumen, Heidel-, Johannis- und Himbeeren im Jahr 2019. Bis 2050 müssten hierfür 81,3 GWp Agri-PV-Leistung installiert werden, was nur einem Bruchteil des technischen Agri-PV-Potentials von 1 700 GWp in Deutschland entspricht (Wirth 2019).

Schritt 1: Abgrenzungsmerkmale zu etablierten PV-Techniken bestimmen

Abgrenzungsmerkmal 1: Landwirtschaftliche Nutzfläche bleibt erhalten

Die Agri-PV erhält die landwirtschaftliche Tätigkeit auf einer Agrarfläche und sollte somit nicht zum Siedlungsflächenanstieg beitragen. In Deutschland erhält eine Agrarfläche, auf der eine Agri-PV-Anlage errichtet wurde, paradoxerweise nach derzeitiger Gesetzgebung aber keine Subventionen mehr im Rahmen der Gemeinsamen Agrarpolitik der EU (EU-GAP). Die aktuelle deutsche Gesetzgebung kennt ausschließlich getrennte Flächennutzungen: entweder Nahrungsmittel- oder Solarstromerzeugung. Eine intersektorale, multifunktionale Landnutzungsart, die eine überlagerte „Doppelernte“ für eine Fläche ermöglicht, ist in der *Direktzahlungsdurchführungsverordnung (DirektZahlDurchfV)*⁴ ausgeschlossen. Die DirektZahlDurchfV besagt in § 12 Abs. 3 Nr. 6, dass Flächen, auf denen sich Anlagen zur Nutzung von solaren Strahlungsenergien befinden, „hauptsächlich für eine nichtlandwirtschaftliche Tätigkeit genutzt“ werden; damit kommen sie nicht

² <https://agri-pv.org/de>

³ Die Ergebnisse der DIN SPEC 91434 wurden am 16.04.2021 veröffentlicht: www.beuth.de/de/technische-regel/din-spec-91434/337886742.

⁴ www.gesetze-im-internet.de/direktzahldurchfV/DirektZahlDurchfV.pdf



ABBILDUNG 1: Bodennah installierte Photovoltaik-Freiflächenanlagen (PV-FFA) kombiniert mit extensiver landwirtschaftlicher Tätigkeit zwischen den PV-Modulreihen. Traktoren können nur zwischen, aber nicht unter den Modulen fahren.

für Direktzahlungen aus der EU-Agrarförderung infrage. Auch auf kommunaler Ebene wird seitens der öffentlichen Verwaltung kein Unterschied zwischen Agri-PV und PV-FFA gemacht. Wie PV-FFA werden Agri-PV-Anlagen im Flächennutzungsplan als „Sondergebiete“ ausgewiesen. In der Bauleitplanung wird die PV-FFA- und Agri-PV-Fläche gleich einer Art Gewerbefläche im Außenbereich zur Produktion von Solarstrom bewertet und somit der Landnutzungskategorie Siedlungsfläche zugeordnet, dabei könnte bei der Agri-PV die Flächenkategorie „Landwirtschaftliche Nutzfläche“ erhalten bleiben.

Unter naturschutzrechtlichen Aspekten erscheint es ordnungspolitisch rigoros, wenn Bewilligungen für Agri-PV-Bauvorhaben gemäß der Eingriffsregelung im Baugesetzbuch an Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen geknüpft werden und dadurch zusätzliche Agrarflächen für den Naturschutz verloren gehen. Eine solche Steuerung wird dem Umstand nicht gerecht, dass die beiden PV-Anwendungsmöglichkeiten unterschiedliche naturschutzrechtliche Auswirkungen haben. Bei der Agri-PV bleibt die landwirtschaftliche Tätigkeit auf der Agrarfläche größtenteils erhalten und die naturschutzfachlichen Kompensationsauflagen fallen entsprechend geringer aus, weil etwa Nistplätze, Schutzmöglichkeiten in der Feldfrucht und Nahrungsmittelgrundlage für Wild und Vögel weiterhin vorhanden sind. Im Zusammenhang mit Obst- und Beerenbau, wenn Agri-PV bestehende Hagel- und Folien-schutzsysteme ersetzt, wird zudem der Eingriff ins Landschaftsbild als sehr gering eingeschätzt (Siemensmeyer 2015, S. 33). Die Akzeptanz in der betroffenen Bevölkerung ist für die Agri-PV höher als für PV-FFA, bei der keine Nahrungsmittelproduktion mehr stattfindet (Ketzler et al. 2019). Eine PV-FFA hingegen führt zwar zu einer Flächennutzungsänderung und Einschränkung der Nahrungsmittelproduktion (häufig wird Acker- in Grünland umgewandelt), kann aber im Vergleich zu einer konventionellen Agrarfläche die Biodiversität erhöhen, weil unter anderem im Vergleich zu einer intensiv bewirtschafteten Agrarfläche weniger Pestizide eingesetzt werden und gezielt Biodiversitätsmaßnah-

men umgesetzt werden können (BNE 2021). Aufgrund der nicht differenzierten Handhabung von PV-FFA und Agri-PV bei der Flächenfestsetzung auf Kommunalebene bewertet die Bundesregierung konsequenterweise Projekte beider Art als „direkte und indirekte Landnutzungsänderungen“ und schlägt sie dem Siedlungsflächenanstieg hinzu (Bundesregierung 2019). Vor diesem Hintergrund konkurriert der PV-FFA-Ausbau politisch weniger mit der Verfügbarkeit von landwirtschaftlicher Nutzfläche zur Nahrungsmittelproduktion als vielmehr mit weiteren Agrarflächeninanspruchnahmen für Siedlungsflächen, insbesondere vor dem Hintergrund der Zielvorgabe, den Anstieg der Siedlungsfläche zu begrenzen, um bis 2050 eine Nettonull-Flächenkreislaufwirtschaft einzurichten (Bundesregierung 2021, BMUB 2016).

Damit der Agri-PV-Ausbau im Gegensatz zu PV-FFA-Projekten nicht zum Siedlungsflächenanstieg zählt, sollte im Baugenehmigungsverfahren die Festsetzung der Projektfläche im Flächennutzungsplan auf „Landwirtschaftliche Nutzfläche mit integrierter Agri-PV“ geändert werden.⁵ Zudem sollte die EU-GAP-Beihilfefähigkeit für die landwirtschaftliche Tätigkeit in Koppelung an Agri-PV erhalten bleiben, auch damit über die Dokumentationspflicht in der Schlagkartei die landwirtschaftlichen Erträge dauerhaft erfasst werden. Dass eine Flächennutzung für die Solarstromerzeugung zusammen mit einer beihilfefähigen landwirtschaftlichen Nutzung möglich ist, bestätigt ein noch nicht rechtskräftiges Urteil des Verwaltungsgerichts Regensburg aus dem Jahr 2018. Darin drängt die Gerichtsbarkeit die gesetzgebende Gewalt dazu, die bestehende Rechtslage zu korrigieren: Flächen, die unter und

>

⁵ Kleinflächige Agri-PV-Anlagen (< 1 Hektar) können mit hoher Wahrscheinlichkeit über die Privilegierung nach § 35 BauGB (*Baugesetzbuch*) umgesetzt werden, sofern sie im räumlichen Zusammenhang zur Hofstelle und für die Stromeigenversorgung installiert werden (also der landwirtschaftliche Betrieb auch der Betreiber der Agri-PV-Anlage ist). Großflächige Agri-PV-Anlagen (> 1 Hektar), deren Strom ausschließlich ins Stromnetz eingespeist wird, benötigen in der Regel einen vorhabenspezifischen Bebauungsplan.

zwischen den PV-Modulen hauptsächlich landwirtschaftlich genutzt werden und für die keine starke Einschränkung durch die Energiegewinnung durch PV besteht, seien fortan als beihilfefähige Flächen zu bewerten (VG Regensburg 2018). Das Urteil des Bundesverwaltungsgerichts zum Maislabyrinth und die darin enthaltene Bewertung von nicht landwirtschaftlicher Nutzung im Verhältnis zur landwirtschaftlichen Tätigkeit bekräftigt dies (Bundesverwaltungsgericht 2019): Mit hoher Wahrscheinlichkeit ist die heutige Gesetzgebung in Deutschland nicht konform mit geltendem EU-Recht und die *DirektZahlDurchfV* muss entsprechend angepasst werden. Eine Änderung der *DirektZahlDurchfV* dergestalt, dass in § 12 Abs. 3 Nr. 6 eine Ausnahme für Agri-PV-Anlagen vorgesehen wird („[...] mit Ausnahme von Agri-Photovoltaik-Anlagen“), trüge zur Rechtssicherheit bei.

Abgrenzungsmerkmal 2: Schutzfunktion durch höhere Aufständigung; Nahrungsmittel statt Extensivierung

Die EU-GAP-Beihilfefähigkeit allein wäre allerdings unzulänglich für die Herleitung einer differenzierten Agri-PV-Definition: Es macht einen Unterschied, ob die landwirtschaftliche Tätigkeit unter oder zwischen den PV-Modulreihen stattfindet. Bei der hochaufgeständerten Agri-PV findet eine tatsächliche Doppelnutzung der Agrarfläche statt und die Modultechnik erfüllt neben der Stromerzeugung weitere Zwecke, wie Regen-, Hagel- oder Sonnenschutz. Auch die Unterkonstruktion kann für die Landwirtschaft einen Doppelnutzen erfüllen, etwa indem Anbaudrähte als Rankhilfe zwischen dem Tragwerk gezogen werden oder Frost- und Bewässerungssysteme daran befestigt sind. Bodennah installierte Agri-PV ermöglicht hingegen eine Parallelnutzung der Agrarfläche, zum Beispiel für die Heuproduktion als Futtermittel oder den klassischen Ackerbau (Abbildung 1). Im Vergleich zu dieser Agri-PV, bei der die landwirtschaftliche Tätigkeit größtenteils weiterhin unter freiem Himmel stattfindet, bieten hochaufgeständerte Agri-PV-Anwendungen mehr Synergien. Im besten Fall ersetzt die Agri-PV-Anlage ein bestehendes landwirtschaftliches Kulturenschutzsystem, etwa eine Folienregenhaube oder ein Hagelschutznetz (Abbildung 2). Die Agri-PV-Doppelnutzung lässt sich zudem wesentlich klarer von PV-FFA abgrenzen und das ausgeprägtere Zusammenwirken beider Produktionssysteme rechtfertigt auch die höheren Gestehungskosten gegenüber PV-FFA oder Agri-PV-Parallelnutzung. Die Abgrenzung zwischen Agri-PV-Parallelnutzung und PV-FFA erfolgt über die Bewertung, ob die PV-Installation zu einer Flächennutzungsänderung geführt hat. Damit ist nicht die baurechtliche Bewertung der Fläche gemeint, also ob der Status weiterhin landwirtschaftliche Nutzfläche oder Sondergebiet Solarpark ist, sondern die Frage, ob es zu einer Veränderung der landwirtschaftlichen Tätigkeit kam. Agri-PV-Parallelnutzung erhält die bisherige Fruchtfolge des landwirtschaftlichen Betriebs, wohingegen bei PV-FFA die Agrarfläche aus der Produktion des Betriebs genommen wird. Bei PV-FFA wird die Agrarfläche in der Regel eingegrünt und eine maximale Stromerzeugung angestrebt. Bei Agri-PV-Parallelnutzung passen sich beispielsweise die Modulunterkante und die Modulreihenabstände der Ackerfrucht beziehungsweise der Landmaschinenteknik an und die mögliche

Solarstromerzeugung ergibt sich aus den Anpassungen des PV-Systems für die Beibehaltung der bisherigen Nahrungs- und Futtermittelproduktion auf der Fläche. Im Rahmen der EEG-Innovationsausschreibungen für besondere Solaranlagen wären die hochaufgeständerten Agri-PV-Doppelnutzungsanlagen (Kategorie 1, *DIN SPEC 91434*³) mit ihren vielen Zusatznutzen gegenüber den Agri-PV-Parallelnutzungsanlagen (Kategorie 2, *DIN SPEC 91434*³) im Kostenwettbewerb unterlegen. Agri-PV-Parallelnutzungsverfahren haben nämlich bereits im Auktionsmechanismus für PV-FFA Zuschläge erhalten und sind zuweilen „subventionsfrei“ umgesetzt worden (BayWa r.e. 2019). Die zusätzliche BNetzA-Konsultationsfrage im Rahmen der Agri-PV-Definition, ob Agri-PV-Parallelnutzung aus dem Verfahren der *InnAusV* ausgenommen werden sollten, ist daher mit Ja zu beantworten: Für die Agri-PV-Markteinführung wäre es zielführend, wenn ausschließlich die hochaufgeständerte Agri-PV-Doppelnutzung durch die *InnAusV* gefördert würde, während die Agri-PV-Parallelnutzungen durch das Ausschreibungsverfahren aus dem ersten Segment mit PV-FFA in den Wettbewerb träten. Allerdings sollte für die Agri-PV-Parallelnutzung innerhalb der herkömmlichen Ausschreibungen die Einschränkung der Flächenkulisse auf benachteiligtes Gebiet oder Flächen entlang von Transportwegen aufgehoben werden: Die Technologie sollte auf allen landwirtschaftlichen Nutzflächen ermöglicht werden, da auch sie die Flächenausnutzung erhöht.

Agri-PV-Doppelnutzungsanlagen lassen sich besser von PV-FFA abgrenzen als Parallelnutzungsanlagen. Als Abgrenzungsmerkmal wird die Höhe der Aufständigung als lichtetes Maß zwischen dem Grund und der niedrigsten Unterkante der Tragwerkskonstruktion oder des PV-Moduls gemessen (Dinesh und Pearce 2016). Sie wurde in der *DIN SPEC 91434* auf 2,10 m festgelegt.

Abgrenzungsmerkmal 3: Beitrag zur Anpassung der Landwirtschaft an den Klimawandel

Bereits heute kann die Agri-PV-Technik auf Finanzierungsmechanismen der UN-Klimarahmenkonvention zurückgreifen und so die CO₂-Reduktion und die landwirtschaftliche Produktion etwa in einem Entwicklungsland oder kleinen Inselstaat unterstützen (GCF 2020). Der Weltklimarat hat die Verwundbarkeit des Agrarsektors gegenüber dem Klimawandel als sehr hoch eingestuft. Hochaufgeständerte Module können die landwirtschaftliche Tätigkeit vor vermehrt auftretenden Extremwetterlagen schützen: In Trockenzeiten wird durch Verschattung die Evaporation und Transpiration gesenkt. Bei Starkregen oder Hagel werden zum Beispiel Obstplantagen geschützt. Der Kulturenschutz wird über die Stromerlöse finanziert und der Landwirt spart sich die Investitionskosten für ein gewöhnliches Folienschutzsystem. Agri-PV-Doppelnutzungsanlagen unterstützen so die Anpassung der Landwirtschaft an die Erderwärmung und tragen zu ihrer Resilienzsteigerung bei. Dies ist ein weiteres Abgrenzungsmerkmal gegenüber PV-FFA oder Agri-PV-Parallelnutzungen. Klimaschutz und die Anpassung der Landwirtschaft an den Klimawandel sollen laut BMEL zukünftig einen größeren Stellenwert in der Agrarpolitik einnehmen (BMEL 2019). Hochaufgeständerte Agri-PV



ABBILDUNG 2: Hochaufgeständerte Agri-PV-Technik mit Schutzfunktionen für die landwirtschaftliche Tätigkeit unterhalb der Modulreihen. Folienregenhäuben wie oben rechts oder Hagelschutznetze wie unten rechts können ersetzt werden; landwirtschaftliche Fahrzeuge können auch unter den Anlagen verkehren. Das Landschaftsbild verändert sich gegenüber bereits von Folien- und Hagelschutzsystemen überprägten Flächen kaum.

könnte eine Lösungsoption für die landwirtschaftlichen Betriebe und ein Beitrag zur Erreichung der BMEL-Ziele sein.

Abgrenzungsmerkmal 4: Steigerung der Landnutzungsrate

Zur Optimierung der Landnutzung durch eine Kombination von Nahrungsmittel- und Energieproduktion auf einer Fläche entwickelte die FAO die Methode von Integrierten Nahrungsmittel- und Energiesystemen. Da die Agri-PV ähnlich wie ein „Agroforstsystem“ oder die „Agrotreibstoffproduktion mit Kaskadennutzung“ die Landnutzungsrate wesentlich steigert (FAO 2011, S. 19), wurde sie im *Global Land Outlook* als Lösung für Flächennutzungskonkurrenz anerkannt (UNCCD 2017, S. 215). Diese Steigerung der Landnutzungseffizienz ist damit ein weiteres Agri-PV-Alleinstellungsmerkmal gegenüber PV-FFA. Durch die Berechnung der Landnutzungsrate wird sie quantitativ bestimmt (Dupraz et al. 2011). Eine Steigerung der Landnutzungseffizienz für die landwirtschaftliche Tätigkeit ist bei einer gemischten Flächennutzung im Vergleich zu einer getrennten Landnutzung (je auf der halben Fläche Landwirtschaft und PV-FFA) dann gegeben, wenn der Ernteertrag unter Agri-PV mehr als 50% des Ernteertrags auf der reinen Agrarfläche beträgt. Damit jedoch der Status „landwirtschaftliche Nutzfläche“ erhalten bleibt, stellt die *DIN SPEC* die Muss-Anforderung, dass mindestens zwei Drittel der landwirtschaftlichen Erträge nach Inbetriebnahme der Agri-PV-Anlage erhalten

bleiben. Dies würde zur einer Flächennutzungseffizienzsteigerung von mindestens 33% gegenüber einer getrennten Flächennutzung führen (für die beiden Teilflächen: getrennte Nutzung: $100\% + 0\% = 100\%$; APV: $67\% + 67\% = 133\%$).

Abgrenzungsmerkmal 5: bauliche Anlage und kein Gebäude

Der PV-Anlagenbetrieb ist für viele Landwirte eine wichtige von landwirtschaftlichen Erträgen unabhängige Einkommensquelle. Für die Bewertung von Agri-PV-Abgrenzungsmerkmalen sind daher explizit andere PV-Nutzungsmöglichkeiten für Landwirte zu prüfen, die einem bereits existierenden PV-Marktsegment und dessen Förderrichtlinien eindeutig zugeordnet werden können. Im Folgenden werden Gewächshäuser und Stallungen mit dachintegrierter PV-Technik von Agri-PV abgegrenzt.

Sogenannte Solargewächshäuser grenzen sich durch zwei Eigenschaften von Agri-PV ab. Erstens, Gewächshäuser bieten eine geschlossene Pflanzenkultivierung in einem künstlich erzeugten Klima, im Fokus steht die Erntezeitpunktsteuerung unabhängig von den natürlichen klimatischen Bedingungen. Agri-PV hingegen verfügt über keine solche Steuerungsmöglichkeit für das wetterunabhängige Kultivieren von Pflanzen. Agri-PV ist stets ein geschützter Anbau, aber kein geschlossener. Die Kultivierungssysteme Agri-PV und Gewächshäuser erfüllen entsprechend für die landwirtschaftliche Haupterzeugung unterschiedliche Zwecke und



ABBILDUNG 3: Dachintegrierte PV-Technik auf Stallungen (links) und Gewächshäusern (rechts).

sind klar voneinander abzugrenzen. Das bedeutet auch: Die Erträge der landwirtschaftlichen Tätigkeit unter Agri-PV hängen nicht ausschließlich vom Lichtmanagement, sondern auch von Temperatur, Bodenfruchtbarkeit, natürlichen Bestäubern und vielen weiteren Faktoren ab. Zweitens, ein Gewächshaus ist gemäß *Bau-GB* ein Gebäude, während Agri-PV und andere landwirtschaftliche Schutzsysteme baurechtlich als bauliche Anlagen bewertet werden. Eine auf dem Dach eines Gewächshauses integrierte PV-Anlage erhält dementsprechend eine PV-Dacheinspeisevergütung und wird damit bereits heute im PV-Fördersystem berücksichtigt. Eine ähnliche Argumentationslinie gilt für Stallungen mit dachintegrierter PV: Ein geschlossenes Gebäude, in dem die Tiere ganzjährig gehalten werden können, sollte als Stall und nicht als Agri-PV-Anlage bewertet werden.⁶ Bei der Analyse der Agrarflächeninanspruchnahme durch PV und der Wirkungsanalyse einer Agri-PV-Diffusion sind daher Gewächshäuser und Ställe mit dachintegrierter PV dem Dach- (also Siedlungs-) und Verkehrsflächen-segment und nicht dem Agrarflächen-segment zuzuordnen. Beispiele für Solargewächshäuser und Stallungen mit PV-Dach sind in Abbildung 3 dargestellt.

Schritt 2: Eigenschaften der Agri-PV an deutschen Nachhaltigkeitszielen messen: Agrarflächenerhaltung, Klimaschutz und -anpassung, Technologieführerschaft

Für die gesellschaftspolitische Entscheidung zur Förderung der Agri-PV-Diffusion ist die Beurteilung wichtig, ob Agri-PV in Summe einen Beitrag zur Steigerung des Nachhaltigkeitsniveaus in Deutschland leisten kann. Hierbei wird gefragt, welche der Agri-PV-Eigenschaften gegenüber bestehenden PV-Techniken einen zusätzlichen Nutzen für die nachhaltige Entwicklung bedeuten und somit eine Aufnahme in ein Förderregime rechtfertigen. Da Definitionen per se keinen politischen Anforderungen entsprechen sollten, sondern den Anspruch der Allgemeingültigkeit haben, sind die nationalen politischen Beweggründe als eine zusätzliche Information oder ergänzende Anmerkung zur Definition hinzuzufügen. Tabelle 1 fasst zusammen, welche Auswirkungen

eine Agri-PV-Diffusion in Deutschland auf die Umsetzung der *Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie (DNS)* (Bundesregierung 2021) haben könnte.

Insgesamt werden sechs *Sustainable Development Goals (SDGs)* und acht *DNS-Key-Performance-Indicators (KPIs)* direkt von einer Agri-PV-Diffusion beeinflusst. Zwei *KPIs* betreffen Alleinstellungsmerkmale der Agri-PV im Vergleich zu sonstigen PV-Anwendungen:

1. KPI 11.1.a Nachhaltige Landnutzung: Gebäude, Gewächshäuser, Verkehrswege, Konversionsflächen und Sondergebiete für die PV-FFA-Nutzung zählen allesamt zu Siedlungsflächen. Die Agri-PV-Diffusion kann zur Reduktion des Siedlungsflächenanstiegs auf Kosten der Landwirtschaftsfläche beitragen, wenn statt PV-FFA Agri-PV-Anlagen erstellt werden. Indem ein Mindestniveau der bisherigen Agrarproduktion weiterhin erzielt wird, beispielsweise zwei Drittel oder drei Viertel im Vergleich zu den Vorjahren und den regionalen Referenzwerten pro Jahr, bleibt die regionale Nahrungsmittelproduktion gewährleistet und die Anlage trägt zur nachhaltigen Landnutzung bei. Es wäre daher angebracht, wenn Agri-PV-Flächen nicht mehr unter die Sondergebiete fielen, sondern den Status landwirtschaftliche Nutzfläche behielten.

2. KPI 9.1 – Zukunft mit neuen Lösungen gestalten: Regierungen in Japan, Südkorea, China, Frankreich, den Niederlanden und den USA haben Agri-PV-Fördersysteme verabschiedet, um ihre Landwirte zu stärken und Landnutzungskonflikte zu mindern (Schindele et al. 2020). In den USA befasst sich der Kongress mit der Agri-PV-Technik (Lawson et al. 2020) und auch die Europäische Kommission analysiert die Marktentwicklung und die Potenziale von Agri-PV für die Umsetzung des European Green Deal (European Commission 2020). Bis Juni 2021 waren weltweit schätzungsweise über 3 500 Agri-PV-Anlagen installiert – allein in Japan über 3 000 (Tajima 2021). Die größte Agri-PV-Anlage befindet sich in China, umfasst über 1 200 Hektar, verfügt über 1 GWp Leistung und trägt zur Ökosystem-Restaurierung bei, indem nahe der Wüste Gobi eine degradierte Fläche durch die PV-Verschattung und durch Windschutz wieder für die Nahrungsmittelerzeugung zurückgewonnen werden konnte (Bellini 2020). In Deutsch-

⁶ In Deutschland ist dies gegeben, aber die Einstufung wird nicht in allen Ländern gleich vorgenommen.

SDG 2:	Hunger beenden, Ernährungssicherheit erreichen und nachhaltige Landwirtschaft fördern
KPI 2.1.b	Anteil ökologischer Landbau erhöhen
SDG 7:	Zugang zu bezahlbarer, verlässlicher, nachhaltiger Energie für alle sichern
KPI 7.2.a	Anteil erneuerbarer Energien am Brutto-Endenergieverbrauch erhöhen
KPI 7.2.b	Anteil erneuerbarer Energien am Brutto-Stromverbrauch erhöhen
SDG 8:	nachhaltiges Wirtschaftswachstum und produktive Vollbeschäftigung für alle fördern
KPI 8.4	Wirtschaftsleistung umwelt- und sozial-verträglich steigern
KPI 8.5.a	Beschäftigungsniveau steigern
SDG 9:	nachhaltige Industrialisierung fördern und Innovationen unterstützen
KPI 9.1	Zukunft mit neuen Lösungen gestalten
SDG 11:	Städte und Siedlungen widerstandsfähig und nachhaltig machen
KPI 11.1.a	nachhaltige Landnutzung
SDG 13:	umgehend Maßnahmen zur Bekämpfung des Klimawandels und seiner Auswirkungen ergreifen
KPI 13.1.a	Treibhausgase reduzieren

TABELLE 1: Schnittmengen einer Agri-PV-Diffusion mit der *Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie (DNS)* (Bundesregierung 2021). *SDG: Sustainable Development Goal* (nachhaltiges Entwicklungsziel der Vereinten Nationen); *KPI: key performance indicator* (Schlüsselindikator der *DNS*).

land sind schätzungsweise zwölf Agri-PV-Anlagen installiert worden, die meisten zu Forschungszwecken. Das BMWi behandelt die Agri-PV als Nische. So verschläft die Behörde den internationalen Trend, intersektorale Herausforderungen durch multifunktionale Lösungen zu meistern, und missachtet den dringlichen Handlungsbedarf auf kommunaler Ebene, Landnutzungskonflikte zu entschärfen. Im gleichen Zug, wie das BMWi die Agri-PV im *EEG* als Chance begreifen und die Ausbaumenge wesentlich stärker statt der derzeit angedachten 150 MWp auf mindestens 300 MWp pro Jahr erhöhen sollte, müsste das BMEL die gesetzlichen Rahmenbedingungen für die landwirtschaftliche Tätigkeit unter oder zwischen Agri-PV-Modulen schaffen und die *Direkt-ZahlDurchfV* dahingehend anpassen, dass diese landwirtschaftliche Nutzfläche EU-GAP-beihilfefähig bleibt. Zwischen dem Deutschen Bauernverband (DBV) und allen relevanten Energieverbänden, darunter dem Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) und dem Bundesverband Erneuerbare Energie (BEE), besteht Einigkeit, dass die Agri-PV als neues PV-Marktsegment im *EEG* etabliert werden sollte. Die Agri-PV-Technik steht in ihrer Markterschließung erst am Anfang und über weitere Forschung und Entwicklung (FuE) sowie erhöhte Absatzmengen sind Kostenreduktion, Skaleneffekte und „Learning by doing“ möglich, die mittel- bis langfristig die Agri-PV an die Wettbewerbsfähigkeit heranführen. FuE-Investitionen seitens der Industrie werden nur getätigt, wenn ein ausreichend großer Markt in Aussicht gestellt wird. Technology-Push (Forschung) und Demand-Pull (Diffusion) müssen Hand in Hand gedacht und umgesetzt werden, damit der nationale Wissensstand kontinuierlich erhöht, die Technik weiterhin verbessert und ins Ausland exportiert werden kann.

Anpassung der Landwirtschaft an den Klimawandel: Ein weiterer wichtiger Punkt ist das Agri-PV-Alleinstellungsmerkmal, die Landwirtschaft bei der Anpassung an den Klimawandel zu unterstützen. Agri-PV kann den landwirtschaftlichen Betrieben dienlich sein, wenn etwa Nutztiere in der Sommerhitze unter Agri-PV-Anlagen weiden können oder die bestehenden Anbauschutz-

systeme im Sonderkulturbereich ersetzt werden. Landwirte profitieren so von einer Schutzfunktion, deren Investitionskosten über das *EEG* finanziert werden könnten. Allerdings ist die Anpassung der Landwirtschaft an den Klimawandel im Moment kein Ziel der *DNS*. Geringere Investitionskosten, weniger Arbeit und Müllreduktion bei gleicher oder sogar verbesserter Schutzfunktion sind die techno-ökonomischen und sozio-ökologischen Hauptargumente für die Agri-PV-Integration in die landwirtschaftliche Produktion.

Schritt 3: Agri-PV-Definition festlegen, Förderkriterien für Deutschland herleiten

Um Pseudo-Agri-PV-Anwendungen, Fehlanreize und Mitnahmeeffekten vorzubeugen, sollten bei der Agri-PV-Diffusion die Förderkriterien möglichst konkret und überprüfbar definiert werden. Unter Berücksichtigung der fünf Abgrenzungsmerkmale zu anderen PV-Techniken wird zunächst eine allgemeingültige Agri-PV-Definition hergeleitet, die drei Prüfkriterien standhalten muss:

1. Damit es zu keiner Flächennutzungsänderung kommt, muss der primäre Zweck der Agri-PV-Landnutzung die landwirtschaftliche Tätigkeit zur Nutzpflanzenkultivierung oder Nutztierhaltung sein;
2. Damit ein landwirtschaftlicher Mindestertrag unter der Agri-PV-Anlage gewährleistet wird, muss der Wert der landwirtschaftlichen Ernte in einer gemischten Agri-PV-Flächennutzung höher sein als bei einer getrennten Flächennutzung zur Solarstromerzeugung und Nahrungsmittelproduktion und somit die Flächennutzungseffizienz gesteigert werden;
3. Der sekundäre Zweck der Agri-PV-Landnutzung ist die Solarstromerzeugung. Die PV-Technik muss sich den Bedarfen der landwirtschaftlichen Tätigkeit anpassen und techno-ökonomische sowie sozio-ökologische Synergien beider Produktionssysteme optimal nutzen.

Der Begriff „Agri-Photovoltaik“ kann daraus wie folgt definiert werden: „Agri-Photovoltaik erhöht die Landnutzungseffizienz von



Agrarflächen, indem sie eine sekundäre Solarstromproduktion an eine landwirtschaftliche Primärerzeugung koppelt und dabei Synergien der beiden Produktionssysteme optimal nutzt.“

Diese Basisdefinition könnte als Diskussionsgrundlage für die Ausarbeitung einer international gültigen Agri-PV-Norm dienen, damit in Wissenschaftsgemeinde, Staatengemeinschaft, Gesellschaft und Wirtschaft Einigkeit über den Begriff „Agri-PV“ und die Grundeigenschaften der Technik herrscht. Im nationalen Kontext können die politischen Gründe für eine Agri-PV-Diffusion unterschiedlich sein und deshalb weitere Kann-Anforderungen ergänzend an die Basisdefinition angefügt werden. Als Ergebnis der DNS-Analyse für Deutschland werden vier weitere Prüfkriterien als Voraussetzung für eine Förderung vorgeschlagen:

4. Damit Agri-PV-Anlagen Schutzfunktionen für verschiedene darunterliegende landwirtschaftliche Nutzungen zur Anpassung an den Klimawandel übernehmen können, muss die sekundäre Flächennutzung zur Solarstromproduktion hochaufgeständert sein, daher wird empfohlen, solche Anlagen (Doppelnutzung) primär zu fördern;
5. In Abgrenzung zur BMEL-Richtlinie *Energieeffizienz und CO₂-Reduktion in der Landwirtschaft*, durch die kleinflächige (< 1 ha) Agri-PV-Installationen zur Energieeigenerzeugung bereits heute förderfähig sind, müssen in der *InnAusV* großflächige (≥ 1 ha) Agri-PV-Anlagen zur Netzeinspeisung gefördert werden;
6. Nach der Agri-PV-Anlagenerrichtung müssen die genehmigten Agri-PV-Spezifizierungen und insbesondere die dauerhafte landwirtschaftliche Tätigkeit unter der Agri-PV-Anlage überprüft werden, weshalb die EU-GAP-Beihilfefähigkeit der Agri-PV-Fläche gegeben sein muss;
7. Die drei Agri-PV-Basis-Prüfkriterien 1–3 und die drei Kann-Anforderungen 4–6 müssen im Baugenehmigungsverfahren durch einen Sachverständigen überprüft und bestätigt und auf Bundesebene gegenüber dem Fördermittelgeber als Teil des kommunalen Aufstellungsbeschlusses zum Agri-PV-Projektvorhaben nachgewiesen werden. Dabei wird auf lokaler Ebene beurteilt, ob eine wirtschaftlich tragfähige und dauerhafte landwirtschaftliche Erzeugung unter der angedachten Agri-PV möglich ist.

Die Agri-PV-Basisdefinition kann zur Berücksichtigung nationaler Bedarfe zur Anwendung in der *InnAusV* folgendermaßen ergänzt werden:

„Bei der Agri-PV-Doppelnutzung ist die PV-Anlage eine landwirtschaftliche Schutzvorrichtung und dient der darunterliegenden landwirtschaftlichen Tätigkeit zur Anpassung an den Klimawandel. Aufgrund dieser zusätzlichen Schutzfunktion ist die Agri-PV-Doppelnutzung in der Diffusion gegenüber der Agri-PV-Parallelnutzung zu bevorzugen. Beide Agri-PV-Nutzungsmöglichkeiten erhöhen die Widerstandsfähigkeit der Landwirtschaft gegen den Klimawandel, indem sie zur Einkommensdiversifizierung des landwirtschaftlichen Betriebs beitragen, wenn der Solarstrom durch Netzeinspeisung vermarktet wird. Die tragfähige und dauerhafte landwirtschaftliche Erzeugung unter den PV-Modulen wird vor der Anlagenerrichtung durch ein Sachverständigengut-

achten nachgewiesen und nach Installation durch die Koppelung an die EU-GAP-Beihilfefähigkeit gewährleistet.“

In Schindele 2021 (in diesem Heft) wird für die Wirkungsanalyse einer Agri-PV-Diffusion in Deutschland bis 2050 ausschließlich die Agri-PV-Basisdefinition verwendet.

