

Agri-Photovoltaik

aktueller Forschungs- und Technikstand, sowie fallspezifische
Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Freie wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des akademischen Grades

Master of Science (M.Sc.)

in der Studienfachrichtung Erneuerbare Energien Management

Vorgelegt bei:	Erstgutachterin:	Kerstin Wydra, Prof. Dr. sc. agr. habil. (Fachhochschule Erfurt)
	Zweitgutachter:	Hubert Aulich, Dr. (SolarInput e.V.)
Von:	Vera Lynn Vollmer	
	Adresse:	xx
	Matrikel-Nr.:	xx

Eingereicht am: 23. November 2022

Hinweis: Bei diesem Dokument handelt es sich um eine nicht examensrelevante, überarbeitete Version der von der Verfasserin vorgelegten Masterarbeit.

Zusammenfassung

Die Vielzahl der stetig neu erscheinenden Publikationen zur Thematik der Agri-Photovoltaik (APV) zeugt von dem hohen, aktuellen Interesse an der APV sowohl in Deutschland als auch global. Die vorliegende Arbeit soll den derzeitigen Forschungs- und Technikstand aufzeigen, sowie die ökonomische Betrachtung von systemspezifischen Fallbeispielen darlegen.

Hierzu wurde die Notwendigkeit des Ausbaus von APV anhand aktueller klimatischer und energiepolitischer Entwicklungen, sowie die Herausforderungen in der Landwirtschaft erörtert. Zur Ermittlung des aktuellen Forschungsstandes wurde eine Literaturrecherche durchgeführt, die 129 Publikationen, davon zwei Drittel aus dem Jahr 2022, beinhaltet. Die Publikationen wurden kodiert und eingeordnet in die Themenbereiche (1) Allgemeiner Überblick und Reviews, (2) Design, Gestaltung und optische Anlagenkonstruktion, (3) Entwicklung und Potential, (4) Pflanzenbau, Biodiversität und Pflanzenertragssteigerung, (5) Spezifische Studien und (6) Systemkomponenten. Die wichtigsten Forschungsergebnisse wurden entsprechend dargestellt und zeigen Lösungsansätze zu bestehenden Herausforderungen in der APV sowie den weiteren Forschungsbedarf auf. Die Integration in bestehende, landwirtschaftliche Anbausysteme, sowie die Untersuchung der Eignung diverser Kulturen und mögliche Anpassungsmaßnahmen sind wichtige Forschungsgebiete auf Seiten der Landwirtschaft. Die Anpassung der Anlagenkonstruktion an bestehende Pflanzenkulturen, die technische Integration sowie die Optimierung der Solarzellentechnologie (Transparenz- und Wirkungsgrade) liegen im Fokus der energetischen Forschungsfragen. Ein weiterer Forschungspunkt beinhaltet die ökonomische Optimierung durch innovative Technologien.

Im Stand der Technik wurden neben einigen dieser Innovationen auch marktreife Systeme vorgestellt. APV-Systeme bieten unterschiedliche Aufständermöglichkeiten (hochaufgeständert, leichtaufgeständert, Tracking, Seilaufhängung, Faltdach), die für verschiedene Pflanzenkulturen und Bewirtschaftungsweisen geeignet sind. Gleiches gilt für die Modultechnologien (bifazial, semitransparent, Leichtbau, Dünnschicht, organisch, farbig, konzentrierend und weitere), die ebenfalls an die darunter oder dazwischen angebauten Kulturen angepasst werden sollten. Weiterhin werden Potentiale aufgezeigt zur optimalen Integration in die bestehende (Landwirtschafts-) Umgebung durch eine angepasste Fundamentierung, Bewässerung, Netzeinspeisung und Eingliederung.

Um den aktuellen Forschungsstand in Deutschland aufzuzeigen, werden bestehende und geplante Forschungsprojekte in Deutschland vorgestellt. Bei bestehenden Forschungsprojekten werden die gewonnenen Erkenntnisse dargelegt. Einige dieser Anlagen befinden sich derzeit in der Planungsphase, weshalb künftig von weiteren Forschungsergebnissen in Deutschland auszugehen ist.

Die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zeigen im Varianten- und Szenarienvergleich, dass die verschiedenen Systeme (hochaufgeständert, leichtaufgeständert,

Seilaufhängung) derzeit mit hundertprozentiger Eigennutzung des APV-Stroms die ökonomisch sinnvollste Version darstellen. Die hundertprozentige Netzeinspeisung des APV-Stroms mit EEG- und PPA-Vergütung bietet für kleinere APV-Anlagen (Fläche: 1 ha, Leistung: unter 1 MWp) nur bedingt einen ausreichenden Gewinn, um die Anlage als wirtschaftlich sinnvoll einzustufen. Den verschiedenen Systemen entsprechend gilt es hier die Vergütung anzupassen.

Es wurde gezeigt, dass bereits eine Vielzahl an Forschungserkenntnissen und Lösungsansätzen zu den Herausforderungen der APV existieren. Die ökonomische Umsetzung einer APV-Anlage ist bereits bei einigen Systemvarianten möglich, dennoch sollten die Vergütungssätze angepasst werden, um den Markthochlauf der APV voranzutreiben. Die APV stellt einen wichtigen Beitrag zur sicheren Lebensmittel- und Strombereitstellung dar, insbesondere in Hinsicht auf die zunehmenden Auswirkungen des Klimawandels.

Abstract

The large number of new publications on the subject of agrivoltaics (AV) testifies the high level of current interest in AV both in Germany and globally. This paper is intended to show the current state of research and technology, as well as to present the economic consideration of system-specific case studies.

For this purpose, a literature search of 129 current publications was conducted. The most important research results are presented and indicate possible solutions to existing challenges in AV as well as the need for further research.

In addition to some of these innovations, market-ready systems are described in the state of the art. AV systems offer different mounting options (high mounted, low mounted, tracking, rope system, folding roof), which are suitable for different crops and farming methods. The same applies to module technologies (bifacial, semi-transparent, lightweight, thin film, organic, coloured, concentrating and others), which should also be adapted to the crops grown underneath or in between them. Furthermore, potentials are shown for optimal integration into the existing (agricultural) environment through adapted foundation, irrigation, grid feeding and system integration. In order to give an overview of the current state of research in Germany, existing and planned research projects in Germany are presented.

The results of the economic feasibility study show in a comparison of variants and scenarios that the various systems (high mounted, light mounted, rope system) with 100% self-use of the AV electricity currently represent the most economic version. For smaller AV systems (area: 1 ha, output: less than 1 MWp), the 100% grid feed-in of AV electricity under the renewable energy sources act (EEG) and PPA remuneration only offer limited profit and allow only to a limited extent to classify the system as economically viable. The remuneration needs to be adjusted according to the different systems.

It has been shown that a large number of research findings and approaches to the challenges of AV exist and that the economic implementation of an AV system is already possible. Nevertheless, the remuneration rates should be adjusted to promote the market ramp-up of AV.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	i
Abstract	iii
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis.....	VII
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund	1
1.2 Ziel und Forschungsfragen	2
1.3 Aufbau der Arbeit	2
1.4 Methodik	3
2 Agri-Photovoltaik.....	5
2.1 Definitionsansatz	5
2.2 Entwicklung	6
2.3 Notwendigkeit von APV-Systemen	7
2.3.1 Ausbauziele, Flächenbedarf und Potentiale	7
2.3.2 Aktuelle klimatische Entwicklungen	11
2.4 Aktuelle Rahmenbedingungen	21
2.5 Internationale Bedeutung / Entwicklung	24
2.6 Partizipation	27
3 Stand der Forschung	30
3.1 Allgemeiner Überblick und Reviews	30
3.2 Design, Gestaltung und Anlagenkonstruktion.....	39
3.3 Entwicklung und Potential	41
3.4 Pflanzenbau, Biodiversität und Ertragssteigerung	47
3.5 Spezifische Studien.....	58
3.6 Systemkomponenten.....	61
4 Stand der Technik	84
4.1 Aufständigung	87
4.1.1 Hochaufgeständerte Anlagen / Kategorie I.....	87
4.1.2 Bodennahe Anlagen / Kategorie II	89
4.1.3 Tracking-Systeme	92
4.1.4 Innovationen	94
4.2 Module.....	101
4.2.1 Semitransparente Module	101
4.2.2 Bifaziale Module	102
4.2.3 Leichtmodule	103

4.2.4	Dünnschicht-Module.....	103
4.2.5	Organische Module.....	104
4.2.6	Farbige Module.....	104
4.2.7	Konzentrierende PV	105
4.2.8	Tube Solar	105
4.2.9	Anti-Reflexbeschichtung	106
4.2.10	Kombinierte Photovoltaik und Photosynthese.....	106
4.3	Fundamentierung.....	106
4.4	Regenwasserauffangsystem	107
4.5	Lichtmanagement.....	108
4.6	Eingliederung und Standortwahl.....	109
4.6.1	Anordnung	109
4.6.2	Eignungsflächen	110
4.6.3	Landschaftsbild	111
4.7	Netzeinspeisung, Eigenverbrauch und Stromerlöse	112
4.8	Fazit	114
5	Ausgewählte Forschungsprojekte und -anlagen in Deutschland	117
5.1	Forschungsprojekt „APV-Resola“	117
5.2	Forschungsanlage Weihenstephan.....	118
5.3	Forschungsprojekt „HyPErFarm“	119
5.4	Forschungsprojekt „Modellregion Agri-PV BaWü“	120
5.5	Forschungsprojekt „APV-Obstbau“	121
5.6	Fazit	122
6	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....	125
6.1	Berechnungsgrundlage.....	125
6.2	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung anhand eines Beispiels.....	128
6.3	Ökonomische Fallbeispiele	133
6.3.1	Ökonomisches Fallbeispiel 1: leichtaufgeständerte APV-Anlage.....	133
6.3.2	Ökonomisches Fallbeispiel 2: hochaufgeständerte Anlagen	136
6.3.3	Ökonomisches Fallbeispiel 3: APV-Anlage mit Seilaufhängung	139
6.4	Fazit	141
7	Fazit, Diskussion und Ausblick.....	144
	Literaturverzeichnis	VIII
	Danksagung	XXIV
	Eidesstattliche Erklärung.....	XXV

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verteilung der Veröffentlichungen wissenschaftlicher Publikationen über APV in den Jahren 2011 bis Februar 2022.....	6
Abbildung 2: Potentielle Flächenverfügbarkeit für die Energieumwandlung aus Windkraft an Land und PV-Freiflächenanlagen.	8
Abbildung 3: Zustimmung zu Erneuerbare-Energie-Anlagen in der Umgebung des eigenen Wohnorts.....	9
Abbildung 4: Beispielhafter Ablauf eines Bebauungsplanverfahrens.....	10
Abbildung 5: Flächennutzungspotential eines Hektars Ackerland.....	11
Abbildung 6: Höhe der Schadenaufwände von durch Wetterextreme verursachte Schäden in der Landwirtschaft in Deutschland in den Jahren 1990-2013	12
Abbildung 7: Drying Stripes - Bodenfeuchte in Deutschland in den Jahren 1961-2020	13
Abbildung 8: Einkommenskombinationen landwirtschaftlicher Betriebe in Deutschland	15
Abbildung 9: Treibhausgasemissionen in Deutschland nach Sektoren und Emissionsquellen in der Landwirtschaft.....	16
Abbildung 10: Flutpräventions-Photovoltaik mit Wasserspeicher	17
Abbildung 11: Veranschaulichung der Veränderungen des mittäglichen Energieaustauschs bei Referenzfläche Landwirtschaft PV-FFA und einer APV-Anlage.....	18
Abbildung 12: Vergleich optischer Auswirkungen auf das Landschaftsbild zwischen Hagelschutznetz, Hagelschutzfolie und APV-Anlage	19
Abbildung 13: Vergleich Leistung und Temperatur zwischen konventioneller PV-Anlage und APV-Anlage	20
Abbildung 14: Weltweite Entwicklung der APV seit 2010.....	24
Abbildung 15: Die "5C´s" zum Voranbringen der APV in den USA.....	26
Abbildung 16: Schlüsselfaktoren zur Steigerung der Akzeptanz von APV-Anlagen	29
Abbildung 17: Nach Erscheinungsjahr sortierte Anzahl der betrachteten Publikationen.....	30
Abbildung 18: Thematische Analyse zur Akzeptanzbefragung.	42
Abbildung 19: Gewichtung von Herausforderungen der APV in verschiedenen Ländern.	43
Abbildung 20: Signifikante saisonale Unterschiede in der Bodentemperatur, Lufttemperatur, Luftfeuchte und Dampfdruckdefizit zwischen der Referenzfläche, zwischen den PV-Reihen und unter den Modulen	50
Abbildung 21: Visualisierung eines hochaufgeständerten Systems aus Ich-Perspektive und Vogelperspektive anhand von Open Source Geodaten.....	62
Abbildung 22: APV-Projekt an der HSWT mit TubeSolar-Modulen.....	64
Abbildung 23: Variation der durchschnittlich sichtbaren Transmission für verschiedene (un-) durchsichtige, nicht-selektive und UV/NIR-selektive PV-Zelltechnologien.....	66
Abbildung 24: Energieertrag und Bodenbestrahlungsstärke für verschiedene Tracking-Algorithmen	68

Abbildung 25: Umwandlung einer PV-FFA in eine APV durch Pflanzung von Baumkulturen zwischen den Modulreihen	69
Abbildung 26: Skizzierter Aufbau einer APV-Anlage mit wichtigen Kenngrößen.....	84
Abbildung 27: Klassifikation und Beispiele von APV-Systemen nach Konzept, Anwendung und Aufständering	86
Abbildung 28: Vergleich bestehender Projekte in Deutschland nach durchschnittlicher Höhe und durchschnittlichem Reihenabstand in den Kategorien Ackerbau, Gartenbau und Weide.....	87
Abbildung 29: Darstellung APV-Anlage Kategorie I nach DIN SPEC 91434.	88
Abbildung 30: APV-Anlage in Kressbronn mit Sonderkultur Apfel, wobei Teile der Aufständering als Leithilfen verwendet werden und Schematische Darstellung der Rankhilfe.	89
Abbildung 31: Darstellung APV-Anlage Kategorie II, Variante 1 nach DIN SPEC 91434	90
Abbildung 32: Verschattungsfaktor für vertikale APV-Systeme an vier repräsentativen Tagen. Vergleich zwischen Matlab [®] -, PVsyst [®] - und SketchUp [®] -Model	91
Abbildung 33: Darstellung APV-Anlage Kategorie II, Variante 2 nach DIN SPEC 91434	92
Abbildung 34: Simulation der photosynthetisch aktiven Strahlung der Pflanzen in den Varianten Tracking, Anti-Tracking und feststehend.	93
Abbildung 35: Mögliche Schutzwirkungen der Kulturen durch verschiedene Ausrichtungswinkel bei (Anti-)Tracking-Systemen	94
Abbildung 36: Modell einer APV-Anlage mit Seilaufhängung.....	95
Abbildung 37: Abgespannte Seilaufhängung einer APV-Anlage in Straßkirchen, Bayern	95
Abbildung 38: Verschiedene APV-Seilsysteme Agrivoltaico 3D-Nachführsystem, feststehendes Streifensystem, feststehendes Schachbrettsystem.	96
Abbildung 39: Beispiel einer Faltdachanlage mit Solarmodulen, kommerziell bereits über Parkplätzen und Infrastrukturanlagen	97
Abbildung 40: PV-Anlage mit Aufständering aus behandeltem Holz.....	98
Abbildung 41: Darstellung Dome-Struktur Ost-West-Ausrichtung der Freiflächenanlage in Hölzengraben, Kaiserslautern und rechts schematische Darstellung über Spargelkulturen	99
Abbildung 42: Solarbogen "Modular Arc System" mit Tierhaltung.....	100
Abbildung 43: Mobile Anlage auf Rädern der Firma H2arvester	100
Abbildung 44: Semitransparente Module, hier als Überdachung für Äpfel in Gelsdorf	101
Abbildung 45: Zusammenhang zwischen Stromertrag und PAR bei zunehmendem Transparenzgrad von semitransparenten-Modulen.....	102
Abbildung 46: PAR und flächenspezifischer Ertrag als Funktion der Flächenbelegung für monofaziale Module und bifaziale Module in Ost-West-Ausrichtung und Nord-Süd-Ausrichtung.....	103
Abbildung 47: Verschiedene Anwendungsmöglichkeiten von OPV beispielsweise an Gewächshäusern	104

Abbildung 48: Veranschaulichung des Aufbaus und der Konstruktionsweise der Modultechnologie der Firma TubeSolar AG	106
Abbildung 49: Direkte Verankerung im Boden von APV-Anlagen mithilfe von Spinnankern	107
Abbildung 50: Variation eines Bewässerungssystems von APV-Anlagen.....	108
Abbildung 51: Lichtverteilung anhand unterschiedlicher Modulanordnungen	109
Abbildung 52: Verschattung hochaufgeständerter APV-Anlagen	109
Abbildung 53: Vergleich Anordnung „Block“ und Anordnung „Zebra“	110
Abbildung 54: Integrativer Gestaltungsansatz von APV-Anlagen. Mosaik-Anordnung angepasst an natürliches Landschaftsbild, Bodennahe Anlagen	111
Abbildung 55: Schematische Darstellung verschiedener PV-Muster. Konventionell, parallele Streifen, traditionelle Anordnung, Inselflächen.....	112
Abbildung 56: Vergleich Einspeisung, Erzeugung und Eigenverbrauch der Hofgemeinschaft der Forschungsanlage Heggelbach	113
Abbildung 57: APV-Forschungsanlage in Heggelbach, aus Blickrichtung Westen, sowie Bewirtschaftung unterhalb der Anlage.....	117
Abbildung 58: Relative Ertragsveränderungen der angebauten Kulturen der Forschungsanlage Heggelbach.....	118
Abbildung 59: Bewirtschaftung der APV-Anlage in Freising an der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf und nach dem Sonnenstand ausgerichtete APV-Anlage ..	119
Abbildung 60: Forschungsanlage HyPERFarm - Seilaufhängung - Krinner Carport	119
Abbildung 61: Semitransparente Module einer APV-Anlage in Kressbronn über bestehender Apfelpflanzung.....	121
Abbildung 62: APV-Anlage im Apfelanbau in Gelsdorf	121
Abbildung 63: Kostenunterschiede semitransparenter Module nach Transparenzgrad	129
Abbildung 64: Stromgestehungskostenpanne verschiedener (A)PV-Systeme	130
Abbildung 65: Amortisationszeit Berechnungsbeispiel leichtaufgeständerte APV-Anlage ..	136
Abbildung 66: Quantitativer Gewinnvergleich von Strom- und Pflanzenertrag einer hochaufgeständerten APV-Anlage bei 100% Eigenverbrauch und Strombezugskosten von 15 ct/kWh).	141
Abbildung 67: Ökonomischer Vergleich der Stromgestehungs-, Investitions- und Betriebskosten verschiedener APV-Systeme und PV-FFA auf einem Hektar.....	143

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Technologiebonus für Agri-PV-Anlagen nach §38 Abs. 1 Satz 2 EEG 2023	22
Tabelle 2: Geschäftsmodelle verschiedener APV-Betreiber-Varianten	28
Tabelle 3: Leistungsindikatoren zur Qualitätseinstufung von APV-Anlagen	32
Tabelle 4: Möglichkeiten zu unterschiedlichen Auslegungsmöglichkeiten von APV-Anlagen.	34
Tabelle 5: Literaturrecherche APV - Bereich "Allgemeiner Überblick und Reviews"	37
Tabelle 6: Literaturrecherche APV - Bereich "Design".	40
Tabelle 7: Literaturrecherche APV - Bereich "Entwicklung und Potential"	45
Tabelle 8: Parametermessung im APV-Apfelanbau.	47
Tabelle 9: Literaturrecherche APV - Bereich "Pflanzenbau, Biodiversität und Ertragssteigerung"	53
Tabelle 10: Literaturrecherche APV - Bereich "Spezifische Studien"	60
Tabelle 11: Literaturrecherche APV - Bereich "Systemkomponenten"	74
Tabelle 12: Übersicht Aufständersysteme und deren Vorteile	115
Tabelle 13: Übersicht Modultechnologien und deren Vorteile.....	116
Tabelle 14: Forschungs- und Praxisanlagen in Deutschland mit verschiedenen Systemtechniken: Vertikale Anlage, Trackinganlage, Hochaufgeständert, Leichtaufgeständert, Seilaufhängung, Solarröhren, Gartenbau, Weide, Ackerbau. ...	123
Tabelle 15: Kostenaufstellung verschiedener APV-Systeme	131
Tabelle 16: Parameter der leichtaufgeständerten APV-Anlage auf einem Hektar Fläche	134
Tabelle 17: Berechnungsgrundlage der beispielhaften leichtaufgeständerten APV-Anlage.	134
Tabelle 18: Ökonomischer Variantenvergleich leichtaufgeständerter APV-Anlage nach Nutzung und Vergütung	135
Tabelle 19: Parameter hochaufgeständerte APV-Anlage auf einem Hektar Fläche.....	137
Tabelle 20: Berechnungsgrundlage der beispielhaften hochaufgeständerten APV-Anlage	137
Tabelle 21: Ökonomischer Variantenvergleich hochaufgeständerter APV-Anlage nach Nutzung und Vergütung.	138
Tabelle 22: Parameter APV-Anlage mit Seilaufhängung auf einem Hektar Fläche	139
Tabelle 23: Berechnungsgrundlage der beispielhaften APV-Anlage mit Seilaufhängung	139
Tabelle 24: Ökonomischer Variantenvergleich APV-Anlage mit Seilaufhängung nach Nutzung und Vergütung	141

Abkürzungsverzeichnis

AgrOPV	Organische Agri-Photovoltaik
APV	Agri-Photovoltaik
CAPEX	Investitionskosten, engl. "Capital expenditures"
CPV	Konzentrierende PV
c-Si	Kristallines Silizium
DSSC	Farbstoffsolarzellen (engl. Dye-Sensitized Solar Cells)
ebd	ebenda
FFA.....	Freiflächen-Photovoltaikanlage
FNP	Flächennutzungsplan
GAP	Grundzüge der Gemeinsamen Agrarpolitik
GAPDZV	GAP-Direktzahlungen-Verordnung
GCR.....	Flächenbelegungsrate (engl. ground cover ratio)
LCOE	Levelized Cost of Electricity
LER.....	Land Equivalent Ratio (Flächennutzungsrate), Flächennutzungseffizienz (engl. land equivalent ratio)
LPF	Lichtproduktivitätsfaktor
LSC.....	Lumineszierende Solarkonzentrationen
NIR.....	Nahinfrarot
OPEX.....	Operational Expenditure
OPV.....	Organische PV
PAR	Photosynthetisch aktive Strahlung
PPA	Power Purchase Agreements
PV	Photovoltaik
PV-FFA	Photovoltaik-Freiflächenanlage
ROI.....	Return on Investment
SDG.....	Sustainable Development Goals
STPV.....	Semitransparente PV-Module

1 Einleitung

Im Folgenden wird der Hintergrund, das Ziel und die leitenden Forschungsfragen der Arbeit vorgestellt. Dabei wird auf den Ablauf und die methodische Vorgehensweise der vorliegenden Arbeit eingegangen.