Fazit

Die vorgelegte Empfehlung einer Agri-PV-Definition erfolgte in drei Schritten. Schritt 1 erläuterte die Eigenschaften der Agri-PV in Abgrenzung zu anderen PV-Techniken. Aus den fünf identifizierten Abgrenzungsmerkmalen wurde eine Agri-PV-Basisdefinition hergeleitet. Diese kann als Grundlage für die Ausarbeitung einer international gültigen Agri-PV-Norm dienen.

Im nationalen Kontext können die politischen Gründe für die Förderung einer Agri-PV-Diffusion unterschiedlich sein und daher weitere Kann-Anforderungen ergänzend an die Basisdefinition angefügt werden. Deswegen stand in einem zweiten Schritt die Agri-PV-Diffusion im deutschen gesellschaftspolitischen Kontext im Fokus. Die Frage lautete, ob die Eigenschaften der Agri-PV den politischen Zielen entsprechen. Dazu wurden die Auswirkungen einer Agri-PV-Diffusion auf Schlüsselindikatoren (*KPIs*) der DNS überprüft. Insgesamt sind acht *KPIs* direkt durch Agri-PV betroffen.

In der EEG-Novelle 2020 ist lediglich ein einmaliges Mengenvolumen von 150 MWp für die drei PV-Technologien Floating-, Parkplatz- und Agri-PV vorgesehen. Dies wird bei Weitem nicht ausreichen, um die Ziele der DNS zu erreichen und die nationalen Interessen der Land- und Energiewirtschaft zu unterstützen. Wissenschaft und Wirtschaft haben die Chancen der Agri-PV stärker durchdrungen als die Bundesregierung, die den internationalen Agri-PV-Marktentwicklungen hinterherhinkt und dem Anspruch auf Technologieführerschaft im Bereich der erneuerbaren Energien nicht gerecht wird. Ein weiterer wichtiger Punkt, der allerdings in der Nachhaltigkeitsstrategie nicht aufgenommen ist, ist, dass Agri-PV die Landwirtschaft bei der Anpassung an den Klimawandel unterstützen könnte.

Im dritten und letzten Schritt wurde die Agri-PV-Definition hergeleitet und wurden Prüf- und EEG-Förderkriterien mit den dazugehörigen Spezifikationen erarbeitet. In Deutschland befindet sich die Agri-PV-Technik in einer frühen Phase der technischen Ontogenese. Gesellschaftspolitisch hat sie den Sprung von einer Invention zur Innovation vollzogen. Die BNetzA ist aufgefordert, bis Oktober 2021 eine genaue Agri-PV-Definition festzusetzen. Dieser Artikel leistet einen Beitrag zur aktuellen Konsultation für die Festlegung der Anforderungen an Agri-PV als „besondere Solaranlagen“ nach §15 der Innovationsausschreibung.

Ausblick

Schindele (2021, in diesem Heft) bewertet, wie viel landwirtschaftliche Nutzfläche für den PV-Ausbau in Deutschland benö-

tigt wird und welche Auswirkung eine solche Agri-PV-Diffusion auf den Agrarflächenbestand bis 2050 hätte.

Diese Arbeit wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) Deutschland gefördert (Förderkennzeichen: 033L098AN).

Ich danke Harry Wirth und Max Trommsdorff (Fraunhofer ISE), meinen Doktorvätern Josef Schmid und Daniel Buhr (Universität Tübingen) sowie drei anonymen Gutachter(inne)n für wertvolle Hinweise zu meinem Beitrag.

Der Autor hat keine finanziellen Interessen und sonstigen Interessenkonflikte zu deklarieren. Die Forschung für diesen Artikel wurde im Rahmen einer Dissertation am Fraunhofer ISE durchgeführt, der jetzige Arbeitgeber des Autors hat keinerlei Einfluss auf die Inhalte genommen.

Literatur

- Bayerische Staatsregierung. 2019. *Zweite Verordnung über Gebote für Freiflächenanlagen*. 754-4-1-W, vom 04.06.2019. Fundstelle: GVBl. 2019, S. 314.
- BayWa r.e. 2019. *First subsidy-free solar park in Germany*. <https://solar-distribution.baywa-re.de/en/about-us/news/details/first-subsidy-free-solar-park-in-germany> (abgerufen 20.06.2021).
- Bellini, E. 2020. Giant agrivoltaic project in China. *PV Magazine* September 3rd. www.pv-magazine.com/2020/09/03/giant-agrivoltaic-project-in-china (abgerufen 19.06.2021).
- BMEL (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft). 2019. *Ackerbaustrategie 2035. Perspektiven für einen produktiven und vielfältigen Pflanzenbau*. Berlin: BMEL.
- BMEL. 2020. *Richtlinie zur Förderung der Energieeffizienz und CO₂-Einsparung in Landwirtschaft und Gartenbau. Teil A – Landwirtschaftliche Erzeugung, Wissenstransfer*. 18. September 2020. Bonn: BMEL.
- BMJV (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz). 2021. *Verordnung zu den Innovationsausschreibungen (Innovationsausschreibungsverordnung – InnAusV). § 15 Festlegung zu besonderen Solaranlagen*. www.gesetze-im-internet.de/innausv/___15.html (abgerufen 19.06.2021).
- BMUB (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Nukleare Sicherheit). 2016. *Klimaschutzplan 2050. Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung*. Berlin: BMUB.
- BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie). 2021. *Referentenentwurf des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Verordnung zur Umsetzung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes 2021 und zur Änderung weiterer energierechtlicher Vorschriften*. Bearbeitungsstand: 12.05.2021, 14:56 Uhr. www.bmwj.de/Redaktion/DE/Downloads/V/verordnung-zur-umsetzung-des-eeg-2021-und-zur-aenderung-weiterer-energierechtlicher-vorschriften.pdf?__blob=publicationFile&v=6 (abgerufen 23.06.2021).
- BNE (Bundesverband Neue Energiewirtschaft). 2021. *Selbstverpflichtung: Gute Planung von PV-Freiflächenanlagen. Wie sich Energiewende, Umwelt- und Naturschutz vereinen lassen*. www.bne-online.de/de/verband/gute-planung-pv (abgerufen 19.06.2021).
- Bundesregierung. 2019. *Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Stephan Protschka, Peter Felser, Franziska Gminder, weiterer Abgeordneter und der Fraktion der AfD – Drucksache 19/11956. Direkte und indirekte Landnutzungsänderungen*. Drucksache 19/12697, 26.08.2019. Berlin: Deutscher Bundestag, 19. Wahlperiode.
- Bundesregierung. 2021. *Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie. Weiterentwicklung 2021*. Berlin: Bundesregierung.
- Bundesverwaltungsgericht. 2019. *Beihilfefähigkeit eines Maislabyrinths. Urteil des 3. Senats vom 4. Juli 2019 – BVerwG 3 C 11.17*. Leipzig: Bundesverwaltungsgericht.
- DIN (Deutsches Institut für Normung). 2020. *Geschäftsplan für ein DIN SPEC-Projekt nach dem PAS-Verfahren zum Thema „Agrophotovoltaik-Anlagen – Anforderungen an die landwirtschaftliche Hauptnutzung“*. Berlin: DIN.
- Dinesh, H., J. M. Pearce. 2016. The potential of agrivoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 54: 299–308. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.024>.
- Dupraz, C., H. Marrou, G. Talbot, L. Dufour, A. Nogier, Y. Ferard. 2011. Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use. Towards new agrivoltaic schemes. *Renewable Energy* 36(10): 2725–2732. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.005>.
- European Commission. 2020. *Horizon Scanning Alert. Agrivoltaics, shielding crops with PV panels*. https://setis.ec.europa.eu/sites/default/files/reports/jrc120514_agrivoltaics_hs_alert.pdf (abgerufen 24.06.2021).
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2011. *Making integrated food-energy systems work for people and climate. An overview*. www.fao.org/3/i2044e/i2044e.pdf (abgerufen 19.06.2021).
- GCF (Green Climate Fund). 2020. *SAP016: Fiji Agrophotovoltaic Project in Ovalau*. Incheon, KR: GCF. www.greenclimate.fund/project/sap016 (abgerufen 09.11.2020).
- Goetzberger, A., A. Zastrow. 1982. On the coexistence of solar-energy conversion and plant cultivation. *International Journal of Solar Energy* 1(1): 55–69. <https://doi.org/10.1080/01425918208909875>.
- Ketzer, D., N. Weinberger, C. Rösch, S. B. Seitz. 2019. Land use conflicts between biomass and power production – citizens' participation in the technology development of agrophotovoltaics. *Journal of Responsible Innovation* 15(2): 1–24. <https://doi.org/10.1080/23299460.2019.1647085>.
- Kühne, O. 2018. *Landschaft und Wandel. Zur Veränderlichkeit von Wahrnehmungen*. Wiesbaden: Springer.
- Lawson, A. J., M. F. Sherlock, M. D. Platzer, C. E. Clark, T. Cowan. 2020. *Solar energy: Frequently asked questions*. January 27. Washington, D. C.: Congressional Research Service CRS.
- Rösch, C. 2016. Agrophotovoltaik – die Energiewende in der Landwirtschaft. *GAIA* 25(4): 262–256. <https://doi.org/10.14512/gaia.25.4.5>.
- Schindele, S. 2021. Nachhaltige Landnutzung mit Agri-Photovoltaik: Photovoltaikausbau im Einklang mit der Lebensmittelproduktion. Szenarioanalyse zur Inanspruchnahme landwirtschaftlicher Nutzflächen durch Photovoltaik in Deutschland bis 2050. *GAIA* 30(2): 96–105. <https://doi.org/10.14512/gaia.30.2.7>.
- Schindele, S. et al. 2020. Implementation of agrophotovoltaics: Techno-economic analysis of the price-performance ratio and its policy implications. *Applied Energy* 265: 114737. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114737>.
- Siemensmeyer, B., S. Irmscher. 2015. *Umweltbericht. Bestandteil der Begründung zum Bebauungsplan „Forschungsanlage Agrophotovoltaik“, Gesamtbilanz Eingriff/Kompensation, Ausblick und Hinweise für zukünftige Planungen*. Stand: 30.09.2015. Verfahrensführende Gemeinde: Herdwangen-Schönach.
- Tajima, M. 2021. Japan – Country overview. *Agrivoltaics conference 2021*. Monday, 14th June. <https://cms2021.agrivoltaics-conference.org/program>.
- UNCCD (United Nations Convention to Combat Desertification). 2017. *Global land outlook*. www.unccd.int/sites/default/files/documents/2017-09/GLO_Full_Report_low_res.pdf (abgerufen 19.06.2021).
- VG Regensburg (Verwaltungsgericht Regensburg). 2018. *Beihilfefähigkeit eines Solarparks. Urteil v. 15.11.2018 – RO 5 K 17.1331*. BeckRS 2018: 35338.
- Wirth, H. 2019. *Integrierte Photovoltaik – Flächen für die Energiewende. Positionspapier*. Freiburg im Breisgau: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE.



Stephan Schindele

Studium der Betriebswirtschaft an der ESB Business School der Hochschule Reutlingen und der California State University East Bay, USA. 2015 bis 2020 Lehrtätigkeit in Energiepolitik an der Hochschule Reutlingen. Dissertation im Bereich Agri-Photovoltaik am Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE in Freiburg im Breisgau. Seit 2020 Head of Agri-PV bei BayWa r.e. Solar Projects in Freiburg im Breisgau. Arbeitsschwerpunkte: Agri-PV-Systementwicklung, globale Agri-PV-Markterschließung, Synergien zwischen der Land- und Energiewirtschaft.

Appendix C: Publikation „GAiA Teil 2 von 2”

Nachhaltige Landnutzung mit Agri-Photovoltaik: Photovoltaikausbau im Einklang mit der Lebensmittelproduktion

Szenarioanalyse zur Inanspruchnahme landwirtschaftlicher Nutzflächen durch Photovoltaik in Deutschland bis 2050

Ohne massiven Ausbau der Photovoltaik lassen sich die Klimaziele nicht erreichen. Dafür werden auch Anlagen auf Landwirtschaftsflächen nötig sein. Wie viel Agrarfläche braucht es für den erforderlichen Photovoltaikausbau in Deutschland, welche Auswirkung hätte er auf den Agrarflächenbestand? Entscheidend, auch für das Erreichen der Flächenkreislaufwirtschaft, ist, ob dieser Ausbau mittels Agri-Photovoltaik oder mittels Freiflächenanlagen erfolgt.

Stephan Schindele¹ 

Sustainable land use with agrivoltaics: photovoltaics diffusion in harmony with food production. Scenario analysis on the agricultural land demand by photovoltaics in Germany until 2050 *GAIA* 30/2 (2021): 96–105

Abstract

Germany's *Sustainable Development Strategy* sets the goals to reduce "land take" for housing, industry, roads or recreational purposes to 30 hectares per day by 2030 and to "no net land take" by 2050 ("circular economy for land and soils"). Simultaneously Germany plans to increase the share of ground-mounted photovoltaics (PV-GM). Yet, PV-GM accounts to industry land take and thus the two targets are contradictory. The expected area of arable land taken for PV-GM till 2050 is simulated. For a second simulation, PV-GM diffusion is partially substituted by agrivoltaics. Finally, the arable land demand in both scenarios is compared and evaluated according to the German policy goals. Agri-PV dissemination, when replacing PV-GM, could preserve approximately 60,000 hectares of arable land and thus reduce land take increase significantly. Political recommendations for sustainable land management and Agri-PV implementation finalize the article.

Keywords

agri-photovoltaics, impact analysis, land management, multi-level policy analysis, policy field analysis, policy learning, sustainability politics

Dipl.-Betriebsw. (FH) Stephan Schindele, MBA | Eberhard-Karls-Universität Tübingen | Institut für Politikwissenschaft | Melanchthonstr. 36 | 72074 Tübingen | Deutschland und BayWa r.e. Solar Projects GmbH | Büro Freiburg | Kaiser-Joseph-Str. 263 | 79098 Freiburg im Breisgau | Deutschland | stephan.schindele@baywa-re.com

© 2021 S. Schindele; licensee oekom verlag. This Open Access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution License CC BY 4.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>). <https://doi.org/10.14512/gaia.30.2.7>
Received February 15, 2021; revised version accepted May 19, 2021 (double-blind peer review).

In Schindele 2021 (in diesem Heft) wurde der Begriff „Agri-Photovoltaik“ (Agri-PV) wie folgt definiert: „Agri-PV erhöht die Landnutzungseffizienz von Agrarflächen, indem sie eine sekundäre Solarstromproduktion an eine landwirtschaftliche Primärerzeugung koppelt und dabei Synergien der beiden Produktionssysteme optimal nutzt“. Im Gegensatz zu Photovoltaik-Freiflächenanlagen (PV-FFA) trägt Agri-PV nicht zum Siedlungsflächenanstieg bei, sondern erhält die landwirtschaftlichen Nutzflächen. Gemäß dieser Basisdefinition wird im vorliegenden Artikel eine Wirkungsanalyse für eine Agri-PV-Diffusion in Deutschland bis 2050 durchgeführt.

Bis ins Jahr 2050 könnte Agri-PV für knapp 60000 Hektar den Status landwirtschaftliche Nutzfläche erhalten, indem 81,3 Gigawatt Peak (GWp, maximale Leistung) zu erwartender PV-FFA-Zubau durch Agri-PV ersetzt wird, was nur einem Bruchteil des technischen Agri-PV-Potenzials von 1700 GWp in Deutschland entspricht (Wirth 2019). Dadurch könnte die Agri-PV einen Beitrag zur nachhaltigen Landnutzung leisten und den Übergang zu einer Flächenkreislaufwirtschaft ab 2050 erleichtern. In diesem Artikel wird gezeigt, wie die Abschätzung zustande kommt.

In Deutschland führten steigender Wohlstand und Wirtschaftswachstum zu einem täglichen Siedlungsflächenanstieg von durchschnittlich 58 Hektar (ha) zwischen Anfang 2014 und Ende 2017 (UBA 2019). Im gleichen Zeitraum hat sich der Waldflächenanteil in Deutschland erhöht, während die landwirtschaftliche Nutzfläche zurückgegangen ist. Daher wird davon ausgegangen, dass der Siedlungsflächenanstieg zu Lasten von Agrarflächen erfolgte (Bundesregierung 2016). In der *Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie (DNS)* liegt die Zielvorgabe für die Begrenzung des Siedlungs-

¹ Dieser Artikel entstand im Rahmen eines Dissertationsprojekts am Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE in Freiburg im Breisgau.

flächenanstiegs bei „durchschnittlich unter 30 ha“ pro Tag bis 2030 (Bundesregierung 2021, S. 100). Gleichzeitig hat sich die Bundesregierung in ihrem Klimaschutzplan das Ziel gesetzt, bis spätestens 2050 den Übergang zur einer Flächenkreislaufwirtschaft zu erreichen, indem dieser Anstieg auf „nettonull“ gesenkt wird (BMUB 2016). Diese Zielsetzungen für ein nachhaltiges Landmanagement stimmen überein mit dem *Fahrplan für ein ressourceneffizientes Europa* der Europäischen Kommission (2011). Im November 2019 stellte die Bundesregierung jedoch fest, dass gemessen am Ziel „unter 30 ha/d bis 2030“ der tägliche Siedlungsflächenanstieg immer noch zu hoch ist und dass „zusätzlich“ Agrarflächen für den PV-FFA-Ausbau beansprucht würden (Bundesregierung 2019, S. 3), sodass das Ziel des Schlüsselindikators 11.1.a der DNS „Nachhaltige Landnutzung“ mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht erreicht wird.

Der PV-Ausbau kann zum Siedlungsflächenanstieg beitragen

Mehrere Studien analysieren die Inanspruchnahme landwirtschaftlicher Nutzflächen durch PV-FFA in Deutschland (Bundesnetzagentur 2016, ZSW 2014, 2018, 2019). Für die 27 EU-Mitgliedsstaaten und Großbritannien wurde ermittelt, dass auf 1,4% der Gesamtfläche eine PV-Stromproduktion erzielt werden könnte, die dreimal so hoch ist wie die EU-Stromnachfrage im Jahr 2016 (Ruiz et al. 2019). Auch ein Workshop des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU 2005, S. 18) kam zu dem Ergebnis, dass für den für die Energiewende erforderlichen PV-Ausbau in Deutschland lediglich eine geringe Fläche notwendig sei. Diese Aussage verkennt jedoch die Gesetzeslage, dass PV-Ausbau auf landwirtschaftlichen Nutzflächen zum Siedlungsflächenanstieg zählt und somit die beiden Nachhaltigkeitsziele *Klimaschutz durch PV-FFA-Ausbau* und *Reduktion des Siedlungsflächenanstiegs* in direkter Konkurrenz stehen. Beispielsweise führte die 4-GWp-PV-FFA-Sonderausschreibung zwischen 2019 und 2021 zu einer täglichen Agrarflächeninanspruchnahme von 5,47 ha, wodurch 18,2% des gemäß DNS noch erlaubten Siedlungsflächenanstiegs beansprucht waren.² Angesichts des PV-Ausbaubedarfs von 340 bis 450 GWp bis 2050 (Fraunhofer ISE 2020) ist anzunehmen, dass der PV-FFA-Anteil am gesamten täglichen Siedlungsflächenanstieg künftig zunehmen wird. Auf regional- und kommunalpolitischer Ebene sind diese proportionalen Verschiebungen in der Flächenbeanspruchung bereits spürbar. Als erstes Bundesland verabschiedete 2019 Bayern eine Zuschlagsmengenbegrenzung von 70 PV-FFA-Projekten pro Jahr, um dem zusätzlichen Siedlungsflächenanstieg durch PV entgegenzusteuern (Enkhardt 2019).

Vor diesem Hintergrund werden künftig innovative PV-Anwendungen benötigt, die nicht zum Siedlungsflächenanstieg auf Kosten der Agrarflächen beitragen. Allein auf Dach-PV sowie PV-FFA auf Konversionsflächen³ und in benachteiligten Gebieten⁴ zu setzen, wie es das *Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)* bis vor kurzem vorsah, reicht nicht aus. Schwimmende PV-Anlagen, et-

wa auf Kiesgruben oder Tagebauseen, und Agri-PV sind Möglichkeiten, den Wirkungsbereich des EEGs sinnvoll zu erweitern, ohne Landnutzungskonflikte zu befeuern, und gleichzeitig durch Doppelnutzung der Fläche eine intersektorale Win-win-Situation zu schaffen. Die Integration von Floating-, Parkplatz- und Agri-PV in die Novelle des EEG ist daher folgerichtig (BMWi 2021, S. 39). Die aktuelle gesetzliche Ausgestaltung greift jedoch viel zu kurz, wie dieser Artikel zeigt.

Im Folgenden wird erläutert, wie die Sektorkopplung zwischen Agrar- und Energiewirtschaft durch die Agri-PV-Diffusion zur nachhaltigen Landnutzung in Deutschland bis 2050 beitragen kann. Dabei sind drei Forschungsfragen zu beantworten:

1. Wie viel landwirtschaftliche Nutzfläche wird durch den Ausbau von PV-FFA bis zur Etablierung einer Flächenkreislaufwirtschaft ab 2050 beansprucht? Die Annahme, dass dieser Ausbau ganz ohne Agri-PV erfolgt, also vollständig Landwirtschafts- durch Siedlungsfläche ersetzt, dient als *Szenario 1 (Referenzszenario)*.
2. Welcher Anteil des PV-FFA-Ausbaus könnte als Agri-PV erfolgen und welche Auswirkungen hätte dies auf den Verlust landwirtschaftlicher Nutzfläche? Diese Wirkungsanalyse resultiert in *Szenario 2*.
3. Wie steht die Agrarflächeninanspruchnahme durch PV-FFA gemäß beiden Szenarien im Verhältnis zum zu erwartenden Siedlungsflächenanstieg durch Ausweitung der Gewerbe-, Wohnraum-, Freizeit- und Verkehrsflächen bis 2050? Dieser Vergleich dient als gesellschaftspolitische Entscheidungsgrundlage, ob und wie weit die Agri-PV zur Erreichung des DNS-Ziels „Nachhaltige Landnutzung“ beitragen kann.

Zuletzt werden aus den Ergebnissen politische Handlungsbedarfe für eine nachhaltige Landnutzung abgeleitet und erläutert, welche Stellschrauben in der Innovationsausschreibung für besondere Solaranlagen angepasst werden müssten, damit die Agri-PV-Diffusion gelingt.

Analyse der Agrarflächeninanspruchnahme durch Photovoltaik bis 2050

Ausgangssituation

Abbildung 1 (S. 98) zeigt die gesamte installierte PV-Leistung in Deutschland Ende 2020 aufgeteilt nach Marktsegmenten. Von 53,3 GWp entfallen 6,8 GWp, etwa 12,7% der PV-Gesamtleistung, auf das Marktsegment PV-FFA auf früheren Agrarflächen. >

2 Bei einem Flächenbedarf von derzeit 1 ha pro installierte MWp PV-Leistung entspricht die 4 GWp-PV-FFA-Sonderausschreibung einer Ackerfläche von 4000 ha in zwei Jahren (4000 ha/731 Tage = 5,47 ha/Tag oder 18,2% des ursprünglichen 30 ha/Tag-Ziels bis 2020).

3 Ehemalige Militärfelder und/oder Flughäfen, Mülldeponien oder ungenutzte Industriebrachen.

4 Agrarflächen mit geringer Bonität, im ländlichen Raum mit wenig infrastruktureller Anbindung, oftmals in Hanglage, beispielsweise Schwäbische Alb, Schwarzwald, Allgäu, Voralpenland, Harz.

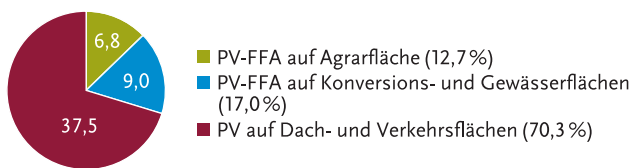


ABBILDUNG 1: Leistung von Photovoltaik (PV) nach Marktsegmenten in Deutschland Ende 2020 in GWp (Daten aus ZSW 2018, Bundesnetzagentur 2016). Gesamte installierte PV-Leistung: 53,3 GWp.

Szenario 1: keine Agri-Photovoltaik

Abbildung 2 zeigt die jährliche PV-Marktsegmententwicklung zwischen den Jahren 2000 und 2050. Angenommen wird eine bis 2050 installierte PV-Leistung von insgesamt 298,3 GWp (100%), eine konservative Annahme angesichts des PV-Ausbaubedarfs von mindestens 340 GWp für ein klimaneutrales Energiesystem in Deutschland (Wirth 2019, Fraunhofer ISE 2020).

Verglichen mit dem PV-FFA-Ausbau wird der agrarflächenneutrale PV-Zubau in den Marktsegmenten Dach-, Gewerbe- und Verkehrsflächen sowie Konversions- und Gewässerflächen trotz eher höherer Kosten als mengenmäßig relevanter angenommen, weil dessen gesellschaftliche Akzeptanz höher ist. Die dadurch erzeugte Leistung nimmt im Zeitraum 2021 bis 2050 jeweils um 2,75 bis 3,6 GWp/a beziehungsweise 0,8 bis 1,1 GWp/a zu. Das Marktsegment PV-FFA auf ehemaligen Agrarflächen wächst dagegen in den nächsten Jahrzehnten um 1,5 bis 6,3 GWp/a verhältnismäßig stark an; davon wird ausgegangen, weil PV-FFA bereits heute subventionsfrei über Stromabnahmeverträge wirtschaftlich umsetzbar sind, während die anderen Marktsegmente aufgrund der höheren Erzeugungskosten für eine wirtschaftliche Installation weiterhin auf Förderung angewiesen sein werden. Der Anteil Agrarflächen am PV-FFA-Zuwachs steigt, weil die wirtschaftlich erschließbaren Konversionsflächen irgendwann ausgeschöpft

sein dürften. Diesem Szenario liegt die Extremannahme zugrunde, dass der heutige gesetzliche Rahmen nicht angepasst wird, also auch in Zukunft bei der Agri-PV weder für die Landwirtschaft noch für die Energieerzeugung eine Förderung bereitsteht und deswegen keine Agri-PV installiert wird.

Abbildung 3 zeigt die gesamte installierte PV-Leistung in Deutschland Ende 2050 aufgeteilt nach Marktsegmenten und gemäß den Simulationsergebnissen aus Szenario 1, ohne Agri-PV-Diffusion. Das Marktsegment PV-FFA auf früheren Agrarflächen wächst von 6,8 GWp auf 123,6 GWp und steigert seinen Marktanteil von 12,7 auf 41,4%.

Abbildung 4 zeigt die Entwicklung der durchschnittlichen Flächeninanspruchnahme von PV-FFA pro Hektar und den Anteil der landwirtschaftlichen Nutzfläche in Deutschland, der bis 2050 durch PV-FFA ersetzt ist.⁵ Zwei Trends sind zu beobachten.

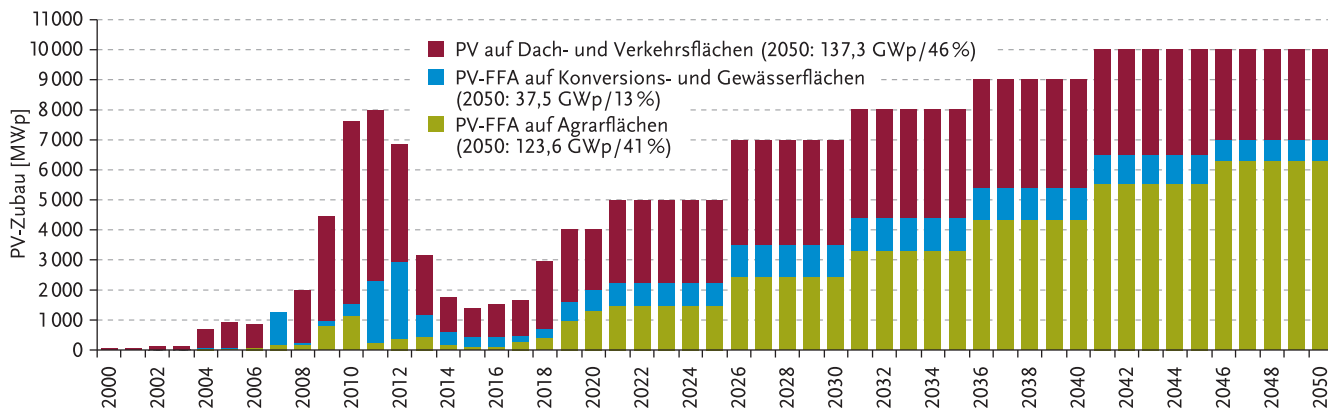
Zum einen beanspruchen PV-FFA mit der Zeit immer weniger Fläche pro installierter Leistung, was auf die Steigerung der Systemeffizienz zurückzuführen ist. Zum anderen führt der PV-FFA-Ausbau zu einer wachsenden Inanspruchnahme von landwirtschaftlichen Nutzflächen. 123,6 GWp PV-FFA-Leistung im Jahr 2050 entsprechen 112 381 ha beziehungsweise 0,69% der gemäß Simulation dann noch zur Verfügung stehenden Agrarflächen in Deutschland. Obwohl in den Jahren zwischen 2021 und 2050 der Anteil des PV-FFA-Segments auf Agrarflächen am PV-Gesamtausbau zunimmt, bleibt wegen der Effizienzsteigerung die absolute zusätzliche Agrarflächeninanspruchnahme nahezu konstant bei durchschnittlich 8,8 Hektar pro Tag. Die durchschnittliche Flächeninanspruchnahme pro Leistung aller bis 2050 installierten PV-FFA beträgt 0,83 ha/MWp.

Szenario 2: Markteinführung der Agri-Photovoltaik

Abbildung 5 (S. 100) zeigt die jährliche PV-Marktsegmententwicklung 2000 bis 2050 mit Agri-PV. Beim Gesamtausbau und beim

⁵ Faktisch dürfte eher mehr Landwirtschaftsfläche verloren gehen, weil bei der PV-FFA-Umnutzung zusätzliche Naturschutzflächen als Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen ausgewiesen werden müssen: https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/5_Energie/Erneuerbare_Energien/Sonnenenergie/Hinweise-zum-Ausbau-von-Photovoltaik-Freiflaechenanlagen.pdf, Seite 14, Hinweis zur Eingriffs-/Ausgleichsregelung.

ABBILDUNG 2: Szenario 1: Jährliche Marktsegmententwicklung von Photovoltaik (PV): PV-Zubau in Deutschland bis 2050 ohne Agri-PV (Daten aus ZSW 2018, Bundesnetzagentur 2016, ab 2021 Prognose aufgrund eigener Annahmen). Gesamte installierte PV-Leistung 2050: 298,3 GWp.



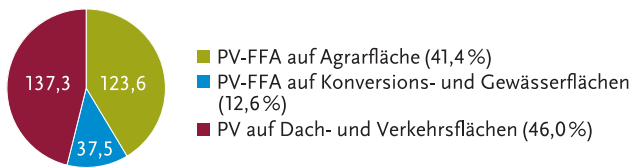


ABBILDUNG 3: Szenario 1: Leistung von Photovoltaik (PV) nach Marktsegmenten in Deutschland Ende 2050 in GWp, ohne Agri-PV (eigene Annahmen). Gesamte installierte PV-Leistung: 298,3 GWp.

Ausbau auf Dach-, Gewerbe- und Verkehrs- sowie Konversions- und Gewässerflächen ändert sich im Vergleich zu Szenario 1 nichts. Die Agri-PV-Markteinführung wird in Szenario 2 ab dem Jahr 2021 angenommen: Zwischen 2021 und 2023 werden im Rahmen der EEG-Innovationsausreibungen 300 MW/a Agri-PV gefördert. Der Anteil der Agri-PV am Zubau steigt dann kontinuierlich an und ist ab dem Jahr 2035 auf gleichem Niveau wie der konventionelle PV-FFA-Ausbau auf Agrarflächen. Dieser wird ab dann schrittweise bis 2050 (Flächenkreislaufwirtschaft) abnehmen. Gemessen am technischen Potenzial von 1700 GWp (50% des gesamten technischen PV-Potenzials in Deutschland) erscheint die in die Berechnung eingeflossene wirtschaftlich erschließbare Agri-PV-Zubaumenge von insgesamt 81,3 GWp bis 2050 (Wirth 2019) durchaus realistisch. Voraussetzung hierfür wäre, dass auf den Politikebenen von EU, Bund und Kommune politisches Lernen stattfindet und daher die multifunktionale Landnutzung mittels Agri-PV ermöglicht und gefördert wird.

Herkömmliche PV-FFA bleiben bis 2030 das dominante Marktsegment auf Agrarflächen. Danach wird in diesem Szenario davon ausgegangen, dass durch die Anschubförderung Agri-PV sich bewähren konnte und Agrar- und Energiepolitik solche Anlagen konventionellen PV-FFA vorziehen. Zwischen 2031 und 2034 verfügen PV-FFA und Agri-PV über ähnlich große Zubaumengen. Ab 2035 ist die jährliche Zubauquote im Agri-PV-Marktsegment höher als bei PV-FFA auf Agrarflächen. Von 2040 an wird Agri-PV von allen PV-Marktsegmenten den größten Zubau verbuchen,

sodass 2050 zwei Drittel aller auf Agrarflächen installierten PV-FFA-Leistung durch Agri-PV ersetzt wären.

Abbildung 6 (S. 100) zeigt die gesamte installierte PV-Leistung in Deutschland Ende 2050 aufgeteilt nach Marktsegmenten und gemäß den Simulationsergebnissen aus Szenario 2, inklusive Agri-PV-Diffusion. Aufgrund der Agri-PV-Diffusion werden PV-FFA auf Agrarflächen nur im Umfang von 42,2 GWp ausgebaut (statt 123,6 GWp in Szenario 1) und steigern ihren Marktanteil nur leicht von 12,7 auf 14,2%. Ausschließlich dieses Marktsegment würde landwirtschaftliche Nutzflächen zu Siedlungsflächen umwandeln und die Agrarproduktion in Deutschland einschränken. 27,2% Marktanteil werden in diesem Szenario von Agri-PV anstelle von PV-FFA eingenommen. Insgesamt wären 2050 256,1 GWp beziehungsweise 85,8% der PV-Leistung agrarflächenneutral umgesetzt, was in etwa dem agrarflächenneutralen PV-Marktanteil von 87,3% Ende 2020 entspricht.