1.1 Hintergrund

Die aktuelle, geopolitische Situation zeigt, dass Erneuerbare Energien langfristig gesehen notwendig, rentabel und nachhaltig sind. Mit wachsender Bevölkerungszahl wird trotz steigender Energieeffizienz künftig mehr (erneuerbare) Energie benötigt. Dies ist auch auf den Umstieg von fossiler auf erneuerbare Energie zurückzuführen, indem beispielsweise Gas- und Ölheizungen auf elektrisch betriebene Wärmepumpen umgerüstet werden.

Für den Umstieg auf erneuerbare Energien werden Flächen benötigt. Eine Flächenzunahme wird jedoch auch auf Seiten der Landwirtschaft erfolgen, da die wachsende Bevölkerung eine zunehmende Nahrungsmittelproduktion notwendig macht, beziehungsweise eine Umstellung dieser notwendig ist. Hinzu kommt die Nachfrage nach Siedlungs- und Verkehrsflächen (Beckmann, et al. 2019). Die Auswirkungen des Klimawandels verschärfen diese Flächennutzungskonkurrenz, da durch klimatische Veränderungen frucht- und nutzbare Böden knapper werden und zusammen mit Starkwetterereignissen die Ernten beeinträchtigen beziehungsweise gefährden. Dem gegenüber steht das Ziel der deutschen Nachhaltigkeitsstrategie, in der festgehalten wurde, dass bis 2030 die Flächeninanspruchnahme pro Tag auf unter 30 ha fallen soll (Bundesregierung 2020).

Ein vielschichtiger Ausbau der erneuerbaren Energien muss demnach zeitnah erfolgen. Der Ausbau wird jedoch durch verschiedene Herausforderungen, wie Akzeptanz in der Bevölkerung, die Wirtschaftlichkeit und die damit verbundene Finanzierbarkeit der Anlagen, Genehmigungs- und Beteiligungsfragen, aber auch technische Herausforderungen, wie die statische Sicherheit bestehender Gebäude oder Denkmalschutz gehemmt.

Ein Lösungsansatz, der sowohl die Flächenkonkurrenz entschärfen, die Resilienz der Landwirtschaft stärken, Natur- und Umweltschutz betreiben und gleichzeitig die Energiewende vorantreiben kann, ist die Agri-Photovoltaik (APV). Als APV wird die Kombination aus Landwirtschaft und Solarwirtschaft verstanden. Die Funktionsweise, die damit verbundenen Schutzwirkungen für die Landwirtschaft, die Realisierbarkeit der Anlagen, sowie das Potential und die Herausforderungen der APV sollen in dieser Arbeit betrachtet werden.

1.2 Ziel und Forschungsfragen

Das Ziel dieser Arbeit besteht darin einen Überblick über den aktuellen Stand der Forschung, der Technik und der Ökonomie im Bereich der APV darzustellen. Dabei sollen die folgenden Leitfragen beantwortet werden:

1. Besteht eine Notwendigkeit zum Ausbau der APV in Deutschland?
2. Welche Forschungsgebiete werden aktuell im Bereich der APV untersucht?
3. Welche aktuellen Forschungsergebnisse finden sich zum Thema APV?
4. Was ist der Status Quo im Stand der Technik?
5. Welche aktuellen Forschungsprojekte bestehen derzeit in Deutschland?
6. Besteht bei aktuellen Vergütungs- und Nutzungsmöglichkeiten die Möglichkeit zur wirtschaftlich sinnvollen Nutzung einer APV in Deutschland?

1.3 Aufbau der Arbeit

Im ersten Schritt wird das eigentliche Funktionsprinzip der APV vorgestellt. Hierbei wird auf aktuelle klimatische, energetische und politische Rahmenbedingungen und Entwicklungen eingegangen und damit die Notwendigkeit der APV aufgezeigt.

Zum Stand der Forschung wurde eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt, die aktuelle Publikationen zur APV beinhalten und die neugewonnenen Erkenntnisse vorstellen. Diese betreffen die APV im Allgemeinen, wobei zusammenfassende Überblicke und Rezensionen gegeben werden. Im Bereich Design, Gestaltung und Anlagenkonstruktion werden Forschungsergebnisse vorgestellt, welche die Auslegung der APV-Anlagen, die optische Gestaltung und die Integration in das Landschaftsbild optimieren sollen. Im anschließenden Themenbereich werden aktuelle Publikationen zur Entwicklung der APV und zu länderspezifischen und globalen Potentialen vorgestellt. Zur Optimierung der Pflanzenerträge gibt es eine Vielzahl an Publikationen. Es werden Publikationen zur Untersuchung verschiedener Kulturen, sowie zu Änderungen des Mikroklimas und zu Anpassungen der Pflanzenerträge durch die Optimierungsansätze auf Seiten der APV-Anlage vorgestellt. Es existiert weiterhin eine Vielzahl an spezifischen Studien, die für bestimmte Länder oder Regionen gelten oder sich auf Pilotprojekte beziehen, bei denen sich eine allgemeine Übertragung der Ergebnisse auf andere Projekte als schwierig gestaltet. Der größte Anteil der untersuchten Publikationen liegt im Bereich „Systemkomponenten“, in welchem die einzelnen Anlagenkomponenten, wie beispielsweise Module, erforscht und optimiert werden und die Optimierung der APV-Anlage im Vordergrund steht.

Im Stand der Technik wird das System der APV anhand der einzelnen Systemkomponenten vorgestellt. Aufständigung, Module und die dazugehörigen Innovationen werden ebenso betrachtet, wie auch Fundamentierung, Netzanschluss, Regenwassermanagement und die

Integration in das Landschaftsbild. Zur weiteren Veranschaulichung des Status Quo der APV werden aktuelle Forschungsprojekte in Deutschland vorgestellt.

Zum Schluss wird eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durchgeführt, bei der aktuelle Kosten der APV in verschiedenen Systemvarianten betrachtet werden. Es werden drei spezifische Fallbeispiele in diversen Szenarien und Varianten vorgestellt.

1.4 Methodik

Die durchgeführte Literaturrecherche beinhaltet vorwiegend deutsch- und englisch-sprachige Literatur. Insgesamt wurden für die spezifische Literaturrecherche im Bereich „Stand der Forschung“ 129 Publikationen gesichtet. Um ein möglichst hohes Maß an Aktualität zu erreichen, wurde der Fokus des Veröffentlichungszeitraumes auf die Jahre 2020 bis 2022 gelegt. Einige Ausnahmen aus vorherigen Jahren wurden dennoch einbezogen, da die Ergebnisse bis heute Relevanz besitzen. Die gesichteten Publikationen wurden anhand der folgenden Kriterien kodiert: Autor*innen; Herausgeber*innen, Institutionen beziehungsweise Name des Journals, in dem die Publikation erschienen ist; Titel der Publikation; Jahr der Veröffentlichung; Validität (wissenschaftliches Paper mit/ohne Peer-Review); Datentyp (empirische Primärdaten oder Sekundärdaten und Metastudien); DOI/URL der Publikation; Anlagentyp, um nicht-APV-spezifische Publikationen zu differenzieren. Anschließend wurden jeweils die wichtigsten Forschungsergebnisse der Publikationen anhand von „Keywords“ notiert. Diese Keywords wurden als Themenbereich zusammengefasst. Anhand der Themenbereiche konnte eine Einordnung in sechs Schwerpunkte erfolgen: (1) Allgemeiner Überblick, (2) Design, Gestaltung und optische Anlagenkonstruktion, (3) Entwicklung und Potential, (4) Pflanzenbau, Biodiversität und Pflanzenertragssteigerung, (5) Spezifische Studien, (6) Systemkomponenten und Stromertragssteigerung. Die Aufbereitung und Analyse der Publikationen erfolgten mit Microsoft Excel.

Die gewonnenen Erkenntnisse wurden auch für die Erarbeitung des Standes der Technik verwendet und um Erfahrungen aus bestehenden Anlagen, sowie Firmenangaben und Pressemitteilungen innovativer APV-Technologien ergänzt, um eine Vielzahl an Systemmöglichkeiten und Innovationen zu betrachten. Die bestehenden Forschungsprojekte in Deutschland werden bisher oft vom Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE) betreut und die gewonnenen Forschungserkenntnisse in Publikationen durch das Fraunhofer ISE veröffentlicht.

Die Wirtschaftlichkeitsberechnung wurde an die VDI-2067-Reihe „Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen“ angelehnt. Sie beinhaltet die Recherche aktueller APV-Preise der einzelnen Systemkomponenten anhand von Forschungsergebnissen beziehungsweise -erfahrungen aus Publikationen und bestehenden Projekten. Aktuelle rechtliche Rahmenbedingungen stellen die Grundlage der Vergütungsmöglichkeiten dar. Aufgrund der aktuellen, geopolitischen Situation weichen Echtzeit-Preise stark von der bisherigen Energiesituation ab, daher

wurden keine firmenbezogenen Angebote eingeholt. Diese würden eine hohe Unsicherheit beinhalten, wodurch eine Aussage bezüglich der zukünftigen (preislichen) Entwicklung der APV-Anlagen nur schwer zu treffen wäre.

2 Agri-Photovoltaik

Im Folgenden wird der Begriff Agri-Photovoltaik (APV) definiert, sowie ihre Entwicklung, die Funktionsweise und die Notwendigkeit erläutert. Dies erfolgt anhand der Ergebnisse der Literaturrecherche auf Basis ausgewählter Publikationen.

2.1 Definitionsansatz

Die Kombination von Landwirtschaft und Solarwirtschaft wird als Agri-Photovoltaik bezeichnet. Durch die ressourceneffiziente Doppelnutzung der gleichen Fläche zur Nahrungsmittel- und Energieproduktion wird die Landnutzungseffizienz erhöht. Eine Definition der APV wird beispielsweise in der DIN-SPEC 91434:2021-05 gegeben: „Agri-Photovoltaik / Agri-PV / APV: kombinierte Nutzung ein und derselben Landfläche für landwirtschaftliche Produktion als Hauptnutzung und für Stromproduktion mittels einer PV-Anlage als Sekundärnutzung“ (Deutsches Institut für Normung e.V. 2021). Als landwirtschaftliche Fläche wird Ackerland, Dauergrün- beziehungsweise Dauerweideland oder eine mit Dauerkulturen genutzte Fläche verstanden (ebd.). Die DIN-SPEC stellt die Vorbereitung eines Prüfverfahrens dar, welches als Standardwerk für das Berichtswesen und die Projektdokumentation für Genehmigungsbehörden, Gesetz- und Fördermittelgebern, sowie zur Nachprüfung und Beglaubigung von APV-Anlagen für Sachverständige und Zertifizierungsorganisationen fungieren kann. Damit soll gewährleistet werden, dass technische Risiken reduziert werden, eine langfristige Nutzung garantiert, die Qualität gefördert und besonders das Risiko von missbräuchlichen APV-Systemen verringert wird und damit Akzeptanzverluste in der Gesellschaft minimiert werden.

Im Leitfaden des Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE) wird angemerkt, dass als APV-Systeme neben der doppelten Nutzung einer Fläche für Photosynthese (landwirtschaftliche Pflanzenproduktion) und PV (Solarstromerzeugung), auch Tierunterstände mit PV-Modulen als Agri-PV-Anlage gewertet werden könnten. Hierfür fehlt es jedoch an differenzierenden Merkmalen zu konventionellen PV-Dächern (Fraunhofer ISE 2022).

In der GAP¹-Direktzahlungen-Verordnung (kurz: GAPDZV) wird die APV definiert als eine auf einer landwirtschaftlichen Fläche errichtete Anlage zur Nutzung solarer Strahlungsenergie, die „eine Bearbeitung unter Einsatz üblicher landwirtschaftlicher Methoden, Maschinen und Geräte nicht ausschließt und die landwirtschaftlich nutzbare Fläche unter Zugrundlegung der DIN-SPEC 91434:2021-5 um höchstens 15 Prozent verringert“ (vgl. §12 (5) GAPDZV).

Auch in anderen Literaturen finden sich verschiedene Ansätze, um das Thema APV zu definieren. So wird unter anderem in Schindele (2021) in drei Arbeitsschritten eine APV-Definition hergeleitet: im ersten Schritt werden Abgrenzungsmerkmale zu etablierten PV-Techniken bestimmt. Im zweiten Schritt werden Eigenschaften der APV an deutschen Nachhaltigkeitszielen

¹ GAP ist das Akronym für „Grundzüge der Gemeinsamen Agrarpolitik“.

gemessen. Im letzten Schritt werden die Definition festgelegt und Förderkriterien für Deutschland hergeleitet. Als Basisdefinition wird vorgeschlagen: „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.“ (S. Schindele 2021).

Die verschiedenen Definitionsbeispiele verdeutlichen, dass die APV eine Schutzfunktion für die Landwirtschaft darstellt und die landwirtschaftliche Produktion im Vordergrund stehen sollte. Andernfalls handelt es sich nicht um eine APV-Anlage, sondern um eine Photovoltaik-Freiflächenanlage (PV-FFA), für welche andere Normen und Bedingungen gelten (Deutsches Institut für Normung e.V. 2021).

2.2 Entwicklung

Das theoretische Konzept der APV wurde erstmalig 1981 von Prof. Dr. A. Götzberger vorgestellt (Goetzberger und Zastrow 1981). Die ersten Pilotanlagen wurden jedoch erst nach dem Jahr 2000 in Japan, anschließend in Deutschland (2008) und Frankreich errichtet (Schindele, et al. 2020, Fraunhofer ISE 2022a). Internationale Beachtung findet die APV seit dem Jahr 2000 (siehe Kapitel 2.5). Ein Anstieg an wissenschaftlichen Veröffentlichungen ist seit dem Jahr 2011 zu beobachten, wobei seit 2017 ein steter Zuwachs an Publikationen zur APV zu finden ist und 2021 ein regelrechter Aufschwung der APV erfolgte (Abbildung 1).

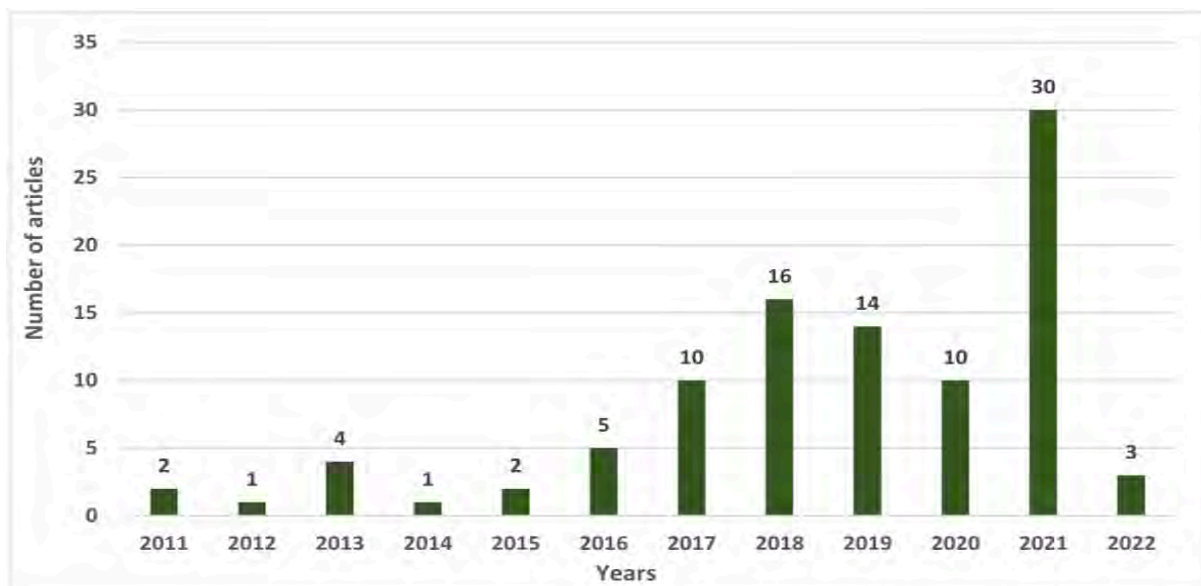


Abbildung 1: Verteilung der Veröffentlichungen wissenschaftlicher Publikationen über APV in den Jahren 2011 bis Februar 2022 (Al Mamun, et al. 2022).

In den in Abbildung 1 aufgeführten 98 untersuchten Studien konzentrierten sich die betrachteten Forschungsfragen überwiegend auf die Anlagenkonzeption oder auf Faktoren, die den Stromertrag beeinflussen. Besonders Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen und APV-Anlagen in

Kombination mit Tierhaltung sind bisher wenig bis gar nicht erforscht und weisen noch große Wissenslücken auf (Al Mamun, et al. 2022).

Aufgrund aktueller politischer Situationen, des Klimawandels und der damit notwendigen Energiewende gewinnt der Ausbau der Photovoltaik immer mehr an Bedeutung. Der Flächenbedarf erhöht sich durch den zunehmenden Wettbewerb um Land aufgrund des Bevölkerungswachstums, der Bebauung von Flächen für Industrie und Verkehr und der steigenden Nachfrage nach Lebensmitteln. Daher werden APV-Systeme auch in Zukunft eine immer wichtigere Rolle spielen, wodurch die Anzahl an wissenschaftlichen Publikationen über APV stetig wachsen wird (ebd.).

2.3 Notwendigkeit von APV-Systemen

Einer der ersten (konventionellen) Solarparks mit einer Leistung von über 1 MWp wurde bereits 1982 in Kalifornien errichtet (Arnett, et al. 1984). Mittlerweile existieren in Deutschland 13.595 PV-FFA (Stand August 2022) mit einer Leistung von insgesamt 17.572 MWp (Bundesnetzagentur 2022). Weiterhin besteht ein Potential für den zukünftigen Ausbau von PV-FFA in Deutschland von 76,5 GW auf Konversionsflächen, Autobahn-, Schienen- und Randstreifen und versiegelten Flächen (Stiftung Klimaneutralität 2021). Weshalb APV-Anlagen dennoch sinnvoll und notwendig sind, wird im folgenden Kapitel erläutert.

2.3.1 Ausbauziele, Flächenbedarf und Potentiale

In Deutschland wurden im Jahr 2021 circa 8,8 % der Bruttostromerzeugung durch PV-Strom generiert (BDEW 2021). Im Gesetz „Sofortmaßnahmen für einen beschleunigten Ausbau der erneuerbaren Energien und weitere Maßnahmen im Stromsektor“ wurde das Ausbauziel für Solaranlagen in Deutschland auf 22 GW pro Jahr gesteigert, sodass bis 2030 insgesamt 215 GW Energieerzeugungsanlagen für solare Strahlungsenergie installiert sein sollen (vgl. §4 Abs. 3d EEG) (Bundesgesetzblatt 2022). Weiterhin besagen die nationalen Klimaschutzziele eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um 65 % bis zum Jahr 2030 (§3 Abs. 1 Nr. 1 KSG). Um diese Ziele zu erreichen, bedarf es eines schnellen und vielfältigen Ausbaus der erneuerbaren Energien. Der Ausbau von erneuerbaren Energien ist demnach sowohl gefordert als auch notwendig.

In der „deutschen Nachhaltigkeitsstrategie“ heißt es, dass bis zum Jahr 2030 die Flächeninanspruchnahme für Siedlungs- und Verkehrsflächen auf unter 30 ha pro Tag gesenkt werden soll (Bundesregierung 2020). Im Jahr 2020 wurden in Deutschland täglich 54 ha als Siedlungs- und Verkehrsflächen eingestuft (BMUV 2022). Davon entfallen pro Jahr 155 km² für PV-FFA. Zusammen mit Windkraftanlagen an Land (1.725 km²) entspricht dies einem Flächenanteil von circa 0,5 % (Stand 2015) (Matthes, et al. 2018).

Dass das Potential hierbei noch groß ist, zeigt Matthes, et al. (2018) in einer Studie, in der potentielle Flächenanteile für die jeweiligen Bundesländer Deutschlands berechnet wurden. Diese liegen zwischen 4,2 % und 6,7 % (Abbildung 2) (ebd.). Die für PV-Dachanlagen zur Verfügung stehende Fläche wurde hierbei einbezogen.

	Bodenfläche	Siedlungs- und Verkehrsfläche	Moor und Heide	Waldfläche	Wasserfläche	Abbau- und Unland	Flächen für Energieumwandlung	Anteil an Gesamtfläche
	km ²							
Baden-Württemberg	35.677	5.158	30	13.678	390	259	1.616	4,5%
Bayern	70.055	8.399	151	25.721	1.235	2.133	3.291	4,7%
Brandenburg*	30.546	3.426	127	10.698	1.082	691	1.452	4,8%
Hessen	21.115	3.324	2	8.488	295	128	888	4,2%
Mecklenburg-Vorpommern	23.213	1.902	45	5.086	1.445	291	1.444	6,2%
Niedersachsen*	48.036	6.896	719	10.541	1.162	848	2.787	5,8%
Nordrhein-Westfalen	34.113	7.828	69	8.878	662	262	1.641	4,8%
Rheinland-Pfalz	19.848	2.836	2	8.399	271	85	826	4,2%
Saarland	2.569	538	1	874	25	23	111	4,3%
Sachsen	18.449	2.432	28	5.033	427	462	1.007	5,5%
Sachsen-Anhalt	20.452	2.248	141	5.069	479	109	1.241	6,1%
Schleswig-Holstein*	16.558	249	118	1.728	869	274	1.108	6,7%
Thüringen	16.202	1.588	2	53	203	231	888	5,5%
Gesamt	357.327	49.066	1.437	109.493	8.543	5.797	18.299	5,1%

Abbildung 2: Potentielle Flächenverfügbarkeit für die Energieumwandlung aus Windkraft an Land und PV-Freiflächenanlagen (Stand 2018) (Matthes, et al. 2018).