Vergleich der beiden Szenarios

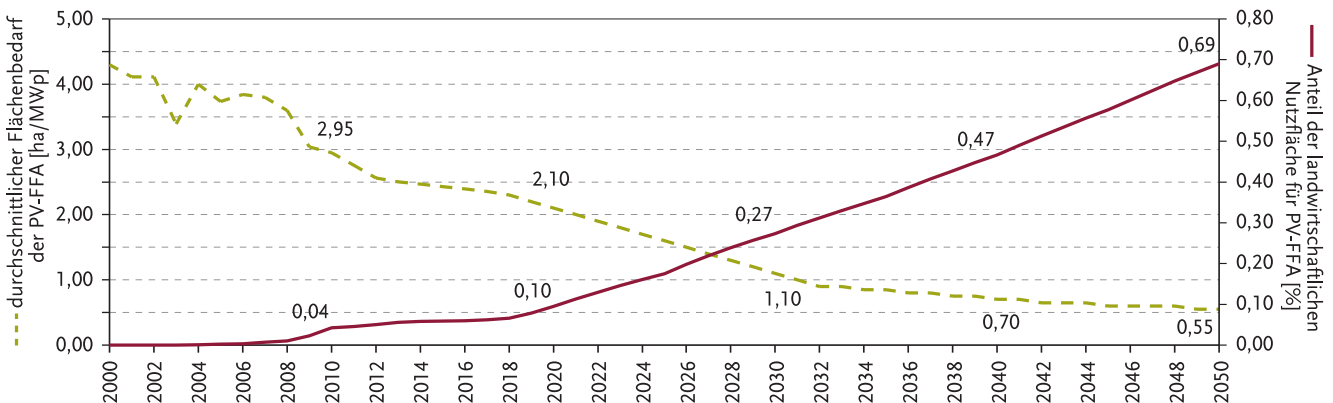
Abbildung 7 (S. 100) präsentiert die Modellierungsergebnisse beider Szenarios im Vergleich. Die Agrarflächeninanspruchnahme durch PV-FFA ist als Anteil der landwirtschaftlichen Nutzfläche angegeben. Die Auswirkung einer Agri-PV-Diffusion entspricht der Differenz beider Szenarien: *Ceteris paribus* wären mit Agri-PV im Jahr 2050 0,37% mehr von der landwirtschaftlichen Nutzfläche erhalten. Absolut würde die erhaltene Agrarfläche 59 295 ha betragen; dies entspricht etwa der Anbaufläche für die inländische Produktion von Baumobst (Äpfel, Birnen, Süß- und Sauerkirschen sowie Pflaumen aller Art) und Strauchbeeren (Kulturheidel-, Johannis- und Himbeeren) (Destatis 2019).

In Abbildung 8 ist die tägliche Inanspruchnahme landwirtschaftlicher Nutzflächen durch PV-FFA in Szenario 1 und 2 in Deutschland bis zur Einführung der Flächenkreislaufwirtschaft 2050 dargestellt. In Szenario 2 erreicht sie im Jahr 2026 mit 7 ha ihr Maximum und sinkt ab dem Jahr 2027 kontinuierlich.

Wenn in Szenario 1 angenommen wird, dass der PV-FFA-Ausbau und die damit einhergehende Flächeninanspruchnahme jähr-



ABBILDUNG 4: Szenario 1: Entwicklung der durchschnittlichen Flächeninanspruchnahme pro Hektar von Photovoltaik-Freiflächenanlagen (PV-FFA) (linke y-Achse) und des durch PV-FFA ersetzten Anteils der landwirtschaftlichen Nutzfläche in Deutschland bis 2050 (rechte y-Achse) (Daten aus UBA 2019, ZSW 2018, 2019, Bundesnetzagentur 2016, ab 2021 Prognose aufgrund eigener Annahmen). Bis 2050 installierte PV-FFA auf ehemaligen Agrarflächen: 123 554 MWp auf 112 381 ha.



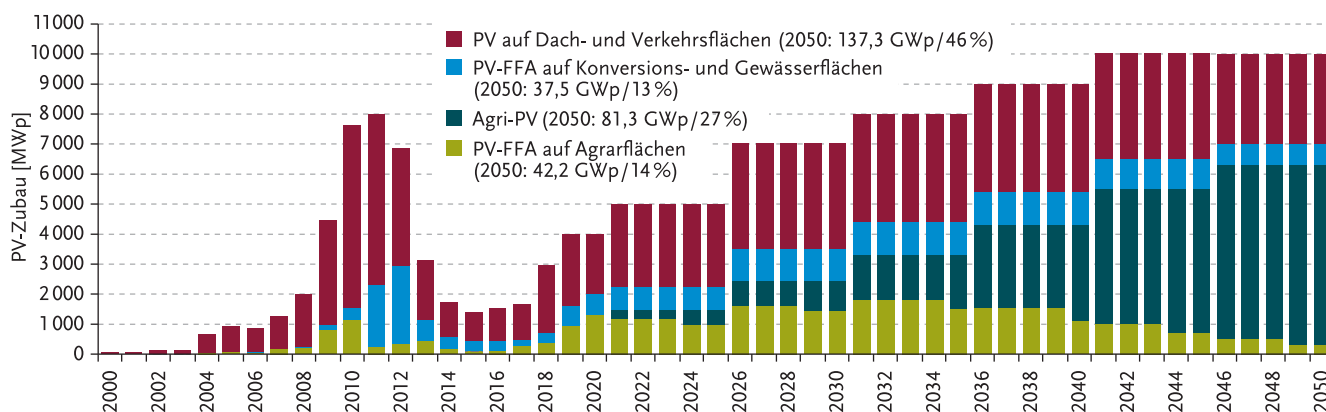


ABBILDUNG 5: Szenario 2: Jährliche Marktsegmententwicklung von Photovoltaik (PV): PV-Zubau in Deutschland bis 2050 mit Agri-PV (Daten aus Bundesnetzagentur 2016, ZSW 2018, ab 2021 Prognose aufgrund eigener Annahmen). Gesamte installierte PV-Leistung 2050: 298,3 GWp.

lich mit konstanter Rate fortschreiten können und nicht wie in Szenario 2 kontinuierlich bis „nettonull“ reduziert werden, ist zum Jahr 2050 wegen der Einführung der Flächenkreislaufwirtschaft ein abrupter Bruch im PV-FFA-Marktsegment nötig.

Die Agri-PV-Markteinführung anstelle eines Teils der zugebauten PV-FFA-Leistung auf Agrarflächen unterstützt dadurch einen geordneten Übergang seitens der Solarwirtschaft zu einer Flächenkreislaufwirtschaft. Ab 2051 wäre der PV-FFA-Ausbau auf Agrarflächen nicht mehr möglich, während der agrarflächenneutrale PV-Ausbau inklusive Agri-PV bei Bedarf weiter voranschreiten könnte.

Ausweitung der Gewerbe-, Wohnraum-, Freizeit- und Verkehrsflächen im Vergleich mit dem PV-Ausbau

Abbildung 9 zeigt die durchschnittliche tägliche Agrarflächeninanspruchnahme durch Gewerbe- Wohnraum-, Freizeit- und Verkehrsflächenausweisungen und den zusätzlichen Siedlungsflächenanstieg durch den PV-FFA-Ausbau auf landwirtschaftlichen Nutzflächen gemäß Szenario 1 (ohne Agri-PV) zwischen 2000 und 2050. Zudem ist das DNS-Minimalziel zum DNS-Schlüsselin-

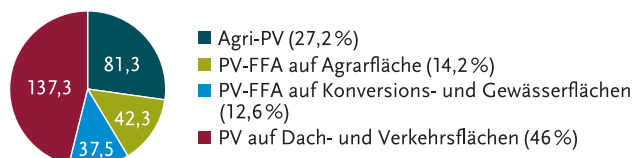
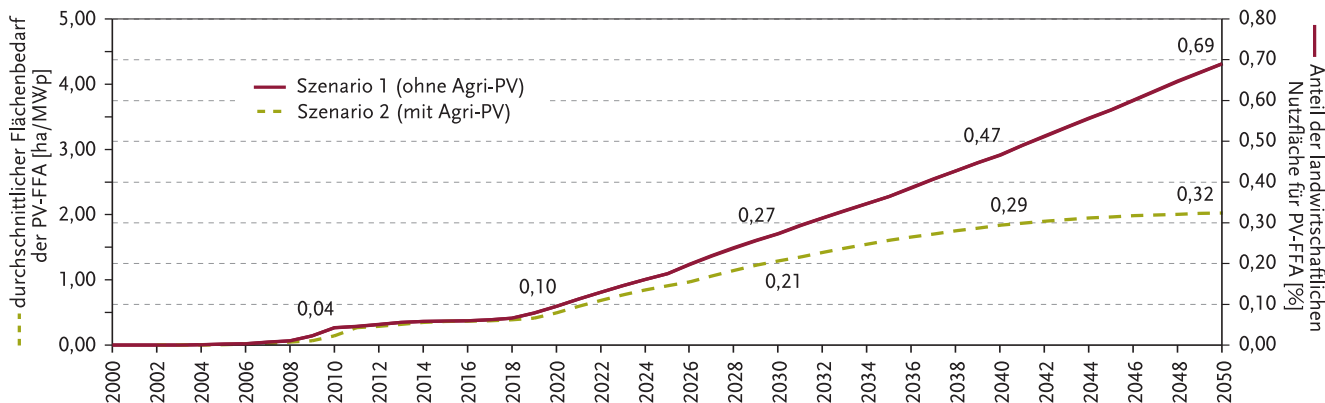


ABBILDUNG 6: Szenario 2: Photovoltaik(PV)-Leistung nach Marktsegmenten in Deutschland Ende 2050 in GWp, mit Agri-PV (eigene Annahmen). Gesamte installierte PV-Leistung: 298,3 GWp.

dikator 11.1.a *Nachhaltige Landnutzung*, die Begrenzung des Siedlungsflächenanstiegs auf unter 30 Hektar pro Tag bis 2030, angezeigt.

In diesem Szenario wird davon ausgegangen, dass bei der Politik betreffend Siedlungsflächen an der Erreichung des < 30 ha/d-Ziels der DNS und des Ziels der Flächenkreislaufwirtschaft bis 2050 gearbeitet wird und daher der Siedlungsflächenzuwachs kontinuierlich sinkt. Wird jedoch der zusätzliche Siedlungsflächenanstieg durch den PV-FFA-Ausbau auf Agrarflächen (für den bisher keine Zahlen erfasst werden, siehe Bundesregierung 2019)

ABBILDUNG 7: Entwicklung des durch Photovoltaik-Freiflächenanlagen (PV-FFA) ersetzten Anteils der landwirtschaftlichen Nutzfläche in Deutschland bis 2050 im Vergleich von Szenario 1 (ohne Agri-PV) und Szenario 2 (mit Agri-PV) (Daten aus ZSW 2018, 2019; Bundesnetzagentur 2016, UBA 2019, ab 2021 Prognose aufgrund eigener Annahmen). Bis 2050 installierte PV-FFA auf ehemaligen Agrarflächen: Szenario 1: 123 554 MWp auf 112 381 ha, Szenario 2: 42 268 MWp auf 53 086 ha.



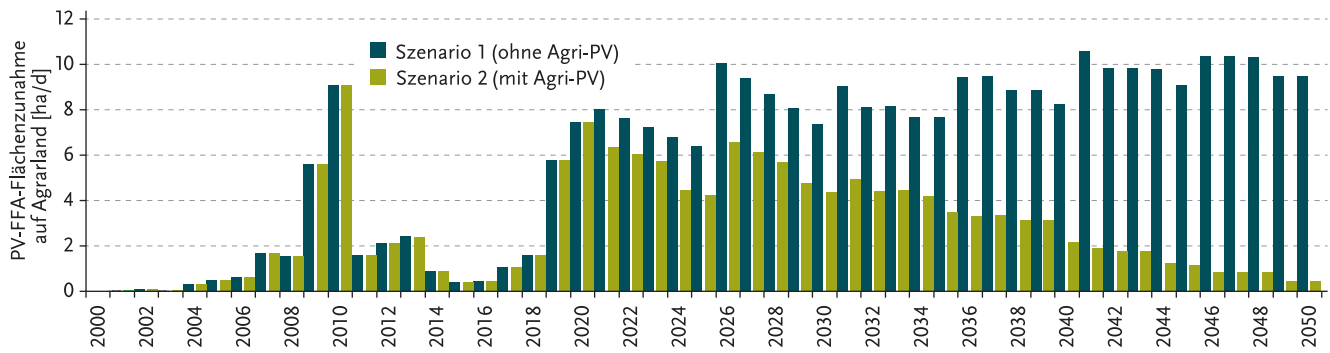


ABBILDUNG 8: Tägliche Neuinanspruchnahme landwirtschaftlicher Nutzflächen durch Photovoltaik-Freiflächenanlagen (PV-FFA) bis zur Einführung der Flächenkreislaufwirtschaft in Deutschland 2050 im Vergleich von Szenario 1 (ohne Agri-PV) und Szenario 2 (mit Agri-PV) (Daten aus Bundesnetzagentur 2016, ZSW 2018, 2019, ab 2021 Prognose aufgrund eigener Annahmen).

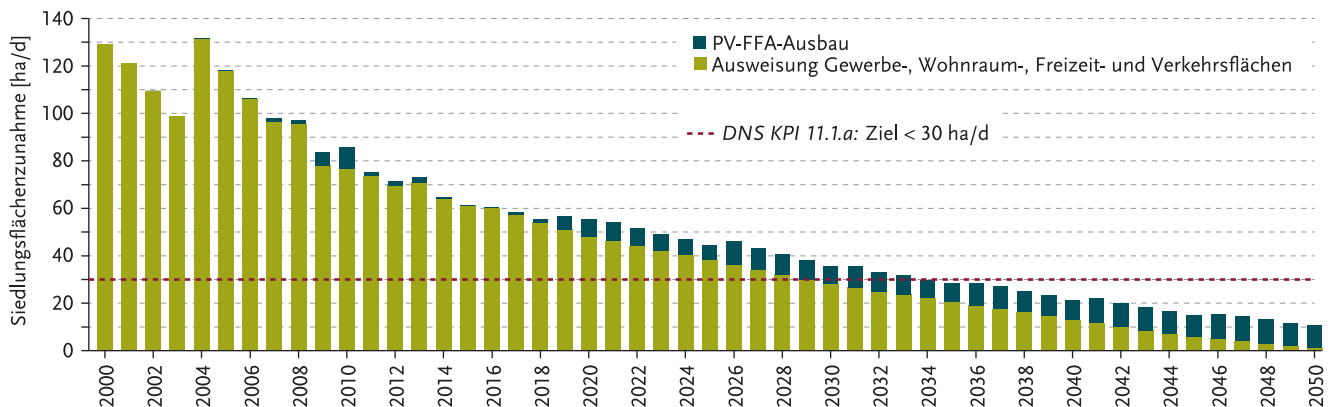
einberechnet, wird deutlich, dass die Zielvorgabe < 30 ha/d erst ab dem Jahr 2034 erreicht wird. Um bei unverändertem PV-FFA-Zubau und mit kontinuierlichem Senkungspfad die Begrenzung ab dem Jahr 2030 einzuhalten, müsste der Siedlungsflächenanstieg (ohne PV-FFA) bereits ab dem Jahr 2025 unterhalb von 30 ha/d liegen. Das heißt, entweder die Ausweisung von neuen Gewerbe-, Wohnraum-, Freizeit- und Verkehrsflächen oder der PV-FFA-Ausbau auf Kosten von Agrarflächen müsste bereits heute in den Landesentwicklungsplänen und Fortschreibungen der Regionalpläne auf kommunaler Ebene eingeschränkt werden. Die gesamte zu erwartende Agrarflächeninanspruchnahme zwischen 2021 und 2050 aufgrund von Gewerbe-, Wohnraum-, Freizeit- und Verkehrsflächenausweisung sowie des PV-FFA-Abaus auf Agrarflächen entspricht 325 027 Hektar, wovon 30 % auf die PV-FFA entfallen und 70 % auf Baumaßnahmen wie Gewerbe- oder Wohnflächen.

Abbildung 10 (S. 102) zeigt die Entwicklung gemäß Szenario 2. Die Annahmen zur Agrarflächeninanspruchnahme durch Gewerbe-, Wohnraum-, Freizeit- und Verkehrsflächenausweisung sind in beiden Szenarios identisch. Der einzige Unterschied in

Szenario 2 besteht in der Annahme, dass ein Teil des zusätzlichen Siedlungsflächenanstiegs durch PV-FFA auf Kosten von Agrarfläche durch Agri-PV ersetzt wird. Dadurch reduziert sich der tägliche absolute Siedlungsflächenanstieg, wodurch in Szenario 2 das DNS-Ziel 11.1.a annähernd 2030 erreicht wird.

In Szenario 2 ist der Siedlungsflächenanstieg in den Sektoren Gewerbe-, Wohnraum-, Freizeit- und Verkehrsflächen ausbau bis 2050 viel entscheidender für die Agrarflächenerhaltung als der PV-FFA-Ausbau auf Kosten landwirtschaftlicher Nutzflächen. Der PV-FFA-Ausbau macht mit 53 086 Hektar lediglich 14 %, der Agrarflächeninanspruchnahme aus. Der Bausektor wäre für 86 % des Siedlungsflächenanstiegs verantwortlich. Bei der Interpretation der Simulationsergebnisse ist zu beachten, dass bis zur Einführung einer Flächenkreislaufwirtschaft im Jahr 2050 eine lineare Reduktion des Siedlungsflächenanstiegs angenommen wurde. Sollte diese Reduktion nicht stattfinden, ergeben sich für den zusätzlichen PV-FFA-Ausbau entsprechend weniger Flächenpotenziale. Wenn simultan dazu der konventionelle PV-Ausbau auf Agrarflächen ausgeweitet wird, steigt auf lokaler Ebene der Flächen- druck und die Landnutzungskonkurrenz nimmt zu. Ergo kann

ABBILDUNG 9: Szenario 1: Tägliche Agrarflächeninanspruchnahme im Jahresdurchschnitt durch Gewerbe-, Wohnraum-, Freizeit- und Verkehrsflächen ausweisung und zusätzlicher Siedlungsflächenanstieg durch Photovoltaik-Freiflächenanlagen (PV-FFA) in Deutschland zwischen 2000 und 2050 (Daten aus UBA 2019, ZSW 2019, ab 2021 Prognose aufgrund eigener Annahmen). Die waagerechte Linie zeigt die Obergrenze des Siedlungsflächenanstiegs gemäß der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie (DNS), 30 ha/d ab 2030.



die Zielsetzung für ein nachhaltiges Landmanagement mit hoher Wahrscheinlichkeit im Jahr 2030 nicht erreicht werden und der Bedarf, agrarflächenneutrale PV-Anwendungen wie die Floating- und Agri-PV als neue Marktsegmente zu etablieren, steigt.

Politische Handlungsempfehlungen für eine nachhaltige Landnutzung

Aus dem Vergleich der beiden Szenarios können mit Blick auf das Ziel des nachhaltigen Landmanagements Handlungsempfehlungen an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) und das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) sowie eine Empfehlung für die *Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie (DNS)* abgeleitet werden:

Empfehlungen an das BMWi

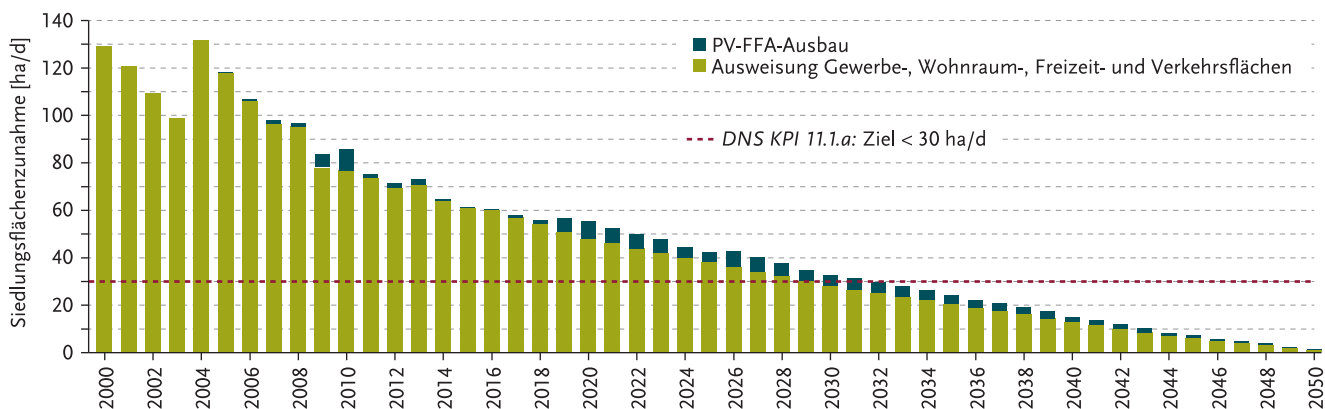
Kontinuität ermöglichen, Ausbaumengen und Leistungsgrenzen erhöhen, Verkomplizierungen vermeiden: Für die Erschließung neuer Marktsegmente bedarf es einer auf mehrere Jahre angelegten Förderung, die kontinuierlich und ausreichend Investitionsanreize gibt. Die Unterstützung für „besondere Solaranlagen“ steht gemäß *Innovationsausschreibungsverordnung (InnAusV)* nur einmalig im Jahr 2022 zur Verfügung, bietet voraussichtlich lediglich ein Volumen von 150 MWp an und begrenzt die projektspezifischen Leistungen auf maximal 2 MWp, obwohl Projekte in der Größenordnung von bis zu 10 MWp umsetzbar wären (BMJV 2021). Für die Markteinführung einer neuen Technologie ist es wichtig, dass diese möglichst schnell wettbewerbsfähig ist, um sich gegenüber bestehenden Lösungen am Markt zu behaupten. Die aktuelle *InnAusV* beschränkt Skaleneffekte und verlangt zusätzlich die Einbindung einer Energiespeicherlösung (Anlagenkombination). Die *InnAusV* verkompliziert dadurch die Einführung einer ohnehin bereits wegen ihrer Intersektoralität komplexen Technologie und verteuert künstlich die Angebote. Damit sich Agri- und Floating-PV-Anlagen in Deutschland durchsetzen kön-

nen, sollte das BMWi seine Förder- und Innovationsstrategie auf mehrere Jahre ausweiten, das Fördervolumen für besondere Solaranlagen auf mindestens 500 MWp/a erhöhen und die Leistungsobergrenze je Projekt auf 10 MWp anheben. Die Verpflichtung zur Anlagenkombination sollte entfallen.

Vorgehen mit dem BMEL abstimmen, Leistungsuntergrenze in der InnAusV erhöhen und Flächenkulisse ausweiten:

Mit der im November 2020 in Kraft getretenen *BMEL-Richtlinie zur Förderung der Energieeffizienz und CO₂-Einsparung in Landwirtschaft und Gartenbau* (BMEL 2020, S. 12) und der Agri-PV-Integration in das *EEG* im Januar 2021 gibt es im deutschen Fördersystem für die kleinflächige Agri-PV-Umsetzung eine Doppelförderung. Die im *EEG* festgesetzte Leistungsuntergrenze von 100 kWp überschneidet sich mit der genannten Richtlinie, weshalb Investoren, speziell Landwirt(inn)e(n) und Betriebsinhaber(innen), evaluieren, durch welches Förderinstrument höhere Renditen zu erwarten sind. Um derartige Überförderungen zu verhindern, sollte sich das BMEL auf die kleinflächigen Agri-PV-Anlagen für die Energieeigenerzeugung und das BMWi auf die großflächigen Projekte für die Netzeinspeisung fokussieren. Dementsprechend sollte in der *InnAusV* die Agri-PV-Leistungsuntergrenze von derzeit 100 auf 750 kWp angehoben werden. Dass in der *InnAusV* unter § 15, Nr. 2 die Agri-PV-Flächenkulisse auf ausschließlich „Ackerflächen“ beschränkt wurde, verhindert die Förderfähigkeit von Agri-PV-Projekten auf Grünland, Dauergrünland/Weidefläche sowie Dauerkulturflächen. Im BMWi und im Ausschuss für Wirtschaft und Energie im Bundestag scheint entweder der Unterschied zwischen „Agrarfläche“ und „Ackerfläche“ unbekannt zu sein oder die Agri-PV-Projektumsetzung sollte aktiv massiv eingeschränkt werden. Sowohl bei der Ausgestaltung der *InnAusV* als auch der Festlegung der Agri-PV-Flächenkulisse wäre das BMWi gut beraten gewesen, in den Austausch mit dem BMEL zu treten, um beide Förderregime sauber voneinander abzugrenzen und den Hinweis zu erhalten, dass Ackerflächen nur eine von mehreren Kategorien landwirtschaftlicher Nutzflächen sind.

ABBILDUNG 10: Szenario 2: Tägliche Agrarflächeninanspruchnahme im Jahresdurchschnitt durch Gewerbe-, Wohnraum-, Freizeit- und Verkehrsflächenausweisung und zusätzlicher Siedlungsflächenanstieg durch Photovoltaik-Freiflächenanlagen (PV-FFA) in Deutschland zwischen 2000 und 2050 (Daten aus UBA 2019, ZSW 2019, ab 2021 Prognose aufgrund eigener Annahmen). Die waagerechte Linie zeigt die Obergrenze des Siedlungsflächenanstiegs gemäß der *Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie (DNS)*, 30 ha/d ab 2030.



Agri-PV-Qualitätssicherung im Aufstellungsbeschluss zum vorhabenspezifischen B-Plan-Verfahren einfordern: Bei der Agri-PV sollte im Bauantragsverfahren keine Änderung der Flächennutzungsplanung erfolgen, sondern der Status landwirtschaftliche Nutzfläche erhalten bleiben. Dadurch wäre für die landwirtschaftliche Tätigkeit unter der Agri-PV-Anlage die Beihilfefähigkeit gemäß der *Direktzahlungsdurchführungsverordnung (DirektZahlDurchfV)*⁶ weiterhin gegeben und wegen der überwiegend positiven Umweltwirkung der Projekte fiele die Verpflichtung zu Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen zur Umweltkompensation wesentlich geringer aus oder entfiel gänzlich. Bei der Zulassung für Agri-PV-Projekte in der *InnAusV* sollte die Bundesnetzagentur darauf achten, dass beim Aufstellungsbeschluss für einen B-Plan auf kommunaler Ebene der Agri-PV-Qualitätsstandard nach *DIN SPEC 91434*⁷ verpflichtend verlangt wird, damit bundesweit Minimalanforderungen an die Qualität durchgesetzt werden können. Zur Teilnahme an der *InnAusV* sollten nur hochaufgeständerte Agri-PV-Doppelnutzungsanlagen (*DIN SPEC 91434* Kategorie 1) zugelassen sein, die auch einen Beitrag zur Anpassung der Landwirtschaft an den Klimawandel leisten können. Agri-PV-Parallelnutzungsanlagen (*DIN SPEC 91434* Kategorie 2) sollten über die herkömmlichen PV-FFA-Ausschreibungen, jedoch ohne Einschränkung der Flächenkulisse gefördert werden, weil die Agri-PV-Parallelnutzung der Agrarfläche bereits heute mit klassischen PV-FFA kostenwettbewerbsfähig ist. Siehe zu dieser Differenzierung auch die Basisdefinition und die ergänzenden Kann-Anforderungen in Schindele 2021 (in diesem Heft).

Forschung und Entwicklung sowie Raumplanungsorganisationen unterstützen: Zur Unterstützung der Agri-PV-Forschung sollte zu Beginn der Markteinführung zwischen 2021 und 2024 ein wissenschaftliches Mess- und Auswerteprogramm (MAP) durchgeführt werden. Für die Identifikation geeigneter Agri-PV-Flächen sollten die 113 Raumplanungsorganisationen in Deutschland durch Bund und Länder finanzielle Unterstützung erhalten, um Flächenpotenzialanalysen durchzuführen und die Ergebnisse in die Regionalplanung einfließen zu lassen.

Empfehlungen an das BMEL

Entscheidungshoheit über die knappe Ressource Boden dem BMEL zuweisen: In Deutschland besteht hinsichtlich der Sachverwaltung der knappen Ressource Boden eine Polity-Problematik. Offiziell ist das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) für nachhaltiges Landmanagement zuständig. Allerdings hat das BMU weder für Wirtschaftswachstum noch für den Ausbau erneuerbarer Energien oder die landwirtschaftliche Nutzung von Agrarflächen die Federführung. Der Handlungsspielraum des BMU, durch eigenständige Maßnahmen den täglichen Siedlungsflächenanstieg zu begrenzen und dadurch Agrarflächen zu erhalten, ist somit sehr begrenzt. Weil der größte Widerstand gegen den täglichen Siedlungsflächenanstieg und den PV-FFA-Ausbau auf Agrarflächen vom Landwirtschaftssektor kommt und das BMEL mit der Bioökonomie großen Einfluss auf die Tank-oder-Teller-Diskussion hat sowie maßgeb-

lich die EU-GAP-Maßnahmen steuert, erscheint das BMEL mit seinen vielseitigen politischen Gestaltungsmöglichkeiten hinsichtlich der Ressource Boden als „Landmanager“ wesentlich besser geeignet als das BMU. Folgerichtig sollte das BMEL die Einführung der Flächenkreislaufwirtschaft und die Erreichung des Ziels nachhaltiges Landmanagement verantworten und nicht das BMU.

Subsidiaritätsprinzip im Landmanagement einschränken und Landnutzungsobergrenze für PV-FFA einführen:

Die Reduktion des Siedlungsflächenanstiegs wird auch durch das Subsidiaritätsprinzip erschwert. Denn die politische Entscheidung, wie eine Fläche beansprucht wird, obliegt den Kommunen und regionalen Verwaltungen, die sich wiederum an die Vorgaben der Landesentwicklungspläne und Regionalpläne halten sollten. Gemeinden stehen jedoch im innerdeutschen Wettbewerb um Gewerbe- und Industrieansiedlung und sind bei Flächenfestsetzungen für den Klimaschutz aufgrund vermehrter und intensiverer Landnutzungskonflikte in ihrer Kompetenz überfordert. Auch hat die Gemeindeebene nicht den Überblick über den Siedlungsflächenanstieg auf Agrarflächen auf Landes- oder Bundesebene und sollte somit nicht in letzter Instanz über die Flächenfestsetzung entscheiden dürfen. Kommunale Beschlüsse für die Ausweisung neuer Gewerbe-, Wohnraum-, Freizeit- und Verkehrsflächen sowie PV-FFA auf Agrarflächen sollten nur mit Zustimmung des BMEL gefasst werden können. In diesem Zusammenhang sollte das BMEL eine juristische Analyse veranlassen, um die Legitimität der Ziele im *Fahrplan für ein ressourceneffizientes Europa* (Europäische Kommission 2011) und der im *Klimaschutzplan 2050* (BMUB 2016) vorgesehenen Einführung einer Flächenkreislaufwirtschaft zu prüfen. Schließlich könnte die Vereinbarkeit eines dauerhaften Verbots der Umwandlung landwirtschaftlicher Nutzflächen für Infrastrukturmaßnahmen mit den im Grundgesetz abgesicherten Eigentumsrechten nicht ohne weiteres gegeben sein. Bei der Steuerung der PV-Förderung könnten Pfadabhängigkeiten in der Gesetzgebung fortgeführt werden, indem die *EEG-Länderöffnungsklausel* einerseits die PV-FFA-Flächenkulisse von benachteiligten Gebieten auf alle Agrarflächen ausweitet, aber andererseits je Bundesland eine Landnutzungsobergrenze für PV-FFA von 1,5 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche bis 2050 festlegt. Agrarflächenneutrale PV-Anwendungen wie Floating- und Agri-PV sollten von dieser Obergrenze ausgenommen werden.

Anerkennung der landwirtschaftlichen Tätigkeit unter Agri-PV als EU-GAP-Eco-Scheme und Nachhaltigkeitsziele kombiniert betrachten:

Damit in Deutschland das Dilemma zwischen Agrarflächenförderung und PV gelöst wird, sollte die *DirektZahlDurchfV* dergestalt ergänzt werden, dass in § 12 Abs. 3 Nr. 6 eine Ausnahme für Agri-PV-Anlagen vorgesehen wird: „[...] mit Ausnahme von Agri-PV-Anlagen gemäß *DIN SPEC 91434*.“ Das EU-Recht erlaubt an dieser Stelle mehr Handlungsspielraum, als national umge-

>

⁶ www.gesetze-im-internet.de/direktzahlDurchfV/DirektZahlDurchfV.pdf

⁷ Die Ergebnisse der *DIN SPEC 91434* wurden am 16.04.2021 veröffentlicht: www.beuth.de/de/technische-regel/din-spec-91434/337886742.

setzt wurde. Da der nationale Strategieplan Deutschlands zur Umsetzung der EU-GAP ab 2023 eine Umwidmung von Fördermitteln aus der 1. in die 2. Säule vorsieht, wird die *DirektZahlDurchfV* voraussichtlich noch in dieser Legislaturperiode durch das BMEL angepasst und im Bundestag neu beschlossen. Vor diesem Hintergrund könnte für die Agri-PV-Umsetzung zeitnah und unkompliziert durch die Ausnahmeregelung Rechtssicherheit geschaffen werden. Agri-PV trägt zur Erreichung wesentlicher EU-GAP-Ziele bei, etwa Sicherung der Einkommen von Landwirten, Klimaschutzmaßnahmen und Erhaltung von natürlichen Ressourcen. Damit in anderen EU-Mitgliedstaaten kein ähnliches Dilemma aufkommt und Landwirte zugleich einen Anreiz erhalten, bei der

könnte für den Sonderkulturanbau der Indikator *Widerstandsfähigkeit im Obstbau* eingeführt werden, mit dem Ziel „Resilienzsteigerung des Obstbaus“, indem bis 2030 mindestens 10% der Anbaufläche mittels Agri-PV geschützt werden. Betriebsinhaber(innen) und Landeigentümer(innen) hätten finanzielle Vorteile, wenn bisherige plastikbasierte Schutzsysteme, wie Hagelschutznetze oder Folienschutzhauben, durch Agri-PV ersetzt würden und so die gekoppelte Solarstromerzeugung die Investitionskosten größtenteils übernehme. Hinzu kommen die Diversifizierung des Einkommens, weniger Müll und Arbeitszeit sowie ein geringerer ökologischer Fußabdruck und die Reduktion des Wasserbedarfs durch Abmilderung von Evaporation und Transpiration.

Agri-PV trägt zur Erreichung wesentlicher Ziele der Gemeinsamen Agrarpolitik der Europäischen Union bei: Einkommenssicherung für Landwirt(inn)e(n), Klimaschutz, Erhaltung natürlicher Ressourcen. Ökologisch ist die Flächennutzung am besten, bei der Agri-PV mit ökologischer Landwirtschaft gekoppelt wird. Bei der Agri-PV-Markteinführung könnten Anreize für die Umstellung von konventionell auf ökologisch gesetzt werden.