*Anmerkung: * Die Stadtstaaten wurden in die jeweiligen umliegenden Bundesländer integriert: Berlin in Brandenburg, Bremen in Niedersachsen, Hamburg in Schleswig-Holstein.*

Dass sich das Ausbauziel Deutschlands nicht allein durch PV-Dachanlagen erreichen lässt, ist am Beispiel Thüringens erkennbar: In Thüringen sind 36.927 PV-Anlagen mit einer Leistung von 1.898,1 MWp installiert (Stand April 2021). Dem gegenüber steht ein Potential von 15.837 MWp (ThEGA 2022), von dem maximal 50 % der Fläche für PV-Dachanlagen geeignet sind. Dies ist auf verschiedene Faktoren zurückzuführen, wie beispielsweise die Statik der Gebäude oder Auflagen des Denkmalschutzes. Es gilt weiterhin zu beachten, dass nicht alle potentiell nutzbaren Dachflächen vollständig belegt werden, da Eigentümer meist die wirtschaftlich sinnvollste Variante der Belegung wählen und damit oft der Autarkiegrad entscheidet und nicht der vollständigen Belegung entspricht (Weiland 2022). Dieser Tatbestand ist auch auf ganz Deutschland übertragbar.

Weiterhin gilt es zu beachten, dass nach §2 Abs. 1 Nr. (3) UVPG seit dem Jahr 2017 auch die Fläche als Schutzgut gewertet wird, die es zu schützen und für die es ggf. Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen zu erfüllen gilt. Obwohl die Akzeptanz in der Bevölkerung gegenüber PV-FFA relativ hoch ist (vgl. Abbildung 3), gestaltet sich der Ausbau von Solarparks oftmals als schwierig, was zumeist auf baurechtliche Hintergründe zurückzuführen ist (Wirth 2022, AEE 2021).

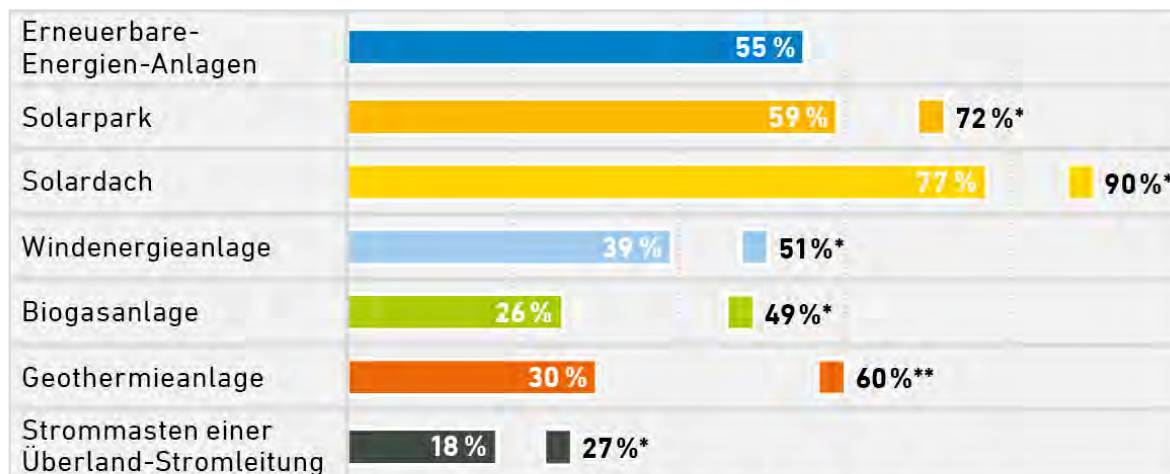


Abbildung 3: Zustimmung zu Erneuerbare-Energie-Anlagen in der Umgebung des eigenen Wohnorts (AEE 2021). *Befragte mit Anlagen in der eigenen Nachbarschaft. **Da die Anzahl der Befragten mit Geothermievorerfahrung sehr gering ist, handelt es sich bei diesem Wert um eine Tendenz.

Die Genehmigung von PV-FFA ist je nach Standort unterschiedlich aufwändig. Bei ehemaligen Ackerflächen ist der baurechtliche Aufwand höher als bei bereits versiegelten Konversionsflächen (STMB 2021). PV-FFA werden nicht als privilegierte Bauvorhaben nach §35 Abs. 1 BauGB geregelt. Hinzu kommt, dass in den meisten Fällen eine Beeinträchtigung öffentlicher Belange aufgeführt wird (vgl. §35 Abs. 2 BauGB). Weiterhin gelten PV-Anlagen nach DIN VDE 0100-712 als elektrische Betriebsstätte. Daher wird oft die Erstellung eines Bebauungsplans notwendig, der zeit- und kostenintensiv ist. Je nach Standort kann auch ein Zielabweichungsverfahren erfolgen, beziehungsweise eine Änderung des Raumordnungsplans, beziehungsweise des Flächennutzungsplans (FNP) erforderlich sein. Die Erstellung des Bebauungsplans findet unter Beteiligung der Öffentlichkeit statt und beansprucht daher einen hohen Zeitaufwand. Für eine Änderung des FNP, sowie die Erstellung eines (vorhabenbezogenen) Bebauungsplans ist mit einem Zeithorizont von zwei bis fünf Jahren zu rechnen (Hörnle, et al. 2021, Rösrath o.J.) Ein beispielhafter Ablauf eines Bebauungsplanverfahrens ist in Abbildung 4 ersichtlich. Das vierstufige Verfahren bezieht innerhalb der 17 verschiedenen Schritte mindestens zweimalig die Öffentlichkeit ein, wobei mehrmals gegen den Entscheid Einspruch erhoben werden kann. Für ein derartiges Bebauungsplanverfahren ist mit einem Zeithorizont von zwei bis fünf Jahren zu rechnen (Hörnle, et al. 2021, Rösrath o.J.). Die hier genannten Umstände erschweren den Ausbau von Solaranlagen.

APV-Anlagen verursachen keinen Flächenverlust, da die Fläche doppelt genutzt wird. Die Flächennutzungsrate ist höher als bei konventionellen PV-Anlagen. Diese wird auch „Land Equivalent Ratio“ (LER) genannt und stellt die Summe der relativen Erträge (Strom- und Pflanzenerträge) in Prozent dar. Diese liegt bei APV-Anlagen somit über 100% (Abbildung 5).

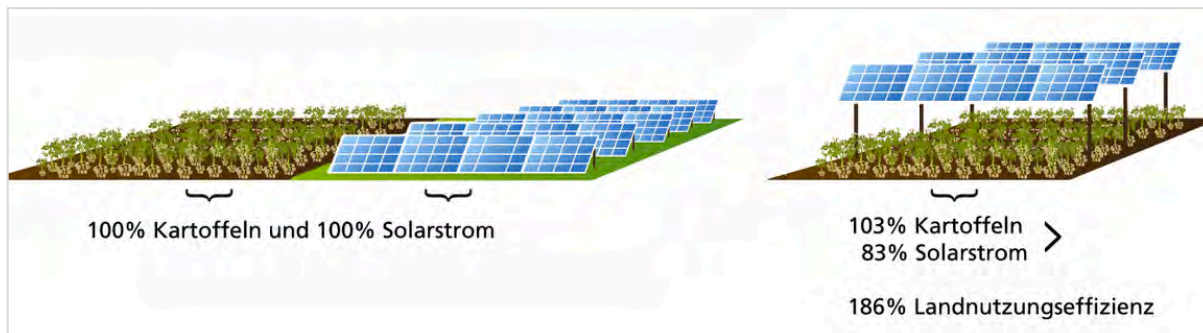


Abbildung 5: Flächennutzungspotential eines Hektars Ackerland (Fraunhofer ISE 2022a).

Weiterhin ist für APV-Anlagen ein enormes Potential vorhanden, da aktuell (Stand 2021) 16,6 Millionen Hektar in Deutschland als landwirtschaftliche Nutzfläche deklariert sind (Statistisches Bundesamt 2022). Würden 4% dieser Fläche für APV-Anlagen genutzt werden, so könnte der gesamte Strombedarf Deutschlands in Höhe von 500 GW bilanziell gedeckt werden (Fraunhofer ISE 2022). Die Universität Hohenheim gibt an, dass 10% der kosteneffizientesten Betriebe auf 1% der Ackerfläche circa 8,8% des Strombedarfs in Deutschland decken könnten (Feuerbacher, et al. 2022). Auch die Stiftung Klimaneutralität gibt ein APV-Potential von 130 GW unter Nutzung von 1% der landwirtschaftlichen Fläche Deutschlands an (Stiftung Klimaneutralität 2021). Damit wird deutlich, dass APV-Anlagen einen wertvollen Beitrag zum Erreichen der Klimaschutzziele Deutschlands darstellen können. Die Genehmigung und Akzeptanz der Anlagen können vereinfacht und gesteigert werden, indem APV-Anlagen als „der Landwirtschaft dienende Funktion“ eingeordnet werden und damit als privilegiertes Bauvorhaben geregelt werden.

2.3.2 Aktuelle klimatische Entwicklungen

APV-Anlagen bieten nicht nur aus energetischen Gründen hinsichtlich des Flächenbedarfs, sondern vor allem auch auf Seiten der Landwirtschaft viele Vorteile. Die aktuelle Situation der Landwirtschaft und Auswirkungen des Klimawandels, sowie eine potentielle Schutzwirkung durch APV sollen im Folgenden erläutert werden.

Auswirkungen des Klimawandels auf die Landwirtschaft

Daten des Deutschen Wetterdienstes zeigen einen linearen Trend der Jahressumme der globalen, horizontalen Einstrahlung von +0,3% pro Jahr und der Niederschlagsmenge von -0,4% pro Jahr im Vergleich zu den Jahren 1991 bis 2020 (Wirth, et al. 2021). Die Anzahl von Starkregenereignissen jedoch nimmt deutlich zu (Lengfeld, et al. 2019). Die ausgetrockneten Böden können die großen Niederschlagsmengen in kurzer Zeit nicht aufnehmen und Erosionsgefahr

besteht. Hier werden wertvolle Teile des Oberbodens abgetragen, ebenso Dünge- und Pflanzenschutzmittel abgespült, die umliegende Gewässer belasten können. Besonders noch nicht bewachsene Böden sind schnell bei starken Regenfällen gesättigt. Das Wasser kann nicht mehr versickern, es fließt entlang der Geländeneigung und sammelt sich als Wasser-Boden-Gemisch oft in nahen Siedlungen. Die sogenannte „Schlammlawine“ hinterlässt große Schäden, die aufgrund des Bodenanteils nur mit hohem Aufwand zu beseitigen sind (Hänsel, et al. 2018). In Deutschland entstehen jährlich Schäden in Höhe von 511 Millionen Euro (Abbildung 6) (Nier, 2018). Verschlammung durch Staunässe ist ebenfalls schädlich für die angebauten Kulturen (Honecker, et al. 2015).



Abbildung 6: Höhe der Schadenaufwände von durch Wetterextreme verursachte Schäden in der Landwirtschaft in Deutschland in den Jahren 1990-2013 (Nier, 2018).

Je nach Vegetationsphase können bei Starkregenereignissen Schäden an den Pflanzen (zum Beispiel abknicken, Wunden und Pilzbefall) entstehen. Hagel gilt ebenfalls als Niederschlag welcher jedoch Blätter und Pflanzenteile mechanisch schädigt, wodurch die Photosyntheseleistung reduziert wird und damit der Ertrag gemindert (Nikoleit, et al. 2016). Dem gegenüber zeigt der Dürremonitor des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung in Leipzig, dass der Boden das fünfte Jahr in Folge zu trocken ist (Marx 2022). Die mittlere Temperatur der bodennahen Luft hat sich in Deutschland im letzten Jahrzehnt um 2°C erhöht im Vergleich zu den ersten aufgezeichneten Jahrzehnten (1881-1910) (Deutscher Wetterdienst 2020). In Deutschland entstehen die meisten Schäden in der Landwirtschaft durch Trockenheit (Nier 2018). So zeigt Abbildung 7 beispielsweise äquivalent zu den sogenannten „Warming Stripes“ die Abweichung der Bodenfeuchte in den Jahren 1961-2020 im Vergleich zum Referenzzeitraum 1961-1990 (Deutscher Wetterdienst 2021).

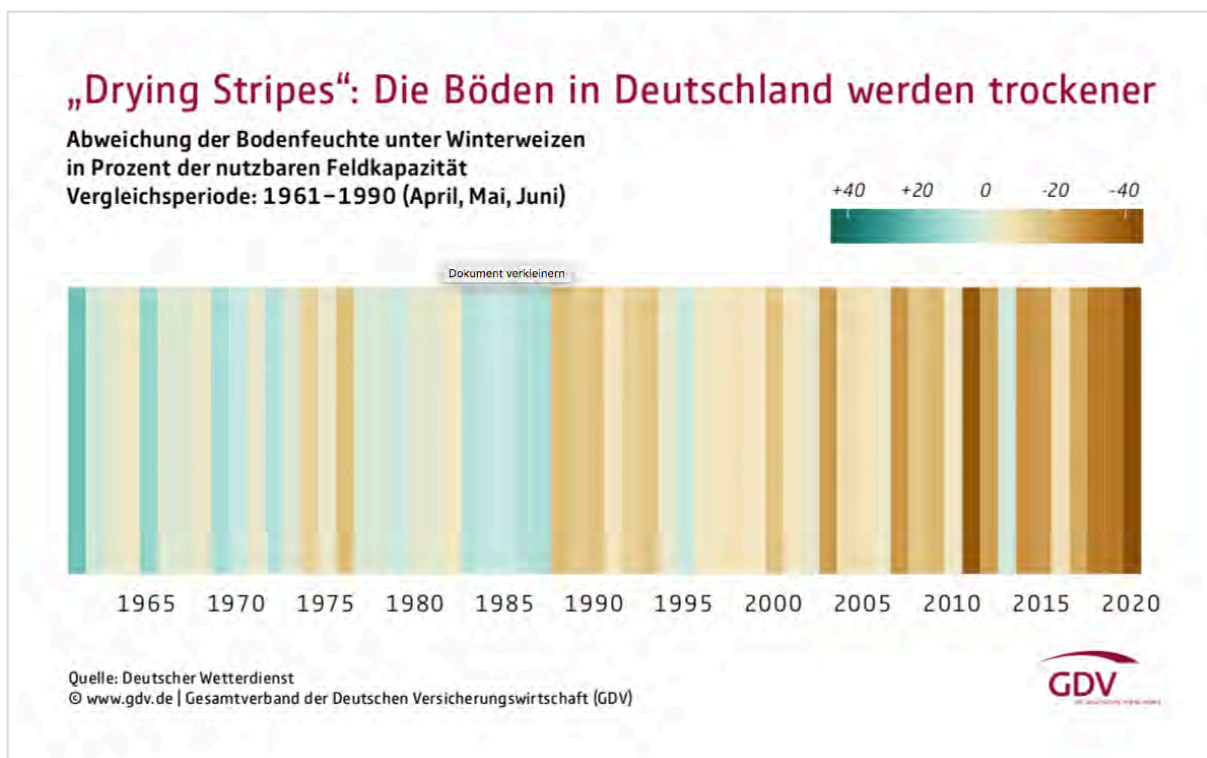


Abbildung 7: Drying Stripes - Bodenfeuchte in Deutschland in den Jahren 1961-2020, Referenzintervall: 1961-1990 (Deutscher Wetterdienst 2021).

Im Dürrejahr 2018 waren die Ernteerträge im Durchschnitt 18% niedriger als im langjährigen Mittel der Jahre 2010 bis 2021, mit regionalen Abweichungen (Schleswig-Holstein: -31%, Brandenburg: -27%) (BMEL 2022). Der Trockenstress während Dürrejahre entsteht durch fehlende Sommerniederschläge und durch einen höheren Wasserbedarf der Pflanzen aufgrund der erhöhten Temperaturen (Deutsches Klima-Konsortium, et al. 2022). Der weltweite Temperaturanstieg führte zu einer Verschiebung der Klimazonen, wodurch der phänologische Frühling in Deutschland im Mittel circa zwei Wochen früher beginnt, ebenso der Herbst und sich damit der phänologische Winter von durchschnittlich 120 Tagen auf circa 102 Tage verkürzt (Kaspar et al. 2015, Deutscher Wetterdienst 2022).

In Folge eines kurzen, milden Winters entstehen weitere Probleme: Frost ist für einige Pflanzen in bestimmten Wachstumsphasen notwendig. So benötigt beispielsweise Winterweizen beim „Schossen“ einen Kältereiz, um hohe Ernteerträge zu generieren (Deutsches Klima-Konsortium, et al. 2022). Folgt wiederum auf einen kurzen, milden Winter ein warmer Frühling, so sind die Pflanzen, insbesondere Bäume und Büsche, besonders empfindlich für Spätfrostschäden, da sie früher austreiben (Bigler und Bugmann 2018). Dies führt zu hohen Verlusten im Obst- und Weinanbau (TMIL 2021).

Weitere Herausforderungen in der Landwirtschaft

Nach Beckmann et al. (2019) sind 80% der Landfläche in Europa besiedelt oder werden land- und forstwirtschaftlich genutzt. Bevölkerungswachstum und Konsumverhalten begründen die

steigende Nachfrage nach Fläche für den Anbau von Nahrungs- und Futtermitteln, sowie Energiepflanzen. Effizienz und Ertragsoptimierung wurden bisher durch die Intensivierung der Landwirtschaft erzielt. Dies führt zu einem Zielkonflikt zwischen Produktion und Artenreichtum. Bei konventioneller Intensivierung kann zwar der Ertrag um bis zu 85% gesteigert werden, allerdings zu einem hohen Artenverlust von 23% (Beckmann, et al. 2019). Daher besteht die Herausforderung darin, hohe Nahrungsmittelerträge und gleichzeitig vielfältige Biodiversität sicher zu stellen. Besonders betroffen von konventioneller Intensivierung der Landwirtschaft sind fliegende Insekten, wie beispielsweise Bienen, Vögel, insbesondere Bodenbrüter, Säugetiere, wie beispielsweise Feldhamster und auch Pflanzen, wie beispielsweise Ackerwildkräuter. Dies ist unter anderem auf fehlende Strukturelemente, die Verwendung von Herbiziden und Pestiziden, sowie die meist großflächige, intensive Bewirtschaftung mit wenigen Kulturen zurückzuführen. Weitere spezifische Ursachen und potentielle Lösungswege werden in diversen Studien untersucht (Deutscher Bundestag 2018). Auch das Landschaftsbild wird maßgeblich durch Landwirtschaft beeinflusst. So verändern besonders große, zusammenhängende landwirtschaftliche Flächen („Schlagvergrößerung“), wie sie in Ostdeutschland typisch sind, die natürliche Umgebung. Auch Verengungen der Fruchtfolge und Beseitigungen von Strukturelementen sorgen für eine Verarmung des Landschaftsbildes und der Artenvielfalt (Wix, et al. 2018).

Die (intensive) landwirtschaftliche Nutzung bringt verschiedene Auswirkungen auf die Bereiche Boden, Biodiversität, Klima, Landschaftsbild und Wasser mit sich. Diese sollten zukünftig mehr Beachtung finden, um zumindest keine Verschlechterung zu verursachen (§13 BNatschG und §2 UVPG) (Heißenhuber, et al. 2015).

Die immer häufiger werdenden Ertragsverluste, Anpassungen an die sich verändernden Umweltbedingungen, Erwartungen an die Landwirtschaft durch sich wandelnde Werte der Bevölkerung (zum Beispiel Tierschutz) und die steigende Flächenkonkurrenz erschweren die Existenzstabilität von Landwirt*innen. Während im Jahr 1991 noch 1.174.000 Landwirt*innen in der Agrarwirtschaft beschäftigt waren, sind es heute nur noch 560.000 (DBV 2021), wobei zu beachten gilt, dass die Flächen pro Landwirtschaftsbetrieb im Vergleich stark zugenommen haben. Dies ist unter anderem auf die fortschrittlichen Landmaschinen zurückzuführen (Pascher, et al. 2022). Im Jahr 2020 erzielte die Hälfte aller landwirtschaftlichen Betriebe ihr Einkommen aus verschiedenen Sektoren des Betriebes, wobei die Erzeugung von erneuerbaren Energien 47% ausmachte (ebd.). Innerhalb dieses Sektors wurden in den Jahren 2009 bis 2017 davon 58,3% in die Produktion von Biogas investiert (AEE 2017). Weitere wichtige Einkommensquellen sind in Abbildung 8 dargestellt.

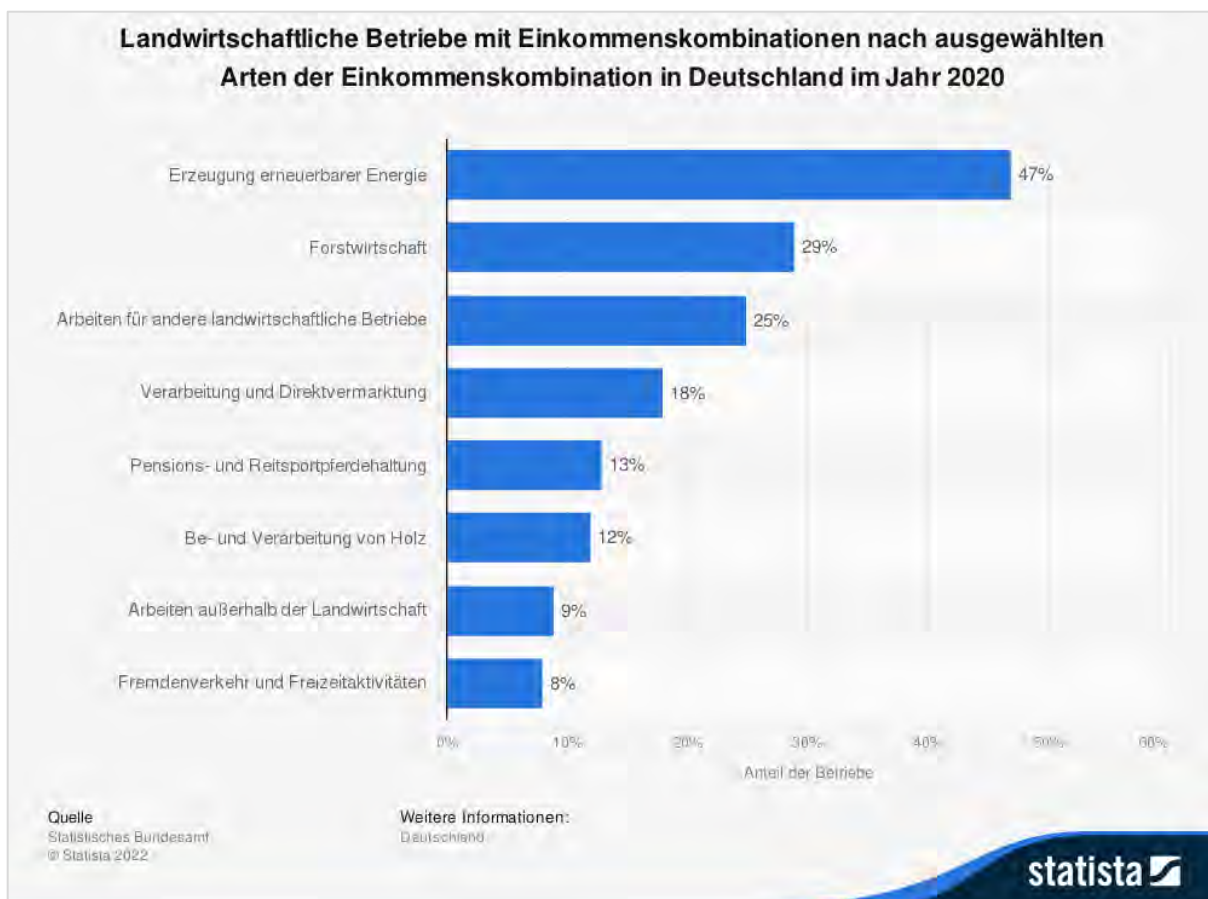


Abbildung 8: Einkommenskombinationen landwirtschaftlicher Betriebe in Deutschland im Jahr 2020 (Pascher, Hemmerling und Stork 2022).