Agri-PV-Umsetzung mitzuwirken, könnte die landwirtschaftliche Tätigkeit in Kopplung an Agri-PV als *EU-GAP-Eco-Scheme*-Maßnahme anerkannt werden. So wäre das Risiko von etwaigen Ernterückgängen gerade in der Markteintrittsphase zumindest teilweise kompensiert und die Flächeneffizienzsteigerung durch multifunktionale Landnutzung würde honoriert. Des Weiteren hätte die Aufnahme in den Eco-Scheme-Mechanismus den Vorteil, dass die landwirtschaftliche Tätigkeit unter der PV-Anlage dokumentiert und kontrolliert werden müsste, was die Akzeptanz in der Gesellschaft und eine evidenzbasierte Politik langfristig unterstützen würde. Ökologisch betrachtet ist die Flächennutzung am wertvollsten, bei der Agri-PV mit Bio-Landwirtschaft gekoppelt wird. Die Agri-PV-Markteinführung könnte daher mit der Zielsetzung der *DNS* zur Ausweitung des Ökolandbaus von derzeit 9% auf mindestens 20% bis 2030 kombiniert werden, indem sie über die Ausgestaltung eines Agri-PV-Fördersystems Anreize für die vollständige oder teilweise Betriebsumstellung von konventionell auf biologisch setzen.

Empfehlung für die *DNS*

Anpassung der Landwirtschaft an den Klimawandel als *DNS-Schlüsselindikator aufnehmen:* Vor dem Hintergrund der Verwundbarkeit des Landwirtschaftssektors durch den Klimawandel ist es erstaunlich, dass die Anpassung der Agrarwirtschaft an die Erderwärmung nicht Gegenstand der *DNS* ist. Unter *SDG 2. Den Hunger beenden, Ernährungssicherheit und eine bessere Ernährung erreichen und eine nachhaltige Landwirtschaft fördern* (BMWi 2021, S. 96) könnte das Nachhaltigkeitspostulat 2.1. *Landbewirtschaftung durch einen neuen Schlüsselindikator 2.1.c Anpassung an den Klimawandel* ergänzt werden. Als einer von mehreren Bausteinen

Fazit

Gemessen am großen Ausbaupotenzial der Agri-PV, den Zielen für eine nachhaltige Landnutzung sowie der dringenden Notwendigkeit intersektoraler Zusammenarbeit bleibt die von der Bundesregierung beschlossene Agri-PV-Markteinführung weit hinter den Erwartungen zurück. Für die kleinflächige Agri-PV-Umsetzung werden vielmehr Doppelfördersysteme errichtet und die Flächenkulisse in der *InnAusV* wird mit der Begrenzung auf „Ackerflächen“ unerklärlicherweise stark eingeschränkt.

Das zögerliche Handeln der Regierung bei der Förderung von agrarflächenneutralen PV-Anwendungen schiebt die Erreichung des Ziels nachhaltige Landnutzung in weite Ferne. Das Ziel „unter 30 Hektar Siedlungsflächenzunahme pro Tag bis 2030“ gilt bereits heute aufgrund der hohen Rate an Neuausweisungen von Gewerbe-, Wohnraum-, Freizeit- und Verkehrsflächen als nicht mehr realistisch. Die Bundesregierung lässt zudem die Chance verstreichen, intersektorale Lösungsansätze ausreichend zu fördern und so den zusätzlichen PV-bedingten täglichen Siedlungsflächenanstieg abzuschwächen. Regionale Landnutzungskonflikte werden durch das sehr geringe Agri-PV-Fördervolumen nicht gemildert und die heimische Nahrungsmittelproduktion weiter reduziert.

Die Ergebnisse der Wirkungsanalyse einer Agri-PV-Markteinführung zeigen, dass der zusätzliche Siedlungsflächenanstieg durch PV-FFA mittels Agri-PV abgemildert werden kann: Insgesamt könnten bis 2050 81,3 GWp PV-FFA-Leistung durch Agri-PV-Zubau ersetzt werden und so 59 295 Hektar für die landwirtschaftliche Tätigkeit erhalten bleiben. Damit die Agri-PV-Technik diesen Beitrag zur nachhaltigen Landnutzung in Deutschland leis-

ten kann, wird für ihre Markteinführung ein Fördervolumen von 300 MWp jährlich zwischen 2021 und 2024 empfohlen. Die förderfähige Flächenkulisse sollte auf alle landwirtschaftlichen Nutzflächen ausgeweitet, die maximale förderfähige Projektgröße von 2 auf 10 MWp angehoben werden. Damit bundesweit Minimal-kriterien an die Agri-PV-Qualität gestellt werden, sollte auf kommunaler Ebene beim Aufstellungsbeschluss für einen vorhaben-spezifischen B-Plan der Bezug zum Standardisierungsprozess der *DIN SPEC 91434* hergestellt werden. Die Sektorkopplung zwischen Land- und Solarwirtschaft mittels Agri-PV kann dann zur Erhaltung landwirtschaftlicher Nutzflächen einen wesentlichen Beitrag leisten.

Diese Arbeit wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) Deutschland gefördert (Förderkennzeichen: 033L098AN).

Ich danke *Harry Wirth* und *Max Trommsdorff* (Fraunhofer ISE), meinen Doktorvätern *Josef Schmid* und *Daniel Buhr* (Universität Tübingen) sowie drei anonymen Gutachter(inne)n für wertvolle Hinweise zu meinem Beitrag.

Der Autor hat keine finanziellen Interessen und sonstigen Interessenkonflikte zu deklarieren. Die Forschung für diesen Artikel wurde im Rahmen einer Dissertation am Fraunhofer ISE durchgeführt, der jetzige Arbeitgeber des Autors hat keinerlei Einfluss auf die Inhalte genommen.

Literatur

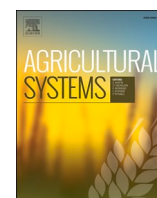
- BMEL (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft). 2018. *Landwirtschaft verstehen. Fakten und Hintergründe*. Berlin: BMEL.
- BMEL. 2020. *Richtlinie zur Förderung der Energieeffizienz und CO₂-Einsparung in Landwirtschaft und Gartenbau. Teil A – Landwirtschaftliche Erzeugung, Wissenstransfer*. 18. September 2020. Bonn: BMEL.
- BMJV (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz). 2021. *Verordnung zu den Innovationsausschreibungen (Innovationsausschreibungsverordnung – InnAusV). § 15 Festlegung zu besonderen Solaranlagen*. www.gesetze-im-internet.de/innausv/___15.html (abgerufen 19.06.2021).
- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit). 2005. *Photovoltaik-Freiflächenanlagen. Aktuelle Erfahrungen und Konfliktlinien. Workshop-Dokumentation*. <https://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/dokumentation-endfassung-workshop.pdf> (abgerufen 24.06.2021).
- BMUB (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Nukleare Sicherheit). 2016. *Klimaschutzplan 2050. Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung*. Berlin: BMUB.
- BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie). 2021. *Referentenentwurf des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Verordnung zur Umsetzung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes 2021 und zur Änderung weiterer energierechtlicher Vorschriften*. Bearbeitungsstand: 12.05.2021, 14:56 Uhr. www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/V/verordnung-zur-umsetzung-des-eeg-2021-und-zur-aenderung-weiterer-energierechtlicher-vorschriften.pdf?__blob=publicationFile&v=6 (abgerufen 23.06.2021).
- Bundesnetzagentur (Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen). 2016. *Bericht über die Flächeninanspruchnahme für Freiflächenanlagen nach § 36 Freiflächenausschreibungsverordnung (FFAV)*. Bonn: Bundesnetzagentur.
- Bundesregierung. 2016. *Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie*. Neuauflage 2016. Berlin: Bundesregierung.
- Bundesregierung. 2019. *Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Stephan Protschka, Peter Felser, Franziska Gminder, weiterer Abgeordneter und der Fraktion der AfD – Drucksache 19/11956*. Direkte und indirekte Landnutzungsänderungen. Drucksache 19/12697, 26.08.2019. Berlin: Deutscher Bundestag, 19. Wahlperiode.
- Bundesregierung. 2021. *Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie. Weiterentwicklung 2021*. Berlin: Bundesregierung.
- Destatis (Statistisches Bundesamt). 2019. *Statistisches Jahrbuch 2019. Kapitel 19, Land- und Forstwirtschaft*. Wiesbaden: Destatis. https://www.destatis.de/DE/Themen/Querschnitt/Jahrbuch/jb-land-forstwirtschaft.pdf;jsessionid=6A9A98A8B2B5857D07FC1D3DC1D20574.live711?__blob=publicationFile (abgerufen 24.06.2021).
- Enkhart, S. 2019. 1. Photovoltaik-Sonderausschreibung: Höchster Zuschlagswert bei 8,40 Cent pro Kilowattstunde. *PV Magazine*, 28. März. <https://www.pv-magazine.de/2019/03/28/1-photovoltaik-sonderausschreibung-hoehster-zuschlagswert-bei-840-cent-pro-kilowattstunde> (abgerufen 20.06.2021).
- Europäische Kommission. 2011. *Fahrplan für ein ressourcenschonendes Europa. Brüssel: Europäische Kommission*. KOM(2011) 571. https://www.europarl.europa.eu/meetdocs/2009_2014/documents/com/com_com%282011%290571_/com_com%282011%290571_de.pdf (abgerufen 24.06.2021).
- Fraunhofer ISE. 2020. *Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem 2050. Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen Update unter einer Zielvorgabe von 65% CO₂-Reduktion in 2030 und 100% in 2050*. <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Fraunhofer-ISE-Studie-Wege-zu-einem-klimaneutralen-Energiesystem-Update-Zielverschaeferung.pdf> (abgerufen 20.06.2021).
- Ruiz, P. et al. 2019. ENSPRESO: An open, EU-28 wide, transparent and coherent database of wind, solar and biomass energy potentials. *Energy Strategy Reviews* 26: 100379. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100379>.
- Schindele, S. 2021. Feldfrüchte und Strom von Agrarflächen: Was ist Agri-Photovoltaik und was kann sie leisten? *GAIA* 30/2: 87–95. <https://doi.org/10.14512/gaia.30.2.6>.
- UBA (Umweltbundesamt). 2019. *Siedlungs- und Verkehrsfläche. Anhaltender Flächenverbrauch für Siedlungs- und Verkehrszwecke*. Dessau: Umweltbundesamt.
- Wirth, H. 2019. *Integrierte Photovoltaik – Flächen für die Energiewende. Positionspapier*. Freiburg im Breisgau: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE.
- ZSW (Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg). 2014. *Vorbereitung und Begleitung der Erstellung des Erfahrungsberichts 2014 gemäß § 65 EEG, im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Vorhaben IIc Solare Strahlungsenergie. Wissenschaftlicher Bericht*. Stuttgart: ZSW.
- ZSW. 2018. *Vorbereitung und Begleitung bei der Erstellung eines Erfahrungsberichts gemäß § 97 Erneuerbare-Energien-Gesetz. Teilvorhaben II c: Solare Strahlungsenergie*. Erstellt im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. <https://www.zsw-bw.de/uploads/media/zsv-boschundpartner-vorbereitung-begleitung-eeg.pdf> (abgerufen 24.06.2021).
- ZSW. 2019. *Untersuchung zur Wirkung veränderter Flächenrestriktionen für PV-Freiflächenanlagen. Kurzstudie im Auftrag der innogy SE*. Ulm: ZSW.



Stephan Schindele

Studium der Betriebswirtschaft am der ESB Business School der Hochschule Reutlingen und der California State University East Bay, USA. 2015 bis 2020 Lehrtätigkeit in Energiepolitik an der Hochschule Reutlingen. Dissertation im Bereich Agri-Photovoltaik am Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE in Freiburg im Breisgau. Seit 2020 Head of Agri-PV bei BayWa r.e. Solar Projects in Freiburg im Breisgau. Arbeitsschwerpunkte: Agri-PV-Systementwicklung, globale Agri-PV-Markterschließung, Synergien zwischen der Land- und Energiewirtschaft.

Appendix D: Publikation “Agricultural Systems”



An analytical framework to estimate the economics and adoption potential of dual land-use systems: The case of agrivoltaics

Arndt Feuerbacher^{a,*}, Moritz Laub^{a,b}, Petra Högy^c, Christian Lippert^d, Lisa Pataczek^b, Stephan Schindele^e, Christine Wieck^a, Sabine Zikeli^b

^a Institute of Agricultural Policy and Markets, University of Hohenheim, 70599 Stuttgart, Germany

^b Center for Organic Farming, University of Hohenheim, 70599 Stuttgart, Germany

^c Institute of Landscape and Plant Ecology, University of Hohenheim, 70599 Stuttgart, Germany

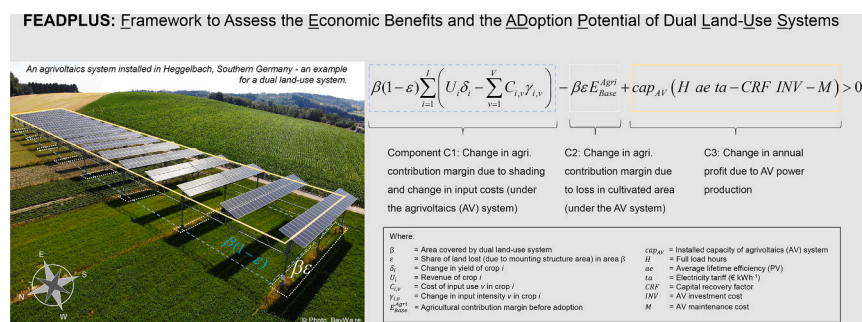
^d Institute of Farm Management, University of Hohenheim, 70599 Stuttgart, Germany

^e Institute of Political Science, University of Tübingen, 72074 Tübingen, Germany

HIGHLIGHTS

- Dual land-use systems, like agrivoltaics, allow for high land-use efficiency and are becoming increasingly relevant
- We report a novel analytical Framework to assess the economic benefits and the adoption potential of dual land-use systems (FEADPLUS)
- The framework allows for a analysis of farm-specific synergies and trade-offs determining agrivoltaic profitability
- Profitability is most dependent on photovoltaic parameters, but farm specific effects may tip the scale towards adoption
- The framework meets researchers' demands for a simple tool to analyze dual land-use systems at various scales and allows for many extensions

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Editor: Jagadish Timsina

Keywords:

Dual land-use systems
Agrivoltaics
Agrophotovoltaics
Farming systems
Adoption potential
Economic analysis

ABSTRACT

CONTEXT: Dual land-use systems allow for a high land-use efficiency and are becoming increasingly relevant amid the rising scarcity of land. Agrivoltaics is a prominent example, yet there are farming system-specific trade-offs when simultaneously producing agricultural output and photovoltaic power.

OBJECTIVE: Our objective is to report a novel analytical Framework to assess the Economic benefits and the Adoption Potential of dual Land-Use Systems (FEADPLUS). The framework is developed with the goal of enabling a straightforward application in large farm-level datasets.

METHODS: FEADPLUS is grounded in neoclassical economic theory and applied to the case of agrivoltaics. An annualized profitability condition is derived and decomposed to identify the main components determining the agrivoltaic systems' economic viability, allowing for a comprehensive analysis of farm-specific synergies and trade-offs. Modifications enable calculation of the break-even electricity tariff and the relative change in

* Corresponding author.

E-mail address: a.feuerbacher@uni-hohenheim.de (A. Feuerbacher).

agricultural contribution margin below the agrivoltaic system. The framework's functionality is demonstrated using data for cereal and vegetable farming systems on the Filder Plain, Southern Germany.

RESULTS AND CONCLUSIONS: We show that farm-specific characteristics explain differences in the adoption potential under equal solar radiations. Cereal and vegetable farms could adopt agrivoltaics at a tariff of 8.63 and 9.00 EUR-cents kWh⁻¹, respectively. Yet, the agricultural contribution margins from land cultivated below the agrivoltaics system decline by 40.3% and 73.9%, respectively. The decline is due to shading effects on crop yields, higher machinery and labor costs, and the foregone agricultural contribution margins from area lost due to the agrivoltaics mounting structure. In the presence of such trade-offs, the adoption of agrivoltaics is more profitable for farms growing low-value crops, such as cereals, than high-value crops like vegetables. Our sensitivity analyses show that this may change if there are synergies, e.g., positive shading effects on yield. Moreover, they indicate that agricultural contribution margins in some scenarios, which could incentivize farmers to abandon farming below the agrivoltaics system. This highlights the need for policymakers to put adequate safeguards in place.

SIGNIFICANCE: Dual land-use systems are still understudied, but their high land-use efficiency becomes increasingly relevant in light of the mounting pressures on land. FEADPLUS is the first framework that allows estimation of economic benefits and adoption potential across farming systems and specific technology setups under different policy designs. To this end, it meets researchers' demands for a simple tool and allows for many extensions, e.g., incorporation of stochastics or aspects of (dynamic) optimization and economies of scale.

1. Introduction

Land provides important habitat for wildlife and is the main production input to feed a growing global population. It is not only needed to sustain agricultural production, it also needs to meet many other demands of mankind, e.g., land for settlements, transportation infrastructure, disaster prevention and leisure activities. Dual land-use systems are characterized by high degrees of land-use efficiency since they allow for the combined use of land for agricultural production and other desired, land-intensive, outputs.¹ Agrivoltaics (AV; also referred to as agrophotovoltaics or Agri-PV) is one such dual land-use system, which lately has received increased attention and interest (e.g., Amaducci et al., 2018; Parkinson and Hunt, 2020). The transformation of energy systems towards clean energy sources has been accompanied by adverse impacts on biodiversity, landscape aesthetics and changes in land cover and use (Allison et al., 2014; Hernandez et al., 2014). More generally, the food-energy nexus is expected to increase the scarcity of land for food production as more land is needed for energy generation (Tilman et al., 2009). This is reflected in the “food vs. fuel” debates, which center on the question about the primary purpose of land-use. While this debate has mostly involved criticisms of biofuels, the focus increasingly is shifted towards other renewable energy sources, such as wind and photovoltaics (PV). For example, a recent study found the highest potential of PV to be on areas, currently used as cropland (Adeh et al., 2019).

Against this background, AV is a promising dual land-use system that can mitigate these trade-offs (Dinesh and Pearce, 2016; Dupraz et al., 2011; Götzberger and Zastrow, 1982; Miao and Khanna, 2020). AV allows for a simultaneous production of agricultural output and PV power on the same area. It therefore has a substantially higher land-use efficiency than conventional ground-mounted PV systems. However, recent research shows that the levelized cost of energy of AV can be about 38% higher compared to ground-mounted PV (Schindele et al., 2020). Firstly, the installation of the PV panels in AV systems is usually associated with higher cost (e.g., due to the mounted steel structure to elevate the panels). Secondly, the installed AV system can also lead to changes in crop yields due to the reduction in photosynthetically active radiation and to higher production cost (e.g., more labor requirement of

agricultural operations). In some farming systems, these additional costs might be offset by cost-saving synergies or increases in yields of (shade-loving) crops. In other farming systems, adoption is only economically feasible if AV systems benefit from higher tariffs than ground-mounted PV. Past studies focused on the potential of AV at either single crop or farm-level (Barron-Gafford et al., 2019; Dinesh and Pearce, 2016; Schindele et al., 2020) or studied the potential of AV at the regional level, neglecting the heterogeneity of farming systems (Sacchelli et al., 2016). However, both the farming system-specific differences in AV's opportunity cost and the solar radiation based regional differences in AV electricity yield determine the economic feasibility and therefore the adoption of AV.

The objective of this study is to develop and report an analytical Framework to assess the Economic benefits and the Adoption Potential of dual Land-Use Systems (FEADPLUS), which accounts for the heterogeneity of farm-level, spatial and technological determinants. Using representative data from agricultural landholdings, FEADPLUS can be applied to quantitatively assess the potential of dual land-use systems at varying degrees of policy support and considering various technology designs. The framework is developed using the example of AV, but may also be applied to other dual land-use systems. The paper is structured as follows: In the subsequent section we report the development of the analytical framework, FEADPLUS, highlighting the framework's main assumptions and components. In Section 3, we apply the framework to assess the adoption potential of AV across two hypothetical typical farm types representative for the Filder Plain in Southern Germany. Section 4 discusses the main merits of the framework, possible modifications and limitations, and ends with concluding remarks.

2. The analytical framework FEADPLUS

The analytical framework FEADPLUS assumes that the farmer, landowner and investor are one entity. Yet, it can be modified to accommodate other investor and ownership settings. FEADPLUS is grounded in neoclassical economic theory. Farmers maximize their profit by choosing the agricultural production system returning the most favorable expected average yearly net benefit.² Hence, profit maximizing farmers will adopt a dual land-use system when this increases their profit. In the following, we will use AV as an example of a dual land-use system. The situation with or without adoption of AV is

¹ It should be noted, that there is (yet) no formal definition of dual land-use systems. In the following, it is defined as land-use systems that allow for the combined production of agricultural outputs and a secondary, non-agricultural output. Other examples for dual land-use systems comprise the simultaneous production of agricultural output and use of the land for other renewable energies (e.g., wind farms), recreational uses (e.g., maize labyrinths, open air concerts) and disaster prevention measures (e.g., flood control).

² In reality, profit maximization behavior is not (always) the case, e.g., due to bounded rationality or because farmers maximize utility, which, beyond profits, also depends on further utility components (e.g., utility of being a farmer) that are not reflected in monetary terms (see for instance Simon (1990) or Kliebenstein et al. (1980)).

captured by the subscripts “AV” or “Base”, respectively. The annual contribution margins from agriculture are termed E^{Agri} and the additional annualized farm profit from the PV power sold is termed, E^{PV} .

A contribution margin is computed as the difference between sales revenue from goods sold (or stored) and the variable cost incurred to produce these goods. Fixed costs, such as machinery or buildings, are not included. Eq. (1) shows that in order to adopt AV, the annual profit from PV and the new agricultural contribution margin combined have to be larger than the base agricultural contribution margin.

$$E_{AV}^{Agri} + E_{AV}^{PV} - E_{Base}^{Agri} > 0 \quad (1)$$

2.1. Changes in farmers' agricultural income

The farmers' contribution margin from agricultural operations is the sum of the contribution margins from all agricultural activities performed. In the following, our point of departure is the assumption that the AV system is installed within a cropping system on arable land. Principally, FEADPLUS can also be used when AV systems are installed within other agricultural systems (e.g., horticulture, livestock husbandry). In a usual farming system, a farmer cultivates crop i (from a population I of cultivated field crops) with yield y_i , which can be sold to the market at producer price p_i . A farmer thus generates a contribution margin per unit of land, e_i , as follows:

$$e_i = p_i y_i - \sum_{v=1}^V x_{i,v} p_v \quad (2)$$

where $x_{i,v}$ is the quantity of input v for V different inputs (e.g., production factors such as machinery and labor, and related intermediate inputs like diesel) and p_v is the respective unit price (the farm's family labor can be valued with its opportunity cost³). At low AV adoption levels within an economy, it is unreasonable to expect any substantial changes in market prices of outputs and inputs. In such a context, output and input prices are assumed to remain unaffected, which allows to rewrite the contribution margin as the difference in crop specific revenue, u_i , and the sum of input cost, $c_{i,v}$. Both are expressed per unit of land (e.g., hectare).

$$e_i = u_i - \sum_{v=1}^V c_{i,v} \quad (3)$$

The total annual agricultural contribution margin from all crop producing activities, E^{Agri} , is the sum of cultivated area per crop in the base situation, a_i , times the crop specific contribution margin, e_i , per unit of area. At the farm-level, E^{Agri} can thus be expressed as the sum of contribution margins from each crop. The contribution margin of each crop is the individual revenue U_i , of each crop i , minus the sum of the input costs $C_{i,v}$ of each input v for that crop:

$$E_{Base}^{Agri} = \sum_{i=1}^I e_i a_i = \sum_{i=1}^I \left(U_i - \sum_{v=1}^V C_{i,v} \right) \quad (4)$$

The installation of an AV plant has implications for a farmer's total production area, crop yields and field management. The mounting structure reduces the production area within the AV system, which is denoted by parameter ϵ (describing the share of the area covered by the AV plant's mounting structure, which is lost for agricultural production). Other dual land-use systems will likely also involve some loss of production area ϵ . In the AV case, the crop-specific contribution margins, e_i , are affected by the reduction in solar radiation (shading), changing the crop yields grown within the AV system. The relative change in crop

yields is captured by δ_i . Reductions in photosynthetically active radiation may lower the yield of some crops, e.g., cereals such as maize, which is a C4 plant and thus particularly susceptible to shading. Yet, it may hardly impact or even increase the yield of some other crops, e.g., potatoes (Schulz et al., 2019), blueberries (Rotundo et al., 1998) or apples (Lopez et al., 2018). The mounting structure of an AV plant requires changes in the field management and input intensity (Weselek et al., 2019), resulting in potentially higher production costs described by the relative change $\gamma_{i,v}$. Depending on the country and farming system context, labor inputs may be treated as variable costs and thus are affected by the AV adoption. If the opportunity costs of family labor were zero ($p_{labor} = 0$), it would not be considered an input cost affecting AV profitability.

Since farmers usually rotate the crops grown on their fields over the years, it is not straightforward to estimate the share of crop production area cultivated within the AV system. With ambiguous impacts on crop yields, farmers are incentivized to optimize their system to minimize the potential crop yield reductions and to maximize the potential crop yield increases from shading. Incorporating such a behavior requires in-depth knowledge about a farming system, as a number of factors constrain farmers' flexibility of adjusting the crop rotation (Castellazzi et al., 2008). For the sake of simplicity, the framework therefore abstracts from this aspect and assumes that the relative share of crop production area within the AV system is equal across all crops cultivated. Furthermore, it is assumed that the AV design leads to evenly distributed shading of crops, as for instance the case in Schindele et al. (2020). A farmer with total crop area A adopts an AV system on area A_{AV} , such that share $\beta = A_{AV}/A$ of each cultivated crop area is grown within the AV system (i.e., β applies to all crops equally). To correct A_{AV} and β for the lost land due to the mounting structure that carries the AV plant, it is multiplied by $(1 - \epsilon)$. The share under the previous agricultural system is the remainder $(1 - \beta)$, and the total arable land is reduced by $\beta\epsilon$. All the above presented AV parameters of agronomic relevance enter the computation of the crop-specific contribution margins with AV adoption \tilde{e}_i , which after some simple re-arrangement (see Appendix A) can be expressed as follows:

$$\tilde{e}_i = e_i + \beta(1 - \epsilon) \left(u_i \delta_i - \sum_{v=1}^V c_{i,v} \gamma_{i,v} \right) - \beta\epsilon e_i \quad (5)$$

Since $E_{AV}^{Agri} = \sum_{i=1}^I a_i \tilde{e}_i$, the total annual contribution margin from agriculture with AV adoption is expressed as:

$$E_{AV}^{Agri} = E_{Base}^{Agri} + \beta(1 - \epsilon) \sum_{i=1}^I a_i \left(u_i \delta_i - \sum_{v=1}^V c_{i,v} \gamma_{i,v} \right) - \beta\epsilon E_{Base}^{Agri} \quad (6)$$

At the total farm-level, the above can be modified such that only data on total crop specific revenue, U_i and the sum of crop specific input costs $C_{i,v}$ are needed:

$$E_{AV}^{Agri} = E_{Base}^{Agri} + \beta(1 - \epsilon) \sum_{i=1}^I \left(U_i \delta_i - \sum_{v=1}^V C_{i,v} \gamma_{i,v} \right) - \beta\epsilon E_{Base}^{Agri} \quad (7)$$

⇔

$$E_{AV}^{Agri} = E_{Base}^{Agri} + \Delta E_{AV}^{Agri}$$

The second term in eq. (7) starting with $\beta(1 - \epsilon)$ describes the change in total agricultural contribution margin due to the AV impacts on shading and production cost. The third term, $\beta\epsilon E_{Base}^{Agri}$, describes the reduction in contribution margin due to the loss in cultivated land. Together, they determine the difference in agricultural contribution margin due to AV adoption, ΔE_{AV}^{Agri} . Making use of the definition in eq. (7), adoption condition (1) can be expressed as:

$$E_{Base}^{Agri} + \Delta E_{AV}^{Agri} + E_{AV}^{PV} - E_{Base}^{Agri} > 0 \Leftrightarrow \Delta E_{AV}^{Agri} + E_{AV}^{PV} > 0 \quad (8)$$

This shows that the adoption potential of AV is dependent on the balance of two main factors: The change of the contribution margins

³ In some context, like Germany, family farm labor is usually not treated as a variable cost in contribution margin calculations. Our later empirical example for instance only considers hired labor as variable labor cost.

from agriculture due to AV adoption and the additional farm income from the AV plant.

2.2. Income from the operation of the agrivoltaics (AV) power plant

The AV plant is operated over the horizon of the system's expected lifetime (LT). During this lifetime, the AV system results in annual income from the sale of electricity and cost for operation and maintenance. In addition, one needs to account for the cost for the upfront AV investment, INV , which includes the discounted disposal costs at the end of the lifetime. This upfront cost can be transformed into an annuity using the capital recover factor $CRF = r/[1 - (1 + r)^{-LT}]$, which is based on LT and the farmer's discount rate r .

The annual profit from the PV plant, E_{AV}^{PV} , is thus:

$$E_{AV}^{PV} = cap_{AV}(H[l, s] ae ta - CRF INV[cap_{AV}] - M[cap_{AV}]) \quad (9)$$

where cap_{AV} denotes the installed peak generation capacity (usually in kWp or MWp), H denotes the average annual full-load hours,⁴ which is a function of solar radiation at location, l , and plant setup, s (reflecting the plant's angle and azimuth, density of modules, module type, etc.). To calculate the electricity revenue, we further require the electricity tariff, ta (e.g., in Euro-cents per kWh), at which the farmer can sell the power to the national grid⁵ and the average lifetime efficiency of PV modules, ae . The latter is computed $ae = 1 - rmeLT/2$, where rme is the reduction in module efficiency per year.

Both, the upfront AV investment and maintenance are a function of the installed capacity, since with increasing capacity lower unit costs are to be expected, which would result in economies of scale. $INV[cap_{AV}]$ stands for the disposal cost corrected upfront investment per unit of installed capacity. $M[cap_{AV}]$ includes the annual cost for maintenance and any miscellaneous annual expenditures (e.g., insurance, administration), also expressed per unit of installed capacity. These economies of scale are also likely to diminish with increasing capacity, which for the example of $INV[cap_{AV}]$ would imply $\partial INV[cap_{AV}]/\partial cap_{AV} < 0$ and $\partial^2 INV[cap_{AV}]/\partial cap_{AV}^2 > 0$.

2.3. Profitability condition for the adoption of AV

Relying on the above assumptions we combine eqs. (7) to (9) to obtain the following profitability condition for the case of an AV adoption:

$$\begin{aligned} \Delta E_{AV}^{Agri} + E_{AV}^{PV} &> 0 \\ \Leftrightarrow & \\ \beta(1 - \varepsilon) \sum_{i=1}^I \left(U_i \delta_i - \sum_{v=1}^V C_{i,v} \gamma_{i,v} \right) - \beta \varepsilon E_{Base}^{Agri} & \\ + cap_{AV}(H ae ta - CRF INV - M) &> 0 \end{aligned} \quad (10)$$

Note, henceforth for brevity $H[l, s] = H$, $INV[cap_{AV}] = INV$ and $M[cap_{AV}] = M$.

Eq. (10) enables us to identify the main parameters and components that determine the AV adoption decision of a farmer. Component C1, $\beta(1 - \varepsilon) \sum_{i=1}^I \left(U_i \delta_i - \sum_{v=1}^V C_{i,v} \gamma_{i,v} \right)$, describes the change in agricultural contribution margin due to shading and higher input costs. Component C2, $-\beta \varepsilon E_{Base}^{Agri}$, captures the change in agricultural contribution margin due to the loss in cultivated area. Finally, component C3, $cap_{AV}(H ae ta - CRF INV - M)$, comprises the change in annual farm profit due to AV power production. The components are also visualized in Fig. 1 using the example of an AV system installed in Southern Germany, where the PV

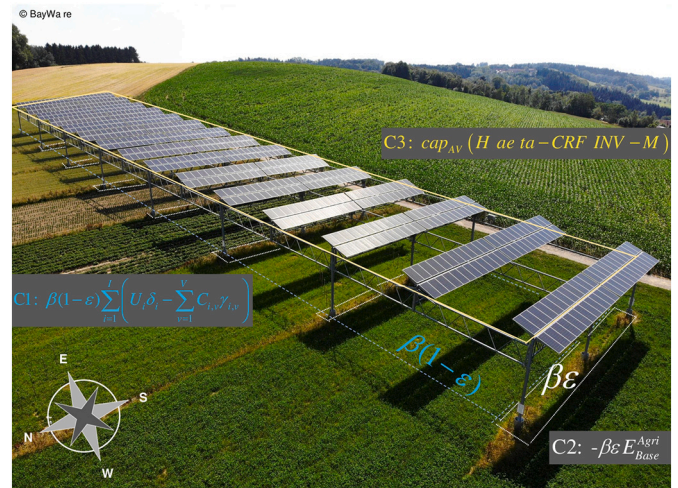


Fig. 1. An agrivoltaic plant in Heggelbach, Southern Germany. The yellow area shows the photovoltaic component and total area shaded. The dashed blue area is the shaded area available for cultivation net of the land loss. The dotted white area shows the land lost due to the mounting structure.

modules are erected above the cultivated land (as in our later application).

The magnitude and signs of the first two components are subject to farming system characteristics, as most parameters involved, such as U_i , δ_i , C_i and γ_i are specific to the cultivated crop and the production system. The discount rate, r , which determines the CRF , could be treated as farm specific parameter.⁶ A region-specific determinant is H , which is mostly dependent on the solar radiation in the farmer's location, the configuration of the plant and the average lifetime efficiency of the modules. Both prices for agricultural outputs and inputs are (usually) beyond the control of farmers and are determined at the national (or global) level. Similarly, the unit cost for the AV investment, INV , the maintenance cost, M , and the tariff received for the generated electricity, ta , are independent from the farming system. A certain share of the cost of construction and maintenance services may be subject to regional differences (e.g., due to regional wage differentials or differences in regulations). The largest part of the investment cost consists of solar modules, converters, and steel, in which case prices are largely regionally invariant. In absolute terms, the size of the AV plant's capacity determines the electricity revenue, the investment expenditure and annual maintenance cost. It also influences the share of area within the AV system, β , and thus the potential agronomic costs or benefits. Technology advancements affect the AV profitability through changes in module efficiency, ae , and cost reductions in the upfront investment and maintenance (e.g., through longevity of modules). The policy and market environment affect AV adoption directly through setting a tariff for AV electricity and, potentially, by defining upper limits for AV plant sizes, delimiting cap_{AV} .

The framework and its profitability condition can also be used to analyze the adoption potential of a ground-mounted PV system, which is the special case when $\varepsilon = 1$. In that case, component C1 is zero, as no agricultural activities are possible within the ground-mounted PV system and component C2 represents the total agricultural contribution margin foregone on the ground-mounted PV system area. Of course, the investment and maintenance cost parameters would need to reflect the lower costs of the ground-mounted PV technology.

The profitability condition (10) can also be rearranged to isolate ta , which yields the break-even electricity tariff:

⁴ See also Appendix C for a detailed documentation on how the full-load hours are calculated for the empirical example.

⁵ We do not account for the possibility of own consumption of the generated AV power.

⁶ The discount rate applied by the farmer may also positively correlate with the size of the AV system relative to the farmer's overall landholding or assets.

$$ta > \frac{-\beta(1-\varepsilon) \sum_{i=1}^I \left(U_i \delta_i - \sum_{v=1}^V C_{i,v} \gamma_{i,v} \right) + \beta \varepsilon E_{Base}^{Agri} + cap_{AV} (CRF INV + M)}{cap_{AV} H ae} \quad (11)$$

Eq. (11) describes at which electricity tariff an AV investment becomes worthwhile for a farmer given the predefined farming system, generation capacity and (per unit) investment cost. Calculating the break-even electricity tariff allows us to estimate the cumulative adoption of AV across a sample or population of farms, ultimately resulting in an aggregated AV electricity supply curve. The break-even electricity tariff is similar to computing the levelized cost of electricity, which is usually applied to calculate the profitability of PV systems. We can show this by expanding the fraction with the inverse of the capital recovery factor, CRF , which is the present value annuity factor ($PVAF$). The corresponding equation for the levelized cost of electricity for an AV system is provided in Appendix B.

2.4. Implications for the agricultural system and data requirements

The first two components in the profitability condition in eq. (10) capture how the adoption of a dual land-use system affects the underlying agricultural system. Depending on the farming system and agro-climatic context, there might be either trade-offs or synergies between the agricultural and the second land-use (e.g., PV power production).

Component C1 can be both, positive or negative, depending on the shade effect on crop yield and the possible changes in production costs. *Ceteris paribus*, the adoption potential of AV decreases with declining yields, $\delta_i < 0$. The opposite effect is true, if AV results in higher yields, $\delta_i > 0$. The same relationship exists with relative increases in costs, γ_i, v , which could also interact with δ_i , for example in the case of lower fertilization rates due to lower attainable yields. Component C2 is negative, when the adoption of AV results in land area lost (within the dual land-use system), i.e., $\varepsilon > 0$. In that case, component C2 is negative for all crops as long as the crop-specific contribution margin before adoption is positive.

The framework's requirement in terms of farm-level data are quite moderate. Since the effect of shading on crop yields varies strongly, data on the farm's revenue and cost from growing the respective arable crops is needed. While crop-specific revenue data is often available, data on input costs at the crop level may be missing. Then, information on total variable input cost can be used instead, $C_v = \sum_{i=1}^I C_{i,v}$, which requires to assume that changes in input costs, γ_i, v , are not crop specific, but uniform, i.e., $\gamma_{i,v} = \gamma_v$. We then rewrite eq. (10) as:

$$\beta(1-\varepsilon) \left(\sum_{i=1}^I U_i \delta_i - \sum_{v=1}^V \gamma_v C_v \right) - \beta \varepsilon E_{Base}^{Agri} + cap_{AV} (H ae ta - CRF INV - M) > 0 \quad (12)$$

Data on the remaining agronomic parameters, such as shade-induced changes in yield or input cost changes, depend on the specific design of the AV system and are derived from the literature or expert judgements. Ex-post the adoption of an AV system, it is of interest whether farming is still economically worthwhile. Using component C1, which describes the absolute change in the total contribution margin within the dual land-use system (net of the loss in cultivated land, denoted by ε), we can calculate the relative change in the base contribution margin, $perchgE_{AV}^{Agri}$, for the same share of total area, $\beta(1-\varepsilon)$, as follows:

$$perchgE_{AV}^{Agri} = \frac{\beta(1-\varepsilon) \sum_{i=1}^I \left(U_i \delta_i - \sum_{v=1}^V C_{i,v} \gamma_{i,v} \right)}{\beta(1-\varepsilon) E_{Base}^{Agri}} \quad (13)$$

Note: $\beta(1-\varepsilon)$ can obviously be cancelled out, but it emphasizes that only the $\beta(1-\varepsilon)$ share of the farm's total contribution margin is directly affected by the AV adoption.

3. Application to typical farming systems of the Filder plain (southern Germany)

We demonstrate the potential of FEADPLUS using the example of two hypothetical farm types: a vegetable and a cereal farm. The farm sizes and crop rotations are typical examples of farming systems found on the Filder Plain, a natural region in Southern Germany and part of the Stuttgart metropolitan region. The typical soils in this region are silt loams of the soil type Luvisols (Baxter, 2007), which usually have a depth of two meters and deeper, and a high soil fertility. An example of such a soil can be found on the Heidfeldhof, an experimental station of the University of Hohenheim, which has a pH of 5.9 and 1.22% of organic carbon (Kunz et al., 2016). Due to the fertile soils, both horticultural activities and cereal farming are practiced in the area.

3.1. Farming system data

We assume that each farm type cultivates a total area of 30 ha, which is the average farm size for the "Esslingen" district (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, 2021) wherein most of the Filder Plain is located. To keep the demonstration of the framework simple, each farm has a crop rotation of only three crops, each covering a third of the total area. The two farm types differ in profitability and cost structures, and the changes in crop yields (δ_i) vary as the crops cultivated show different susceptibility towards shading (Table 1). Only variable costs, such as (hired) labor, machinery inputs (fuel, lubricants) and other inputs (fertilizer, pesticides, etc.) are accounted for. This excludes the farmers' own (family) labor, as it is common practice for agricultural contribution margin computations in Germany. Both farms are characterized by a conventional crop production system based on crop budget data from KTBL (2020). The plot sizes of both farms are assumed to equal 2 ha being located 4 km away from the farm. A medium yield level and soil quality as well as a mechanization level based on a 102-kW tractor is assumed. The input specific cost changes, γ_i , due to the adoption of AV (Table 1) are based on assumptions and judgements of farmers cultivating land beneath the Heggelbach research AV plant (Schindele et al., 2020).

The vegetable farm is a labor-intensive system producing mostly high-value crops rotating between iceberg lettuce, winter wheat and cabbage. Iceberg lettuce is cultivated in 1.2 m wide beds, harvested manually and sold as fresh market produce. Cabbage is cultivated for processing and sold after storage. In contrast, the cereal farm grows a rotation of summer barley, winter wheat and grain maize. All cereals are sown after seedbed preparation with a rotary harrow in a reduced tillage system (KTBL, 2020).

3.2. Agrivoltaics system data

The AV system simulated in the following is based on the Heggelbach research AV plant (Schindele et al., 2020). This design is characterized by an annual average reduction in solar radiation (RSR) below the AV system of about 40% (Trommsdorff et al., 2021). The corresponding yield changes at this level of shading as shown in Table 1 are based on empirical estimates of yield responses at different levels of RSR. Elamri et al. (2018) and Marrou et al. (2013) report yield changes for lettuce at RSR between 23% and 50% in temperate regions. On average, this fits the RSR of our AV system and we consider the mean of their reported changes in yield of 15% as a reasonable proxy for lettuce and cabbage. In a similar fashion, based on Ding and Su (2010), we estimate the reductions in maize yield at 39%. For winter wheat and summer barley we assume a yield reduction of 25% based on Zhao et al. (2019), who for a RSR of 44% report a 29% reduction in wheat yields. Of course, the estimates for changes in cost and yield are associated with a high uncertainty, as either data is scarce or because estimates are taken from different agro-climates. We address this by performing a sensitivity analysis over a wide span of variation in these parameters. The AV

Table 1

Characteristics of the two (simplified) farm types found in the Filder Plain region. The two farms differ in their structure, but their total landholding is assumed to be identical.

Parameter	Unit	Vegetable Farm			Cereal Farm		
		Iceberg lettuce ^a	Winter wheat	Cabbage	Summer barley	Winter wheat	Grain maize
Yield	kg ha ⁻¹	30,000	7890	90,000	5920	7890	9770
Area	ha	10	10	10	10	10	10
Price	EUR kg ⁻¹	0.760	0.150	0.180	0.180	0.150	0.165
Revenue	EUR ha ⁻¹	22,800	1184	16,200	1066	1184	1612
Costs	EUR ha ⁻¹	15,325	726	6349	549	726	920
Input cost	EUR ha ⁻¹	7658	530	2519	367	530	496
Machinery cost	EUR ha ⁻¹	1079	196	1853	182	196	424
Labor cost	EUR ha ⁻¹	6587	0	1977	0	0	0
Contribution margin	EUR ha ⁻¹	7475	457	9851	517	457	692
Expected yield changes δ_i	%	-15	-25	-15	-25	-25	-39
Cost changes by input type γ_v							
Input cost	%	0	0	0	0	0	0
Machinery cost	%	5	5	5	5	5	5
Labor cost	%	10	10	10	10	10	10

Note: Data is based on crop budget data from the *KTBL (2020)* database. The expected yield changes are based on *Elamri et al. (2018)*, *Marrou et al. (2013)*, *Zhao et al. (2019)* and *Ding and Su (2010)*. More details are provided in the main text. The input specific cost changes are informed by the authors' assumptions and expert judgements.

^a Yield and price for iceberg lettuce is measured in pieces and was converted to kilograms assuming 0.5 kg piece⁻¹.

system parameters, e.g., the size, setup and costs of the AV plant, as well as the discount rate r are identical for both example farms (Table 2). The AV investment costs comprise all up-front capital expenditures including the cost of planning, permits and installation. Since the cost of maintenance, solar panels and other components are likely to change in the future, we also vary them in the sensitivity analysis below.

3.3. Results

We applied the FEADPLUS framework using the General Algebraic Modeling System (GAMS) software (Brooke et al., 1988), though, it can be easily implemented using other software, e.g., R (R Core Team,

Table 2

Parameters of the agrivoltaic (AV) system at a size of 1040 kWp covering an area of 2 ha (Schindele et al., 2020).

	Variable	Unit	Variable value
Total farm area owned ^a	A	ha	30
Area for AV system ^b	A_{AV}	ha	2
AV capacity per AV system area ^c		kW _p ha ⁻¹	520
AV capacity	cap_{AV}	kW _p	1040
Share of total area within AV system	$\beta = A_{AV}/A$	%	6.7
Share of area lost within AV system ^c	ϵ	%	8.0
Annual full-load hours ^d	$H(l, s)$	kWh kW _p ⁻¹ year ⁻¹	1202
Expected lifetime of AV system ^c	LT	years	25
Annual reduction in module efficiency ^c	rme	% year ⁻¹	0.25
Average PV lifetime efficiency ^c	ae	%	96.9
Farmer's discount rate ^c	r	%	4.1
Capital recovery factor	CRF	%	6.5
AV investment costs ^c	INV	EUR kW _p ⁻¹	1294
Annual AV maintenance costs ^c	M	EUR kW _p ⁻¹ year ⁻¹	16

^a Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (2021).

^b Authors' assumptions.

^c Data based on Schindele et al. (2020)

^d See calculation in Appendix C.

2020), which is an open source and freely available software.⁷ Applying the profitability condition from equation (10), the results for the two farm types are presented in Table 3 for an electricity tariff, t_e , of 8, 9 and 10 EUR-cents kWh⁻¹. The agronomic components are constant across all three scenarios and the photovoltaic component is constant across the farm type. The vegetable farm suffers from a high decline in agricultural contribution margin. While the relative decline in vegetable yield is much lower than for the cereals, this result is explained by the high output value and contribution margin per hectare. In the cereal farm, the higher reductions in crop yield are offset by the relatively low level of contribution margin of cereals. Consequently, the net benefit from AV system is lower for the vegetable farm compared to the cereal farm. For

Table 3

Components of the change in contribution margin (CM) in a) total absolute values and b) per hectare at an electricity tariff of 8, 9, and 10 EUR-cents kWh⁻¹. The break-even tariff is 9.00 and 8.63 EUR-cents kWh⁻¹ for the vegetable and cereal farm, respectively.

Variable	Vegetable farm			Cereal farm		
	8	9	10	8	9	10
a) Annual total change in CM, in EUR year⁻¹						
Component C1 - Shading and change in input cost	-4391	-4391	-4391	-755	-755	-755
Component C2 - Loss in cultivated area	-948	-948	-948	-89	-89	-89
Component C3 - AV power production	-6976	5316	17,429	-6996	5316	17,429
Sum C1-C3	-12,135	-23	12,090	-7640	4472	16,585
b) Annual change in CM per hectare under AV, in EUR year⁻¹ha⁻¹						
Component C1	-2195	-2195	-2195	-378	-378	-378
Component C2	-474	-474	-474	-44	-44	-44
Component C3	-3398	2658	8714	-3398	2658	8714
Sum C1-C3	-6068	-11	6045	-3820	2236	8293

⁷ In the following, we only used R and the *ggplot2* package (Wickham, 2016) to visualize the results.

both farm types AV is not profitable at a tariff of 8 EUR-cents kWh⁻¹. For the cereal farm it becomes profitable at a tariff of 8.63 EUR-cents kWh⁻¹, while the vegetable farm has a break-even tariff of 9.00 EUR-cents kWh⁻¹. Calculating the relative change in the agricultural contribution margin beneath the AV system, see eq. (13), the contribution margin below the AV system would decline by 40.3% and 73.9% for the vegetable farm and for the cereal farm, respectively. This shows that the relative change in agricultural contribution margin (which is lower for the vegetable farm) is a weak predictor for the economic viability of AV adoption.

3.4. Sensitivity analysis

We test the sensitivity of the break-even electricity tariff (eq. (11)) with regard to variations in agronomic and photovoltaic parameters between -30% and +30%.

The main agronomic parameters of interest are the effects of AV on the relative crop yield (1 + δ) and cost level (1 + γ), which are multiplied with the X percentage change variation in parameters, (1 + X). For example, a -30% variation in the yield effect multiplied by (1 + δ), with δ = -20%, results in a relative yield level of 0.56, which is equivalent to a yield loss of -44%. Similarly, a positive variation of 30% multiplied by (1 + δ), with δ = -20%, is equivalent to an actual yield gain of 4%. Moreover, we investigate the impacts of changes in contribution margins by equivalent percentage changes in the revenue and cost. The photovoltaic parameters considered in the sensitivity analysis are the annual full-load hours H (due to changes in solar radiation or system losses), the up-front investment cost and the annual maintenance cost. Each sensitivity analysis scenario is conducted varying only one parameter at a time, while leaving the rest of the parameters at their initial values, as defined in Tables 1 and 2. We report the break-even tariff and, in case of the changes in the agronomic parameters, also the relative changes in agricultural contribution margin below the AV system (which does not change, when only photovoltaic parameters are varied).

We find that variations in the full-load hours (or solar radiation) and investment cost have the largest impact on the break-even tariff

(Fig. 2b). Despite the differences in break-even tariff between the farms, their change in break-even tariff develops in parallel with changes of solar radiation and investment cost. With 30% less full-load hours, the break-even tariff is 12.86 EUR-cent kWh⁻¹ for the vegetable farm and 12.33 EUR-cent kWh⁻¹ for the cereal farm. With 30% more full-load hours it drops to 6.93 EUR-cent kWh⁻¹ for the vegetable farm and 6.64 EUR-cent kWh⁻¹ for the cereal farm.

In comparison, the sensitivity to shade-induced yield changes is lower than changes in solar radiation (Fig. 2a), but the vegetable farm is much more sensitive to variations in yield changes. For example, the difference in break-even tariff between a reduction of (1 + δ) by 30% and a 30% increase of (1 + δ) is 1.03 EUR-cent kWh⁻¹ for the vegetable farm but only 0.08 EUR-cent kWh⁻¹ for the cereal farm. Thus, due to their different margin and cost structures, the vegetable farm shows a higher sensitivity to changes in δ than the cereal farm. The vegetable farm, which has higher input cost than the cereal farm (Table 1), also reacts stronger to changes in (1 + γ) than the cereal farm (Fig. 2a). The break-even tariffs are almost equal for both farm types once the cost change decreases by 30% compared to the baseline.

Changes in the contribution margin (due to price changes) and maintenance cost generally have a moderate impact on the break-even tariff. The differences between break-even tariffs of the two farms slightly converges with decreasing levels of the contribution margin. Changes in maintenance cost impact both farm types by the same absolute degree.

A relevant result is also how the agricultural contribution margin changes below the AV system, as shown in Fig. 3. At the base choice of parameters (%-change = 0), we already observe a strong reduction of the agricultural contribution margin of 40.3% and 73.9% for the vegetable and cereal farm, respectively. At higher declines in yield (or higher increases in cost) the contribution margin can turn negative for the cereal farms for the range of changes covered in the sensitivity analysis (and at even higher changes, the same would apply for the vegetable farm). This could incentivize the farmer to abandon the cultivation of the area below the AV system. In the European Union, farmers would probably still farm the land as long as the direct payment per hectare of the Common Agricultural Policy offsets the potentially negative

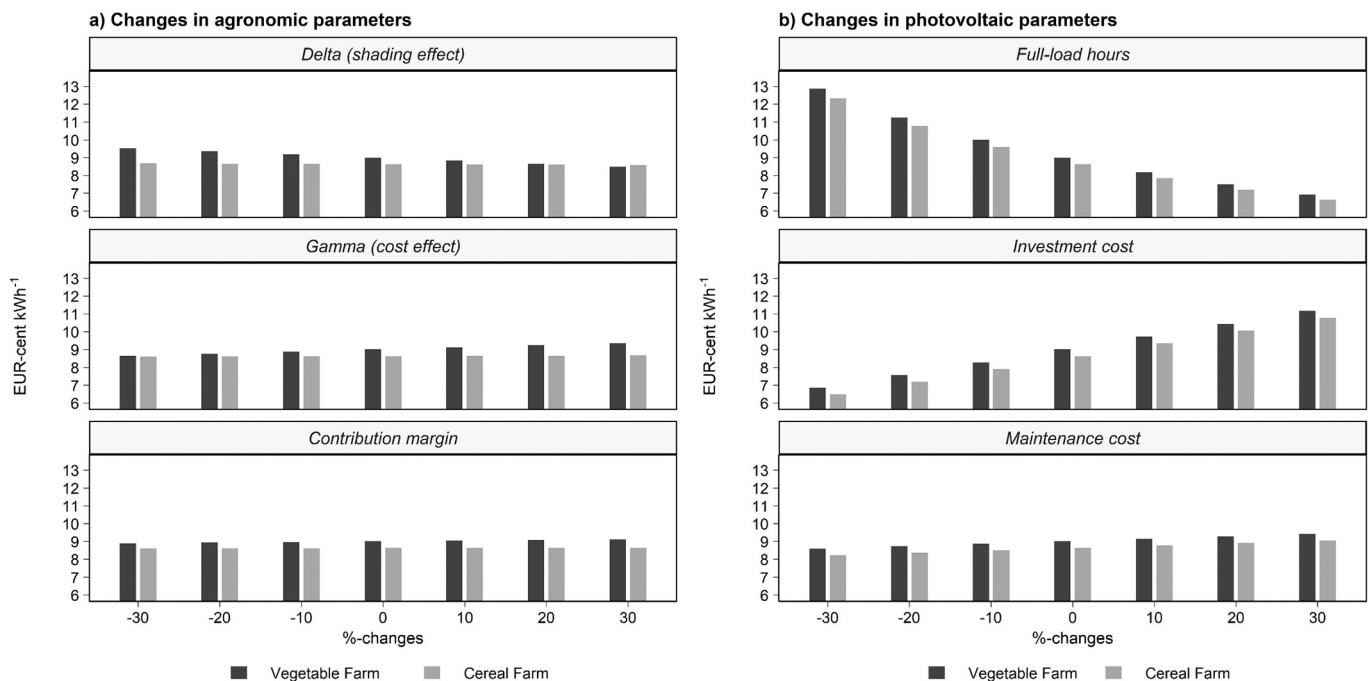


Fig. 2. Sensitivity of main agronomic and photovoltaic parameters on the break-even electricity tariff of two farm types in the Filder Plain region (see Table 1 for differences in profitability and cost structure).

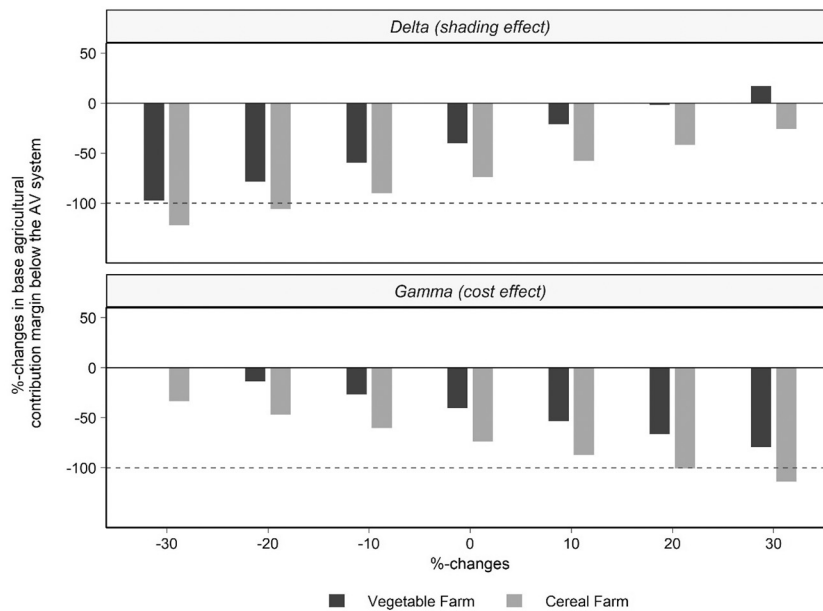


Fig. 3. Relative changes of the agricultural contribution margin for the cultivated area below the AV system. Bars below the dotted horizontal line indicate that the absolute reduction in the agricultural contribution margin exceeds the base agricultural contribution margin.

contribution margin. The sensitivity analysis also shows for very high increases in shade-induced yield changes that, at least for the vegetable farm, the agricultural contribution margin would turn positive.

4. Discussion

Using the example of AV, we demonstrated the functionality of the FEADPLUS framework to assess and estimate the economics and the adoption potential of dual land-use systems. The framework captures both the likely trade-offs and synergies that could arise from the adoption of an AV system. The example calculations show that the threshold at which farmers adopt AV is not only dependent on the solar radiation. Also, the cost and revenue structure of a farm as well as the trade-offs and synergies of agricultural production have to be accounted for when assessing the AV adoption potential.

The trade-offs and synergies are determined by the changes in yields (δ) and input costs (γ) within the first component of the profitability condition in eq. (10). These depend on the farming system, i.e., what type and variety of crops farmers cultivate in what kind of production system. In most arable cropping systems in temperate regions, as illustrated by our analysis of farm types on the Filder Plain, AV may lead to trade-offs due to shade-induced yield declines ($\delta < 0$) and increases in input intensities ($\gamma > 0$) (Weselek et al., 2019). However, in different contexts, AV may offer synergies in these dimensions. In arid and semi-arid climatic regions characterized by water scarcity and high solar radiation, AV may reduce the water input due to reduced evapotranspiration in the shade or because it is combined with rainwater harvesting, possibly resulting in lower input costs (Trommsdorff et al., 2021) and positive yield changes (Marrou et al., 2013). Moreover, the shading may mitigate adverse impacts on labor productivity, which would otherwise occur due to climate change-induced heat stress (Willockx et al., 2020). There are also potential cost synergies in case of fruit production such as berries and apples, where the AV mounting structure could reduce input costs for hail nets or plastic foil. These crops may also be shade-tolerant, which means that component C1 could be positive overall, as yields only decrease slightly (or even increase) and input costs decline. This was corroborated by our sensitivity analysis for the vegetable farm and a +30% relative increase in the yield level. Yet, for some crops, like apples, there may also be reductions in fruit quality (do Amarante et al., 2011).

The results show that variations in the agronomic parameters may flip the relative suitability for AV between different farming systems. Systems relying on high-value crops, i.e., the vegetable farm, are much more sensitive to the yield and cost changes. The case of the vegetable farm shows that an AV system with a lower density of PV modules could at least benefit on the agronomic side, as a lower reduction in photosynthetically active radiation would lead to lower reductions in yield. Yet, there is a potential trade-off with the investment cost, as there may be fixed costs for the mounting structure per area, which then has to be allocated to a lower annual electricity production. On the other hand, systems with low production values may allow for a lower adoption cost of APV. However, there is a risk of negative agricultural contribution margins, as our analysis shows (Fig. 3). In such a case, depending on other factors (e.g., whether the farmer receives direct payments per area cultivated), a profit maximizing farmer may abandon farming on the area beneath the AV system. This would strongly undermine the actual rationale for policymakers to support such systems, while of course an option value is left, as the farmer may re-cultivate the land at any time (unlike in case of ground-mounted PV systems). A focus should be put on farming systems that allow for synergies, but here more research is needed, whether it concerns knowledge about the yield changes of relevant crops due to various levels of shading or the cost of AV systems within different agricultural systems (e.g., for arable land, grassland or specialty crop systems).

A general finding of our study is that the agronomic influence on the economic performance of AV systems is small compared to the influence of the PV component, at least for arable farming, where per hectare contribution margins are relatively low. Yet, this may change in the case of higher value crops which benefit from shading by increasing yield by up to 30%, as was observed in some studies for berries (Makus, 2010; Rotundo et al., 1998). However, the total potential in terms of land area for such crops may be rather limited. Furthermore, future reductions in the price of PV generated electricity may substantially increase the relative importance of the agronomic components in determining the economic feasibility of AV. Future increases in module efficiency would reduce the mounting structure's cost share and allow for higher electricity generation without increasing the level of shade.

Applying FEADPLUS, we can assess the profitability of AV within a one-year horizon, by annualizing all changes in the agricultural and photovoltaic contribution margins. This makes the framework easily

applicable to large farm-level datasets, such as the FADN (Farm Accountancy Data Network) database of the European Commission. Various research questions related to the adoption potential of AV across regions and farming systems can be addressed applying FEADPLUS. For instance, it could be used to estimate the cumulative electricity supply from AV systems at varying degrees of policy support (e.g., different electricity tariffs paid for AV above the current ground-mounted PV cost), to estimate the reduction in agricultural supply at given levels of AV adoption or to identify the most cost-efficient farm types or regions. The framework can be extended to account for advances in technology through improved AV system designs or future changes in relative prices between the agricultural and energy market. Also, stochastics can be incorporated to account for the uncertainty in agronomic and technology parameters or economies of scale in the AV system designs or agricultural operations.

Dual land-use systems are an emerging field and policies are needed to provide the necessary support and regulatory framework. In that context, FEADPLUS may serve as a tool to analyze policy scenarios and future technological developments of different dual land-use systems. Specifically, FEADPLUS can be used to identify the minimum policy support necessary to reach a certain adoption level in a given region or farming system. Furthermore, it can be used as an evaluation tool to analyze appropriate policy support (e.g., subsidies or feed-in-tariffs in case of AV systems) for projects that may otherwise be economically unviable. This also enables one to address the problem of additionality (which may be a prerequisite for the eligibility to receive policy support), as one can calculate systematically where the threshold between incentive and windfall gain may be situated for different farming systems and regions. In addition, the framework can support the understanding in which farming systems the adoption of a dual land-use system may create unintended consequences. For example, farmers are incentivized to abandon land cultivation below the AV system if contribution margins become negative.

In the following subsections, we first discuss possible and easily implementable modifications and then highlight the key limitations of the FEADPLUS framework.

4.1. Possible modifications of the framework

Modifications of the framework are necessary to account for settings in which the investor is external. The external investor would need to pay the landowner a land lease if the net absolute change in the agricultural contribution margin is negative and the landowner would consequently need to compensate the land-user, if both are not the same entity. In case the adoption of AV results in a net increase of the agricultural contribution margin (after the loss in land), farmers (or the landowner) would face a theoretical incentive to pay external investors for installing an AV system. Yet, at the same time external investors should also be competing for AV investments in farming systems where there are no trade-offs, or even synergies instead. At any rate, a change in the investor setting would require transfers between the different actors involved. These transfers can be included in the framework, but they would also be associated with transaction costs, which are unknown in their magnitude and moreover difficult to measure.

The adoption of dual land-use systems could imply changes in farmers' eligibility to receive payments from agricultural support policies, e.g., Europe's Common Agricultural Policy. Currently, at least in Germany, there is unclear legal practice whether farmers are still (partially) eligible for direct payments for those areas of agricultural land which are covered by an AV system (Fraunhofer ISE, 2020). The additional income from agricultural subsidies as well as the possible change in the eligibility to receive them could be incorporated into the framework as an additional term. With ongoing and future reforms of the Common Agricultural Policy to strengthen biodiversity conservation, scenarios are likely in which farmers are incentivized to bring back a certain share of their cultivated land under high-diversity landscape

features. This may include "rotational or non-rotational fallow land" (European Commission, 2020, p. 8). The share of land which is lost for production due to the design of a dual land-use system (the second term of the profitability condition in eq. (10)) could (partially) count towards such requirements and thus reduce the loss in agricultural contribution margin. This could be incorporated into the framework in a straightforward manner, and is a particularly interesting aspect for those dual land-use systems in which a high share of land is lost for agricultural production, but which could alternatively provide habitat for a higher diversity of flora and fauna (Trommsdorff et al., 2021). Future research is, however, needed to thoroughly assess this potential.

The setup of FEADPLUS allows us to implement economies of scale in a straightforward manner. For the example of AV, we illustrated how the cost of upfront investment and annual maintenance can be expressed as functions of the capacity installed. Certain cost components such as the mounting structure, site preparation and installation, system design, grid connection and cost for permits and advisory services are expected to experience a decline in per unit cost with increasing installed capacity (Schindele et al., 2020). The same holds for annual maintenance costs such as surveillance and commercial management. Depending on the data availability, the per unit cost degression curves can be estimated using linear, logarithmic or other functional forms. Since the AV technology is still at the early stages of its development, it is likely that the relevance of farming system characteristics and agronomic effects will increase in future.

The framework can also be applied for AV designs, which do not result in an even shading of the system area, e.g., systems in which bifacial PV panels are vertically erected towards an East-West direction. In this case, the reduction in PAR is highest for crops growing directly next to the panel walls, while in the middle of the aisles shading would be the lowest. A straightforward solution could be to estimate yield losses in different zones of the AV system area where the degree of shading is rather homogenous. This could be used to calculate an area-weighted average of the yield loss. More sophisticated approaches may be necessary as the AV technology advances. For instance, setups may be developed in which the shading from the panels is dynamic (e.g., using either single- or double-axis tracking of PV modules). Such systems could be controlled to maximize either electricity production, crop production or the total economic return by minimizing the trade-offs between electricity and crop production. These approaches may also consider at which growth stage a crop is particularly susceptible to yield declines from shading and in which stage it may benefit from shading. Within this context, FEADPLUS could be coupled with dynamic crop growth models, which simulate yield changes due to different shading optimizations, accounting for higher water-use efficiency, lower heat stress and other favorable microclimatic conditions.

4.2. Limitations

FEADPLUS provides a straightforward profitability condition on an annual basis applicable to large datasets of farm-level data. This requires the use of various simplifying assumptions. For instance, it is assumed that farmers do not optimize their crop rotation. When analyzing the potential of dual land-use systems at the micro scale, accompanied with data availability on crop rotation constraints and site conditions, this assumption can be relaxed employing methods of mathematical programming. A further assumption is that future cash flows from both agricultural operations and the investment in the dual land-use system are static. This is a limitation when conducting uncertainty analysis, e.g., with regards to annual fluctuations in crop yields and solar radiation. Principally, the single-year form of FEADPLUS can incorporate stochastic components, yet they would always need to be interpreted as average changes over the whole simulated time horizon. When discounting future cash flows, results from investment analyses are quite sensitive towards adverse effects that occur during early years of the investment.

In theory, we can use the presented framework to calculate the farmers AV adoption potential with a high level of detail, if all parameters of the framework are well known. In practice, limitations in data availability could limit the confidence in results. For example, data on crop-specific allocation of input costs is usually not available. This could be especially relevant, when considering mixed systems combining cropping and livestock. Another limitation is that the FEADPLUS framework does not explicitly account for differences in farmers' preferences (e.g., risk aversion). Analyses on farmers' adoption attitudes towards new technologies, e.g., planting short-rotation coppices, found substantial differences in farmers' corresponding willingness to accept and risk premia and other adoption influencing factors (Gillich et al., 2019). Hence, while the framework defines an adoption threshold and identifies the main cost and benefit components, an additional component may need capture transaction and "psychological" costs.

Besides economic incentives and the institutional and legal settings, there are many further factors determining the adoption of new technologies, many of which are dependent on the adopting farmer, as for instance regards existing skills and knowledge or a motivation to protect the environment (Kuehne et al., 2017). In the case of AV, the acceptance and perceptions of local citizens and other farmers play an important role. So far, no research has been done on this topic besides from Ketzer et al. (2019), who describe an overall positive attitude of local citizens towards AV compared to ground-mounted PV at the location Heggelbach. However, competing land uses like tourism and recreation may restrict this acceptance and hinder the adoption of AV. Moreover, the environmental impacts of AV, e.g., on soil quality or biodiversity, are not fully assessed yet, which may also prevent farmers from adoption, even if current AV systems are designed in a way that allows a full removal of the AV construction with as little negative impact to the soil as possible, contrary to many ground-mounted PV systems. In contrast to ground-mounted PV systems, AV systems – like the one installed in Heggelbach, Southern Germany – do not require fencing, as both converters and PV modules are installed at elevated height, which reduces the risk of theft. Given that insurance companies waive the requirement of fences for AV systems, this may be another advantage over ground-mounted PV systems in terms of social acceptance and biodiversity. Neither local residents nor (most) wildlife⁸ prefer fences in the open landscape for obvious reasons. AV may also offer an adaption to climate change as the profit from operating an AV system is likely to be negatively correlated with yield declines during drought years. Hence, an AV investment could be part of farmers' risk management strategies, particular in light of the current projections on climate change related weather extremes. In summary, many of the limitations discussed above could be addressed by future research, but this comes at the cost of

increased complexity.