Für das Erreichen der Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2045 (§3 KSG) müssen die CO₂-Emissionen gesenkt werden. Das bedeutet eine Reduktion bis zum Jahr 2030 um 36% gegenüber 1990 (Rüger und Buchheim 2021). Von den Emissionsquellen in der Landwirtschaft fallen 36,7% auf die landwirtschaftlichen Böden und circa 13% auf die Düngewirtschaft (Abbildung 9) (Rüger und Buchheim 2021). Hier besteht ein hohes Einsparpotential, welches durch ökologische und regenerative Landwirtschaft, Extensivierung und den sparsamen Umgang mit dem Schutzgut Fläche erreicht werden kann.

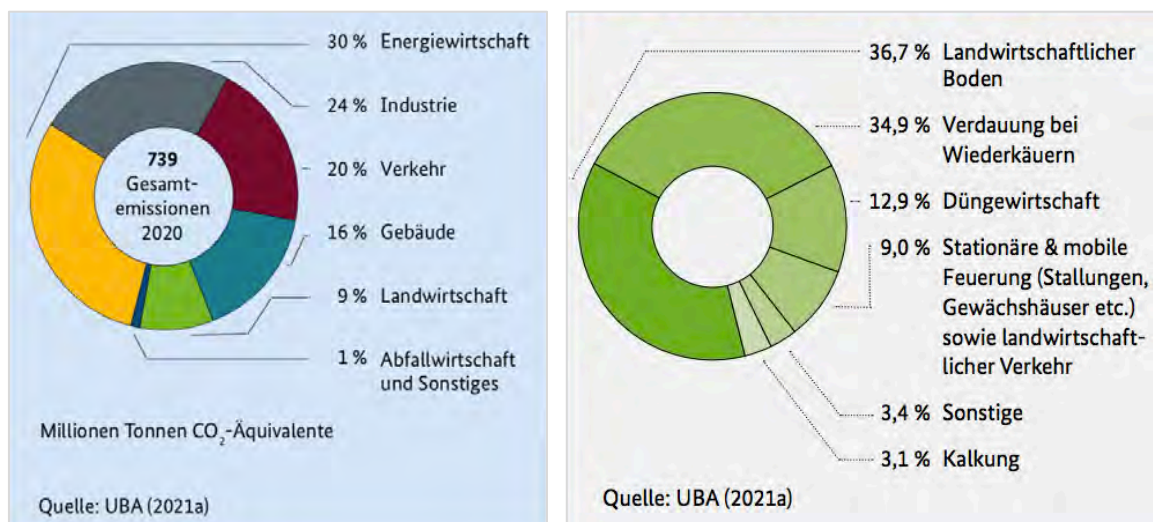


Abbildung 9: Treibhausgasemissionen in Deutschland nach Sektoren (links, Stand 2020) und Emissionsquellen in der Landwirtschaft (rechts, Stand 2019) (Rüger und Buchheim 2021).

APV als der Landwirtschaft dienende Funktion

Eine präventive Maßnahme gegen die genannten Herausforderungen in der Landwirtschaft und die Auswirkungen des Klimawandels bietet die Agri-Photovoltaik. Durch die schützende Dachfunktion und weitere Möglichkeiten, die die APV bietet, können sowohl Schäden im Anbau gemindert oder gar vermieden als auch Einkommenseinbußen ausgeglichen werden.

Durch die dachartige Überbauung der Anbaukulturen mit APV-Anlagen entsteht ein Schutz vor Starkregenereignissen, je nach Position der Module und eventueller zusätzlicher Maßnahmen wie Regenwasserauffangeinrichtungen (siehe Kapitel 4.4). Die Gefahr von Schäden an Pflanzen und der Erosion wird verringert, da das Wasser aufgefangen wird und nicht unkontrolliert die Ernte und den Boden trifft. Ebenso kann die Bildung von Schlammlawinen reduziert werden und die APV-Anlage als Flutprävention dienen, wenn sie quer zur Hangneigung errichtet wird, sodass die Aufständigung und eine zusätzliche Versickerungsfläche ein Abflusshindernis darstellen. Des Weiteren können bei besonders gefährdeten Flächen Auffangbecken beziehungsweise Wasserspeicher und Flutmauern installiert werden („Flutpräventionsphotovoltaik“ vergleichend Abbildung 10). Die Bewirtschaftung kann je nach Aufbau zwischen oder unter den Modulen stattfinden, sowie in Kombination mit Biodiversitätsmaßnahmen realisiert werden (ewind 2022). Auch die Errichtung von Schutzgürteln, die große Flächen in kleinere Abschnitte unterteilen, reduziert die Gefahr der Bildung von Schlammlawinen (Bím 2022).

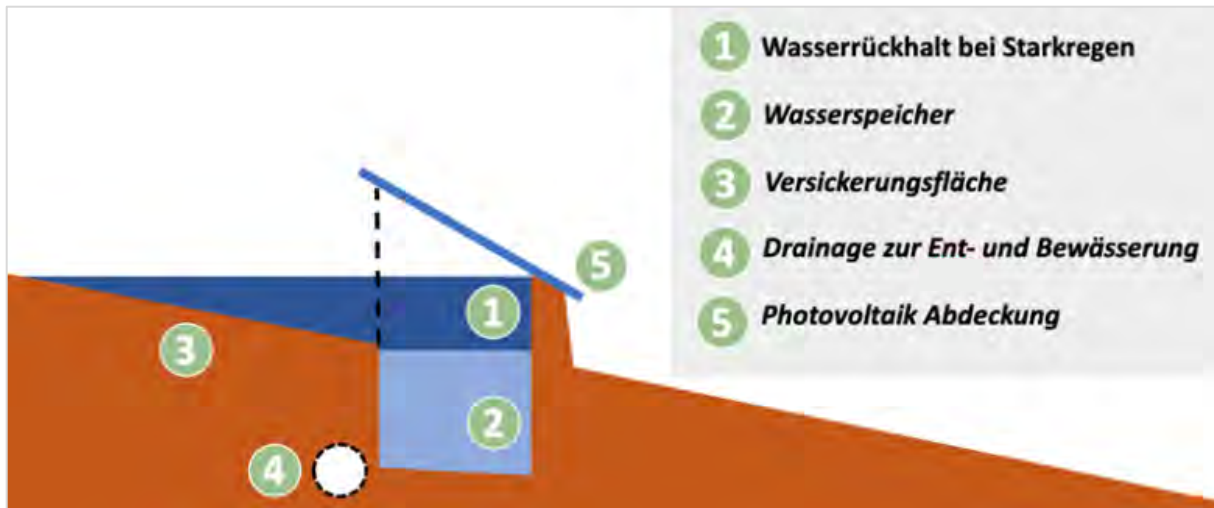


Abbildung 10: Flutpräventions-Photovoltaik mit Wasserspeicher © Volker Kormann (ewind 2022).

Der auf das Modul treffende Niederschlag kann auch gesammelt (vgl. Kapitel 4.4, S. 107) und anschließend über Bewässerungssysteme den Pflanzen gezielt zugeführt werden. Regelmäßige und gleichmäßige Bewässerung steigert und sichert den Pflanzenertrag (Butz 2018). Ausgetrocknete Böden können somit nach und nach regeneriert werden, ohne dass eine Verschlammung stattfindet oder Staunässe entsteht. Durch eine gezielte Bewässerung wird der Bildung von Pilzbefall entgegengewirkt (ebd.). Das „Solardach“ bietet einen mechanischen Schutz der Pflanzen bei Starkregenereignissen und Hagelschlägen vor Abknicken und Zerstörung, ähnlich wie bei der Verwendung eines Hagelschutznetzes (Rana, et al. 2021).

Weiterhin dient die APV der Landwirtschaft, indem die Dachfunktion die Pflanzen vor Austrocknung und Hitzestress schützt, da die Sonneneinstrahlung je nach Belegungsichte und Auswahl der Module spezifisch reduziert werden kann (siehe auch Kapitel 4.2.1). Die Verschattung mindert damit die Sonnenbrandgefahr der Pflanzen und verringert zusätzlich die Temperatur unter den Modulen (Abbildung 11). Bei konventioneller Landwirtschaft (Abbildung 11a) wird durch die Sonneneinstrahlung (gelbe Pfeile) der Boden selbst erwärmt (orangene Pfeile) und das Wasser im Boden und in den Pflanzen verdunstet (Evapotranspiration, blaue Pfeile). Durch diese Wärmeströme erwärmt sich die Luft über dem Boden (atmosphärische Erwärmung, rote Pfeile). Bei einer konventionellen PV-FFA ohne Pflanzenbewuchs (Abbildung 11b) entstehen weitere Wärmeströme durch die Reflektion der Sonneneinstrahlung auf den PV-Paneelen (dunkelgrüne Pfeile) und durch die Umwandlung des Stroms (hellgrüne Pfeile). Außerdem wird die atmosphärische Erwärmung verstärkt durch die Zirkulation unter den Modulen. Werden Landwirtschaft und PV-Anlage kombiniert (Abbildung 11c) werden die Wärmeströme auf die Pflanzen durch die Verschattung abgeschwächt und eine zusätzliche Kühlung der Solarmodule entsteht durch die Evapotranspiration.

Es wurde nachgewiesen, dass die Lufttemperatur tagsüber unter einer APV-Anlage kühler (Versuchsanlage: $-1,2^{\circ}\text{C}$) und nachts wärmer (Versuchsanlage: $+0,5^{\circ}\text{C}$) als auf einer

Referenzfläche ohne APV-Anlage ist (Barron-Gafford, et al. 2019). Auch die Bodentemperatur sinkt unter einer APV-Anlage, sodass die Verdunstungsmenge abnimmt und der Boden feuchter ist als bei Böden ohne Überdachung (Trommsdorff et al. 2022). Die ausgleichende Veränderung der Boden- und Lufttemperatur kann die Kulturen vor Frostschäden schützen (Teitel, et al. 1996). In Versuchsanlagen wurde so ein Blütenrückgang (im Vergleich zur Referenzfläche von teilweise 85%) vermieden (Juillion, et al. 2022).

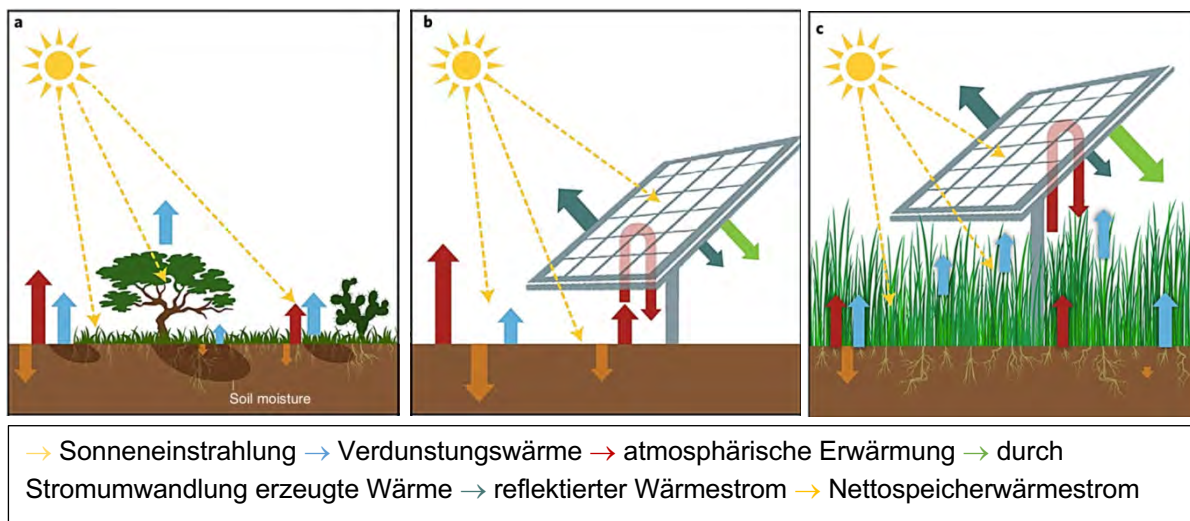


Abbildung 11: Veranschaulichung der Veränderungen des mittäglichen Energieaustauschs bei Referenzfläche Landwirtschaft (a), PV-FFA (b) und einer APV-Anlage (c) (Barron-Gafford, et al. 2019). Die Größe und Häufigkeit der Pfeile entsprechen dem Ausmaß des Effekts.

Der erhöhte Wassergehalt im Boden beeinflusst durch die Beschattung, die reduzierte Lufttemperatur am Tag und die Einstrahlungsänderung das Mikroklima der landwirtschaftlichen Kulturen. Dadurch können Ertragseinbußen und der erhöhte Wasserbedarf der Pflanzen in besonders trockenen und heißen Sommern reduziert (Trommsdorff et al. 2022) und der Ernteertrag sogar erhöht werden (Weselek, et al. 2021, Adeg, et al. 2018).

Der Ausbau von PV-FFA hat gezeigt, dass durch die Extensivierung der Fläche unter den PV-Modulen die Biodiversität im Vergleich zur intensiv genutzten Landwirtschaftsfläche zunimmt (Graham, et al. 2021). Dies ist einerseits auf die Extensivierung der Fläche und das verbesserte Mikroklima zurückzuführen als auch auf die Schutzfunktion des PV-Dachs (beispielsweise durch Schutz vor Fressfeinden) (ebd.). Je nachdem wie biologisch wertvoll die Landwirtschaftsflächen sind (einseitige Fruchtfolgen, Monokulturen, Weide, Ökolandwirtschaft), besteht ein geringes bis erhebliches Potential zur Verbesserung der Flora und Fauna (Montag, et al. 2016). Dies kann durch das Anlegen von extensiv genutzten Grasflächen, Blühstreifen, Brachen, Randvegetation und der Optimierung von Lebensräumen, wie beispielsweise das Anbringen von Nistkästen erfolgen. Auch die Stilllegung von Flächen (beispielsweise an der Aufständigung der PV-Anlage) stellt eine Extensivierung der Fläche dar und steigert damit die Biodiversität (Dubina, SolarPowerEurope 2022). Es existiert bereits eine Vielzahl an Literatur,

Untersuchungen und Studien zum Thema Biodiversität unter Solaranlagen. Eine gute Übersicht und Zusammenfassung dieser bietet Wydra, et al. (2022).

Landschaftsbild

Die Intensivierung der Landwirtschaft verändert das Landschaftsbild. Dies ist auch von APV-Anlagen zu erwarten, wobei als Referenzfläche für eine Beurteilung immer die Landwirtschaftsfläche gelten sollte. Besonders bei der Verwendung von Hagelschutznetzen und -folien ist ein Unterschied aus der Ferne kaum erkennbar (Abbildung 12). Werden zusätzliche Strukturelemente in die Fläche gebracht (beispielsweise Blühstreifen an den Aufständern), so wird das Landschaftsbild aufgewertet. Auch die Integration von Hecken als Umrandung der Landwirtschaftsfläche beziehungsweise Umzäunung der APV-Anlage optimiert die Ästhetik (siehe auch Kapitel 4.6.3).



Abbildung 12: Vergleich optischer Auswirkungen auf das Landschaftsbild zwischen Hagelschutznetz (rechts), Hagelschutzfolie (Mitte) und APV-Anlage (links) (©Fraunhofer ISE 2021).

Stromerzeugung

Durch die Evapotranspiration unter der APV-Anlage werden die Module gekühlt, was wiederum einen höheren Wirkungsgrad mit sich bringt (Sultan, et al. 2021, Waghmare, et al. 2021). Durch einen höheren Wirkungsgrad kann der Stromertrag der PV-Module erhöht werden (Abbildung 13).

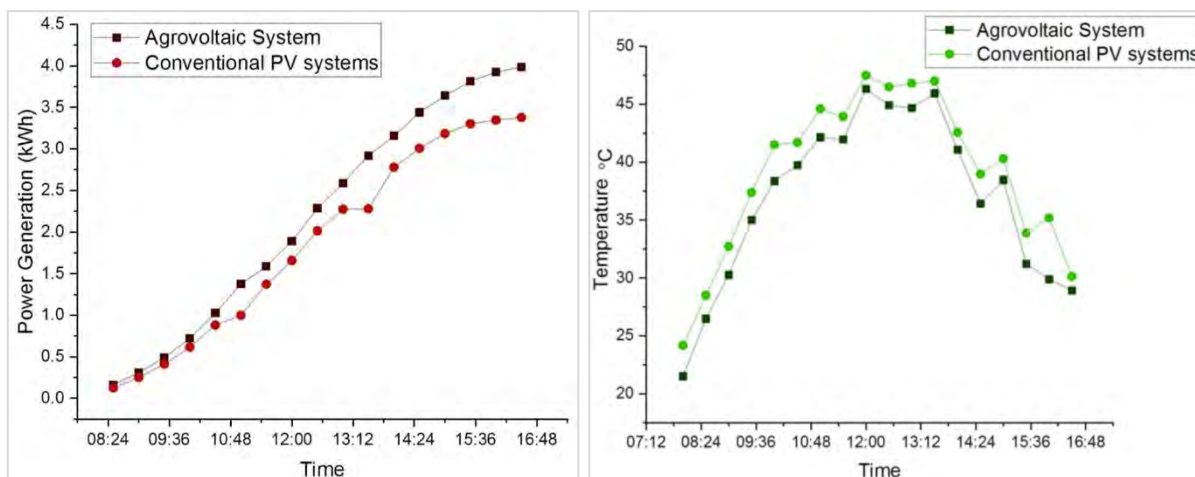


Abbildung 13: Vergleich Leistung und Temperatur zwischen konventioneller PV-Anlage und APV-Anlage (Waghmare, et al. 2021).

Der Strom der APV-Anlage kann entweder eigenverbraucht werden durch Verwendung im landwirtschaftlichen Betrieb (zum Beispiel zur Getreidetrocknung) oder aber in das öffentliche Stromnetz eingespeist werden (vgl. Kapitel 4.7). Beide Nutzungsarten bringen dem Betreiber der Anlage Einsparungen beziehungsweise Einkommen durch den Stromverkauf. Ist der landwirtschaftliche Betrieb der Betreiber der Anlage, kann so eine Existenzstabilität durch Einkommensdiversifizierung gesichert werden (vgl. Abbildung 8). Der Stromertrag ist unabhängig vom Agrarertrag und da die Solarerträge weniger volatil sind als landwirtschaftliche Erträge, bieten sie dem Landwirt damit Planungssicherheit (Gerhards, et al. 2022). Auch bei Ernteauffällen generiert der landwirtschaftliche Betrieb damit Einkommen. Diese zusätzliche Sicherheit könnte der Abnahme der Anzahl an landwirtschaftlichen Betrieben in Deutschland entgegenwirken (Khele und Szabó 2021).

Wird der erzeugte Strom direkt vor Ort genutzt, kann eine Reduktion der CO₂-Emissionen direkt im landwirtschaftlichen Betrieb erreicht und der Kohlenstoff-Fußabdruck der landwirtschaftlichen Einheit und der Produkte verringert werden. Der bevorstehende Einsatz von elektrifizierten Landmaschinen und Stromspeichertechnologien könnte diese Entwicklung erleichtern (Trommsdorff, et al. 2022). Durch eine Extensivierung der Landwirtschaft, zusätzliche Elemente wie Hecken und Blühstreifen, und die kombinierte Flächennutzung können zusätzlich Treibhausgasemissionen in Boden und Gehölzen gespeichert werden. Dies trägt dazu bei, die Klimaziele auch im Landwirtschaftssektor zu erreichen. Der CO₂-Fußabdruck der Photovoltaik (14 - 73 g CO₂-eq/kWh) ist als viel geringer einzuschätzen als Gas-(607.6 CO₂-

eq/kWh), Öl-(742.1 CO₂-eq/kWh) und Kohlekraftwerke (975.3 g CO₂- eq/kWh). Mit neuen Materialien und/oder recyceltem Silizium lassen sich die Treibhausgasemissionen um bis zu 50% senken (Tawalbeh, et al. 2020).

Zwischenfazit

Durch die kombinierte Nutzung der Fläche für Solarwirtschaft und Landwirtschaft wird dem Problem der Flächenkonkurrenz entgegengewirkt und das Schutzgut „Fläche“ (§2 UVPG) bewahrt. Auch den in Deutschland festgesetzten Nachhaltigkeitszielen wird damit entsprochen (Die Bundesregierung 2021). Um die Klimaschutzziele zu erreichen, kann die integrierte Photovoltaik² damit zu einer klimafreundlichen und flächenneutralen Stromerzeugung beitragen. In einer Simulation wurden die Klimaziele der deutschen Politik in Szenarien aufgegriffen, bei denen sowohl die PV-FFA ausgebaut wurden als auch die APV. Es stellte sich heraus, dass durch den Ausbau von APV-Anlagen circa 60.000 ha Ackerland erhalten werden könnten und damit der Flächenverbrauch deutlich reduziert werden würde (Schindele 2021).

2.4 Aktuelle Rahmenbedingungen

APV bietet eine ideale Lösung, um die Klimaziele in Deutschland zu erreichen und gleichzeitig die Vorgaben der Nachhaltigkeitsstrategie zum Flächenverbrauch zu erfüllen. Da es sich bei APV-Anlagen aktuell noch um eine neue Technologie handelt, ist ein Ausbau nur mit politischer Unterstützung und reduzierten bürokratischen Hürden möglich.