4.3. Concluding remarks

Agricultural land is a scarce factor: its availability is continuously decreasing and multiple land-use purposes fuel the competition. The demand for productive land is increasing with a growing population, while the projected shifts towards clean energy systems and a bio-based economy result in additional demand for land. At the same time, biodiversity conservation policies demand that land is set aside or managed specifically to enhance species richness. Dual land-use systems are one possible strategy to relieve the pressure on land and are thus becoming increasingly relevant. This study presented FEADPLUS, which is an analytical framework to estimate the economics and the adoption potential of dual land-use systems accounting for farming system-specific trade-offs and synergies. We demonstrated the functionality of FEADPLUS using the example of agrivoltaics, a dual land-use system, which is experiencing increasing attention given its potential to achieve a high level of land-use efficiency. Using FEADPLUS, it is possible to compare multiple designs of a dual land-use system, e.g., to find the most economically suitable AV design for a given farming system and location. FEADPLUS can be applied equally well to large-scale agricultural databases and to local high-resolution measurements or simulations of agrivoltaic systems. As the demand for studies on the potential of dual land-use systems, in particular AV, is likely to rise, FEADPLUS may serve as a simple analytical framework that can be adjusted to different contexts and technologies even with limited data availability. Since the framework captures the heterogeneity of farming systems, while still being easy to grasp and communicate, it is the authors' hope that it may serve future applications at the science-policy interface.

Declaration of Competing Interest

None.

Acknowledgements

This study was funded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF), grant number 033L098G. We are indebted to the editor and three anonymous referees for comments on earlier versions of this study. We also would like to thank Alexander Gocht, Tristan Herrmann, Sebastian Neuenfeldt and the participants of the internal farm economics seminar at the Johann Heinrich von Thünen Institute in Braunschweig, Germany, for their suggestions and comments.

Appendix A. Intermediate steps of FEADPLUS: Crop specific contribution margins

The crop-specific contribution margin is first defined as

$$\tilde{e}_i = (1 - \beta) \left(u_i - \sum_{v=1}^V c_{i,v} \right) + \beta(1 - \varepsilon) \left(u_i(1 + \delta_i) - \sum_{v=1}^V c_{i,v}(1 + \gamma_{i,v}) \right) \quad (\text{A.1})$$

Which after factoring out and rearranging yields A.2:

$$\begin{aligned} \tilde{e}_i &= \left(u_i - \sum_{v=1}^V c_{i,v} \right) - \beta \left(u_i - \sum_{v=1}^V c_{i,v} \right) + \beta \left(u_i + u_i \delta_i - \sum_{v=1}^V c_{i,v} - \sum_{v=1}^V c_{i,v} \gamma_{i,v} \right) - \beta \varepsilon \left(u_i + u_i \delta_i - \sum_{v=1}^V c_{i,v} - \sum_{v=1}^V c_{i,v} \gamma_{i,v} \right) \\ \Leftrightarrow \tilde{e}_i &= \left(u_i - \sum_{v=1}^V c_{i,v} \right) - \beta \left(u_i - \sum_{v=1}^V c_{i,v} \right) + \beta \left(u_i - \sum_{v=1}^V c_{i,v} \right) + \beta \left(u_i \delta_i - \sum_{v=1}^V c_{i,v} \gamma_{i,v} \right) - \beta \varepsilon \left(u_i - \sum_{v=1}^V c_{i,v} \right) - \beta \varepsilon \left(u_i \delta_i - \sum_{v=1}^V c_{i,v} \gamma_{i,v} \right) \\ \Leftrightarrow \tilde{e}_i &= \left(u_i - \sum_{v=1}^V c_{i,v} \right) + \beta(1 - \varepsilon) \left(u_i \delta_i - \sum_{v=1}^V c_{i,v} \gamma_{i,v} \right) - \beta \varepsilon \left(u_i - \sum_{v=1}^V c_{i,v} \right) \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

⁸ For some species like ground-breeding birds fenced areas may offer better protection from predators.

As $e_i = u_i - \sum_{v=1}^V c_{i,v}$ the first and parts of the third term of the right-hand side can be substituted to obtain as shown in eq. (5) in the main text:

$$\tilde{e}_i = e_i + \beta(1 - \varepsilon) \left(u_i \delta_i - \sum_{v=1}^V c_{i,v} \gamma_{i,v} \right) - \beta \varepsilon e_i \quad (\text{A.3})$$

which could be further simplified as shown below:

$$\tilde{e}_i = \beta(1 - \varepsilon) \left(u_i \delta_i - \sum_{v=1}^V c_{i,v} \gamma_{i,v} \right) + (1 - \beta \varepsilon) e_i \quad (\text{A.4})$$

Appendix B. Levelized Cost of Energy formula for an AV system

The equation for the levelized cost of electricity for an AV system, $LCOE_{AV}$:

$$LCOE_{AV} = \frac{PVAF \left(-\beta(1 - \varepsilon) \sum_{i=1}^I \left(U_i \delta_i - \sum_{v=1}^V C_{i,v} \gamma_{i,v} \right) + \beta \varepsilon E_{Base}^{Agri} + cap_{AV} M \right) + cap_{AV} INV}{PVAF cap_{AV} H ae}$$

Note: The present value annuity factor (PVAF) is the inverse of the capital recovery factor, CRF.

Appendix C. Calculation of annual full-load hours

The annual full-load hours, H , are expressed in $\text{kWh kWp}^{-1} \text{yr}^{-1}$ and computed for a location l and a setup s as follows:

$$H_{l,s} = AR_{l,s} MPR_{l,s} bf_s ce_s ca_s \eta_s \quad (\text{C.1})$$

Our location, l , is the district Esslingen (NUTS-3 region "DE113"). Our setup, s , follows the AV design of the research plant in Heggelbach as described in Schindele et al. (2020), where crystalline silicon PV modules (SolarWorld bifacial PV modules with 270 Wp peak capacity per module or 0.161 kWp m^{-2} under Standard Test Conditions) are installed at an angle of 20° and an azimuth of 52.2° . The annual incoming solar radiation in $\text{kWh m}^{-2} \text{yr}^{-1}$, AR , and the module performance ratio, MPR , were extracted from the EU's PVGIS online platform (<https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>; Huld et al., 2012; Huld and Amillo, 2015; Súrí et al., 2005). This resulted in an $AR = 1248$ and an $MPR = 0.92$. The bi-facial factor, bf_s , is needed to account for the higher energy yielding bi-facial solar modules of our setup and equals 1.06 following Schindele et al. (2020). The converter efficiency, ce_s , in our setup is 98.6%, based on the Huawei SUN2000-36 KTL converter factsheet. The PV capacity per area in $\text{m}^2 \text{kWp}^{-1}$, ca_s , equals 6.2 and the PV module efficiency, η_s , is 16.1%. Multiplication of η_s with ca_s yields 1, but both are nevertheless required to get the physical dimensions in eq. C.1 right ($AR_{l,s} ca_s = \text{kWh/m}^2 \text{yr} \text{m}^2/\text{kWp} = \frac{\text{kWh}}{\text{kWp yr}}$). Please note that all remaining parameters mentioned in eq. (1) are dimensionless. Using the data above, we arrive at 1202 full-load hours.

References

- do Amarante, C.V.T., Steffens, C.A., Argenta, L.C., 2011. Yield and fruit quality of 'gala' and 'Fuji' apple trees protected by white anti-hail net. *Sci. Hortic.* 129, 79–85. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.03.010>.
- Adeh, E.H., Good, S.P., Calaf, M., Higgins, C.W., 2019. Solar PV power potential is greatest over croplands. *Sci. Rep.* 9, 11442. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47803-3>.
- Allison, T.D., Root, T.L., Frumhoff, P.C., 2014. Thinking globally and siting locally – renewable energy and biodiversity in a rapidly warming world. *Clim. Chang.* 126, 1–6. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1127-y>.
- Amaducci, S., Yin, X., Colauzzi, M., 2018. Agrivoltaic systems to optimise land use for electric energy production. *Appl. Energy* 220, 545–561. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.081>.
- Baden-Württemberg, Statistisches Landesamt, 2021. Landwirtschaftliche Betriebsgrößenstruktur Landkreis Esslingen. Stuttgart, Germany. <https://www.statistik-bw.de/Landwirtschaft/Agrarstruktur/> (accessed 25 February 2021).
- Barron-Gafford, G.A., Pavao-Zuckerman, M.A., Minor, R.L., Sutter, L.F., Barnett-Moreno, I., Blackett, D.T., Thompson, M., Diamond, K., Gerlak, A.K., Nabhan, G.P., Macknick, J.E., 2019. Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands. *Nat. Sustain.* 2, 848–855. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0364-5>.
- Baxter, S., 2007. World Reference Base for Soil Resources: World Soil Resources Report 103. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Brooke, A., Kendrick, D., Meeraus, A., 1988. GAMS: A User's Guide. The Scientific Press, California, USA.
- Castellazzi, M.S., Wood, G.A., Burgess, P.J., Morris, J., Conrad, K.F., Perry, J.N., 2008. A systematic representation of crop rotations. *Agric. Syst.* 97, 26–33. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2007.10.006>.
- Core Team, R., 2020. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Dinesh, H., Pearce, J.M., 2016. The potential of agrivoltaic systems. *Renew. Sust. Energy. Rev.* 54, 299–308. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.024>.
- Ding, S., Su, P., 2010. Effects of tree shading on maize crop within a poplar-maize compound system in Hexi corridor oasis, northwestern China. *Agrofor. Syst.* 80, 117–129. <https://doi.org/10.1007/s10457-010-9287-x>.
- Dupraz, C., Marrou, H., Talbot, G., Dufour, L., Nogier, A., Ferard, Y., 2011. Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: towards new agrivoltaic schemes. *Renew. Energy* 36, 2725–2732. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.005>.
- Elamri, Y., Cheviron, B., Lopez, J.-M., Dejean, C., Belaud, G., 2018. Water budget and crop modelling for agrivoltaic systems: application to irrigated lettuces. *Agric. Water Manag.* 208, 440–453. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.07.001>.
- European Commission, 2020. EU Biodiversity Strategy for 2030: Bringing Nature Back into our Lives. European Commission, Brussels, Belgium. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1590574123338&uri=CELEX:52020DC0380>.
- Fraunhofer, I.S.E., 2020. Agri-Photovoltaik: Chance für Landwirtschaft und Energiewende: Ein Leitfaden für Deutschland. Freiburg, Deutschland. <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/APV-Leitfaden.pdf>.
- Gillich, C., Narjes, M., Krimly, T., Lippert, C., 2019. Combining choice modeling estimates and stochastic simulations to assess the potential of new crops—the case of lignocellulosic perennials in southwestern Germany. *GCB Bioenergy* 11, 289–303. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12550>.
- Götzberger, A., Zastrow, A., 1982. On the coexistence of solar-energy conversion and plant cultivation. *Int. J. Solar Energy* 1, 55–69. <https://doi.org/10.1080/01425918208909875>.
- Hernandez, R.R., Easter, S.B., Murphy-Mariscal, M.L., Maestre, F.T., Tavassoli, M., Allen, E.B., Barrows, C.W., Belnap, J., Ochoa-Hueso, R., Ravi, S., Allen, M.F., 2014. Environmental impacts of utility-scale solar energy. *Renew. Sust. Energy. Rev.* 29, 766–779. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.041>.
- Huld, T., Amillo, A., 2015. Estimating PV module performance over large geographical regions: the role of irradiance, air temperature, wind speed and solar Spectrum. *Energies* 8, 5159–5181. <https://doi.org/10.3390/en8065159>.
- Huld, T., Müller, R., Gambardella, A., 2012. A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa. *Sol. Energy* 86, 1803–1815. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.03.006>.

- Kliebenstein, J.B., Barrett, D.A., Heffernan, W.D., Kirtley, C.L., 1980. An analysis of Farmers' perceptions of benefits received from farming. *North Central J. Agric. Econ.* 2, 131. <https://doi.org/10.2307/1349176>.
- KTBL, 2020. Leistungs-Kostenrechnung Pflanzenbau, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V, Darmstadt, Germany. <https://daten.ktbl.de/dsikrpfanze/postHv.html>.
- Kuehne, G., Llewellyn, R., Pannell, D.J., Wilkinson, R., Dolling, P., Ouzman, J., Ewing, M., 2017. Predicting farmer uptake of new agricultural practices: a tool for research, extension and policy. *Agric. Syst.* 156, 115–125. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2017.06.007>.
- Kunz, C., Sturm, D.J., Varnholt, D., Walker, F., Gerhards, R., 2016. Allelopathic effects and weed suppressive ability of cover crops. *Plant Soil Environ.* 62, 60–66. [Doi:10.17221/612/2015-PSE](https://doi.org/10.17221/612/2015-PSE).
- Lopez, G., Boini, A., Manfrini, L., Torres-Ruiz, J.M., Pierpaoli, E., Zibordi, M., Losciale, P., Morandi, B., Corelli-Grappadelli, L., 2018. Effect of shading and water stress on light interception, physiology and yield of apple trees. *Agric. Water Manag.* 210, 140–148. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.08.015>.
- Makus, D.J., 2010. Weed control and canopy light Management in Blackberries. *Int. J. Fruit Sci.* 10, 177–186. <https://doi.org/10.1080/15538362.2010.492335>.
- Marrou, H., Wery, J., Dufour, L., Dupraz, C., 2013. Productivity and radiation use efficiency of lettuces grown in the partial shade of photovoltaic panels. *Eur. J. Agron.* 44, 54–66. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.08.003>.
- Miao, R., Khanna, M., 2020. Harnessing advances in agricultural technologies to optimize resource utilization in the food-energy-water Nexus. *Ann. Rev. Resour. Econ.* 12, 65–85. <https://doi.org/10.1146/annurev-resource-110319-115428>.
- Parkinson, S., Hunt, J., 2020. Economic potential for Rainfed Agrivoltaics in groundwater-stressed regions. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 7, 525–531. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.0c00349>.
- Rotundo, A., Forlani, M., Di Vaio, C., 1998. Influence of shading net on vegetative and productive characteristics, gas exchange and chlorophyll content of the leaves in two blackberry (*Rubus Ulmifolius* Schott.). *Cultivarts Acta Hortic* 333–340. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1998.457.42>.
- Sacchelli, S., Garegnani, G., Geri, F., Grilli, G., Paletto, A., Zambelli, P., Ciolli, M., Vettorato, D., 2016. Trade-off between photovoltaic systems installation and agricultural practices on arable lands: an environmental and socio-economic impact analysis for Italy. *Land Use Policy* 56, 90–99. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.04.024>.
- Schindele, S., Trommsdorff, M., Schlaak, A., Obergfell, T., Bopp, G., Reise, C., Braun, C., Weselek, A., Bauerle, A., Högy, P., Goetzberger, A., Weber, E., 2020. Implementation of agrophotovoltaics: techno-economic analysis of the price-performance ratio and its policy implications. *Appl. Energy* 265, 114737. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114737>.
- Schulz, V.S., Munz, S., Stolzenburg, K., Hartung, J., Weisenburger, S., Graeff-Hönninger, S., 2019. Impact of different shading levels on growth, yield and quality of potato (*Solanum tuberosum* L.). *Agronomy* 9, 330. <https://doi.org/10.3390/agronomy9060330>.
- Simon, H.A., 1990. *Utility and probability*. In: Palgrave Macmillan UK; Imprint. Palgrave Macmillan, London, 319 pp.
- Šúri, M., Huld, T.A., Dunlop, E.D., 2005. PV-GIS: a web-based solar radiation database for the calculation of PV potential in Europe. *Int. J. Sustain. Ener.* 24, 55–67. <https://doi.org/10.1080/14786450512331329556>.
- Tilman, D., Socolow, R., Foley, J.A., Hill, J., Larson, E., Lynd, L., Pacala, S., Reilly, J., Searchinger, T., Somerville, C., Williams, R., 2009. Energy. Beneficial biofuels—the food, energy, and environment trilemma. *Science (New York, N.Y.)* 325, 270–271. <https://doi.org/10.1126/science.1177970>.
- Trommsdorff, M., Kang, J., Reise, C., Schindele, S., Bopp, G., Ehmann, A., Weselek, A., Högy, P., Obergfell, T., 2021. Combining food and energy production: design of an agrivoltaic system applied in arable and vegetable farming in Germany. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 140, 110694. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110694>.
- Weselek, A., Ehmann, A., Zikeli, S., Lewandowski, I., Schindele, S., Högy, P., 2019. Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 39, 1–20. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0581-3>.
- Willockx, B., Uytterhaegen, B., Ronsijn, B., Herteleer, B., Cappelle, J., 2020. A standardized classification and performance indicators of Agrivoltaic systems. In: Conference Paper Presented at EU PVSEC 2020. <https://lirias.kuleuven.be/retrieve/587644>.
- Zhao, Y., Qiao, J., Feng, Y., Wang, B., Duan, W., Zhou, H., Wang, W., Cui, L., Yang, C., 2019. The optimal size of a paulownia-crop agroforestry system for maximal economic return in North China plain. *Agric. For. Meteorol.* 269–270, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.01.043>.

Literaturverzeichnis

AELF Krumbach (Schwaben)-Mindelheim (2009): Versuchsanbau (Schauversuch) von Winterweizen unter der Photovoltaik-Anlage in Warmisried; Besichtigung am 02.09.2009; Brief vom 04.09.2009. Brief. Unter Mitarbeit von Manfred Guggenmos. Mindelheim. Online verfügbar unter http://elektro-guggenmos.de/uploads/media/Bescheinigung_Landwirtschaftsamt_Mindelheim_-_Versuchsanbau_Doppelernte.pdf, zuletzt aktualisiert am 2009, zuletzt geprüft am 25.04.2022.

AfD (2021): Deutschland. Aber normal. Programm der Alternative für Deutschland für die Wahl zum 20. Deutschen Bundestag. Online verfügbar unter https://www.afd.de/wp-content/uploads/sites/111/2021/06/20210611_AfD_Programm_2021.pdf, zuletzt geprüft am 01.09.2022.

agrarheute (2022): Kommt das Aus für Biokraftstoffe bis 2030? Das plant Lemke. Online verfügbar unter <https://www.agrarheute.com/energie/kommt-fuer-biokraftstoffe-2030-plant-lemke-593737>, zuletzt aktualisiert am 18.05.2022, zuletzt geprüft am 02.12.2022.

agrarheute Redaktion (2021): Flächenverbrauch: Der Landwirtschaft geht der Platz aus. Online verfügbar unter <https://www.agrarheute.com/management/flaechenverbrauch-landwirtschaft-geht-platz-582128>, zuletzt aktualisiert am 10.06.2021, zuletzt geprüft am 17.05.2022.

AgroSolar Europe (2021): Forschung & Entwicklung: Unsere Projekte. Lüchow: Eine 750kW Anlage. Unsere erste 1-Hektar Agro PV Anlage. Online verfügbar unter <https://www.agrosolareurope.de/forschung-entwicklung-unsere-projekte/#steinicke>, zuletzt aktualisiert am 05.11.2021, zuletzt geprüft am 27.04.2022.

Auswärtiges Amt (2022): Abteilung für Klimaaußenpolitik, Wirtschaft und Technologie. Online verfügbar unter <https://www.auswaertiges-amt.de/de/aamt/auswdienst/abteilungen/wirtschaft-und-nachhaltige-entwicklung/214984>, zuletzt aktualisiert am 02.12.2022, zuletzt geprüft am 02.12.2022.

- Bauchmüller, Michael (2021): Agrarmilliarden: Regierung einig über neue Verteilung. In: *Süddeutsche Zeitung*, 12.04.2021. Online verfügbar unter <https://www.sueddeutsche.de/politik/landwirtschaft-agrarsubventionen-kloeckner-bundesregierung-1.5262727>, zuletzt geprüft am 02.09.2022.
- Bauer, Nicole (2021): Kleine Anfrage zu Potentiale von Agri-Photovoltaik. Antwort der Bundesregierung. 11.05.2021. Hg. v. FDP Bundestagsfraktion. Online verfügbar unter <https://www.fdpbt.de/anfrage/kleine-anfrage-potentiale-agri-photovoltaik>, zuletzt aktualisiert am 17.05.2022, zuletzt geprüft am 17.05.2022.
- Bayerische Staatskanzlei (2017): Verordnung über Gebote für Freiflächenanlagen. 754-4-1-W, 2015-1-1-V, 752-2-W. Bayerische Staatsregierung. Online verfügbar unter https://www.bayern.landtag.de/www/ElanTextAblage_WP17/GVBl/2017/GVBl-2017-Nr-04.pdf, zuletzt aktualisiert am 07.03.2017, zuletzt geprüft am 18.05.2022.
- Bayerische Staatskanzlei (2019): Nr. 119, Bericht aus der Kabinettsitzung. Erneuerbare Energien: Mehr Freiflächen-Photovoltaikanlagen für Bayern. 04.06.2019. München. Rainer Riedl. Online verfügbar unter <http://www.bayern.de/bericht-aus-der-kabinettsitzung-vom-4-juni-2019/#1>, zuletzt geprüft am 09.09.2019.
- Bayerische Staatskanzlei (2020): Dritte Verordnung über Gebote für Freiflächenanlagen. 754-4-1-W. Bayerische Staatsregierung. Online verfügbar unter <https://www.verkuendung-bayern.de/files/gvbl/2020/17/gvbl-2020-17.pdf>, zuletzt aktualisiert am 26.05.2020, zuletzt geprüft am 18.05.2022.
- BayWa r.e. AG (2020): BayWa r.e. realisiert Agrar-PV-Projekte in den Niederlanden. 30.07.2020. Online verfügbar unter <https://www.baywa-re.com/de/news/details/baywa-re-realisiert-agrar-pv-projekte-in-den-niederlanden>, zuletzt geprüft am 27.04.2022.
- BayWa r.e. AG (2021): Erste Agri-PV-Anlage für Äpfel in Deutschland errichtet. Online verfügbar unter <https://www.baywa-re.com/de/news/details/erste-agri-pv-anlage-fuer-aepfel-in-deutschland-errichtet>, zuletzt geprüft am 27.04.2022.

- BBSR (2014): Flächenverbrauch, Flächenpotenziale und Trends 2030. BBSR-Analysen KOMPAKT 07/2014. Unter Mitarbeit von Roland Goetzke, Christian Schlump, Jana Hoymann, Gisela Beckmann und Fabian Dosch. Hg. v. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR). Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung. Bonn. Online verfügbar unter http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/AnalysenKompakt/2014/DL_07_2014.pdf?__blob=publicationFile&v=, zuletzt geprüft am 03.02.2020.
- BDEW (2022): Positionspapier. 30 Vorschläge für einen PV-Turbo. Was jetzt für einen schnellen PV-Ausbau zu tun ist. Hg. v. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW). Berlin. Online verfügbar unter https://www.bdew.de/media/documents/220316_BDEW-Papier_30_Vorschl%C3%A4ge_f%C3%BCr_einen_PV_Turbo.pdf, zuletzt geprüft am 16.05.2022.
- Beck, M.; Bopp, G.; Goetzberger, A.; Obergfell, T.; Reise, C.; Schindele, S. (2012): Combining PV and Food Crops to Agrophotovoltaic – Optimization of Orientation and Harvest. 5 pages / 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition; 4096-4100. DOI: 10.4229/27THEUPVSEC2012-5AV.2.25.
- Bellini, Emiliano (2020a): Giant agrivoltaic project in China. In: *PV Magazine*, 03.09.2020. Online verfügbar unter <https://www.pv-magazine.com/2020/09/03/giant-agrivoltaic-project-in-china/>, zuletzt geprüft am 13.05.2022.
- Bellini, Emiliano (2020b): Agrivoltaics for pear orchards. In: *PV Magazine*, 02.10.2020. Online verfügbar unter <https://www.pv-magazine.com/2020/10/02/agrivoltaics-for-pear-orchards/>, zuletzt geprüft am 13.05.2022.
- Bellini, Emiliano (2022): Israel launches tender for 100 MW of agrivoltaics. In: *PV Magazine*, 14.01.2022. Online verfügbar unter <https://www.pv-magazine.com/2022/01/14/israel-launches-tender-for-100-mw-of-agrivoltaics/>, zuletzt geprüft am 13.05.2022.
- Benz, Arthur (2003): Konstruktive Vetospieler in Mehrebenensystemen. In: Renate Mayntz (Hg.): Die Reformierbarkeit der Demokratie. Innovationen und Blockaden. Festschrift für Fritz W. Scharpf. Unter Mitarbeit von Fritz W. Scharpf. Frankfurt/Main, New York:

Campus-Verl. (Schriften aus dem Max-Planck-Institut für Gesellschaftsforschung, Bd. 45), S. 205–236. Online verfügbar unter [https://books.google.de/books?hl=de&lr=&id=uGRKNR7mLBIC&oi=fnd&pg=PA205&dq=Benz,+Arthur,+2003:+Konstruktive+Vetospieler+in+Mehrebenensystemen,+in:+Mayntz,+Renate++Streeck,+Wolfgang+\(Hrsg.\),+2003:+Die+Reformierbarkeit+der+Demokratie,+Innovationen+und+Blockaden,+Frankfurt++Main,+205+%E2%80%93+238.&ots=xS13fr12AS&sig=P9DFKP37eh5OyPxBEHiaG4focpA&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.de/books?hl=de&lr=&id=uGRKNR7mLBIC&oi=fnd&pg=PA205&dq=Benz,+Arthur,+2003:+Konstruktive+Vetospieler+in+Mehrebenensystemen,+in:+Mayntz,+Renate++Streeck,+Wolfgang+(Hrsg.),+2003:+Die+Reformierbarkeit+der+Demokratie,+Innovationen+und+Blockaden,+Frankfurt++Main,+205+%E2%80%93+238.&ots=xS13fr12AS&sig=P9DFKP37eh5OyPxBEHiaG4focpA&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false), zuletzt geprüft am 18.05.2022.

BMBF (2020): Innovationsgruppen für ein Nachhaltiges Landmanagement. Hg. v. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und Forschung für Nachhaltigkeit (FONA). Online verfügbar unter <https://www.fona.de/de/massnahmen/foerdermassnahmen/innovationsgruppen-fuer-ein-nachhaltiges-landmanagement.php>, zuletzt aktualisiert am 26.04.2022, zuletzt geprüft am 26.04.2022.

BMBF (2022a): Nachhaltiges Landmanagement Modul B: Aktuelles. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). Online verfügbar unter <http://modul-b.nachhaltiges-landmanagement.de/modul-b-info/aktuelles/>, zuletzt aktualisiert am 25.04.2022, zuletzt geprüft am 25.04.2022.

BMBF (2022b): Innovationsgruppen für ein Nachhaltiges Landmanagement. Begleitvorhaben: Analyse und Synthese (Schwerpunkt ZALF). Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF); Forschung für Nachhaltigkeit (FONA). Online verfügbar unter <https://innovationsgruppen-landmanagement.de/de/begleitvorhaben/analyse-und-synthese/>, zuletzt aktualisiert am 26.04.2022, zuletzt geprüft am 26.04.2022.

BMBF (2022c): Innovationsgruppen für ein Nachhaltiges Landmanagement. Begleitvorhaben: Innovationsmanagement und Prozessbegleitung (Schwerpunkt inter3). Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF); Forschung für Nachhaltigkeit (FONA). Online verfügbar unter <https://innovationsgruppen-landmanagement.de/de/begleitvorhaben/prozessbegleitung/>, zuletzt aktualisiert am 26.04.2022, zuletzt geprüft am 26.04.2022.

BMEL (2009): Leitfaden der Bund-Länder-Arbeitsgruppe „InVeKoS/Direktzahlungen“ zur Anwendung von Artikel 3 c der VO (EG) Nr. 795/2004 - Kriterien zur Abgrenzung von auf beihilfefähigen Hektarflächen zulässigen und nicht zulässigen nichtlandwirtschaftlichen Tätigkeiten. 424-40402/0002. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. 04.06.2009. Unter Mitarbeit von Referat 424, Gez. Dr. Müller. Hg. v. BMEL. Online verfügbar unter https://www.thueringen.de/imperia/md/content/lwa-lei/blag_leitfaden.pdf, zuletzt geprüft am 07.01.2020.

BMEL (2018): Landwirtschaft verstehen. Fakten und Hintergründe. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. Unter Mitarbeit von Referat 121. Hg. v. BMEL. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Broschueren/Landwirtschaft-verstehen.html>, zuletzt geprüft am 01.10.2019.

BMEL (2019): Grundzüge der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) und ihrer Umsetzung in Deutschland. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). Online verfügbar unter <https://www.bmel.de/DE/themen/landwirtschaft/eu-agrarpolitik-und-foerderung/gap/gap-nationale-umsetzung.html>, zuletzt aktualisiert am 11.05.2020, zuletzt geprüft am 16.05.2022.

BMEL (2021a): Richtlinie zur Förderung der Energieeffizienz und CO₂-Einsparung in Landwirtschaft und Gartenbau. Teil A – Landwirtschaftliche Erzeugung, Wissenstransfer. Hg. v. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). BMEL. Online verfügbar unter https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/Projektfoerderung/BuPro_Energieeffizienz/A-Richtlinie.pdf?__blob=publicationFile&v=2, zuletzt aktualisiert am 18.08.2021, zuletzt geprüft am 18.05.2022.

BMEL (2021b): Richtlinie zur Förderung der Energieeffizienz und CO₂-Einsparung in Landwirtschaft und Gartenbau. Teil B: Erneuerbare Energieerzeugung. Hg. v. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). Berlin. Online verfügbar unter https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/Projektfoerderung/BuPro_Energieeffizienz/B-Richtlinie.pdf?__blob=publicationFile&v=5, zuletzt geprüft am 16.05.2022.

- BMEL (2021c): GAP-Direktzahlungen-Verordnung (GAPDZV). Verbändestellungnahmen zum Referentenentwurf. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). Online verfügbar unter https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Glaeserne-Gesetze/Stellungnahmen/GAPDZV.pdf?__blob=publicationFile&v=2, zuletzt geprüft am 18.05.2022.
- BMEL (2021d): Verordnung zur Durchführung der GAP-Direktzahlungen. GAP-Direktzahlungen-Verordnung – GAPDZV. Unter Mitarbeit von Schneider Charlotte. BMEL. Online verfügbar unter https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Glaeserne-Gesetze/Kabinettfassung/GAPDZV.pdf?__blob=publicationFile&v=3, zuletzt aktualisiert am 24.11.2021, zuletzt geprüft am 31.05.2022.
- BMEL (2022): GAP-Strategieplan für die Bundesrepublik Deutschland. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). Online verfügbar unter <https://www.bmel.de/DE/themen/landwirtschaft/eu-agrarpolitik-und-foerderung/gap/gap-strategieplan.html>, zuletzt aktualisiert am 04.04.2022, zuletzt geprüft am 16.05.2022.
- BMF (2021): Klimaschutz Sofortprogramm 2022. Hg. v. Bundesministerium für Finanzen (BMF). Online verfügbar unter https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Downloads/klimaschutz-sofortprogramm-2022.pdf?__blob=publicationFile&v=1, zuletzt geprüft am 17.05.2022.
- BMF (2022): Stellungnahme zur Taxonomie. Eingangsbemerkung. Hg. v. Bundesfinanzministerium (BMF). Online verfügbar unter https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Downloads/Europa/stellungnahme-zur-taxonomie.pdf?__blob=publicationFile&v=4, zuletzt geprüft am 17.05.2022.
- BMJV (2020): Verordnung zu den Innovationsausschreibungen. InnAusV. BMWi. Online verfügbar unter <https://www.gesetze-im-internet.de/innausv/BJNR010610020.html>, zuletzt aktualisiert am 20.01.2020, zuletzt geprüft am 26.04.2022.
- BMUB (2016): Climate Action Plan 2050. Principles and goals of the German government's climate policy. Hg. v. Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety. Berlin.

- BMUV (2021): Bundesumweltministerium fördert innovative Agro-Photovoltaik. Pressemitteilung Nr. 127/21. BMUV. Online verfügbar unter <https://www.bmuv.de/pressemitteilung/bundesumweltministerium-foerdert-innovative-agro-photovoltaik/>, zuletzt aktualisiert am 11.06.2021, zuletzt geprüft am 01.09.2022.
- BMWi (2019): Kohleausstieg und Strukturwandel. Hg. v. BMWi. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Wirtschaft/kohleausstieg-und-strukturwandel.html>, zuletzt geprüft am 03.02.2020.
- BMWK (2020): Integrierter Nationaler Energie- und Klimaplan. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). Online verfügbar unter https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/I/integrierter-nationaler-energie-klimaplan.pdf?__blob=publicationFile&v=4, zuletzt geprüft am 17.05.2022.
- BMWK (2022a): Klimaschutzplan 2050. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). Online verfügbar unter <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/klimaschutz-klimaschutzplan-2050.html>, zuletzt aktualisiert am 16.05.2022, zuletzt geprüft am 16.05.2022.
- BMWK (2022b): Über die IKI. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). Online verfügbar unter <https://www.international-climate-initiative.com/ueber-die-iki/>, zuletzt aktualisiert am 02.12.2022, zuletzt geprüft am 02.12.2022.
- BnetzA (2021a): Verwaltungsverfahren Az.: 8175-07-00-21/1. Festlegung der Anforderungen besonderer Solaranlagen nach §15 Innovationsausschreibungsverordnung. Hg. v. Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen. BnetzA. Online verfügbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/Ausschreibungen/Innovations/GezeichneteFestlegungOktober2021.pdf?__blob=publicationFile&v=3, zuletzt geprüft am 26.04.2022.