Seit Januar 2021 ist die Agri-Photovoltaik im Rahmen der jüngsten Novellierung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) in die deutsche Gesetzgebung aufgenommen und damit die erste wichtige Rahmenbedingung für den Markthochlauf von APV-Anlagen geschaffen worden. Es wurde geregelt, dass APV-Anlagen in die „Solaranlagen des ersten Segments“ aufgenommen wurden, jedoch einen Bonus erhalten, da sie kapitalintensiver sind als PV-FFA. Letztere sind ebenfalls im ersten Segment eingegliedert, wodurch Agri-PV und PV-FFA im Wettbewerb stehen. Die Höhe des Bonus wird in §38 Abs. 1 Satz 2 EEG 2023 geregelt und ist in Tabelle 1 aufgezeigt. Die Eingliederung der Anlage als APV oder PV-FFA wird durch die DIN-SPEC91434:2021-05 geregelt, wobei bisher nur Anlagen mit horizontaler beziehungsweise leicht schräger Modulausrichtung inbegriffen sind (BMWK 2022). Dieser Bonus wird allerdings von Experten als zu gering eingestuft, um tatsächlich den Wettbewerbsnachteil auszugleichen (DBV, et al. 2022). Zielführender sei ein eigenes Segment für hochaufgeständerte Anlagen, sodass sichergestellt werden kann, dass ein nennenswerter Zubau der APV stattfindet (ebd.).

² Schwimmende PV, Gebäudeintegrierte PV (Fassaden-PV), Parkplatz-PV, Agri-PV

Tabelle 1: Technologiebonus für Agri-PV-Anlagen nach §38 Abs. 1 Satz 2 EEG 2023 (eigene Darstellung).

2023	1,2 ct/kWh
2024	1,0 ct/kWh
2025	0,7 ct/kWh
2026-2028	0,5 ct/kWh

Eine Förderung gibt es allerdings nur für nicht naturschutzrelevante Ackerflächen. Im §3 Nr. 34b EEG 2023 wird definiert, dass diese einen Biotopwert von mindestens Stufe 4 „hoch“ (BKompV) aufweisen müssen, um von der Flächenkulisse ausgenommen zu werden.

Weiterhin gilt dieser Förderbonus nur für Anlagen mit einer Leistung über 1 MWp, sodass kleinere Anlagen nur Anspruch auf den Regelsatz der gesetzlichen Einspeisevergütung haben.

Das EEG erlaubt dem Betreiber der APV-Anlage den Anspruch auf vorrangige Abnahme des erzeugten Stroms nach §11 (1) EEG 2021. Der Anlagenbetreiber muss den Strom aber nicht ins Netz einspeisen, sondern kann ihn grundsätzlich auch direkt nutzen oder "vor" dem Netz an einen Dritten liefern (vgl. Kapitel 4.7).

Die Baugenehmigung ist im Außenbereich nur zulässig, wenn sich die PV-Anlage „in, an und auf Dach- beziehungsweise Außenwandflächen von zulässig genutzten Gebäuden“ befindet (§35 Abs. 1 BauGB). Dient das Vorhaben allerdings einem gartenbaulichen, land- oder forstwirtschaftlichen Betrieb und nimmt nur einen untergeordneten Teil der Betriebsfläche ein, so ist das Vorhaben privilegiert (§35 Abs. 1 BauGB). Entscheidend hierbei ist, ob der betriebsbezogene Anteil der Energieerzeugung deutlich überwiegt. Das Bundesverwaltungsgericht stufte bei einem Urteil einer Windkraftanlage einen Anteil von zwei Drittel Eigenverbrauch als ausreichend ein (BVerwG, Beschl. v. 04.11.2008, Az. 4 B 44.08).

Weiterhin zu beachten gilt, dass öffentliche Belange (Energieerzeugung, Ertragsoptimierung von landwirtschaftlichen Produkten) nicht beeinträchtigt werden (Trommsdorff, et al., 2020).

Wird eine APV-Anlage dennoch nicht als privilegiertes Vorhaben nach §35 BauGB betrachtet, so ist die Aufstellung eines (vorhabenbezogenen) Bebauungsplans notwendig, der von der örtlichen Kommune erstellt wird. Meist wird die Änderung des Flächennutzungsplans erforderlich, um den Bebauungsplan ändern zu können. Diese Verfahren nehmen circa zwei bis fünf Jahre Zeit in Anspruch und verzögern den Markthochlauf der APV (DBV, et al. 2022, Rösrath o.J.).

Die DINSPEC 91434:2021-05 gibt einen maximalen Flächenverlust von 15% vor. Wird zusätzlich eine rückbaubare Verankerung (vgl. Kapitel 4.3) verwendet, so findet keine Flächenversiegelung statt (Scharf, et al. 2021, Trommsdorff, et al. 2020). Bisher gilt es die dienende Funktion der Landwirtschaft und die nicht stattfindende Flächenversiegelung zu beweisen. Die Genehmigung von APV-Anlagen stellt sich damit als aufwändig dar. Eine Erleichterung des Genehmigungsverfahrens wäre möglich, indem APV gemäß §35 Abs. 1 BauGB ausdrücklich

privilegiert wird (Trommsdorff, et al., 2020), die Genehmigungsprozesse digitalisiert und die Fachkompetenzen in den lokalen Genehmigungsbehörden ausgebaut würden (DBV, et al. 2022).

Ab dem 01.01.2023 werden landwirtschaftliche Flächen, die auch für nichtlandwirtschaftliche Tätigkeiten genutzt werden nach GAP-Direktzahlungen-Verordnung gefördert. Dies schließt Agri-PV-Anlagen ein, sofern der Betreiber nachweisen kann, dass es sich nicht um eine konventionelle PV-FFA handelt. Förderfähig sind dabei 85% der Fläche (§12 (5) GAPDZV).

Ein Erlass (BstBl I 2022, S. 1226, vom 15.07.22) durch die obersten Finanzbehörden des Bundes und der Länder besagt, dass der Grundbesitz mit PV-Anlagen, die der DIN-SPEC 91434:2021-05 entsprechen, dem landwirtschaftlichen Vermögen zuzurechnen sind. Diese Flächen verlieren damit nicht die erbschaftsteuerlichen Begünstigungen für landwirtschaftliches Betriebsvermögen und verbleiben in der Grundsteuerklasse A. Hingegen alle nicht APV-Anlagen, wie PV-FFA, dem Grundvermögen zuzuordnen sind (BBH 2022).

Die Nutzung einer Fläche zur Erzeugung von Strom stellt nach §14 Abs. 1 BNatschG einen Eingriff in den Naturhaushalt dar, welcher zu kompensieren ist. Eine Nutzung nach den Regeln der guten landwirtschaftlichen Praxis stellt hingegen keinen Eingriff dar (§13 Abs. 2 BNatschG). Demnach kann es – je nach Einordnung – sein, dass die Erstellung eines Umweltberichtes (strategische Umweltprüfung) oder die Durchführung einer Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) beziehungsweise einer speziell artenschutzrechtlichen Prüfung (saP) notwendig wird. Auch hierbei sollten klare Regeln und Definitionen aufgestellt werden, um die APV richtig einzuordnen und entsprechende vorhabenbezogene Prüfungen durchzuführen beziehungsweise zukünftig für APV-Anlagen zu streichen, da es sich hier um eine hauptsächlich landwirtschaftliche Nutzung handelt mit den für die Landwirtschaft üblichen Eingriffen in den Naturhaushalt. Demnach sollte auch Rechtssicherheit geschaffen werden, ob die Errichtung einer APV-Anlage durch Bilanzierung, beispielsweise mit Ökopunkten, ausgeglichen werden muss (ÖKVO), oder aber sogar als Ausgleichsmaßnahme durch Aufwertung der Landschaft beziehungsweise Extensivierung der Landwirtschaft betrachtet werden kann (§16 BNatschG). Hierfür muss das APV-Projekt beispielsweise bestimmte Arten fördern (Steigerung der Biodiversität), die Bodenfunktion wiederherstellen oder verbessern oder die Grundwasserqualität erhöhen. Die Regelung der Ausgleichsmaßnahmen erfolgt auf Länderebene.

2.5 Internationale Bedeutung / Entwicklung

Weltweit erhielt die APV in den vergangenen Jahren einen regelrechten Aufschwung (vgl. Kapitel 3.3, Abbildung 14). Die Entwicklung, sowie die aktuellen Rahmenbedingungen werden hier beispielhaft für einige Länder vorgestellt.

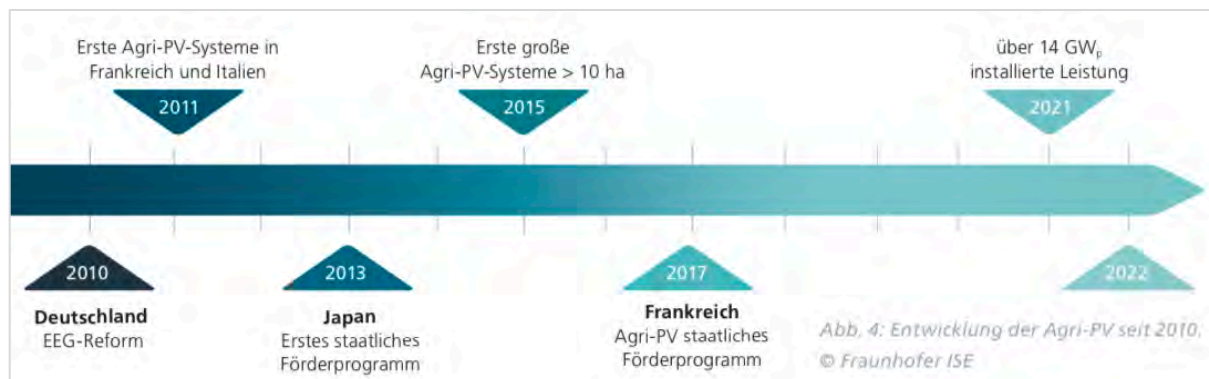


Abbildung 14: Weltweite Entwicklung der APV seit 2010, ausgewählte Eckpunkte und Länder (Fraunhofer ISE 2022).

Japan

Japan war das erste Land, das eine Förderung für APV-Anlagen einführte. Der Fokus lag hierbei auf dem Konzept des „Solar-Sharing“-Prinzips. Die Förderung soll den Sektor Landwirtschaft beleben und gegen die sinkenden landwirtschaftlichen Einkommen und die Überalterung der Landbevölkerung arbeiten (Tajima und Iida 2021). Das Ministerium für Landwirtschaft, Forst und Fischerei Japans (MAFF) hat 2013 technische Leitlinien für die Genehmigung des Konzepts des „Solar-Sharing“ festgelegt, welche im Jahr 2020 genehmigt wurden (Trommsdorff, et al. 2022). Im Jahr 2019 gab es bereits 1992 APV-Anlagen auf einer Fläche von 560 ha (Tajima und Iida 2021), im Jahr 2022 sind es über 3000 Anlagen (Fraunhofer ISE 2022), von denen circa 89% eine Größe von unter 0,3 ha besitzen. Nur 3% sind größer als 1 ha. Im Jahr 2019 deckte die APV damit 0,8% des japanischen Strombedarfs (Tajima und Iida 2021). Die meisten APV-Anlagen haben einen Verschattungsgrad von 20-50%, ein Drittel von 50-80%. Angebaut werden vor allem Pilze, Teekulturen und japanischer Ingwer. Von den APV-Anlagen befinden sich 31% der Fläche auf brachgelegtem, verwüstetem oder aufgegebenem Ackerland (Trommsdorff, et al. 2022).

China

Die installierte Leistung von Agri-PV-Anlagen in China beträgt im Jahr 2021 circa 12 GW (Fraunhofer ISE 2022). Dies ist auf die doppelte Förderung in China zurückzuführen, welche sowohl auf Seiten der Landwirtschaft als auch auf Seiten der Energiewirtschaft erfolgt (Xue 2017). Diese Zusammenlegung soll zur Bekämpfung der Armut in den ländlichen Gebieten Chinas dienen. Hierfür wurden Maßnahmen („Administrative Measures for Poverty Alleviation with PV Power Plants“) und Leitlinien („Photovoltaic Power Station Project Land Use Area

Control Indicators“) eingeführt (Xue 2017, Trommsdorff, et al. 2022). Diese Maßnahmen und Richtlinien bestimmen den Standort der Agri-Photovoltaik-Anlagen. Der Anteil der unter der Armutsgrenze lebenden Bevölkerung wird standortspezifisch bestimmt, die lokalen Behörden berechnen den Kapazitätsbedarf und schreiben daraus resultierend Projekte an Solarentwickler aus. Dadurch kann das Einkommen von unter Armut leidenden Familien diversifiziert werden. Dies erfolgt entweder durch die Verpachtung von Land an Projektierer, die Möglichkeit in den Anlagen beschäftigt zu werden oder durch Mieteinnahmen aus dem erzeugten Strom, wenn die Familien die APV-Anlage (mit-)betreiben (Trommsdorff, et al. 2022).

Frankreich

Die Agentur für ökologischen Stromtransport (ADEME) hat im Jahr 2017 das erste Mal separate Ausschreibungen für APV-Anlagen veranlasst. Bisher wurden vier Ausschreibungsrunden durchgeführt: 2017 (15 MWp), 2019, 2020 (80 MWp) und 2021 (140 MWp) (Trommsdorff, et al. 2022). Für die Entscheidung der Projekte wurde immer eine Einzelfallprüfung herangezogen, da eine Klassifizierung schwierig ist. Um dies zu erleichtern, wurde im Juli 2021 eine Charakterisierung veröffentlicht, in der ein „Entscheidungsbaum“ entwickelt wurde. Dieser soll als Instrument zur Analyse und Identifizierung der vorteilhaftesten Projekte dienen. Dafür wurde eine Literaturrecherche durchgeführt, Interviews mit Farmern und Projektierern gehalten, anschließend die APV definiert und die Richtlinie zur Klassifizierung von APV-Projekten erstellt (ADEME, et al. 2021).

USA

Die APV hat in den USA in den letzten Jahren ebenfalls an Bedeutung gewonnen. So wird als Ziel gesetzt bis 2030 circa 800.000 ha Landwirtschaftsfläche für APV-Anlagen zur Verfügung zu stellen. Für die Erforschung der Auswirkungen von APV-Anlagen wurden bereits zahlreiche Studien durchgeführt, beispielsweise zur Biodiversität (Trommsdorff, et al. 2022). Weiterhin wurde ein „AgriSolar Clearinghouse“ ins Leben gerufen. Dies ist eine Website, die Landwirt*innen, Viehzüchter*innen, Landverwalter*innen, Solarentwickler*innen und Forscher*innen vertrauenswürdige, praktische Informationen zur Verfügung stellen soll, um die Zusammenarbeit von Solar- und Landwirtschaft zu fördern (Peterson 2022).

Um die APV in den USA weiter voranzubringen, wurde eine Studie vom NREL (National Renewable Energy Laboratory) veröffentlicht, die die sogenannten „5C´s“ erarbeitet hat. Diese Studie „Innovative Solar Practices Integrated with Rural Economies and Ecosystems (INSPIRE)“ ist die umfassendste Studie zur APV in den USA. Hierbei wurden Möglichkeiten und Risiken an 25 Standorten untersucht, die die Bereiche Anbau von Pflanzen, den Lebensraum von Bestäubern, Ökosystemdienstleistungen und die Viehzucht umfassen. Der Fokus liegt hierbei nicht auf der prozentualen Veränderung der Ernteerträge sondern vielmehr auf Faktoren, welche die Installation von APV-Anlagen ermöglichen und die Forschung an diesen

Standorten erleichtern (Macknick, et al. 2022). Diese „5C´s“ könnten auch in die deutsche Sprache übertragen werden (Abbildung 15).



Abbildung 15: Die "5C´s" zum Voranbringen der APV in den USA (Macknick, et al. 2022).

C1. Climate – Klima, Boden und Umweltbedingungen:

Die Umgebungsbedingungen und Faktoren des spezifischen Standorts, die außerhalb der Kontrolle der Solareigentümer / Solarbetreiber / Agri-Photovoltaik-Praktiker / Forscher liegen.

C2. Configuration – Konfigurationen, Solartechnologien und Designs:

Die Wahl der Solartechnologie, die Gestaltung des Standorts und andere Infrastrukturen, die die Verfügbarkeit von Licht und die Solarerzeugung beeinflussen können.

C3. Crops and Cultivation – Kulturauswahl und Anbaumethoden, Saatgut- und Vegationskonzepte sowie Managementansätze:

Methoden, Vegetation und landwirtschaftliche Ansätze, die für Agri-Photovoltaik-Aktivitäten und -Forschung verwendet werden.

C4. Compatibility – Kompatibilität und Flexibilität:

Die Kompatibilität des Designs und der Konfiguration der Solartechnologie mit den konkurrierenden Bedürfnissen der Solareigentümer, Solarbetreiber, landwirtschaftlichen Praktiker und Forscher.

C5. Collaboration – Kollaboration / Zusammenarbeit und Partnerschaften:

Abreden und Vereinbarungen zwischen Interessengruppen und Sektoren zur Unterstützung von Agri-Photovoltaik-Installationen und -Forschung, einschließlich der Einbindung von Gemeinden, Genehmigungen und rechtlichen Vereinbarungen.

Weitere Länder

Auch in anderen Ländern gewinnt die APV stetig an Zuwachs. So wurde in Italien beispielsweise im Juni 2022 eine Richtlinie veröffentlicht, welche die Planung, Erbauung und den Betrieb von APV-Anlagen regeln soll. Die dargelegten Grundsätze müssen von Entwicklern und Eigentümern berücksichtigt werden, um die Anlagen als APV-Anlage einstufen zu lassen.

In der Türkei wurde eine Studie veröffentlicht, die das Potential von APV-Anlagen in der Türkei ermittelt hat (Cosgun 2021). Trotz der günstigen Solareinstrahlungsrate sind die landwirtschaftlichen Nutzflächen begrenzt, womit die APV ihre Wichtigkeit erhält. Die Studie zeigt, dass 75% des türkischen Strombedarfs durch Solarenergie gedeckt werden könnten (ebd.)

In Kanada bietet APV die Möglichkeit, Solarenergie auszubauen und gleichzeitig die strengen Regelungen der Landwirtschaft einzuhalten. In einer Studie werden die politischen Änderungen untersucht, die notwendig sind, um den Ausbau der APV zu vereinfachen. Als Ergebnis wurden folgende Bereiche definiert: verstärkte Forschung und Entwicklung, Stärkung des öffentlichen Bewusstseins und Verbreitung von Informationen über APV, unterstützende Maßnahmen für die Landwirt*innen für den Umbau auf APV und die Nutzung der APV als Einnahmequelle durch Verkauf des Stromüberflusses beispielsweise an den Handelspartner USA (Pearce 2022).

2.6 Partizipation

Bei der Umsetzung eines Agri-Photovoltaik-Projektes sind verschiedene Akteure zu berücksichtigen. Sie können anhand von vier Funktionen unterschieden werden: (1) Bereitstellung des Landes (Eigentum); (2) landwirtschaftliche Bewirtschaftung des Landes; (3) Bereitstellung von Agri-Photovoltaik-Systemen (Eigentum/Investition); und (4) Betrieb des PV-Systems. Hinzu kommt die Akzeptanz der Gesellschaft durch beispielsweise Einbeziehung der Kommunen (Trommsdorff, et al. 2022).

Geschäftsmodelle

In einem einfachen Basisfall können die vier genannten Funktionen von einer Partei, nämlich dem beziehungsweise der Landwirt*in, verwaltet werden (Tabelle 2). Dieses Modell eignet sich für kleine, landwirtschaftliche Anlagen, bei denen die Landwirt*innen die Investitionen selbst tätigen können und Eigentümer*in des Landes sind. Neben den geringeren Projektierungskosten, der einfacheren Vertragsgestaltung sowie dem hohen Dezentalisierungsgrad liegt der Hauptvorteil dieses Geschäftsmodells darin, dass die möglichen Vor- und Nachteile einer APV-Anlage leichter und dynamischer berücksichtigt werden können, wenn die Wechselwirkungen zwischen der landwirtschaftlichen und der PV-Ebene durch dieselbe Person erfolgen (ebd.).

Oft befindet sich das Land jedoch nicht im Besitz der/des bewirtschaftenden Landwirtin beziehungsweise des Landwirts. Auch bei größeren APV-Anlagen ist es weniger verbreitet Privat-eigentümer*in der Anlage zu sein. Dies erhöht die Wahrscheinlichkeit von Fremdinvestitionen. Teileigentum könnte in diesem Fall dazu beitragen, die Anreizstruktur für die synergetische Doppelnutzung von Land zu erhalten. Je höher jedoch der Fremdkapitalanteil ist, desto schwieriger wird es, die Vorteile beider Produktionsstufen im Betrieb im Auge zu behalten. Für dieses Geschäftsmodell sprechen Skalierungsmöglichkeiten und mögliche Optimierungen durch eine stärkere Arbeitsteilung (ebd.).

Tabelle 2: Geschäftsmodelle verschiedener APV-Betreiber-Varianten (Trommsdorff, Dhal, et al. 2022).

Geschäftsmodell	Funktion			
	Flächenbereitstellung	Landwirtschaftliche Bewirtschaftung	PV-System Bereitstellung	PV-System Betrieb
Basisfall	Landwirtschaftsbetrieb			
Externes Landeigentum	Flächenbesitzer*in	Landwirtschaftsbetrieb		
Externes PV-Investment	Landwirtschaftsbetrieb		PV Investor*in	Landwirtschaftsbetrieb
Nur Bewirtschaftung und Betrieb	Flächenbesitzer*in	Landwirtschaftsbetrieb	PV Investor*in	Landwirtschaftsbetrieb
Nur Bewirtschaftung	Flächenbesitzer*in	Landwirtschaftsbetrieb	PV Investor*in	PV-Betreiber*in

Akzeptanz und Bürgerbeteiligung

Gerade in der Energiebranche ist oftmals nicht die anliegende Infrastruktur von ausschlaggebender Bedeutung, sondern vielmehr die Akzeptanz in der Bevölkerung. Diese kann beispielsweise durch dezentrale Teilhabe und Bürgerenergiegenossenschaften erreicht werden. Angesichts der Planungshoheit beim Genehmigungsprozess ist die finanzielle Bürgerbeteiligung und die Beteiligung von Kommunen und Gemeinden ein wichtiger Faktor zum Ausbau der APV (eueco GmbH 2021).

Es wird zwischen verschiedenen Beteiligungsmethoden unterschieden: (1) die indirekte Beteiligung von Bürger*innen über die Kommunen. Dabei wird nach §6 EEG 2021 die Gemeinde direkt an den Gewinnen des Solarparks beteiligt. Dadurch kann die regionale Wertschöpfung gesteigert werden. (2) Die direkte finanzielle Beteiligung der Bürger*innen (als sogenannte Anteilhaber*innen) bietet den Anwohner*innen eine wirtschaftliche Teilhabe, durch beispielsweise günstige Tarife bei der Energiebeziehung (ebd.).

Auch bieten derartige Energieprojekte mit Beteiligung der Anwohner die Möglichkeit durch das eigene Handeln in der Energiewende wirksam zu werden. Durch die Eigenverantwortlichkeit bei der Energiekonsumierung können Konsument*innen und Stromproduzent*innen

eigenständig Stromsparmaßnahmen umsetzen. Hierbei spielen besonders Bürgerenergiegenossenschaften und Mieterzusammenschlüsse eine wichtige Rolle, auch als Finanzierungsmöglichkeit beziehungsweise zukünftige Finanzierungsform (Blum, et al. 2021).

Eine möglichst hohe Akzeptanzrate für die weitere Entwicklung und kommerzielle Umsetzung von APV-Anlagen kann durch zehn Schlüsselfaktoren erreicht werden (Trommsdorff, et al. 2022), wobei als 11. Schlüsselfaktor die Beteiligung gesehen werden kann (Abbildung 16).



Abbildung 16: Schlüsselfaktoren zur Steigerung der Akzeptanz von APV-Anlagen (eigene Darstellung in Anlehnung an (Trommsdorff, et al. 2022)).

3 Stand der Forschung

Da die APV in immer mehr Ländern ausgebaut wird, die Zahl an Veröffentlichungen zu Forschung und Optimierung zunimmt und stetig neue Erkenntnisse gewonnen und veröffentlicht werden, soll im Folgenden ein Überblick zum aktuellen Stand der Forschung gegeben werden. Dafür wurden 129 Studien betrachtet und dem jeweiligen Themengebiet zugeordnet. Die Publikationen wurden in den Jahren 2011 bis 2022 veröffentlicht, wobei der überwiegende Teil (n=80) aus dem Jahr 2022 stammt (Abbildung 17).

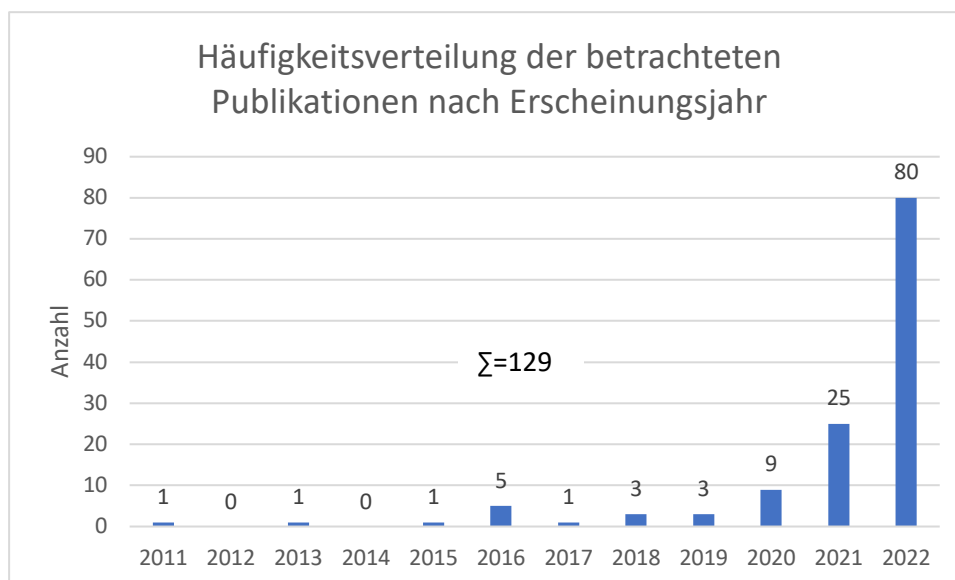


Abbildung 17: Nach Erscheinungsjahr sortierte Anzahl der betrachteten Publikationen zu APV, n=129 (eigene Darstellung).

Die thematischen Bereiche wurden inhaltlich gegliedert in (1) Allgemein, (2) Design, (3) Entwicklung, (4) Pflanzentechnik, (5) Spezifisch und (6) Systemkomponenten. Die betrachteten Publikationen werden nun innerhalb der Bereiche vorgestellt.

3.1 Allgemeiner Überblick und Reviews

Verschiedene Publikationen geben einen allgemeinen Überblick über das Thema APV (vgl. Tabelle 5). Die wohl in Deutschland bekannteste ist der Leitfaden des Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme [(Fraunhofer ISE 2022) 2. Auflage]. Darin wird die Funktionsweise und Notwendigkeit der APV erklärt, Forschungsergebnisse der Landwirtschaft werden vorgestellt, ein Überblick über die Wirtschaftlichkeit und Technik wird gegeben, sowie im Anschluss eine kurze Darstellung von Gesellschaft, Politik und Recht (ebd.).

Eine weitere, allerdings 10 Jahre früher entstandene Studie stellt das Prinzip der APV vor, prüft die Landnutzungseffizienz und erste Hypothesen, wie beispielsweise emissionsarme Energieumwandlung mit Photovoltaik, Klimaresilienz der Pflanzen und die Entschärfung der Flächenkonkurrenz zwischen Nahrungsmittel- und Stromerzeugung (Dupraz, et al. 2011). Die Lichtverfügbarkeit unter APV-Anlagen beeinflusst das Pflanzenwachstum, ebenso die

Wasserverteilung und -bereitstellung. Die Beeinflussung des Pflanzenwachstums wurde im Jahr 2019 untersucht, in elf ausgewählten Projekten (weltweit), wobei der Landnutzungs-koeffizient eine wesentliche Rolle spielte (Weselek, et al. 2019). Weiterhin wurde eine Literatürübersicht zur Schattentoleranz von verschiedenen Pflanzenkulturen erstellt (Weselek, et al. 2019). Neutrale beziehungsweise positive Ergebnisse wurden für Sonnenblumen, und andere ölhaltige Pflanzen, Kartoffeln, Weizen, Mais und Blaubeeren festgestellt. Positive Auswirkungen wurden bei Tomaten, Kiwi, Mango, Kaffeepflanzen und Schwarzebeeren erzielt, negative bei Reis und Baumwollpflanzen. Die vorgestellten Ergebnisse stammen aus verschiedenen Studien von diversen Forschungsprojekten und wurden bei unterschiedlichen Verschattungsgraden ermittelt, wodurch ein Vergleich beziehungsweise eine allgemein gültige Aussage schwierig ist (ebd.).

Eine APV-Anlage sollte laut der Autor*innen Jain, et. al (2021) anhand folgender Aspekte von konventionellen PV-FFA zu unterscheiden sein und innerhalb der APV klassifiziert werden können (siehe auch Kapitel 3.3 Entwicklung):

1. **Anwendung** (Landwirtschaft, Tierbestand)
2. **System** [offen, geschlossen (Gewächshaus)]
3. **Konstruktion** (hoch, leicht aufgeständert, vertikal, und weitere)
4. **Landwirtschaftliche Nutzungsform** (Gartenbau, Ackerfrüchte, Obstbau, Dauergrünland)
5. **Flexibilität** (mobile, dauerhafte Anlage; pflanzen- / energieoptimierte Nachführung)

Die Grundsätze zur Planung einer APV-Anlage beinhalten die Auswahl der Kulturen, die Lichtverteilung, die Aufständigung und Fundamentierung und die Modulauswahl. Als Auswirkungen auf die Landwirtschaft werden Windreduktion, höhere Bodenfeuchtigkeit, geringerer Flächenverlust, die Möglichkeit zum Regenwassersammeln, eine saisonale Verschiebung der Ernte und die Auswahl der pflanzlichen Kulturen zur Senkung der Modultemperatur genannt (Jain, et al. 2021).

Für den Vergleich und die Qualitätseinstufung werden von diesen Autor*innen Leistungsindikatoren für (A)PV-Anlagen definiert. Diese sind in **Tabelle 3** zusammengefasst.

Tabelle 3: Leistungsindikatoren zur Qualitätseinstufung von APV-Anlagen [übersetzt und modifiziert nach Jain, et al. (2021)]

Leistungsindikator	Mathematische Darstellung	Besonderheit
Bodenbedeckungsverhältnis (Ground Cover Ratio – GCR)	$GCR = \frac{A_{PV}}{A_{Ground}}$ A_{PV} = Modulfläche A_{Ground} = landwirtschaftlich genutzte Fläche	<ul style="list-style-type: none"> Nachteilige Variable in der agrivoltaischen Planung Hoher GCR-Wert bedeutet hohen Energie-, aber niedrigen Ernteertrag
Solar- und Landwirtschaftsertrag (Y_{EL} , Y_{AG})	$Y_{EL} = \frac{\text{Stromertrag (MWh)}}{\text{Gesamtfläche (ha)}}$ $Y_{AG} = \frac{\text{Pflanzenenertrag (kg)}}{\text{Gesamtfläche (ha)}}$	<ul style="list-style-type: none"> Y_{EL} von Sonneneinstrahlung, Wirkungsgrad der Module, Systemverlusten usw. abhängig APV kann aufgrund der größeren Kabellängen größere Systemverluste aufweisen
Landnutzungsrate (LER)	$LER = \frac{E(Y_{agri,AV})}{E(Y_{agri,N})} + \frac{(Y_{EL,AV})}{(Y_{EL,N})}$ AV = (unter) APV-Anlage N = Referenz, ohne APV	<ul style="list-style-type: none"> $LER = 1 = 100\%$ Flächennutzung Doppelte Flächennutzung $LER > 1$
Wirtschaftliche Indikatoren (Preis-Leistungs-Verhältnis – P)	$P = \frac{P_{APV}}{P_{FFA}}$ P_{APV} = Kosten APV-System P_{FFA} = Kosten PV-FFA	<ul style="list-style-type: none"> Zusätzliche Kosten abhängig von Stromgestehungskosten $P = 1$ bedeutet, die Anlage ist wirtschaftlich sinnvoll
Landwirtschaftliche Qualität	<ul style="list-style-type: none"> Qualitätseffekte lassen sich nur schwer mit allgemeinem Indikator ausdrücken und sind vom wirtschaftlichen Marktwert abhängig 	
Wassereinsparung	$V \text{ in } [l], [m^3]$	<ul style="list-style-type: none"> Abhängig von Saison, Standort, APV-System
Menschlicher Komfort	<ul style="list-style-type: none"> Qualitätseffekte lassen sich nur schwer mit allgemeinem Indikator ausdrücken Komfort der Bauern während des Anbaus durch Verschattung 	

Das weltweite Entwicklungspotential der APV wird in Khele und Szabó (2021) anhand von aktuellen Forschungsergebnissen ermittelt. Hier wird vor allem das Potential für nachgeführte Systeme und für mobile Anlagen als Ersatz für Hagelschutznetze/-folien gesehen. Laut der/den Autor*innen wird durch die Auswirkungen des Klimawandels und den damit verbundenen, zunehmenden Schutzbedürfnissen der pflanzlichen Kulturen der Ausbau der APV zukünftig stark zunehmen. Auch werden Regierungen in den nächsten Jahren mehr Förderungen für APV erarbeiten. Dies wird belegt durch die wachsende Zahl an Forschungsprojekten zum Thema APV, die weiterhin zunehmen werden. Forscher, Institutionen und Forschungszentren arbeiten an der Optimierung des Systems, was aufgrund der großen Anzahl von Parametern und der Komplexität der Modellierung der Kulturen eine komplexe Aufgabe ist. Besonders die Vorhersage der Erträge in der Planungsphase stellt eine große Herausforderung

dar (Khele und Szabó 2021). Es ist davon auszugehen, dass sich die APV ähnlich der konventionellen Photovoltaik entwickeln wird. Diese Zusammenhänge werden ebenfalls in Forschungsprojekten untersucht (Munoz, et al. 2022).

Die APV ist neben dem Schutz der Pflanzenkulturen vor allem notwendig aufgrund der zunehmenden Flächenkonkurrenz (Scharf, et al. 2021). Nach einem anfänglichen „Boom“ beim Ausbau der PV-FFA wurden in der Folge restriktive Flächenregelungen eingeführt, um wertvolle landwirtschaftliche Flächen zu erhalten und Landwirt*innen vor einem „Pachtpreiskampf“ mit Photovoltaikbetreibern zu bewahren. Aufgrund dieser Regelungen ist die derzeitige Flächenkulisse für PV-FFA recht eingeschränkt. Hier bietet Agri-PV die Möglichkeit, landwirtschaftliche Flächen zu erschließen, ohne dabei die landwirtschaftliche Nutzung zu verhindern (ebd.). Der Schutz der Pflanzenkulturen sollte hierbei immer im Vordergrund stehen. Um dies zu gewährleisten sind folgende Faktoren wichtig: (1) Qualität der Sonneneinstrahlung in Form von Lichtintensität und photosynthetisch aktiver Strahlung (PAR), (2) APV-Auslegungsmöglichkeiten wie energieoptimiert, pflanzenoptimiert und kombinierte Optimierung und (3) Perspektive der Anteilseigner (insbesondere Landwirt*innen). Die Auslegungsmöglichkeiten sind in Tabelle 4 näher definiert. Eine energieoptimierte Konstruktionsweise zielt dabei auf einen möglichst hohen Energieertrag ab. Die pflanzenoptimierte Variante sorgt für eine sehr gute PAR, um damit einen maximalen Pflanzenertrag zu erzielen. Die kombinierte Optimierung sorgt für einen möglichst hohen Pflanzenertrag bei einem akzeptablen Stromertrag.

Im weitesten Sinne operiert eine APV-Anlage zusammen mit den landwirtschaftlichen Kulturen in einer Art Symbiose. Wie in Kapitel 2.3.2 beschrieben, werden die Module durch die Transpiration gekühlt und erzielen damit einen höheren Wirkungsgrad, wobei im Gegenzug die Pflanzen vor Hitzestress geschützt werden (Waghmare, et al. 2021).

Die Vorteile, Optimierungsmaßnahmen, Auswirkungen und Herausforderungen der APV werden in zahlreichen Projekten erforscht. Um diese Informationen zu verbreiten und der Bevölkerung zugänglich zu machen, bietet es sich an sie möglichst benutzerfreundlich auf Medien zu teilen, die öffentlich nutzbar sind. Hier wurde beispielsweise in den USA eine Website³ erstellt, auf der Informationen, Videos und Podcasts zum Thema APV veröffentlicht werden (Peterson 2022). Es wird technische Hilfe für alle Interessierten angeboten, sowie die Vernetzung untereinander gefördert und es werden Fördermöglichkeiten vorgestellt (ebd.). In Deutschland wurde, wie bereits erwähnt, ein Leitfaden für APV erstellt (Fraunhofer ISE 2022). In Belgien wurde ein Webtool von der KU Leuven entwickelt, um eine erste Idee beziehungsweise Basisgrundlagen eines potentiellen APV-Projektes zu erarbeiten (KU Leuven 2022).

³ <https://www.agrisolarclearinghouse.org>

Tabelle 4: Möglichkeiten zu unterschiedlichen Auslegungsmöglichkeiten von APV-Anlagen [modifiziert, übersetzt nach Abidin et al. (2021)].

	Energieoptimiert	Pflanzenoptimiert	Kombinierte Optimierung (Energie + Pflanze)
Weideland, ungenutzte Flächen, Steppen, Wüstenland	Intakte einheimische Vegetation belassen (und ggf. ergänzen)		
	Kurze, schattentolerante Pflanzenkulturen pflanzen	Anpflanzung einer Mischung aus sonnenliebenden und schattentoleranten Pflanzen	Anpflanzung kurzer, schattentoleranter Pflanzen
		Beweidung fortsetzen/einführen	
	Dichte PV-Belegung	Hohe Aufständering der APV-Konstruktion	
Landwirtschaft (Kurzskulturen)	Kurze, schattentolerante Pflanzen unter und um die PV-Anlage herum pflanzen	Pflanzung einer Mischung aus sonnenliebenden und schattentoleranten Pflanzen	
	Dichte PV-Belegung	Leichte / Hohe Aufständering der APV-Konstruktion	
		Wenn Kultur ungeeignet evtl. externe PV-FFA	
Landwirtschaft (Hochskulturen)	Begrenzte Optionen, hohe Aufständering, nur für schattentolerante Pflanzen geeignet	Pflanzenmischung aus sonnenliebenden und schattentoleranten Pflanzen	Anbringung von PV-Solaranlagen auf nicht genutzten Teilen der landwirtschaftlichen Flächen
	Dichte PV-Belegung	Hohe Aufständering der APV-Konstruktion	
		Wenn Kultur ungeeignet evtl. externe PV-FFA	

Die Vorteile innerhalb des APV-Systems, für die Beteiligten und die Umwelt, lassen sich durch die Nachhaltigkeitsziele beziehungsweise engl. „Sustainable Development Goals“ (SDG)⁴ zusammenfassen (Presse- und Informationsamt der Bundesregierung 2022). Bis auf die Ziele SDG 4 „Hochwertige Bildung“ und SDG 5 „Geschlechtergleichheit“, werden alle restlichen 15 Ziele erfüllt. Die stärksten Beiträge können zu den SDG 9, 11, 13 und 15 geleistet werden können. Im SDG 9 „Industrie, Innovation und Infrastruktur“ können APV-Systeme dazu beitragen, dass ländliche Gebiete durchgängig Zugang zu erneuerbarer Energie haben, was für den künftigen Energie- und Nahrungsmittelbedarf wichtig ist. APV-Systeme können in der Nähe von Gemeinden und Städten installiert werden, die Energie- und Nahrungsquellen benötigen und so SDG 11 „Nachhaltige Städte und Gemeinden“ erreichen. Im Hinblick auf SDG 13 „Maßnahmen zum Klimaschutz“ werden APV-Systeme Energie erzeugen, um fossile Brennstoffquellen auszugleichen, aber auch eine Quelle für die Bindung von Kohlenstoff und Methan

⁴ <https://sdgs.un.org/goals>

durch den Aufbau von Vegetation darstellen. SDG 15 „Leben an Land“ wird erreicht, indem APV-Systeme natürliche Lebensräume aufwerten, um Pflanzen-, Tier- und Insektenpopulationen Zuflucht zu bieten. Diese wenigen Beispiele verdeutlichen die Relevanz und die Auswirkungen, die APV-Systeme auf die SDG-Ziele haben können, sowie den Bedarf an weiterer Forschung, um diese Systeme zu einer etablierten Konstruktionsmethode für die Solarindustrie zu machen (Walston, et al. 2022). Als Hauptziele wurden die Produktion von erneuerbarer Energie, die Reduktion von Treibhausgasen, sowie der Naturschutz identifiziert (Sirnik, et al. 2022).

In den letzten fünf Jahren hat die APV-Industrie ein exponentielles Wachstum erlebt. Ein einst neuartiges Konzept hat sich als machbar erwiesen und neue Forschungsarbeiten haben sich auf die Optimierung des gekoppelten Systems verlagert (Reasoner und Ghosh 2022).

Tabelle 5: Literaturrecherche APV – „Allgemeiner Überblick und Reviews“ (eigene Darstellung, WP = wissenschaftliches Paper mit Peer-Review, W = wissenschaftliches Paper ohne Peer-Review; EP = empirische Primärdaten, SP = Sekundärdaten und Metastudien).

	Autor(en)	Journal / Bericht	Titel	Jahr	Validität	Datentyp	DOI / URL	Anlagentyp	Thema	Keywords
1	C. Dupraz; G. Talbot; H. Marrou; J. Wery; S. Roux; F. Liagre; Y. Ferard; A. Nogier	INRA	To Mix Or Not To Mix - Evidences for the Unexpected High Productivity of New Complex Agrivoltaic and Agroforestry Systems	2011	WP	EP	https://www.researchgate.net/publication/230675951_To_mix_or_not_to_mix_evidences_for_the_unexpected_high_productivity_of_new_complex_agrivoltaic_and_agroforestry_systems	APV	grundlegender Überblick	frühzeitige Betrachtung Überblick APV (von 2011!)
2	A. Weselek; A. Ehmann; S. Zikeli; I. Lewandowski; S. Schindele; P. Högy	Agronomy for Sustainable Development	Agrophotovoltaic Systems - Applications, Challenges, and Opportunities -A Review	2019	WP	SP	https://doi.org/10.1007/s13593-019-0581-3	APV	Review	Überblick, Wasserverfügbarkeit, Lichtverteilung, Projekte Weltweit, Stand der Technik
3	P. Jain; G. Raina; S. Sinha; P. Malik; S. Mathur	Elsevier - Bioresource Technology Report	Agrovoltaics - Step towards Sustainable Energy-Food Combination	2021	WP	EP	https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100766	APV	Review	Fokus Kombi Energie-, Pflanzenproduktion, Grafik Bewässerung
4	I. Khele; M. Szabó	Hungarian Agricultural Engineering	Microclimatic and Energetic Feasibility of Agrivoltaic Systems - State of the Art	2021	WP	SP	DOI: 10.17676/HAE.2021.40.102	APV	Review	Status Quo, Entwicklungspotential
5	J. Scharf; M. Grieb; M. Fritz	TFZ, Straubing	Agri-Photovoltaik Stand und Offene Fragen	2021	WP	EP	https://www.tfz.bayern.de/mam/cms08/rohstoffpflanzen/dateien/tfz_bericht_73_agripv.pdf	APV	Review	Überblick allgemein, Bayern
6	M. Abidin; M. Mahyudin; M. Zainuri	Sustainability - MDPI	Solar Photovoltaic Architecture and Agronomic Management in Agrivoltaic System - A Review	2021	WP	SP	https://doi.org/10.3390/su13147846	APV	Review, Anlagentechnik	Anlagendesign, Mikroklima, Bewässerung