- BnetzA (2021b): Ein-ge-gan-ge-ne Stel-lung-nah-men im Fest-le-gungs-verfah-ren zu den be-son-de-ren So-lar-an-la-gen. Bundesnetzagentur (BNetzA). Online verfügbar unter <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Ausschreibungen/Innovation/BesondereSolaranlagen/StellungnahmenFestlegungsverfahren/start.html>, zuletzt aktualisiert am 18.05.2022, zuletzt geprüft am 18.05.2022.
- BnetzA (2022a): Ergebnisse der Ausschreibungen für innovative Anlagenkonzepte und für Solaranlagen auf Gebäuden und Lärmschutzwänden. 11.05.2022. Bundesnetzagentur (BNetzA). Online verfügbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2022/20220511_Solar.html, zuletzt aktualisiert am 11.05.2022, zuletzt geprüft am 01.09.2022.
- BnetzA (2022b): In-no-va-ti-ons-aus-schrei-bun-gen: Ge-bots-ter-min 1. April 2022. Hg. v. Bundesnetzagentur (BNetzA). Online verfügbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Ausschreibungen/Innovation/Gebortstermin_010422/artikel.html, zuletzt aktualisiert am 16.05.2022, zuletzt geprüft am 16.05.2022.
- Böhm, J.; Tietz, A. (2022): Abschätzung des zukünftigen Flächenbedarfs von Photo-voltaik-Freiflächenanlagen. Thünen Working Paper 204. Hg. v. Johann Heinrich von Thünen-Institut. Braunschweig.
- Böhm, Jonas (2022): Wie viele landwirtschaftlichen Flächen sind bereits durch PV-Freiflächenanlagen aus der Produktion genommen? Hg. v. Thünen-Institut für Betriebswirtschaft. Online verfügbar unter https://www.dlg-mitteilungen.de/fileadmin/img/content/cover/heft/2022/22-02/DLG0222_Flaechennutzung_PV-FFA_Boehm.pdf, zuletzt geprüft am 27.05.2022.
- Bopp, Georg (2021): Die lange Geschichte der APV. Von der Idee bis zum Projekt. Lecture Series Fraunhofer ISE. Fraunhofer ISE. Freiburg, 08.04.2021.
- Bopp, Georg; Goetzberger, Adolf; Oberfell, Tabea; Reise, Christian (2012): Verfahren zur simultanen kultivierung von nutzpflanzen und energetischen nutzung von Sonnenlicht. Patent Nr. EP2811819B1. Hg. v. Fraunhofer ISE. Fraunhofer-Gesellschaft. Online verfügbar unter <https://patents.google.com/patent/EP2811819B1/de>.

Buhr, Daniel (2010): Chaos oder Kosmos? Die Koordination der Innovationspolitik des Bundes - Probleme und Lösungsansätze. 1. Auflage. Baden-Baden: Nomos Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG (Wirtschafts- und Sozialpolitik, 4). Online verfügbar unter <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflicht-1202145>.

Bundesinformationszentrum Landwirtschaft (2021): Was wächst auf Deutschlands Feldern? Online verfügbar unter <https://www.landwirtschaft.de/landwirtschaft-verstehen/wie-arbeiten-foerster-und-pflanzenbauer/was-waechst-auf-deutschlands-feldern>, zuletzt aktualisiert am 27.05.2022, zuletzt geprüft am 27.05.2022.

Bundesverfassungsgericht (2021): Verfassungsbeschwerden gegen das Klimaschutzgesetz teilweise erfolgreich. Pressemitteilung Nr. 31/2021 vom 29. April 2021. 1 BvR 2656/18, 1 BvR 288/20, 1 BvR 96/20, 1 BvR 78/20. Online verfügbar unter <https://www.bundesverfassungsgericht.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2021/bvg21-031.html>, zuletzt geprüft am 17.05.2022.

Bündnis 90 / Die Grünen (2021): Deutschland. Alles ist drin. Bundestagswahlprogramm 2021. Online verfügbar unter https://cms.gruene.de/uploads/documents/Wahlprogramm-DIE-GRUENEN-Bundestagswahl-2021_barrierefrei.pdf, zuletzt geprüft am 01.09.2022.

CDU/CSU (2021): Das Programm für Stabilität und Erneuerung. Gemeinsam für ein modernes Deutschland. Online verfügbar unter <https://www.csu.de/common/download/Regierungsprogramm.pdf>, zuletzt geprüft am 01.09.2022.

Chan, Gabriel; Gabel, Matthias; Jenner, Steffen; Schindele, Stephan (2011): BRIC by BRIC. Governance and Energy Security in Developing Countries. Working Paper No. 47 - 2011. Hg. v. Wirtschaft & Politik (WiP). Universität Tübingen. Tübingen (ISSN 1614-5925). Online verfügbar unter https://bibliographie.uni-tuebingen.de/xmlui/bitstream/handle/10900/47813/pdf/Chan_Gabel_Jenner_Schindele_2011_Bric_by_Bric_.pdf?sequence=1, zuletzt geprüft am 16.05.2022.

- CHATZIPANAGI, Anatoli; TAYLOR, Nigel; THIEL, Christian; JAEGER-WALDAU, Arnulf; DUNLOP, Ewan; KENNY, Robert (2022): Agri-photovoltaics (Agri-PV): how multi-land use can help deliver sustainable energy and food. JRC129225. Hg. v. European Commission und Joint Research Centre (JRC). Online verfügbar unter <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC129225>.
- Commonwealth of Massachusetts; EEA; DOER; MDAR (2018): Guideline Regarding the Definition of Agricultural Solar Tariff Generation Units. Hg. v. Commonwealth of Massachusetts, Executive Office of Energy and Environmental Affairs (EEA), Massachusetts Department of Energy Resources (DOER) und Massachusetts Department of Agricultural Resources (MDAR). Online verfügbar unter <https://www.mass.gov/doc/agricultural-solar-tariff-generation-units-guideline-final/download>, zuletzt geprüft am 27.04.2022.
- DBV (2019): Zweite Säule - Förderung ländlicher Räume. EU-Agrarförderung. Die „zweite Säule“ der Gemeinsamen Agrarpolitik, GAP: Agrarumweltmaßnahmen und Ausgleichszulage für benachteiligte Gebiete sowie Förderung der ländlichen Infrastruktur im Fokus. Deutscher Bauernverband (DBV). Online verfügbar unter <https://www.bauernverband.de/themendossiers/eu-agrarfoerderung/themendossier/zweite-saeule-foerderung-laendlicher-raeume>, zuletzt aktualisiert am 01.09.2022, zuletzt geprüft am 01.09.2022.
- Denzin, Norman K. (2017): The Research Act. A Theoretical Introduction to Sociological Methods. First edition. London: Taylor and Francis. Online verfügbar unter <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.4324/9781315134543/research-act-norman-denzin>.
- Destatis (2019): Statistisches Jahrbuch 2019. 19, Land- und Forstwirtschaft. Erschienen im Oktober 2019. Unter Mitarbeit von Juliane Gude. Hg. v. Statistisches Bundesamt (Destatis). Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Themen/Querschnitt/Jahrbuch/_inhalt.html, zuletzt geprüft am 04.02.2020.

Destatis (2021): Siedlungs- und Verkehrsfläche wächst jeden Tag um 52 Hektar.

Pressemitteilung Nr. 209 vom 30. April 2021. Statistisches Bundesamt (Destatis). Online verfügbar unter

https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2021/04/PD21_209_412.html, zuletzt aktualisiert am 30.04.2021, zuletzt geprüft am 27.05.2022.

Deutscher Bauernverband (2019): EU-Agrarförderung. Zweite Säule - Förderung ländlicher Räume. Hg. v. Deutscher Bauernverband e.V. Online verfügbar unter

<https://www.bauernverband.de/themendossiers/eu-agrarfoerderung/themendossier/zweite-saeule-foerderung-laendlicher-raeume>, zuletzt aktualisiert am 16.05.2022, zuletzt geprüft am 16.05.2022.

Deutscher Bauernverband (2021): Potenziale und Synergien von Agri-Photovoltaik im EEG nutzen. Deutscher Bauernverband und Fraunhofer ISE schlagen Optimierung vor.

29.04.2021. Online verfügbar unter <https://www.bauernverband.de/presse-medien/pressemitteilungen/pressemitteilung/potenziale-und-synergien-von-agri-photovoltaik-im-eeg-nutzen>, zuletzt geprüft am 13.05.2022.

Deutscher Bundestag (2019): Drucksache 19/12697. Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Stephan Protschka, Peter Felser, Franziska Gminder, weiterer Abgeordneter und der Fraktion der AfD – Drucksache 19/11956 – Direkte und indirekte Landnutzungsänderungen. Deutscher Bundestag – 19. Wahlperiode. Online verfügbar unter <https://dserver.bundestag.de/btd/19/126/1912697.pdf>, zuletzt geprüft am 18.05.2022.

Deutscher Bundestag (2020): Positionspapier Parlamentarischer Beirat für nachhaltige Entwicklung. Den Nachhaltigkeitszielen im Gesetzgebungsverfahren ein angemessenes Gewicht verleihen. Ausschussdrucksache 19(26)72. Deutscher Bundestag – 19.

Wahlperiode. Online verfügbar unter

<https://www.bundestag.de/resource/blob/704126/5200ee72f67fa1a6f17bb0e32a4d401d/positionspapier-Weiterentwicklung-PBnE-data.pdf>, zuletzt geprüft am 18.05.2022.

- Deutscher Bundestag (2022): Drucksache 20/591. Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Stephan Protschka, Peter Felser, Frank Rinck, weiterer Abgeordneter und der Fraktion der AfD – Drucksache 20/435 –. Flächenverbrauch und Verlust von Agrarflächen in Deutschland. Hg. v. Deutscher Bundestag – 20. Wahlperiode. Online verfügbar unter <https://dserver.bundestag.de/btd/20/005/2000591.pdf>, zuletzt geprüft am 18.05.2022.
- Die Bundesregierung (2011): The Water, Energy and Food Security Nexus – Solutions for the Green Economy. Bonn. Online verfügbar unter <https://www.water-energy-food.org/about-us>.
- Die Bundesregierung (2019): Antwort der Bundesregierung. auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Stephan Protschka, Peter Felser, Franziska Gminder, weiterer Abgeordneter und der Fraktion der AfD – Drucksache 19/11956 –. Direkte und indirekte Landnutzungsänderungen. 26.08.2019. Hg. v. Deutscher Bundestag 19. Wahlperiode. Online verfügbar unter <https://kleineanfragen.de/bundestag/19/12697>, zuletzt geprüft am 03.02.2020.
- Die Bundesregierung (2020a): Die Nationale Wasserstoffstrategie. Hg. v. BMWK. BMWi. Online verfügbar unter https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=20, zuletzt geprüft am 17.05.2022.
- Die Bundesregierung (2020b): Die deutsche Nachhaltigkeitsstrategie. Weiterentwicklung 2021. Online verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/998194/1875176/3d3b15cd92d0261e7a0bcd8f43b7839/deutsche-nachhaltigkeitsstrategie-2021-langfassung-download-bpa-data.pdf>, zuletzt geprüft am 16.05.2022.
- Die Bundesregierung (2022a): Gesetzentwurf der Bundesregierung. Entwurf eines Gesetzes zu Sofortmaßnahmen für einen beschleunigten Ausbau der erneuerbaren Energien und weiteren Maßnahmen im Stromsektor. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). Die Bundesregierung. Online verfügbar unter https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/04_EEG_2023.pdf?__blob=publicationFile&v=8, zuletzt geprüft am 16.05.2022.

- Die Bundesregierung (2022b): Eckpunktepapier BMWK BMUV und BMEL. Ausbau der Photovoltaik auf Freiflächen im Einklang mit landwirtschaftlicher Nutzung und Naturschutz. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). Berlin. Online verfügbar unter https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/eckpunktepapier-ausbau-photovoltaik-freiflaechenanlagen.pdf?__blob=publicationFile&v=12, zuletzt geprüft am 16.05.2022.
- Die Bundesregierung (2022c): Beschleunigter Ausbau. Mehr Windenergie auf See. Online verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/windenergie-auf-see-gesetz-2022968>, zuletzt aktualisiert am 18.05.2022, zuletzt geprüft am 18.05.2022.
- DIN (2022): DIN SPEC 91434:2021-05. Agri-Photovoltaik-Anlagen - Anforderungen an die landwirtschaftliche Hauptnutzung. DIN. Online verfügbar unter <https://www.beuth.de/de/technische-regel/din-spec-91434/337886742>, zuletzt aktualisiert am 26.04.2022, zuletzt geprüft am 26.04.2022.
- DOER MA (2018): Agricultural Solar Tariff Generation Units Guideline Final. Last updated: 2018-04-26. Hg. v. Massachusetts Department of Energy Resources (DOER MA). Online verfügbar unter <https://www.mass.gov/doc/agricultural-solar-tariff-generation-units-guideline-final>, zuletzt geprüft am 30.05.2022.
- DOER MA (2022): Dual-use shading analysis tool. Massachusetts Department of Energy Resources (DOER MA). Online verfügbar unter <https://massgov.github.io/DOER/doer.html>, zuletzt aktualisiert am 18.03.2022, zuletzt geprüft am 01.09.2022.
- Dupraz, Christian.; Marrou, Hélène; Talbot, Grégoire; Dufour, Lydie; Nogier, A.; Ferard, Yoann (2011): Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use. Towards new agrivoltaic schemes. In: *Renewable Energy* 36 (10), S. 2725–2732. DOI: 10.1016/j.renene.2011.03.005.
- EARTO (2014): The TRL Scale as a Research & Innovation Policy toll, EARTO Recommendations.

- Eckmann, U. (2022): SUNfarming Group entwickelt und realisiert neuartige Agri-Solar-Systeme im Rheinland. SUNfarming.de. 15.02.2022. Hg. v. SunFarming. Online verfügbar unter <https://sunfarming.de/blog/sunfarming-group-entwickelt-und-realisiert-neuartige-agri-solar-systeme-im-rheinland>, zuletzt geprüft am 27.04.2022.
- Ecowind (2022): Agri-PV Anlage Haidegg. Leuchtturmprojekt Agri-PV Anlage in Haidegg. ECOWIND Handels-& Wartungs-GmbH. Online verfügbar unter <https://www.ecowind.at/unternehmen/referenzen/agri-pv-anlage-haidegg/>, zuletzt aktualisiert am 02.03.2022, zuletzt geprüft am 31.05.2022.
- EDF France (2020): Une année sous les panneaux d'Agri-PV. Publié le 22/09/2020. Électricité de France SA. Hg. v. EDF France. Online verfügbar unter <https://www.edf.fr/groupe-edf/inventer-l-avenir-de-l-energie/r-d-un-savoir-faire-mondial/toutes-les-actualites-de-la-r-d/une-annee-sous-les-panneaux-d-agri-pv>, zuletzt geprüft am 27.04.2022.
- Eichenauer, Eva; Reusswig, Fritz; Meyer-Ohlendorf, Lutz; Lass, Wiebke (2018): Bürgerinitiativen gegen Windkraftanlagen und der Aufschwung rechtspopulistischer Bewegungen. In: Olaf. Kühne und Florian. Weber (Hg.): Bausteine der Energiewende. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden; Imprint; Springer VS (RaumFragen: Stadt - Region - Landschaft), S. 633–651. Online verfügbar unter https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-19509-0_32, zuletzt geprüft am 18.05.2022.
- EIT Food (2021): New Coalition Announces Bold Plan to Decarbonize Europe's Food System. EIT Food iVZW. 04.05.2021. Hg. v. EIT Food iVZW. Online verfügbar unter <https://www.eitfood.eu/news/post/new-coalition-announces-bold-plan-to-decarbonize-europes-food-system>, zuletzt geprüft am 16.05.2022.
- ENGIE (2022): Agri PV. Online verfügbar unter <https://www.engie.nl/over-ons/projecten/Agri-PV>, zuletzt aktualisiert am 01.09.2022, zuletzt geprüft am 01.09.2022.
- Enkhardt, Saskia (2022): Photovoltaik-Zubau in Deutschland 2021 brutto bei 5263,2 Megawatt. In: *PV Magazine*, 31.01.2022. Online verfügbar unter <https://www.pv-magazine.de/2022/01/31/photovoltaik-zubau-in-deutschland-2021-brutto-bei-52632-megawatt/>, zuletzt geprüft am 27.05.2022.

Europäische Kommission (2022): Short-term outlook for EU agricultural markets in 2022. Spring 2022. Edition N°32. DG Agriculture and Rural Development. Brüssel. Online verfügbar unter https://agriculture.ec.europa.eu/system/files/2022-04/short-term-outlook-spring-2022_en_0.pdf, zuletzt geprüft am 01.09.2022.

European Commission (2011): Fahrplan für ein ressourcenschonendes Europa. Brüssel. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52011DC0571&from=DE>, zuletzt geprüft am 16.05.2022.

European Commission (2019): Europäischer Grüner Deal. Erster klimaneutraler Kontinent werden. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_de, zuletzt aktualisiert am 17.05.2022, zuletzt geprüft am 17.05.2022.

European Commission (2020): Empfehlungen der Kommission für den GAP-Strategieplan Deutschlands. Brüssel. Online verfügbar unter https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/_Landwirtschaft/EU-Agrarpolitik-Foerderung/eu-kom-empfehlungen-gap-strategieplan.pdf;jsessionid=EC0E7E855267E178D76B84E44E2BC3EA.live832?__blob=publicationFile&v=4, zuletzt geprüft am 16.05.2022.

European Commission (2021a): Commission publishes list of potential eco-schemes. Brüssel. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/info/news/commission-publishes-list-potential-eco-schemes-2021-jan-14_de, zuletzt aktualisiert am 01.06.2021, zuletzt geprüft am 16.05.2022.

European Commission (2021b): EU-Bodenstrategie für 2030. Die Vorteile gesunder Böden für Menschen, Lebensmittel, Natur und Klima nutzen. Brüssel. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52021DC0699&from=EN>, zuletzt geprüft am 17.05.2022.

- European Commission (2022a): National energy and climate plans. EU countries' 10-year national energy and climate plans for 2021-2030. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/info/energy-climate-change-environment/implementation-eu-countries/energy-and-climate-governance-and-reporting/national-energy-and-climate-plans_de, zuletzt aktualisiert am 04.02.2022, zuletzt geprüft am 17.05.2022.
- European Commission (2022b): A European Green Deal. Striving to be the first climate-neutral continent. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en, zuletzt aktualisiert am 10.05.2022, zuletzt geprüft am 16.05.2022.
- European Commission (2022c): EDGAR - The Emissions Database for Global Atmospheric Research. EDGAR-FOOD. A global emission inventory of GHGs from the food systems. Online verfügbar unter https://edgar.jrc.ec.europa.eu/edgar_food, zuletzt aktualisiert am 16.05.2022, zuletzt geprüft am 16.05.2022.
- European Commission (2022d): Food Safety. Farm to Fork Strategy. for a fair, healthy and environmentally-friendly food system. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/food/horizontal-topics/farm-fork-strategy_de, zuletzt aktualisiert am 16.05.2022, zuletzt geprüft am 16.05.2022.
- FAO (2014): Making integrated food-energy systems work for people and climate. An overview. Unter Mitarbeit von Anne Bogdanski, Olivier Dubois, Craig Jamieson und Krell Rainer: FAO Books.
- FAO (2020): The State of the World's Forests 2020. Forest, biodiversity and people. Rome: FAO (State of the world's forests, 2020), zuletzt geprüft am 17.05.2020.
- FAO (2021a): The State of Food and Agriculture. Making agri-food systems more resilient to shocks and stresses. Rome: FOOD & AGRICULTURE ORG. Online verfügbar unter <https://www.fao.org/3/cb4476en/cb4476en.pdf>, zuletzt geprüft am 17.05.2022.

- FAO (2021b): The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture. Systems at breaking point. Synthesis Report. Hg. v. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Rome (978-92-5-135327-1). Online verfügbar unter <https://www.fao.org/documents/card/en/c/cb7654en>, zuletzt geprüft am 16.05.2022.
- FAO (2022): FAOSTAT. Land Use. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Online verfügbar unter <https://www.fao.org/faostat/en/#data/RL>, zuletzt aktualisiert am 04.05.2022, zuletzt geprüft am 17.05.2022.
- FDP (2021): Nie Gab es mehr zu tun. Wahlprogramm der Freien Demokraten. Bundestagswahl 2021. Hg. v. FDP. Beschluss des 72. Ord. Bundesparteitag der Freien Demokraten vom 14.-16. Mai 2021 (Seite 60). Online verfügbar unter https://www.fdp.de/sites/default/files/2021-06/FDP_Programm_Bundestagswahl2021_1.pdf.
- Fehrenbach, Horst (2019): Einsatz von Biokraftstoffen im Verkehrssektor bis 2030. Kurzstudie zu den Potenzialen an Kraftstoffen auf Basis von Anbaubiomasse sowie biogenen Abfällen und Reststoffen. Hg. v. Institut für Energie und Umweltforschung (ifeu). Heidelberg. Online verfügbar unter https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/ifeu_Kurzstudie_Potenzialschaetzungen_fuer_Biokrftstoffe_im_Verkehrssektor.pdf, zuletzt geprüft am 18.05.2022.
- Feistel, Ulrike (2022): Hydrologie und Energiewende - Projektbeispiele. Aufbau Agro-PV Anlage in Ngerenyi, Kenia. Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden. Online verfügbar unter <https://www.htw-dresden.de/hochschule/fakultaeten/bauingenieurwesen/studium/lehrgebiete/wasserwesen/forschung/hydrologie-und-energiewende>, zuletzt aktualisiert am 01.09.2022, zuletzt geprüft am 01.09.2022.
- Feuerbacher, Arndt; Laub, Moritz; Högy, Petra; Lippert, Christian; Pataczek, Lisa; Schindele, Stephan 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.

Finanziato dall'Unione europea; MITE (2022): Consultazione pubblica PNRR: Piano di Ripresa e Resilienza, Missione 2 (Rivoluzione verde e Transizione ecologica), Componente 2 (Energia rinnovabile, idrogeno, rete e mobilità sostenibile), Investimento 1.1 (Sviluppo Agrovoltaico). Finanziato dall'Unione europea; Ministero della transizione ecologica (MITE).

FNR (2022): Tabelle der Anbaufläche für nachwachsende Rohstoffe 2021. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR). Online verfügbar unter <https://mediathek.fnr.de/grafiken/daten-und-fakten/anbauflache-fur-nachwachsende-rohstoffe-tabelle.html>, zuletzt aktualisiert am 27.05.2022, zuletzt geprüft am 27.05.2022.

Fraunhofer CSET (2017): FIC AgroPV. Presentacion del proyecto. Hg. v. Fraunhofer Chile. Online verfügbar unter https://www.smart-agropv.com/principal/1/resultados_agropvr15/, zuletzt geprüft am 07.01.2020.

Fraunhofer ISE (2018): Agrophotovoltaik goes global: von Chile bis Vietnam. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Online verfügbar unter <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2018/agrophotovoltaik-goes-global-von-chile-bis-vietnam.html>, zuletzt aktualisiert am 20.06.2018, zuletzt geprüft am 27.05.2022.

Fraunhofer ISE (2019): SHRIMPS – Solar-Aquakultur-Habitate als Ressourceneffiziente und Integrierte Multilayer-Produktions-Systeme. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Online verfügbar unter <https://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/shrimps.html>, zuletzt aktualisiert am 27.05.2022, zuletzt geprüft am 27.05.2022.

Fraunhofer ISE (2020): Agri-Photovoltaik: Chance für Landwirtschaft und Energie. Ein Leitfaden für Deutschland. Hg. v. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Online verfügbar unter https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/infomaterial/brochures/photo-voltaik/APV-Leitfaden_2020_web_neu.pdf, zuletzt geprüft am 26.04.2022.

Fraunhofer ISE (2021a): Erste Agri-PV Forschungs- und Demonstrationsanlage im Rheinischen Revier. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Online verfügbar unter <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/news/2021/erste-agri-pv-forschungs-und-demonstrationsanlage-im-rheinischen-revier.html>, zuletzt aktualisiert am 29.10.2021, zuletzt geprüft am 27.05.2022.

Fraunhofer ISE (2021b): Erste Agri-PV-Anlage für CO₂-neutralen Obstanbau im Test. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Online verfügbar unter <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2021/erste-agri-pv-anlage-fuer-co2-neutralen-obstanbau-im-test.html>, zuletzt aktualisiert am 14.09.2021, zuletzt geprüft am 27.05.2022.

Fraunhofer ISE (2021c): Vorrichtung zur Kultivierung von Nutzpflanzen. Gebrauchsmusterschrift. Hg. v. Fraunhofer-Gesellschaft. Online verfügbar unter <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/074644347/publication/DE202021100025U1?q=pn%3DDE202021100025U1>, zuletzt geprüft am 02.12.2022.

Fraunhofer ISE (2022a): Agri-Photovoltaik: Chance für Landwirtschaft und Energiewende. Ein Leitfaden für Deutschland. Hg. v. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Online verfügbar unter <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/agri-photovoltaik-chance-fuer-landwirtschaft-und-energiewende.html>, zuletzt aktualisiert am 26.04.2022, zuletzt geprüft am 26.04.2022.

Fraunhofer ISE (2022b): APV-MaGa – Agri-Photovoltaik für Mali und Gambia: Nachhaltige Stromproduktion durch integrierte Nahrungsmittel-, Energie- und Wassersysteme. Forschungsprojekte. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Online verfügbar unter <https://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/apv-maga.html>, zuletzt aktualisiert am 27.05.2022, zuletzt geprüft am 27.05.2022.

Fraunhofer ISE (2022c): WATERMED 4.0. Smart technologies to improve quality and safety of Mediterranean agriculture. Unter Mitarbeit von Max Trommsdorff. Hg. v. Fraunhofer ISE (<https://www.watermed-project.eu/>). Online verfügbar unter <https://www.ise.fraunhofer.de/en/research-projects/watermed.html>, zuletzt geprüft am 03.12.2022.

- GIZ (2022): An Overview of the Current Situation of Agrivoltaic Development in China and Some Recommendations. Sino-German Energy Partnership. Hg. v. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. The Sino-German Energy Partnership.
- Goetzberger, Adolf (2014): Solarmodulanordnung mit reduzierten Randeffekten und Verwendung der Solarmodulanordnung zur simultanen Kultivierung von Nutzpflanzen und energetischer Nutzung von Sonnenlicht. Patent Nr. DE102014218458A1. Hg. v. Fraunhofer ISE. Fraunhofer-Gesellschaft. Deutsches Patent- und Markenamt. Online verfügbar unter <https://patents.google.com/patent/DE102014218458A1/ja>, zuletzt geprüft am 25.04.2022.
- Goetzberger, Adolf; Swanson, Richard; Werner, Tom; Yamaguchi, Masafumi (2006): Energy Farming. Für einen intelligenteren Gebrauch von Agrarsubventionen. In: *Solarzeitalter* 2006 (4), S. 44–48.
- Goetzberger, Adolf; Zastrow, Armin (1981): Kartoffeln unter dem Kollektor. In: *Sonnenenergie* (3), S. 19–22. Online verfügbar unter <https://produktdatenbank.innovationsgruppen-landmanagement.de/kartoffeln-unter-dem-kollektor>, zuletzt geprüft am 25.04.2022.
- Goetzberger, Adolf; Zastrow, Armin (1982): On the coexistence of solar-energy conversion and plant cultivation. In: *International Journal of Solar Energy* 1982 (1), S. 55–69. Online verfügbar unter DOI:10.1080/01425918208909875, zuletzt geprüft am 25.04.2022.
- Goldammer, Kathrin; Mans, Ulrich; Rivera, Manuel (2013): Beiträge zur sozialen Bilanzierung der Energiewende. Hg. v. Institute for Advanced Sustainability Studies (IASS). Potsdam. Online verfügbar unter https://www.iass-potsdam.de/sites/default/files/files/report_beitraege_zur_sozialen_bilanzierung_der_energi_ewende_0.pdf, zuletzt geprüft am 18.05.2022.
- Gorjian, Shiva; Ebadi, Hossein; Trommsdorff, Max; Sharon, H.; Demant, Matthias; Schindele, Stephan (2021): The advent of modern solar-powered electric agricultural machinery: A solution for sustainable farm operations. In: *Journal of Cleaner Production* 292, S. 126030. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126030.

-
- Green Climate Fund (2020): SAP016. Fiji Agrophotovoltaic Project in Ovalau. Online verfügbar unter <https://www.greenclimate.fund/project/sap016>, zuletzt aktualisiert am 21.08.2020, zuletzt geprüft am 27.05.2022.
- GrIG (2015): Sequestrata la più grande concentrazione europea di serre fotovoltaiche. In: *Gruppo d'Intervento Giuridico (GrIG)*, 04.07.2015. Online verfügbar unter <https://gruppodinterventogiuridicoweb.com/2015/07/04/sequestrata-la-piu-grande-concentrazione-europea-di-serre-fotovoltaiche/>, zuletzt geprüft am 01.09.2022.
- Han, Kim Chang (2019): Korea's farming-type photovoltaic business and Association role. Session 3: The 1st Solar Sharing Symposium - The Next Big Things (I) Moderator: Prof. Oh Soo Young, Yeungnam University. KAVA. Green Energy Expo. Daegu, Korea (04.04.2019), 2019. Online verfügbar unter <http://greenconference.kr/eng/doc/program02.php>, zuletzt geprüft am 25.09.2019.
- Handley, Lucy (2020): Walmart has a grand plan to help suppliers club together to buy green energy. In: *CNBC*, 23.10.2020. Online verfügbar unter <https://www.cnbc.com/2020/10/23/walmart-wants-suppliers-to-buy-renewable-energy-collectively.html>, zuletzt geprüft am 02.09.2022.
- Harwood, Lori (2021): UArizona Partners on \$10M USDA Grant to Expand Research on Growing Crops Under Solar Panels. The University of Arizona. 06.10.2021. Hg. v. The University of Arizona. Online verfügbar unter <https://news.arizona.edu/story/uarizona-partners-10m-usda-grant-expand-research-growing-crops-under-solar-panels>, zuletzt geprüft am 13.05.2022.
- Hirsch, Benjamin (2021): Grünen-Peitsche oder echte Lösung? Was Verbot des Einfamilienhauses bringen würde Teilen. In: *FOCUS online*, 16.02.2021. Online verfügbar unter https://www.focus.de/politik/deutschland/gruenen-peitsche-oder-echte-loesung-was-verbot-des-einfamilienhauses-bringen-wuerde_id_12983044.html, zuletzt geprüft am 02.12.2022.

- Hofgemeinschaft Heggelbach (2022): Regenerative Energien. Die Energie der Hofgemeinschaft. Hg. v. Hofgemeinschaft Heggelbach. Online verfügbar unter <https://hofgemeinschaft-heggelbach.de/energie>, zuletzt aktualisiert am 25.04.2022, zuletzt geprüft am 27.05.2022.
- Hong, Seo Jae (2019): Overview of Korean PV Market, Policies and Industry. Key note speech 2 (04.04.2019). Session 2: Market Trend and Technology (Host: Prof. Jung Jae Hak). KOPIA. Green Energy Expo. Daegue, Korea, 2019. Online verfügbar unter <http://greenconference.kr/eng/doc/program02.php>, zuletzt geprüft am 24.09.2019.
- Hörmann (2022): Agrar-Photovoltaik Solarzaun. Bereich Photovoltaik. Online verfügbar unter <https://www.hoermann-info.de/photovoltaik/agrar-photovoltaik-solarzaun>, zuletzt aktualisiert am 30.05.2022, zuletzt geprüft am 30.05.2022.
- IEA (2022): Global CO2 emissions rebounded to their highest level in history in 2021 - News - IEA. International Energy Agency (IEA). Online verfügbar unter <https://www.iea.org/news/global-co2-emissions-rebounded-to-their-highest-level-in-history-in-2021>, zuletzt aktualisiert am 08.03.2022, zuletzt geprüft am 02.09.2022.
- InVivo (2020): Agrivoltaïsme : Total et InVivo mettent en commun leur savoir-faire pour allier production agricole et énergie renouvelable | InVivo. Union InVivo - Union de Coopératives Agricoles. 04.03.2020. Online verfügbar unter <https://www.invivo-group.com/en/node/221633>, zuletzt geprüft am 27.04.2022.
- Jäger, Wolfgang (1988): Von der Kanzlerdemokratie zur Koordinationsdemokratie: Für Wilhelm Hennis zum 65. Geburtstag. In: *Zeitschrift für Politik* 35 (1), S. 15–32. Online verfügbar unter <http://www.jstor.org/stable/24226667>.
- Jenner, Steffen (2013): Why and how effectively do states support renewable energy? a comparative econometric analysis of state-level policies in the EU and U.S. Dissertation. Universität Tübingen, Tübingen. Online verfügbar unter <https://bibliographie.uni-tuebingen.de/xmlui/handle/10900/37922>, zuletzt geprüft am 16.05.2022.

-
- Jenner, Steffen; Ovaere, Lotte; Schindele, Stephan (2013): The Impact of Private Interest Contributions on RPS Adoption. In: *Econ Polit* 25 (3), 411-423. DOI: 10.1111/ecpo.12018.
- Kade, Claudia (2014): Parteitag: Der Veggie Day lässt die Grünen nicht los. In: *WELT*, 21.11.2014. Online verfügbar unter <https://www.welt.de/politik/deutschland/article134604516/Der-Veggie-Day-laesst-die-Gruenen-nicht-los.html>, zuletzt geprüft am 02.12.2022.
- Karnowski, Veronika; Kümpel, Anna Sophie (2015): Diffusions of Innovations von Everett M. Rogers: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Ketzer, Daniel; Schlyter, Peter; Weinberger, Nora; Rösch, Christine (2020a): 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.
- Ketzer, Daniel; Weinberger, Nora; Rösch, Christine; Seitz, Stefanie B. (2020b): Land use conflicts between biomass and power production – citizens’ participation in the technology development of Agrophotovoltaics. In: *Journal of Responsible Innovation* 7 (2), S. 193–216. DOI: 10.1080/23299460.2019.1647085.
- Kohns, Stephan (2008): Politikberatung. Stuttgart: Lucius & Lucius (UTB, 8351).
- Kühne, Olaf; Weber, Florian (2018): Bausteine der Energiewende – Einführung, Übersicht und Ausblick. In: Kühne, O., Weber F. (Hg.): BAUSTEINE DER ENERGIEWENDE. [S.l.]: VS VERLAG FÜR SOZIALWISSENSCHAFTEN (RaumFragen: Stadt - Region - Landschaft, RFSRL), S. 3–19. Online verfügbar unter https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-19509-0_1, zuletzt geprüft am 18.05.2022.
- Landesregierung BaWü (2022): Land fördert fünf Modellanlagen zur Agri-Photovoltaik. Baden-Württemberg.de. 13.01.2022. Hg. v. Landesregierung BaWü. Online verfügbar unter <https://www.baden-wuerttemberg.de/de/service/presse/pressemitteilung/pid/land-foerdert-fuenf-modellanlagen-zur-agri-photovoltaik/>, zuletzt geprüft am 27.04.2022.