	Autor(en)	Journal / Bericht	Titel	Jahr	Validität	Datentyp	DOI / URL	Anlagentyp	Thema	Keywords
8	R. Waghmare; R. Jilte; S. Joshi; P. Tete	Sustainable Research for Energy and Environment	Review on Agrophotovoltaic Systems with a Premise on Thermal Management of Photovoltaic Modules Therein	2021	WP	EP	https://doi.org/10.1007/s11356-022-23202-6	APV	Review; Wärmemanagement, Ökonomie, Tomaten	Review APV-Systeme, PV-Temperaturen, Indien, Vgl. APV - FFA Tomaten
9	S. Peterson	AgriVoltaics 2022	The AgriSolar Clearinghouse – An Information-Sharing and Networking Hub for All things Agri-voltaic	2022	W	EP	https://cms2022.agrivoltaics-conference.org/file/display_attachment/37da1a2f7f621ccc7cd8e0bb5518dbf?filename=Stacie+Peterson+-+Abstract.pdf	APV	digitale Informationsplattform	Entwicklung Website USA
10	L. Walston; T. Barley; I. Bhandari; B. Campbell; J. McCall; H. Hartmann; A. Dolezal	Frontiers - Sustainable Food and Energy	Opportunities for Agrivoltaic Systems to Achieve Synergistic Food-Energy-Environmental Needs and Address Sustainability Goals	2022	WP	SP	https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.932018	APV	Review	Allgemein, Herausforderungen, Wissenslücken aufzeigen
11	I. Sirnik; J. Sluijsmans; D. Ouders; S. Stremke	AgriVoltaics 2022	Agrivoltaics Solutions in the Context of Circular Agriculture and Landscape Experience. A Systematic Review	2022	W	EP	https://cms2022.agrivoltaics-conference.org/file/display_attachment/25a277ccdf01bccd0a6f2f426bab66b?filename=Igor+Sirnik+-+Abstract.pdf	APV	Review	Leistungsindikatoren, Sichtbarkeit, Akzeptanz
12	M. Mamun; P. Dargusch; D. Wadley; N. Zulkarnain; A. Aziz	Elsevier - Renewable and Sustainable Energy Reviews	A Review of Research on Agrivoltaic Systems	2022	WP	SP	https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112351	APV	Review	Literaturrecherche, Überblick APV aktuelle Forschungsergebnisse
13	P. Campana; S. Gorjian; M. Trommsdorff; I. Dhal; O. O' zdemir; D. Ketzer; N. Weinberger; C. Rösch	Elsevier	Solar Energy Advancements in Agriculture and Food Production Systems - Agrivoltaics: Solar Power Generation and Food Production	2022	WP	EP	ISBN: 978-0-323-89866-9	APV	Review	Review

	Autor(en)	Journal / Bericht	Titel	Jahr	Validität	Datentyp	DOI / URL	Anlagentyp	Thema	Keywords
14	D. Munoz; S. Guillerez; H. Colin; J. Aimé	AgriVoltaics 2022	Agrivoltaics: a Review of PV Technologies and Modeling Methods	2022	W	EP	https://cms2022.agrivoltaics-conference.org/file/display_attachment/ca21cecd82544996974a4ba920edcf2?filename=Delfina+Mu%C3%B1oz+-+Abstract.pdf	APV	Review	Überblick Module, Technologie
15	M. Reasoner; A. Ghosh	Challenges - MDPI	Agrivoltaic Engineering and Layout Optimization Approaches in the Transition to Renewable Energy Technologies: A Review	2022	WP	SP	https://doi.org/10.3390/challe13020043	APV	Review, Systemtechnik, Verschattung	Optimierung System, Verschattung, Überblick
16	Fraunhofer ISE	Fraunhofer ISE	Agri-Photovoltaik: Chancen für Landwirtschaft und Energiewende	2022	WP	SP	https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/APV-Leitfaden.pdf	APV	Leitfaden	Review, Wirtschaftlichkeit, Gesellschaft, Politik

3.2 Design, Gestaltung und Anlagenkonstruktion

Durch die teilweise hohe Aufständigung von APV-Anlagen wird das unbekannte Landschaftsbild verändert. Dennoch kann durch einfache Maßnahmen dafür gesorgt werden, dass sich die APV-Anlage optimal in die Landschaft integriert, beispielsweise durch die Anpassung der Linienstruktur an die vorhandenen Strukturelemente und die Anordnung in Mosaikform (siehe auch Kapitel 4.6.1). Es gibt verschiedene Studien zu Integrationsmaßnahmen, auch für PV-FFA (Scognamiglio 2015). Die APV-Systeme als dreidimensionale Landschaftsmuster zu entwickeln, soll sie aus einer neuen, integrativen Design-Vision heraus charakterisieren. Das neue Design ermöglicht es, die enge Verbindung zwischen Energie und Raum zu verstehen und Raum für andere neue, landschaftsbezogene Designs zu schaffen. Eine Reihe von Parametern, die nach Kategorien klassifiziert sind, um ein APV-System als Teil der Landschaft zu definieren (Muster, Flecken, Poren), einschließlich verschiedener disziplinärer Inhalte (Photovoltaik-Technologie, Agronomie, Ingenieurwesen), werden hierfür formalisiert, um die Gestaltung von APV-Systemen im Hinblick auf die gewünschten Qualitätsziele anzuleiten und zu bewerten (Toledo und Scognamiglio 2021). Das gewählte Design beeinflusst auch den Schattenwurf der Anlage. Der Schattenwurf wiederum hat erhebliche Auswirkungen auf die pflanzlichen Kulturen. Je nach Konstruktion des APV-Systems kann ein Kernschatten entstehen, beziehungsweise können einige Pflanzen länger vom Licht erreicht werden als andere. Die unterschiedlichen Reifegrade derselben Kultur auf einer Fläche erschweren damit die Wahl des Erntetermins, da einige Früchte noch nicht reif sind, während andere überreif sind. Dies wird in verschiedenen Studien erforscht und gilt es bei der Entwicklung der APV-Anlage zu beachten (Faizi, et al. 2022, Fraunhofer ISE 2022). Die betrachteten Publikationen sind in Tabelle 6 aufgeführt.

Tabelle 6: Literaturrecherche APV - Bereich "Design" (eigene Darstellung, WP = wissenschaftliches Paper mit Peer-Review, W = wissenschaftliches Paper ohne Peer-Review; EP = empirische Primärdaten, SP = Sekundärdaten und Metastudien).

	Autor(en)	Journal / Bericht	Titel	Jahr	Validität	Datentyp	DOI / URL	Anlagen-typ	Thema	Keywords
17	A. Scognamiglio	Elsevier - Agricultural and Forest Meteorology	Photovoltaic Landscapes - Design and Assessment - A Critical Review for a New Transdisciplinary Design Vision	2015	WP	EP	http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.072	FFA	Ästhetik, Design	Integration FFA in Landschaftsbild
18	C. Toledo; A. Scognamiglio	Sustainability - MDPI	Agrivoltaic Systems Design and Assessment - A Critical Review, and a Descriptive Model towards a Sustainable Landscape Vision (Three-Dimensional Agrivoltaic Patterns)	2021	WP	EP	https://doi.org/10.3390/su13126871	APV	Design APV	Technologische, ästhetische Gestaltungsmöglichkeiten
20	M. Faizi; A. Verma; V. Jain	Renewable Energy and Storage Devices for Sustainable Development	Design and Optimization of an Agrivoltaics System	2022	WP	EP	DOI: 10.1007/978-981-16-9280-2_5	APV	Design, Schattenversuche	Optimierung Schattenwurf hochaufgeständerte APV

3.3 Entwicklung und Potential

Die (historische) Entwicklung der APV wurde bereits unter 2.2 beschrieben. Dass es sich bei der APV allerdings um ein aktuell marktreifes Produkt handelt und es aber auch noch großes Forschungspotential zu spezifischen Thematiken der APV gibt, ist an der Vielzahl an Literaturen erkennbar, die zum Thema Entwicklung der APV vorhanden sind und stetig hinzukommen (Tabelle 7).

Das Fraunhofer ISE gibt für Deutschland ein Potential von 1700 GWp Strom aus APV-Anlagen an (Fraunhofer ISE 2022). Die Universität Hohenheim hat ermittelt, dass circa 10% der kosteneffizientesten landwirtschaftlichen Betriebe 8,8% des Strombedarfs in Deutschland decken könnte, bei der Nutzung von etwa 1% der Ackerfläche Deutschlands (Feuerbacher, et al. 2022). Das Potential in Europa wird anhand der licht- beziehungsweise schattenliebenden Pflanzenkulturen in (Willcockx et al. 2022) abgeschätzt. Würde die Fläche für den Kartoffelanbau in Europa (circa 1% der landwirtschaftlichen Fläche) mit APV ergänzt werden, so würde die PV-Leistung auf das derzeit 10-fache ansteigen (1290 GWp) (Willcockx et al. 2022).

Für die weitere Entwicklung und den damit verbundenen Ausbau der APV ist es notwendig die Akzeptanz zu steigern, sodass es nicht zu Gegenreaktionen aus der Bevölkerung kommt (Torma und Aschemann-Witzel 2022). Hierfür ist eine frühzeitige Einbeziehung der Bevölkerung bei der Planung von APV-Projekten sinnvoll, bei der kritische Faktoren betrachtet werden sollten (beispielsweise Landschaftsbild, Beteiligung, und weitere). Die Entwicklung konkreter Kommunikationskonzepte ist hilfreich. Insgesamt besteht ein Bedarf an beteiligten Stakeholdern. Für eine möglichst hohe Akzeptanz sollten bei der weiteren Forschung neben der Wirtschaftlichkeit die rechtliche Erleichterung des Bauvorhabens im Fokus stehen (Gölz und Larisch 2022). Durchgeführte Befragungen zum Thema Akzeptanz zur APV haben ergeben, dass die Interessenvertreter*innen einen vielversprechenden, relativen Vorteil von APV im Vergleich zu anderen Technologien sehen. Dieser Vorteil sei jedoch aufgrund fehlender Beweise, mangelnder Erfahrung und hoher Komplexität beim Verständnis, Betrieb und der Finanzierung einer solchen Technologie gefährdet (ebd.).

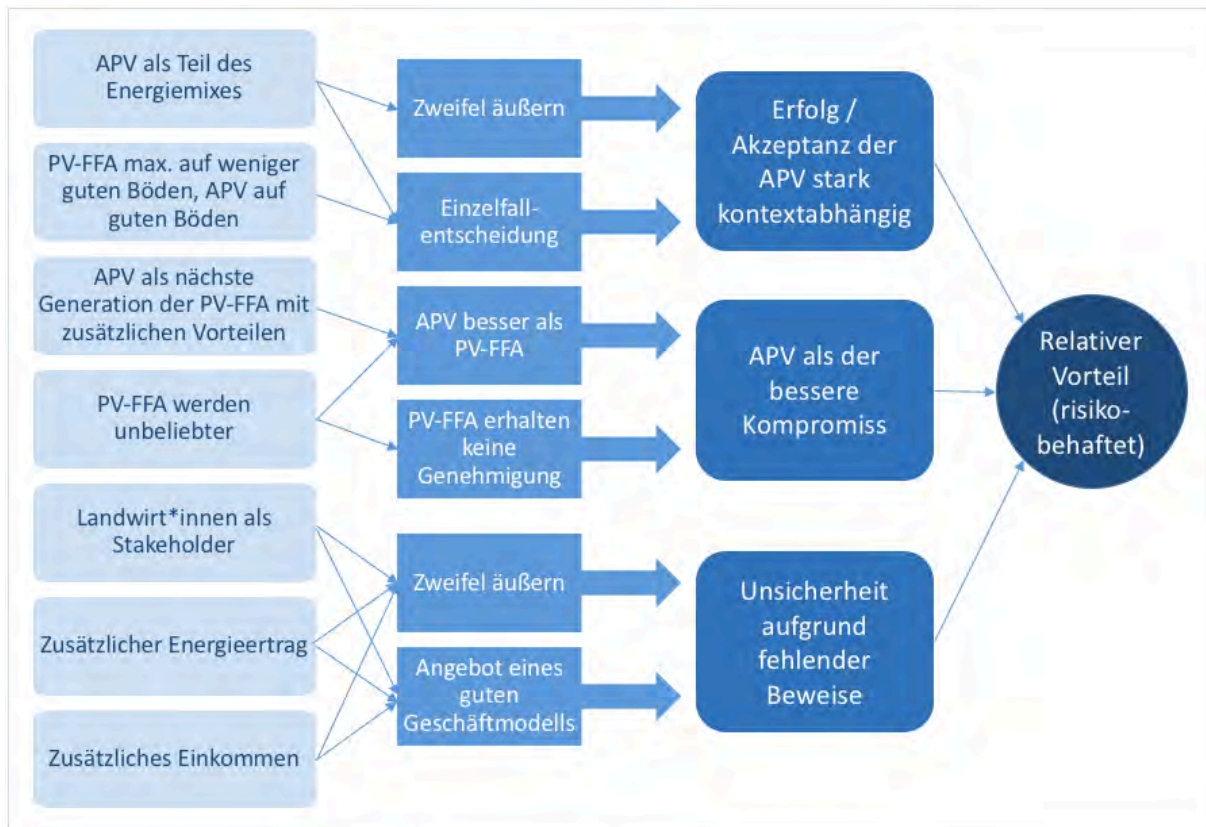


Abbildung 18: Thematische Analyse zur Akzeptanzbefragung (Torma und Aschemann-Witzel 2022).

Es wurden bereits Studien zu Geschmack und der Akzeptanz von unter APV angebaute Pflanzenkulturen durchgeführt. Vorläufige Analysen ergaben, dass die Panelteilnehmer bereit waren, für ihre bevorzugten Proben den gleichen oder einen etwas höheren Preis zu zahlen, unabhängig davon, ob sie in der Lage waren, zwischen den Proben zu unterscheiden. Im APV-System angebaute Produkte können die Geschmackswahrnehmung oder die Geschmackspräferenz beeinflussen. Weitere Ergebnisse zu diesem Forschungsgebiet werden entscheidend dafür sein, wie die Verbraucher über AVP und AVP-Produkte aufgeklärt werden können (Rogers, et al. 2022).

Die oben beschriebene Problematik der fehlenden offiziellen Definition und Unterscheidung von APV (vgl. Kapitel 2.1) wird ebenfalls in diversen Studien untersucht und mögliche Definitionen erarbeitet und vorgeschlagen (Schindele 2021, Pellegrino 2022, Toledo, et al. 2022). Neben der Definition der APV selbst, gilt es auch die Begriffe innerhalb des APV-Systems zu definieren, wie beispielsweise Landnutzung, Landwirtschaftsfläche, und weitere. Dafür wird aktuell ein Terminologieverzeichnis erarbeitet (Toledo, et al. 2022). Die Definition der APV macht eine genaue Einordnung in das vielseitige Gebiet der Photovoltaik möglich. Allerdings verhilft die Klassifizierung der APV wiederum bei der Bildung einer Definition. Aktuell ist die Eingliederung der APV in die integrierte PV möglich. Wobei auch innerhalb der APV eine Klassifizierung stattfinden sollte. Diese wird von verschiedenen Autoren/-teams unterteilt in die

offene und geschlossene APV (Gewächshäuser), wobei nach Nutzungsart unterschieden wird (Gartenbau, Tierhaltung, Ackerkulturen), sowie nach Aufständigung (Bewirtschaftung zwischen oder unter den Modulen) und dynamischen oder statischen Systemen (Nachführung) (Trommsdorff, et al. 2022, Willockx, et al. 2020).

Die Entwicklung von APV-Anlagen steht derzeit im Mittelpunkt der öffentlichen Debatte über Fragen des Landschaftsschutzes und des Interesses privater Investoren. Erste vorläufige Ergebnisse deuten darauf hin, dass ein tiefes Eintauchen in die Landschaft und lokales Wissen die erste unvermeidliche Voraussetzung für die Planung und Gestaltung von APV-Systemen sind. Diese wiederum könnten den finanziellen Hebel zur Unterstützung von Kulturlandschaften und zur Wiederherstellung der traditionellen landwirtschaftlichen Produktion darstellen und in Zukunft selbst als Kulturlandschaft des 21. Jahrhunderts betrachtet werden (Picchi und Scognamiglio 2022).

Dass die APV international immer mehr an Bedeutung gewinnt, wurde bereits in Kapitel 2.5 beschrieben. Die Entwicklung ist jedoch unterschiedlich weit fortgeschritten. Während in Deutschland nur wenige kommerzielle APV-Anlagen und mehr Forschungsanlagen gebaut wurden, bestehen beispielsweise in Japan viele kommerzielle Anlagen. Dennoch bestehen in allen Ländern noch Herausforderungen, die den Ausbau der APV derzeit noch hemmen. Die häufigsten Hemmnisse sind (1) rechtliche Rahmenbedingungen, (2) Agrarwissenschaft, (3) Ökonomie, (4) kulturell / wertbezogen, (5) technologisch und (6) industriell beziehungsweise infrastrukturell. Die unterschiedliche Gewichtung in den jeweiligen Ländern ist in Abbildung 19 grafisch aufbereitet (Vorast 2022).

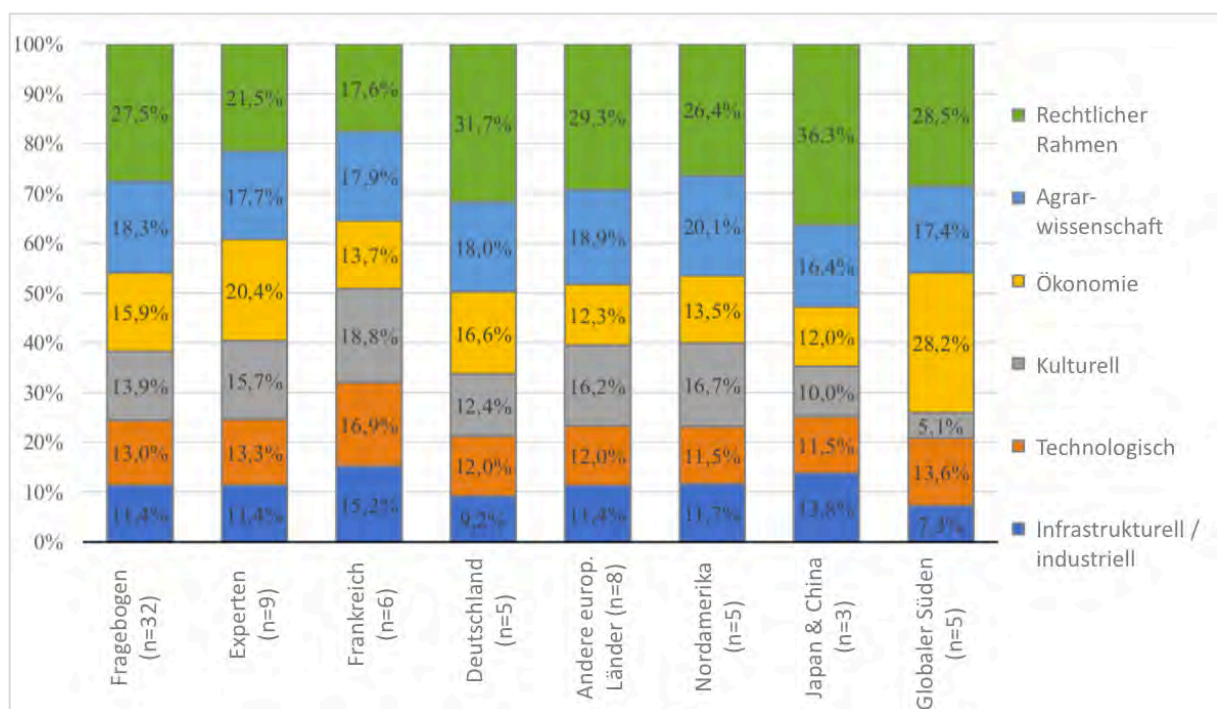


Abbildung 19: Gewichtung von Herausforderungen der APV in den verschiedenen Ländern [modifiziert nach Vorast (2022)].

Neben den Forschungsfragen der Entwicklung des Ausbaus von APV-Systemen, darf die Frage des Recyclings und Rückbaus der Anlagen nicht außer Acht gelassen werden. Es wird momentan von einer Lebenszeit von mindestens 20, eher 30 Jahren bis hin zu 40 Jahren der APV-Systeme ausgegangen. In einer Lebenszyklusanalyse von APV-Anlagen wurden 3 Szenarien untersucht (1: APV, 2: PV-FFA und Kartoffelanbau getrennt, 3: Kartoffelanbau ohne PV). Die Ergebnisse zeigen, dass APV-Anlagen ähnliche Auswirkungen auf Umwelt, Gesundheit und Ressourcennutzung haben wie PV-FFA und deutlich bessere Leistungen erzielen als der deutsche Strommix. In der Hälfte der untersuchten Wirkungskategorien wurden die Umweltauswirkungen durch die Kartoffelproduktion, in der anderen Hälfte durch die Stromproduktion verursacht. Aufgrund der aktuellen Entwicklungen in der Systemauslegung und Solarmoduleentwicklung ist zu erwarten, dass sich die Lebenszyklusbilanz von APV-Anlagen in Zukunft weiter verbessern wird (Busch und Wydra 2022).

Tabelle 7: Literaturrecherche APV - Bereich "Entwicklung und Potential" (eigene Darstellung, WP = wissenschaftliches Paper mit Peer-Review, W = wissenschaftliches Paper ohne Peer-Review; EP = empirische Primärdaten, SP = Sekundärdaten und Metastudien).