- Landtag BaWü (2020): Experten sehen großes Potenzial für die Agrophotovoltaik. 02.10.2020. Hg. v. Landtag von Baden-Württemberg. Online verfügbar unter <https://www.landtag-bw.de/home/aktuelles/pressemitteilungen/2020/oktober/912020.html>, zuletzt geprüft am 27.05.2022.
- Landwirtschaftskammer Oberösterreich (2021): Steuerliche Konsequenzen von PV-Anlagen auf landwirtschaftlichen Flächen. Grundlage: Einkommensteuerrichtlinien Rz 5189 ff. Online verfügbar unter <https://ooe.lko.at/steuerliche-konsequenzen-von-pv-anlagen-auf-landwirtschaftlichen-fl%C3%A4chen+2400+3421151>, zuletzt geprüft am 27.05.2022.
- Lauth, Hans-Joachim; Pickel, Gert; Pickel, Susanne (2015): Methoden der vergleichenden Politikwissenschaft. Eine Einführung. 2., aktualisierte Aufl. Wiesbaden: Springer VS (Grundwissen Politik, Bd. 60).
- Lawson, Ashley J.; Sherlock, Molly F.; Platzer, Michaela D.; Clark, Corrie E.; Cowan, Tadlock (2020): Solar Energy: Frequently Asked Questions. Hg. v. Congressional Research Service. Online verfügbar unter <https://crsreports.congress.gov/product/pdf/R/R46196>, zuletzt geprüft am 13.05.2022.
- Leitner, Hubert; Czaloun, Günther (2018): Innovatives Seil-Tragsystem für Anwendungen in der Agro-Photovoltaik. 15. Symposium Energieinnovation. Technische Universität Graz, 14.02.2018. Online verfügbar unter https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/Events/Eninnov2018/files/lf/Session_C6/461_LF_Leitner.pdf, zuletzt geprüft am 27.04.2022.
- Lieth, Heiner (2022): Emeritus Crop Ecologist specializing in greenhouse, nursery and indoor production, soilless culture, and applications of photovoltaic energy production in agriculture. UC Davis. Online verfügbar unter <https://lieth.ucdavis.edu/>, zuletzt aktualisiert am 03.08.2022, zuletzt geprüft am 01.09.2022.
- Malthus, Thomas (1798): An Essay on the Principle of Population. An Essay on the Principle of Population, as it Affects the Future Improvement of Society with Remarks on the Speculations of Mr. Godwin, M. Condorcet, and Other Writers. First edition. London: J. Johnson (The Macat Library. Politics). Online verfügbar unter <http://www.esp.org/books/malthus/population/malthus.pdf>, zuletzt geprüft am 16.05.2022.

-
- Marrou, Hélène; Wery, Jacques; Dufour, L.; Dupraz, Christian (2013): Productivity and radiation use efficiency of lettuces grown in the partial shade of photovoltaic panels. In: *European Journal of Agronomy* 44, S. 54–66. DOI: 10.1016/j.eja.2012.08.003.
- Matalucci, Sergio (2021): Italy devotes €1.1bn to agrivoltaics, €2bn to energy communities and storage. In: *PV Magazine*, 28.04.2021. Online verfügbar unter <https://www.pv-magazine.com/2021/04/28/italy-devotes-e1-1bn-to-agrivoltaics-e2bn-to-energy-communities-and-storage/>, zuletzt geprüft am 02.12.2022.
- Matland, Richard E. (1995): Synthesizing the Implementation Literature: The Ambiguity-Conflict Model of Policy Implementation. In: *Journal of Public Administration Research and Theory: J-PART* 5 (2), S. 145–174. Online verfügbar unter <http://www.jstor.org/stable/1181674>.
- Mayntz, Renate (Hg.) (1980): Implementation politischer Programme II. Neue Wissenschaftliche Bibliothek Soziologie. Verlagsgruppe Athenäum, Hain, Scriptor, Hanstein.
- Mayntz, Renate (Hg.) (2003): Die Reformierbarkeit der Demokratie. Innovationen und Blockaden. Festschrift für Fritz W. Scharpf. Unter Mitarbeit von Fritz W. Scharpf. Frankfurt/Main, New York: Campus-Verl. (Schriften aus dem Max-Planck-Institut für Gesellschaftsforschung, Bd. 45). Online verfügbar unter [https://books.google.de/books?hl=de&lr=&id=uGRKNR7mLBIC&oi=fnd&pg=PA205&dq=Benz,+Arthur,+2003:+Konstruktive+Vetospiele+in+Mehrebenensystemen,+in:+Mayntz,+Renate++Streeck,+Wolfgang+\(Hrsg.\),+2003:+Die+Reformierbarkeit+der+Demokratie,+Innovationen+und+Blockaden,+Frankfurt++Main,+205+%E2%80%93+238.&ots=xSl3fr12AS&sig=P9DFKP37eh5OyPxBEHiaG4focpA&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.de/books?hl=de&lr=&id=uGRKNR7mLBIC&oi=fnd&pg=PA205&dq=Benz,+Arthur,+2003:+Konstruktive+Vetospiele+in+Mehrebenensystemen,+in:+Mayntz,+Renate++Streeck,+Wolfgang+(Hrsg.),+2003:+Die+Reformierbarkeit+der+Demokratie,+Innovationen+und+Blockaden,+Frankfurt++Main,+205+%E2%80%93+238.&ots=xSl3fr12AS&sig=P9DFKP37eh5OyPxBEHiaG4focpA&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false), zuletzt geprüft am 18.05.2022.
- Mayntz, Renate; Scharpf, Fritz (Hg.) (1973): Planungsorganisation. Die Diskussion um die Reform von Regierung und Verwaltung des Bundes. München: R. Piper & Co. Verlag (Piper-Sozialwissenschaft Reader zur Politologie, Soziologie und Ökonomie, 17).

- Mirazo, Jabier Ruiz (2022): Europa verschlingt die Welt. WWF. Brüssel. Online verfügbar unter <https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Landwirtschaft/bericht-europa-verschlingt-die-welt.pdf>, zuletzt geprüft am 01.09.2022.
- MKG GÖBEL (2022): Büren (D). Projekte. Online verfügbar unter <https://www.mkg-goebel.de/de/projekt/bueren>, zuletzt aktualisiert am 15.04.2022, zuletzt geprüft am 31.05.2022.
- MLR BaWü (2022a): Fruchtwechsel und Stilllegung. Ausnahmen für 2023 beschlossen. 21.09.2022. Hg. v. MLR BaWü. Stuttgart. Online verfügbar unter <https://mlr.baden-wuerttemberg.de/de/unsere-service/presse-und-oeffentlichkeitsarbeit/pressemitteilungen/pressemitteilung/pid/fruchtwechsel-und-stilllegung-ausnahmen-fuer-2023-beschlossen/>, zuletzt geprüft am 02.12.2022.
- MLR BaWü (2022b): Landesregierung fördert fünf Modellanlagen zur Agri-PV mit rund 2,5 Millionen Euro. 13.01.2022. Hg. v. MLR BaWü. Ministerium für Ernährung, Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg (MLR). Online verfügbar unter <https://mlr.baden-wuerttemberg.de/de/unsere-service/presse-und-oeffentlichkeitsarbeit/pressemitteilungen/pressemitteilung/pid/landesregierung-foerdert-fuenf-modellanlagen-zur-agri-pv-mit-rund-25-millionen-euro-1/>, zuletzt aktualisiert am 2022, zuletzt geprüft am 27.05.2022.
- Neville D. Crossman; Onil Banerjee; Luke Brander; Peter Verburg; Jennifer Hauck (2018): Global socio-economic impacts of future changes in biodiversity and ecosystem services: State of play and approaches for new modelling. The Integrated Economic-Environmental Modelling (IEEM) Platform. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/323129926_Global_socio-economic_impacts_of_future_changes_in_biodiversity_and_ecosystem_services_State_of_play_and_approaches_for_new_modelling.
- next2sun (2022): Referenzen. Agri-PV-Anlagen. Solarpark Donaueschingen-Aasen, Baden-Württemberg. Online verfügbar unter <https://www.next2sun.de/referenzen/>, zuletzt aktualisiert am 20.02.2022, zuletzt geprüft am 30.05.2022.

- OeEB (2022): Langfristige Kreditlinie an SEKEM Ägypten. Österreichische Entwicklungsbank. Online verfügbar unter <https://www.oe-eb.at/unsere-projekte/projekte-im-ueberblick/sekem-holding.html>, zuletzt aktualisiert am 02.12.2022, zuletzt geprüft am 02.12.2022.
- ÖKO-HAUS GmbH (2022): Referenzen. Freifläche. Online verfügbar unter <https://www.oeko-haus.com/referenzen/>, zuletzt aktualisiert am 25.01.2022, zuletzt geprüft am 27.04.2022.
- OpenEI (2020): U.S. Department of Energy InSPIRE Project Overview. Online verfügbar unter <https://openei.org/wiki/InSPIRE/Project>, zuletzt aktualisiert am 13.05.2022, zuletzt geprüft am 13.05.2022.
- Ostrom, Elinor (1990): Governing the commons. The Evolution of Institutions for Collective Action. Cambridge: Cambridge University Press (Political Economy of Institutions and Decisions). Online verfügbar unter <https://books.google.de/books?id=4xg6oUobMz4C>.
- Park, Jongseong (2019): Governmental measures and directions of renewable energy policy in Korea. Speaker (24.07.2019). International Symposium on Solar Energy in the Form of Farming. Green Energy Institute. Jeonnam Agricultural Research and Extension Service (JARES) South Korea. Naju-City, Republic of Korea, 2019.
- Pepe, Jacobo Maria (2022): Der Ukraine-Krieg und seine Folgen: Deutschland muss seine Energietransformation neu austarieren. Hg. v. Stiftung Wissenschaft und Politik (SWP). Online verfügbar unter <https://www.swp-berlin.org/publikation/der-ukraine-krieg-und-seine-folgen-deutschland-muss-seine-energietransformation-neu-austarieren>, zuletzt aktualisiert am 18.05.2022, zuletzt geprüft am 18.05.2022.
- Petrova, Veselina (2020): Total Quadran to pursue solar agrivoltaic development with InVivo. Renewables Now. 05.05.2020. Online verfügbar unter <https://renewablesnow.com/news/total-quadran-to-pursue-solar-agrivoltaic-development-with-invivo-689759/>, zuletzt geprüft am 27.04.2022.

Pfluger, Benjamin; Tersteegen, Bernd; Franke, Bernd (2018): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Modul U.a: Ökologische Evaluierung der Szenarien Referenzszenario, Basisszenario, Szenario Geringerer Ausbau der Übertragungsnetze, Szenario Alternative regionale EE-Verteilung und Restriktionsarmes Szenario. Hg. v. Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), Consentec GmbH, Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (IFEU), Technische Universität Wien, M-Five und TEP Energy GmbH. Online verfügbar unter https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/B/berichtsmodul-u-a-oekologische-evaluierung-der-szenarien.pdf?__blob=publicationFile&v=4, zuletzt geprüft am 17.05.2022.

Pierson, Drew (2019): Making Solar and Agriculture Work Together. How solar and agrivoltaics are helping livestock farming and agriculture thrive at Knowlton Farms. Hg. v. BlueWave. Online verfügbar unter <https://bluewave.energy/bw-resources/making-solar-and-agriculture-work-together-at-knowlton-farms>, zuletzt aktualisiert am 27.05.2022, zuletzt geprüft am 27.05.2022.

PRI (2013): Japanese Farmers Producing Crops and Solar Energy Simultaneously. Revitalizing the farming sector for the next-generation and could provide more than enough electricity for the entire country. Restriction to solar PV installation on farmlands removed. In: *Permaculture Research Institute* October 16, 2013, 2013. Online verfügbar unter <https://permaculturenews.org/2013/10/16/japanese-farmers-producing-crops-solar-energy-simultaneously/>, zuletzt geprüft am 30.05.2022.

Prognos; GWS; Fraunhofer ISI; IINAS (2021): Energiewirtschaftliche Projektionen und Folgeabschätzungen 2030/2050. Gesamtdokumentation der Szenarien. Bericht im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Hg. v. BMWK. Online verfügbar unter https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/energiewirtschaftliche-projektionen-und-folgeabschaetzungen-2030-2050.pdf?__blob=publicationFile&v=32, zuletzt geprüft am 17.05.2022.

-
- Pulipaka, Subrahmanyam; Peparthy, Murali (2021): Agrivoltaics in India. Overview of operational Projects and relevant Policies. Hg. v. National Solar Energy Federation of India (NSEFI) und Indo-German Energy Forum Support Office (IGEF-SO). New Delhi. Online verfügbar unter https://www.energyforum.in/fileadmin/user_upload/india/media_elements/Photos_And_Gallery/20201210_SmarterE_AgroPV/20201212_NSEFI_on_AgriPV_in_India_1__01.pdf, zuletzt geprüft am 13.05.2022.
- Radlmayr, Gerhard; Kohlrausch, Franziska (2017): Bundesentwicklungsminister Dr. Gerd Müller spricht sich für eine Umsetzung von Bewässerungs- und Agro-Photovoltaik-Projekten der HSWT in Afrika aus. Online verfügbar unter <https://www.hswt.de/forschung/news/article/bundesentwicklungsminister-dr-gerd-mueller-spricht-sich-fuer-eine-umsetzung-von-bewaesserungs-und-agr.html>, zuletzt aktualisiert am 02.12.2022, zuletzt geprüft am 02.12.2022.
- Rahmstorf, Stefan (2022): Klima und Wetter bei 3 Grad mehr. Eine Erde, wie wir sie nicht kennen (wollen). In: Klaus Wiegandt (Hg.): 3 Grad mehr. Ein Blick in die drohende Heizeit und wie uns die Natur helfen kann, sie zu verhindern: oekom. Online verfügbar unter <http://www.pik-potsdam.de/~stefan/Publications/Klima%20und%20Wetter%20bei%203%20Grad%20mehr.pdf>, zuletzt geprüft am 01.09.2022.
- Ravi, Sujith; Lobell, David B.; Field, Christopher B. (2014): Tradeoffs and Synergies between biofuel production and large solar infrastructure in deserts. In: *Environmental science & technology* 48 (5), S. 3021–3030. DOI: 10.1021/es404950n.
- Redazione ANSA (2017): Truffe: sigilli a impianti fotovoltaici. Gdf sequestra 2 serre in Sardegna e recupera 50 mln di incentivi. In: *ANSA.it*, 14.04.2017. Online verfügbar unter https://www.ansa.it/sardegna/notizie/2017/04/13/truffe-sigilli-a-impianti-fotovoltaici_92465d93-74e0-453c-a082-a01420b0d1c3.html, zuletzt geprüft am 01.09.2022.
- REMTEC (2011): CASTELVETRO Agrovoltaico plant. Piacenza, Italy. Hg. v. REM TEC S.r.l. Online verfügbar unter <http://www.remtec.energy/en/agrovoltaico-2/castelvetro-plant/>, zuletzt geprüft am 07.01.2020.
-

- Renn, Ortwin (2010): Risk governance. Coping with uncertainty in a complex world. Repr., digital print. London: Earthscan (Earthscan risk in society series).
- Ricardo, David (2001): On the Principles of Political Economy and Taxation. 1817 (third edition 1821). Kitchener, Ontario: Batoche Books. Online verfügbar unter <https://socialsciences.mcmaster.ca/econ/ugcm/3113/ricardo/Principles.pdf>, zuletzt geprüft am 16.05.2022.
- Rogers, Everett M. (2003): Diffusion of innovations. Fifth edition. New York: Free Press. Online verfügbar unter <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=4935198>.
- Rolink, Diethard (2021): Steuerfalle: „Die Freiflächenanlage wird für uns zur Steuerbombe“. In: *top agrar online*, 22.09.2021. Online verfügbar unter <https://www.topagrar.com/energie/news/steuerfalle-die-freiflaechenanlage-wird-fuer-uns-zur-steuerbombe-12691115.html>, zuletzt geprüft am 27.05.2022.
- Ross, Stephan A. (1973): The Economic Theory of Agency: The Principal's Problem.
- Rudzio, Wolfgang (2019): Das politische System der Bundesrepublik Deutschland. 10. Aufl. 2019. Wiesbaden: Springer VS (Springer eBook Collection).
- Sandbox Solar (2021): Agrivoltaics. Sandbox Solar LLC. Online verfügbar unter <https://sandboxsolar.com/agrivoltaics/>, zuletzt aktualisiert am 17.02.2021, zuletzt geprüft am 13.05.2022.
- Scharpf, Fritz W. (1972): Komplexität als Schranke der politischen Planung. In: Erwin Faul (Hg.): Gesellschaftlicher Wandel und politische Innovation Tagung der Deutschen Vereinigung für Politische Wissenschaft in Mannheim, Herbst 1971. Opladen, Westdeutsche Verlag: VS Verlag für Sozialwissenschaften (Politische Vierteljahresschrift./Sonderheft 4/1972), S. 168–192.
- Scharpf, Fritz W. (1973): Planung als politischer Prozess. Aufsätze zur Theorie der planenden Demokratie. 1. Aufl. Frankfurt am Main: Suhrkamp (Theorie), zuletzt geprüft am 18.05.2022.

-
- Scharpf, Fritz W. (1993): Positive und negative Koordination in Verhandlungssystemen. In: Adrienne Héritier (Hg.): Politische Vierteljahresschrift. PVS; Zeitschrift der Deutschen Vereinigung für Politische Wissenschaft. Wiesbaden: VS, Verl. für Sozialwiss, S. 57–83.
- Scharpf, Fritz W. (2000): Interaktionsformen. Akteurzentrierter Institutionalismus in der Politikforschung. Unveränd. Nachdr. der 1. Aufl. Wiesbaden: VS, Verl. für Sozialwiss.
- Scharpf, Fritz Wilhelm; Reissert, Bernd; Schnabel, Fritz (1976): Politikverflechtung. Theorie und Empirie der kooperativen Föderalismus in der Bundesrepublik. Kronberg/Ts.: Scriptor-Vrlag (Monographien Ergebnisse der Sozialwissenschaften, 1).
- Schindele, Stephan (2017): Agrophotovoltaic: Doppelte Ernte. In: *Frankfurter Allgemeine Zeitung*, 04.11.2017. Online verfügbar unter <https://www.faz.net/aktuell/wissen/agrophotovoltaik-der-bauer-als-energiewirt-15260666.html>, zuletzt geprüft am 26.04.2022.
- Schindele, Stephan (2021a): 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, Stephan (2021b): Nachhaltige Landnutzung mit Agri-Photovoltaik: Photovoltaikausbau im Einklang mit der Lebensmittelproduktion: Szenarioanalyse zur Inanspruchnahme landwirtschaftlicher Nutzflächen durch Photovoltaik in Deutschland bis 2050. In: *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society* 30 (2), S. 96–105. DOI: 10.14512/gaia.30.2.7.
- Schindele, Stephan; Trommsdorff, Maximilian; Schlaak, Albert; Obergfell, Tabea; Bopp, Georg; Reise, Christian 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.
- Schmidhuber, Josef (2021): Die Rückkehr der Missernten. In: *Der Spiegel*, 24.12.2021. Online verfügbar unter https://www.genios.de/presse-archiv/artikel/SPIE/20211224/die-rueckkehr-der-missernten/PMG4SPIEGEL-Heftimport-SP20211224-38831_b7a6ed78-6334-412e-a59e-716a644df5f1.html, zuletzt geprüft am 16.05.2022.

- Schön, Susanne; Eismann, Christian; Ansmann, Till; Wendt-Schwarzburg, Helke (Hg.) (2019): Nachhaltige Landnutzung managen. Akteure beteiligen - Ideen entwickeln - Konflikte lösen. Bielefeld: wbv Media GmbH & Co. KG. Online verfügbar unter https://www.wbv.de/fileadmin/webshop/pdf/6004699w_Leseprobe.pdf, zuletzt geprüft am 16.05.2022.
- Schön, Susanne; Eismann, Christian; Wendt-Schwarzburg, Helke; Kuhn, David (2020): Transdisziplinäres Innovationsmanagement. Nachhaltigkeitsprojekte wirksam umsetzen. Bielefeld: wbv. Online verfügbar unter <https://openresearchlibrary.org/content/43cb02b8-778b-4c4b-9895-6e059076e618>.
- Scientist Rebellion (2021): We leaked the upcoming IPCC report! Online verfügbar unter <https://scientistrebellion.com/we-leaked-the-upcoming-ipcc-report/>, zuletzt aktualisiert am 17.05.2022, zuletzt geprüft am 17.05.2022.
- Sekem (2022): Über uns. Online verfügbar unter <https://www.sekem.com/de/uber-uns/>, zuletzt aktualisiert am 02.12.2022, zuletzt geprüft am 02.12.2022.
- Smith, Adam (1904): An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations. First Pub. Date 1776. 5. Aufl. London: Methuen & Co., Ltd. Online verfügbar unter <https://www.econlib.org/library/Smith/smWN.html>, zuletzt geprüft am 16.05.2022.
- SolarPower Europe (2021): Agrisolar Best Practice Guidelines. Version 1.0. 1. Aufl. Hg. v. SolarPower Europe. Online verfügbar unter <https://www.solarpowereurope.org/insights/thematic-reports/agrisolar-best-practice-guidelines>, zuletzt geprüft am 16.05.2022.
- Solarserver (2022): Bundesregierung stellt Pläne für Agri-Photovoltaik vor. Die Bundesregierung will den Ausbau von Photovoltaikanlagen auf landwirtschaftlichen Flächen verstärken. Solarthemen Media GmbH. Online verfügbar unter <https://www.solarserver.de/2022/03/17/bundesregierung-stellt-ausbau-plaene-fuer-agri-pv-vor/>, zuletzt geprüft am 03.12.2022.

- SPD (2021): Das Zukunftsprogramm der SPD. Wofür wir stehen. Was uns antreibt. Wonach wir streben. Online verfügbar unter <https://www.spd.de/fileadmin/Dokumente/Beschluesse/Programm/SPD-Zukunftsprogramm.pdf>, zuletzt geprüft am 01.09.2022.
- SPD; Bündnis 90/Die Grünen und FDP (2021): Mehr Fortschritt wagen. Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit. Online verfügbar unter https://www.spd.de/fileadmin/Dokumente/Koalitionsvertrag/Koalitionsvertrag_2021-2025.pdf, zuletzt geprüft am 13.05.2022.
- Spiegel, Der (2021): Geleakter Teil des IPCC-Berichts: Die reichsten zehn Prozent verursachen mehr als ein Drittel der Treibhausgase. In: *Der Spiegel*, 13.08.2021. Online verfügbar unter <https://www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/geleakter-teil-des-ipcc-berichts-die-reichsten-zehn-prozent-verursachen-mehr-als-ein-drittel-der-treibhausgase-a-6d2e8438-7f3e-49bc-8967-4e3aeb6be585>, zuletzt geprüft am 17.05.2022.
- Stensland, Ann (2021): Global Agricultural Productivity Report. Strengthening the Climate for Sustainable Agricultural Growth. 2021 GAP Report. Hg. v. Virginia Tech College of Agriculture and Life Sciences. Online verfügbar unter <https://globalagriculturalproductivity.org/wp-content/uploads/2021/10/2021-GAP-Report.pdf>, zuletzt geprüft am 16.05.2022.
- Sugibuchi, Koichi (2019): Solar Sharing: Symbiosis of PV and Agriculture in Japan. Agrovoltatics - Sharing Resources for Multiple Benefits. RTS Corporation, PV Business Consulting Division. Intersolar Conference Europe. Munich, 2019. Online verfügbar unter https://www.rts-pv.com/en/news/201905_7655/, zuletzt geprüft am 25.05.2022.
- Sun'Agri (2021): The world's first agrivoltaic power plant. Domaine de Nidolères. Hg. v. Sun'Agri SAS. Online verfügbar unter <https://sunagri.fr/en/project/nidoleres-estate/>, zuletzt aktualisiert am 17.11.2021, zuletzt geprüft am 27.04.2022.

Thünen (2022): PV-Freiflächenanlagen in der Landwirtschaft. Johann Heinrich von Thünen-Institut. Online verfügbar unter

<https://www.thuenen.de/de/fachinstitute/betriebswirtschaft/projekte/pv-freiflaechenanlagen-in-der-landwirtschaft>, zuletzt aktualisiert am 01.09.2022, zuletzt geprüft am 01.09.2022.

Trommsdorff, Max; Kang, Jinsuk; Reise, Christian; Schindele, Stephan; Bopp, Georg; Ehmann, Andrea et al. (2021): Combining food and energy production: Design of an agrivoltaic system applied in arable and vegetable farming in Germany. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 140, S. 110694. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110694.

Trommsdorff, Maximilian; Hopf, Michaela; Hörnle, Oliver; Berwind, Matthew; Schindele, Stephan; Wydra, Kerstin (2023): Can synergies in agriculture through an integration of solar energy reduce the cost of agrivoltaics? An economic analysis in apple farming. In: *Applied Energy*.

Trommsdorff, Maximilian; Schindele, Stephan; Vorast, Maximilian; Durga, Neha; Patwardhan, Sachin Manohar; Baltins, Karolina et al. (2019): Feasibility and Economic Viability of Horticulture Photovoltaics in Paras, Maharashtra, India. Hg. v. Fraunhofer ISE. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/353333038_Feasibility_and_Economic_Viability_of_Horticulture_Photovoltaics_in_Paras_Maharashtra_India, zuletzt geprüft am 13.05.2022.

Umann, Ullrich (2020): USA kooperiert mit Deutschland bei Agrivoltaics. Hg. v. GTAI. Germany Trade and Invest (GTAI). Online verfügbar unter <https://www.gtai.de/de/trade/usa/branchen/usa-kooperiert-mit-deutschland-bei-agrivoltaics-590844>, zuletzt aktualisiert am 14.12.2020, zuletzt geprüft am 13.05.2022.

Umweltbundesamt (2021a): Treibhausgas-Emissionen in der Europäischen Union. Hauptverursacher. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-der-europaeischen-union#hauptverursacher>, zuletzt aktualisiert am 17.05.2022, zuletzt geprüft am 17.05.2022.

Umweltbundesamt (2021b): Treibhausgas-Emissionen in der Europäischen Union. Pro-Kopf-Emissionen. Online verfügbar unter

<https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-der-europaeischen-union#pro-kopf-emissionen>, zuletzt aktualisiert am 17.05.2022, zuletzt geprüft am 17.05.2022.

Umweltbundesamt (2021c): Struktur der Flächennutzung. Online verfügbar unter

<https://www.umweltbundesamt.de/daten/flaeche-boden-land-oekosysteme/flaeche/struktur-der-flaechennutzung#die-wichtigsten-flaechennutzungen>, zuletzt aktualisiert am 16.05.2022, zuletzt geprüft am 16.05.2022.

UN (2012): Secretary-General's Initial Input to the Open Working Group on Sustainable Development Goals. Sixty-seventh session. United Nations General Assembly. Online verfügbar unter

<https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/1494sgreportsdgs.pdf>, zuletzt geprüft am 01.09.2022.

UN (2022): Joint Coordination Centre opens in Istanbul to facilitate safe export of commercial foodstuffs and fertilizers from Ukrainian ports. UN Office for the Coordination of Humanitarian Affairs. Istanbul. Online verfügbar unter

<https://reliefweb.int/report/turkiye/joint-coordination-centre-opens-istanbul-facilitate-safe-export-commercial-foodstuffs-and-fertilizers-ukrainian-ports>, zuletzt geprüft am 02.12.2022.

United Nations (2019): World Population Prospects 2019: Highlights. New York: United Nations (Statistical Papers - United Nations (Ser. A), Population and Vital Statistics Report). Online verfügbar unter

https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2019_Highlights.pdf, zuletzt geprüft am 17.05.2022.

VGH München (2021): Zahlungsansprüche für Flächen, auf denen ein Solarpark errichtet ist und die zugleich als Schafweide genutzt werden. VGH München. Online verfügbar unter

<https://www.gesetze-bayern.de/Content/Document/Y-300-Z-BECKRS-B-2021-N-16272?hl=true>, zuletzt aktualisiert am 01.06.2021, zuletzt geprüft am 31.05.2022.

- Wang, Tianyue; Wu, Gaoxiang; Chen, Jiewei; Cui, Peng; Chen, Zexi; Yan, Yangyang et al. (2017): Integration of solar technology to modern greenhouse in China. Current status, challenges and prospect. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 70, S. 1178–1188. DOI: 10.1016/j.rser.2016.12.020.
- Wehling, Hans-Georg; Weber, Reinhold; Riescher, Gisela; Große Hüttmann, Martin; Renn, Ortwin (Hg.) (2014): Politikberatung. Stuttgart: Kohlhammer (Brennpunkt Politik).
- Weizmann, Martin L. (1974): Prices vs. Quantities. In: *The Review of Economic Studies* 41 (4), S. 477–491. Online verfügbar unter <https://scholar.harvard.edu/weitzman/publications/prices-vs-quantities>, zuletzt geprüft am 16.05.2022.
- Welthungerhilfe (2022): Earth Overshoot Day - Eine Erde reicht nicht. Welthungerhilfe. Online verfügbar unter <https://www.welthungerhilfe.de/informieren/themen/klimawandel/earth-overshoot-day-welthungerhilfe>, zuletzt aktualisiert am 01.09.2022, zuletzt geprüft am 01.09.2022.
- Weselek, Axel; Bauerle, Andrea; Hartung, Jens; Zikeli, Sabine; Lewandowski, Iris; Högy, Petra (2021a): Agrivoltaic system impacts on microclimate and yield of different crops within an organic crop rotation in a temperate climate. In: *Agron. Sustain. Dev.* 41 (5). DOI: 10.1007/s13593-021-00714-y.
- Weselek, Axel; Bauerle, Andrea; Zikeli, Sabine; Lewandowski, Iris; Högy, Petra (2021b): Effects on Crop Development, Yields and Chemical Composition of Celeriac (*Apium graveolens* L. var. *rapaceum*) Cultivated Underneath an Agrivoltaic System. In: *Agronomy* 11 (4), S. 733. DOI: 10.3390/agronomy11040733.
- Weselek, Axel; Ehmann, Andrea; Zikeli, Sabine; Lewandowski, Iris; Schindele, Stephan; Högy, Petra (2019): Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities. A review. In: *Agron. Sustain. Dev.* 39 (35), S. 1–20. DOI: 10.1007/s13593-019-0581-3.
- Wien Energie Positionen (2021): Mit Agrophotovoltaik Synergien schaffen. Wien Energie GmbH. Online verfügbar unter <https://positionen.wienenergie.at/projekte/strom/agro-pv/>, zuletzt aktualisiert am 05.10.2021, zuletzt geprüft am 27.04.2022.

-
- Witte, Eberhard (1977): Power and Innovation: A Two-Center Theory. In: *International Studies of Management & Organization* 7 (1), S. 47–70. DOI: 10.1080/00208825.1977.11656219.
- Wölkner, Sabina; Elsner, Gisela (2021): Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie 2021. Sind die Weichen richtig gestellt? Hg. v. Konrad Adenauer Stiftung (KAS) und Monitor Nachhaltigkeit Nr.1/2021. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.kas.de/documents/252038/11055681/Monitor+Nachhaltigkeit%2C+1-2021%2C+Deutsche+Nachhaltigkeitsstrategie+2021.pdf/919b1e59-8aca-e17c-2d04-347c89b59498?version=1.0&t=1617110029188>, zuletzt geprüft am 18.05.2022.
- World Bank (2022): Population, total. Data. Online verfügbar unter <https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.TOTL>, zuletzt aktualisiert am 17.05.2022, zuletzt geprüft am 17.05.2022.
- Wunder, Stephanie; Kaphengst, Timo; Frelih-Larsen, Ana; McFarland, Keighley; Albrecht, Stefanie (2018): Land Degradation Neutrality. Handlungsempfehlungen zur Implementierung des SDG-Ziels 15.3 und Entwicklung eines bodenbezogenen Indikators. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-02-21_texte_15-2018_land-degradation-nutrality_de.pdf, zuletzt geprüft am 17.05.2022.
- Wuppertal Institut (2014): Stellungnahme zur BMWi-Konsultation "Eckpunkte für ein Ausschreibungsdesign für Photovoltaik-Freiflächenanlagen". Agrophotovoltaik (APV) als ressourceneffiziente Landnutzung. Hg. v. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. Wuppertal. Online verfügbar unter <https://epub.wupperinst.org/frontdoor/index/index/docId/5547>, zuletzt geprüft am 26.04.2022.
- Xue, Jinlin (2017): Economic assessment of photovoltaic greenhouses in China. In: *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 9 (3), S. 33502. DOI: 10.1063/1.4982748.

Zinke, Olaf (2021): Landwirtschaftszählung: Das Höfesterben geht weiter. Hg. v. agrarheute.

Online verfügbar unter

<https://www.agrarheute.com/management/betriebsfuehrung/landwirtschaftszaehlung-hoefesterben-geht-577405>, zuletzt aktualisiert am 21.01.2021, zuletzt geprüft am 17.05.2022.

ZSW; Bosch & Partner (2018): Vorbereitung und Begleitung bei der Erstellung eines Erfahrungsberichts gemäß § 97 Erneuerbare-Energien-Gesetz. Teilvorhaben II c: Solare Strahlungsenergie. Zwischenbericht Februar 2018 Erstellt im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Unter Mitarbeit von Tobias Kelm. Hg. v. Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW).

ZSW; Bosch & Partner. Stuttgart, Hannover. Online verfügbar unter

https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/bmwi_de/bericht-eeg-4-solar.pdf?__blob=publicationFile&v=4, zuletzt geprüft am 25.04.2022.

Selbstständigkeitserklärung

Statement of authorship

Ich erkläre ausdrücklich, dass es sich bei der von mir eingereichten Arbeit um eine von mir selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasste Arbeit handelt.

I expressly declare that the work I have submitted was written independently and without external help.

Ich erkläre ausdrücklich, dass ich sämtliche in der oben genannten Arbeit verwendeten fremden Quellen, auch aus dem Internet als solche kenntlich gemacht habe. Insbesondere bestätige ich, dass ich ausnahmslos sowohl bei wörtlich übernommenen Aussagen bzw. unverändert übernommenen Tabellen, Grafiken o. Ä. (Zitaten) als auch bei in eigenen Worten wiedergegebenen Aussagen bzw. von mir abgewandelten Tabellen, Grafiken o. Ä. anderer Autorinnen und Autoren die Quelle angegeben habe.

I expressly declare that all sources used in the abovementioned work – including those from the Internet – have been marked as such. In particular, I declare that I have, without exception, stated the source for any statements quoted verbatim and/or unmodified tables, graphics etc. (i.e. quotations) of other authors.

Mir ist bewusst, dass Verstöße gegen die Grundsätze der Selbstständigkeit als Täuschung betrachtet und entsprechend geahndet werden.

I am aware that violations against the principles of academic independence are considered deception and are punished accordingly.

19.08.2023

Datum

Date

Unterschrift Doktorand/in

Signature of doctoral student