	Autor(en)	Journal / Bericht	Titel	Jahr	Validität	Datentyp	DOI / URL	Anlagentyp	Thema	Keywords
20	S. Gözl; F. Larisch	AgriVoltaics 2022	Acceptance of AgriVoltaics – a Multi-stakeholder Survey for a German Agri-Voltaic System in Fruit Farming	2022	W	EP	https://cms2022.agrivoltaics-conference.org/file/display_attachment/010acba6b1072981b4a51b860dfc490?filename=Sebastian+G%C3%B6lz+-+Abstract.pdf	APV	Akzeptanz	Gelsdorf+B22:M25
21	G. Torma; J. Aschemann-Witzel	AgriVoltaics 2022	Perception on Dual Land Use Approaches: Drivers and Barriers to AV Adoption	2022	W	EP	https://cms2022.agrivoltaics-conference.org/file/display_attachment/22f5357f8aacda8526aadd83e53208b?filename=Gabriele+Torma+-+Abstract.pdf	APV	Akzeptanz	Dimensionen, kritisch
22	H. Wirth; C. Kost; K. Kramer; H. Neuhaus; D. Pepper; J. Rentsch; C. Senkpiel	Greenpeace	Solaroffensive für Deutschland	2021	WP	EP	https://www.greenpeace.de/publikationen/20210806-greenpeace-kurzstudie-solaroffensive.pdf	PV	Ausbau PV Deutschland	Status Quo, Entwicklungspotential Deutschland
23	M. Rogers; K. Lepley; G. Barron-Gafford	AgriVoltaics 2022	Consumer Preferences of Produce Grown in Traditional and AgriVoltaic Systems Based on Flavor, Texture, Color	2022	W	EP	https://cms2022.agrivoltaics-conference.org/file/display_attachment/ea2f2918546982bbb1dacfd5e3f01bb?filename=Mariah+Rogers+-+Abstract.pdf	APV	Crop-Akzeptanz	sinnliche Unterscheidung Referenz-APV
24	S. Schindele	GAIA	Feldfrüchte und Strom von Agrarflächen - Was ist Agri-Photovoltaik und was kann sie leisten?	2021	WP	EP	https://doi.org/10.14512/gaia.30.2.6	APV	Definition APV	Definitionsansatz, politische Hinweise
25	M. Pellegrino	AgriVoltaics 2022	Looking for a Common Definition of AgriVoltaics	2022	W	EP	https://cms2022.agrivoltaics-conference.org/file/display_attachment/80c931d16431d28d7c23a930a013af3?filename=Michele+Pellegrino+-+Abstract.pdf	APV	Definition APV	Definitionsansatz
26	C. Toledo; A. Scognamiglio; N. Colonna; P. Picchi; S. Stremke	AgriVoltaics 2022	Fostering Implementation of Sustainable Agrivoltaics Systems: Revised Terminology and Definitions	2022	W	EP	https://cms2022.agrivoltaics-conference.org/file/display_attachment/e7daf5681d098cf5cedc9f0efa81d7e?filename=Alessandra+Scognamiglio+-+Abstract.pdf	APV	Definition, Terminologie	Landschaft, Landwirtschaft, Energie, LAOR
27	P. Picchi; A. Scognamiglio	AgriVoltaics 2022	Agrivoltaics as Cultural Landscapes of the 21st Century	2022	W	EP	https://cms2022.agrivoltaics-conference.org/file/display_attachment/3eebb313fc08e4a3f17b785a8557b0e?filename=Paolo+Picchi+-+Abstract.pdf	APV	Design	Landschaftsästhetik, Eingliederung

	Autor(en)	Journal / Bericht	Titel	Jahr	Validität	Datentyp	DOI / URL	Anlagentyp	Thema	Keywords
28	B. Willockx; C. Lavaert; J. Cappelle	Elsevier - Energy Reports	Geospatial Assessment of Elevated Agrivoltaics on Arable Land in Europe to Highlight the Implications on Design, Land Use and Economic Level	2022	WP	EP	DOI: 10.1016/j.egy.2022.06.076	APV	Design, Potential, Standort! EU	Simulation Schat-tenwurf, Potent-ial EU
29	S. Schindele	GAIA	Nachhaltige Landnutzung mit Agri-Photovoltaik - Photovoltaikausbau im Einklang mit der Lebensmittelproduk-tion	2021	WP	EP	https://doi.org/10.14512/gaia.30.2.7	APV	Flächen-bedarf APV / FFA	Landmanage-ment, Klimaziele Deutschland
31	M. Vorast	MA, Uni Leipzig	Challenges for Agrivoltaics in the In-ternational Context – An Analytical Hi-erarchy Process Survey	2022	WP	SP	https://unipub.uni-graz.at/obvugrhs/con-tent/titleinfo/7648450	APV	Heraus-forderun-gen	Barrieren Län-dervergleich
32	B. Willockx; B. Uytterhaegen; B. Ronsijn; B. Herte-leer; J. Cappelle	KU Leu-ven	A Standardized Classification and Per-formance Indicators of Agrivoltaic Sys-tems	2020	WP	EP	DOI: 10.4229/EUPVSEC20202020-6CV.2.47	APV	Klassifi-zierung	Klassifizierung APV
33	M. Trommsdorff; L.-M. Bieber; K. Amelung; J. Rie-delsheimer	AgriVolta-ics 2022	Classification Scheme for Agrivoltaics	2022	W	EP	https://cms2022.agrivoltaics-con-ference.org/file/display_attach-ment/548397435abd1a6a27b6bbbf5b427af?file_name=Max+Trommsdorff+-+Abstract.pdf	APV	Klassifi-zierung	Kritische Einord-nung
34	C. Busch; K. Wydra	AgriVolta-ics 2022	Life Cycle Assessment of an Exemplary Agrivoltaic System in Thuringia (Ger-many)	2022	WP	EP	https://cms2022.agrivoltaics-con-ference.org/file/display_attach-ment/7837596dfce74ca65914fb625da2718?file_name=Kerstin+Wydra+-+Paper.pdf	APV	LCA	LCA
35	Stiftung Klimaneutralität	Stiftung Kli-maneneutralität	Photovoltaik (PV) – Potentiale - Litera-turrecherche	2021	WP	SP	https://www.stiftung-klima.de/app/uplo-ads/2021/02/2021-02-18-PV-Potentiale-Litera-turrecherche.pdf	PV al-les	Potentiale	Ausbau alle PV-Systeme, Litera-turrecherche
36	J. Vollprecht; M. Tromms-dorff; C. Hermann	AIP Con-ference Procee-dings	Legal Framework of Agrivoltaics in Germany	2021	WP	EP	DOI: 10.1063/5.0055133	APV	Recht	Einordnung Ener-gie, Landwirt-schaft, Bau und Umwelt

3.4 Pflanzenbau, Biodiversität und Ertragssteigerung

Ein weiterer wichtiger Forschungspunkt im Bereich der APV ist die Ertragssteigerung auf Seiten der Landwirtschaft. Eine Vielzahl an Publikationen gibt Auskunft über Ergebnisse zur Ertragssteigerung verschiedener Pflanzenkulturen unter APV im Vergleich zu einem Referenzfeld ohne PV (Tabelle 8). Hierbei muss erwähnt werden, dass es sich bei den Forschungsprojekten bisher oft um eine relativ kurze Projektzeit handelt. In den Publikationen wird immer der Hinweis gegeben, dass nur langjährige Messungen erwiesene Ergebnisse bieten können. Sowohl die jahreszeitlichen Schwankungen, die klimabedingten Jahresunterschiede als auch der Standort spielen eine ausschlaggebende Rolle auf die Ergebnisse der Messungen. So wurden beispielsweise im Hitzesommer 2018 weitgehend positive Auswirkungen der APV-Anlagen mit bis zu +11,8 % Ertragssteigerungen festgestellt, während in regenreicheren, weniger warmen Sommern eher negative Auswirkungen mit bis zu -32,8 % Ertragsverlusten gemessen werden konnten (Weselek 2022, Fraunhofer ISE 2022). Dies gilt es bei der Betrachtung der Forschungsergebnisse der verschiedenen Publikationen zu beachten.

Ein APV-Projekt in Frankreich untersuchte umfassend das Wachstum von Äpfeln unter den PV-Modulen (Tabelle 8). Insbesondere zeigten sich Verbesserungen nach Frost, sowie im Wassermanagement. Die Auswirkungen von APV werden derzeit auch in einer Forschungsanlage in Deutschland, Gelsdorf (Rheinland-Pfalz) untersucht. Hier sollen die Forschungsergebnisse im Herbst 2023 veröffentlicht werden (Fraunhofer ISE 2022).

Tabelle 8: Parametermessung im APV-Apfelanbau (Juillion, et al. 2022).

Pflanzenkultur:	Apfel
Projektfläche:	0,0735 ha
Projektstandort:	La Pugere (FR)
PV Anlage dynamisch / statisch:	dynamisch
Verschattungsgrad:	4-88% (50-55% Durchschnitt)
Verbesserung Wassermanagement:	6-31%
Lufttemperatur:	-3,80%
Luftfeuchtigkeit:	+14%
Stärkeanteil in den Trieben:	-7%
Blütenintensität:	-31%
Bäume mit hoher Blütenfülle:	-45%
Frostschutz:	sehr hoch
Fruchttragende Bäume trotz Frost:	31%
Früchte pro Baum trotz Frost:	44%
Fruchtgröße:	0%
Trockensubstanzgehalt:	-24%
Ertrag:	<40t/ha

Ähnliche Forschungsversuche wurden auch für andere Pflanzenkulturen durchgeführt, wobei der Vergleich des Pflanzenwachstums in Spanien zwischen den Modulreihen, unter den Modulen und einer Kontrollzone ohne PV-Anlage erfolgte (Hernández, et al. 2022). In der hochaufgeständerten Anlage mit 2 m Höhe wurde für Kapern zwar ein Anstieg der Photosynthese gemessen, allerdings reduzierte sich die Biomasseproduktion und das Fehlen von Blütenknospen wurde festgestellt. Bei Paprika wurden keine signifikanten Unterschiede in der Photosynthese zwischen den Pflanzen in der Kontrollzone und der Zone zwischen den Modulreihen festgestellt. Der Anbau zwischen den Modulreihen führte zu einer höheren Biomasse und einem höheren Fruchtertrag. Die Biomasse der *Aloe vera* wies zwischen den Modulreihen einen höheren Wert auf als in der Kontrollzone. Bei der Biomasseproduktion von Thymian wurden jedoch in beiden Zonen keine signifikanten Unterschiede festgestellt. Der Anbau unter den Modulen verringerte das Wachstum und den Ertrag der Kapern, den Ertrag der Paprika und das Wachstum der *Aloe vera* drastisch. Es wurde zusammengefasst, dass in semiariden Gebieten die intermittierende Verschattung und das Mikroklima unter den APV-Modulen den *Aloe vera*- und Paprika-Kulturen zugute kommen, den Thymiananbau ermöglichen, die Kapernerträge aber drastisch reduzieren kann. Die Versuche werden aktuell (2022) in den nächsten Anbauzyklen fortgesetzt, um diese vorläufigen Ergebnisse zu bestätigen (Hernández, et al. 2022). Eine ähnliche Studie wird derzeit auch in Indien durchgeführt, mit einer hochaufgeständerten APV-Anlage aus Stahl und einer Höhe von 3,5 m (Chauhan und Dulawat 2022). Der Ersatz von (Hagel-)Schutznetzen durch APV-Anlagen führte in der Niederlande zu dem Ergebnis, dass der Ertrag der betrachteten Himbeeren und Erdbeeren nicht wesentlich beeinflusst wurde (ca. 5%) (Helsen, et al. 2022). Lediglich bei den Erdbeeren wurde aufgrund fehlender Sonneneinstrahlung eine geringere Süße der Früchte festgestellt (ebd.). Derartige Qualitätsveränderungen wurden auch bei Brokkoli unter einer APV-Anlage mit einer Höhe von 3,3 m und Reihenabständen von 4,5 m beobachtet (Chae, et al. 2022). Es stellte sich heraus, dass der unter APV gewachsene grünere Brokkoli mit einer kräftigeren Färbung von den Verbrauchern mehr geschätzt wurde (ebd.). Bei der Pflanzung von Salat und Gurken konnten kaum Unterschiede festgestellt werden. Lediglich in der Jugendphase (drei Wochen nach der Pflanzung) konnten geringere Blattbildungsraten gemessen werden (Marrou, et al. 2013). Die Beobachtungen bei Akelei, Bienenweide, Bartfaden, Schafgarbe, Sonnenhut und Blausternchen auf einem Dach-APV-System zeigte, dass das Pflanzenwachstum positiv beeinflusst wurde. Neben Luft- und Bodentemperatur wurden auch die Pflanzenhöhe und -breite dokumentiert. Trotz des stärkeren Wachstums aller Arten in der Schattenparzelle gab es am Ende der Saison bei keiner der Arten statistisch signifikante Unterschiede im Wachstum zwischen Sonne und Schatten bei einem Konfidenzintervall von 95%. Die Trends zeigten jedoch bei allen Arten eine größere

Pflanzenbreite, während die Pflanzenhöhe im Schatten geringer war. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass die betrachteten Arten keine volle Sonne benötigen und stattdessen im Schatten von APV-Systemen gedeihen können (Hickey und Bousset 2022). Untersuchungen zum Pflanzenwachstum und zu Einflüssen auf Mikroklima und Boden werden aktuell auch mit Zierpflanzen durchgeführt, wobei erste Ergebnisse zeigen, dass Verschattung positive Auswirkungen auf das Pflanzenwachstum hat (Jedrowski, et al. 2022). Der Fokus lag hier vor allem auf dem Aufbau der Messtechnik und den Bildverarbeitungsmethoden, die künftig in der Praxis Anwendung finden sollen (ebd.). Auch hier fehlt es aktuell an einem standardisierten Verfahren, wodurch Versuche mit verschiedenen Kamerasystemen durchgeführt werden (Lepley, et al. 2022). Der Ernteertrag von Kartoffeln und Hafer wird um etwa 50 % reduziert, wenn der Reihenabstand der Modulreihen (und damit die PAR) von 20 m auf 5 m verringert wird (Campana, et al. 2021). Die Implementierung eines agrivoltaischen Systems für die untersuchten Kulturen am gewählten Standort zeigt ein Flächenäquivalentverhältnis von über 1,2. Damit wird die Technologie für das Erreichen der Nachhaltigkeitsziele in Schweden gerechtfertigt (ebd.).

Die Ertragsveränderungen unter APV ergeben sich durch ein durch die APV-Anlage verändertes Mikroklima. Diese Änderungen müssen weiterhin wissenschaftlich untersucht werden, womit sich verschiedene Projekte (standortabhängig) in Europa und weltweit beschäftigen. Dafür werden in (A)PV-Anlagen die Bodentemperatur, die PAR, die Lufttemperatur und die Luftfeuchtigkeit untersucht. So können Veränderungen des Mikroklimas quantifiziert und eine Vegetationsanalyse durchgeführt werden.

Die Messungen werden an verschiedenen Stellen vorgenommen: unter, zwischen und außerhalb der Sonnenkollektoren. Für die Vegetation werden die Daten zunächst in Diversitätsindizes umgewandelt, die wiederum zu einer Folgenabschätzung der Landnutzung mit mehreren Indikatoren beitragen, bei der die Auswirkungen auf die Vegetation, die biologische Vielfalt, den Boden und das Wasser bewertet werden. Die Studie kam zu folgenden Ergebnissen: über dem Boden angebrachte Paneele können die Bodentemperatur senken ($5,2^{\circ}\text{C}$), indem sie für Verschattung und ausreichenden Luftstrom sorgen. Im Winter hingegen wurde eine höhere Temperatur von $+1,7^{\circ}\text{C}$ im Vergleich zu den Referenzflächen ohne PV-Anlage gemessen (Armstrong, Ostle und Whitaker 2016). Die gemessenen Temperaturen zwischen den Modulreihen und unter den Modulen werden im Vergleich zur Referenzfläche in Abbildung 20 dargestellt. Darüber hinaus zeigt die mehrdimensionale Analyse der funktionalen Vegetationsvielfalt, dass unter den Paneelen weniger Licht bei höherer Luftfeuchtigkeit und niedrigerer Temperatur (im Sommer) vorhanden ist. Interessanterweise bevorzugen die Arten unter den Modulen auch einen niedrigeren pH-Wert und ein höheres Stickstoffniveau. Schließlich ergab die Bewertung der Auswirkungen auf die Flächennutzung, dass die Auswirkungen der Flächennutzung für ein Weizenfeld insgesamt negativer waren als die des Solarparks, was darauf

hindeutet, dass die Umstellung von konventioneller, intensiver Landwirtschaft auf einen Solarpark von Vorteil wäre (Vervloesem, et al. 2022, Armstrong, et al. 2016).

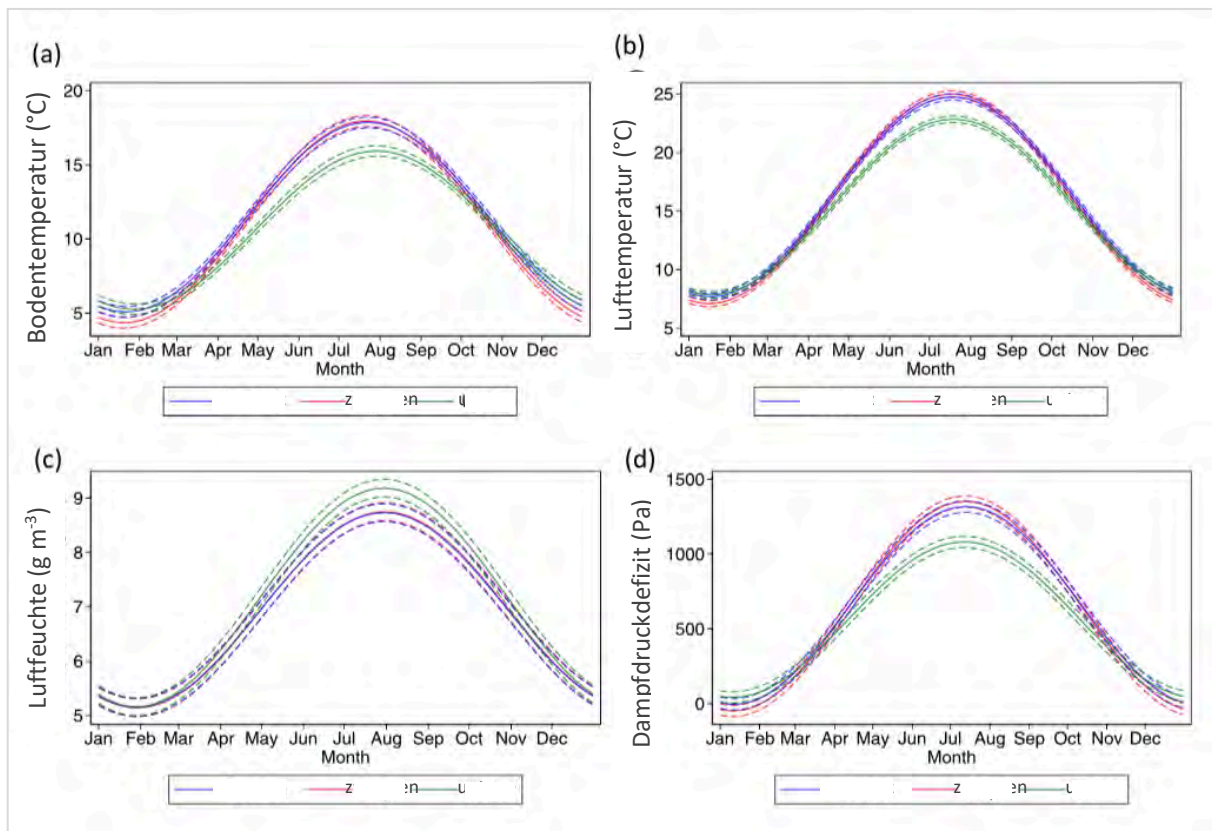


Abbildung 20: Signifikante saisonale Unterschiede in der (a) täglichen durchschnittlichen Bodentemperatur, (b) täglichen maximalen Lufttemperatur, (c) täglichen minimalen absoluten Luftfeuchte und (d) täglichen maximalen Dampfdruckdefizit zwischen der Referenzfläche, zwischen den PV-Reihen und unter den Modulen. Die durchgezogene Linie stellt den Mittelwert dar, der durch ein Modell mit linearen gemischten Effekten angepasst wurde, die gestrichelten Linien die 95%-Konfidenzintervalle (Armstrong, et al. 2016).

(A)PV-Systeme haben unter anderem das Potential, den Nutzen von Gebäudedächern zu maximieren, indem Pflanzenkulturen auf Dächern angebaut werden und mit PV-Systemen überdacht werden (Teng, et al. 2022). Durch das veränderte Mikroklima werden die Modultemperaturen gesenkt, was zu einer höheren Betriebseffizienz führt und auf APV-Systeme auf landwirtschaftlichen Flächen übertragen werden kann. Mikroklimasimulationen haben gezeigt, dass die PV-Temperaturen in der Parzelle mit Pflanzen unter der PV-Anlage an einem typischen, sonnigen beziehungsweise bewölkten Tag zwischen 08:00 und 18:00 Uhr im Durchschnitt um 2,83 °C beziehungsweise 0,71 °C niedriger waren als ohne Pflanzen. Daraus ergibt sich eine Verbesserung des PV-Wirkungsgrads von 1,13 bis 1,42 % an einem sonnigen Tag und von 0,28 bis 0,35 % an einem bewölkten Tag. Die an einem Prototyp eines landwirtschaftlichen Photovoltaiksystems gesammelten Daten deuten darauf hin, dass die Verdunstungskühlung für die Senkung der Umgebungstemperatur verantwortlich ist. Das Vorhandensein von Pflanzen, die unter dem PV-Dach wachsen, führte dazu, dass der agrivoltaische Prototyp

im Laufe des Tages zwischen 3,05% und 3,2% mehr Energie erzeugte als ein Kontrollsystem ohne Pflanzen darunter (ebd.). Einen allgemeineren Lösungsansatz bietet eine CFD⁵-Modellierung einer Anlage (Johansson 2022). Dies wurde für vertikale APV-Systeme entwickelt, das Anwendungsprinzip kann jedoch auch auf horizontale Anlagen übertragen werden. Für das vertikale System wurde eine punktuelle, reduzierte Sonnenintensität von -38% festgestellt (Zainali, et al. 2022). Weiterhin besteht die Möglichkeit feste vertikale, einachsig nachgeführte und zweiachsig nachgeführte Photovoltaik-Arrays für APV-Anwendungen zu entwickeln, um die Verschattungsbedingungen auf dem für die Pflanzenproduktion verwendeten Boden zu analysieren. Die entwickelten Modelle werden dazu beitragen, die Ungewissheit der Ernteerträge bei APV-Systemen zu verringern, indem sie eine genaue Verteilung der PAR auf Ebene der Pflanzen liefern (Zainali, Lu, et al. 2022).

Der Ertrag wird durch den Verschattungsgrad beeinflusst. Inwiefern die Spektralverteilung des ankommenden Lichts das Pflanzenwachstum verändert, gilt es weiterhin zu untersuchen, da morphologische und physiologische Veränderungen die Pflanzenqualität regulieren (Adolfo, et al. 2022). Auch ändert sich der Stickstoffgehalt im Boden unter APV-Anlagen, da dieser durch Sonneneinstrahlung beeinflusst wird. Es ist notwendig langfristige Versuche durchzuführen, die jährliche und saisonale Schwankungen ausschließen. Erste Ergebnisse werden in (Drumm, et al. 2022) erläutert.

Das Wachstumsverhalten der Pflanzen bei veränderter Bewässerung ist grundlegend bekannt. Wie sich die Netto-Photosyntheserate zu bestimmten Tageszeiten verhält, gilt es aber noch zu erforschen. Es wurde nachgewiesen, dass Pflanzen, die regelmäßig im Schatten bewässert werden, in den Morgenstunden eine höhere Photosyntheserate aufweisen (Barron-Gafford, et al. 2019). Der Fokus der Forschung liegt nun auf der gezielten Optimierung der Spitzenzeiten des Sonnenbedarfs von Pflanze und der Erzeugung von PV-Strom (ebd.).

Im Folgenden kann eine Übersicht zum aktuellen Forschungsstand zum Thema „Pflanzen“ gegeben werden (Kumpanalaisatit, et al. 2022):

- 1) Um die Zeit zu verkürzen, die für die Untersuchung der Auswirkungen des Anbaus von Flächen unter feststehenden PV-Modulen auf die Solarstromerzeugung erforderlich ist, sollte ein mathematisches Modell zur Vorhersage von APV-Systemen entwickelt werden.
- 2) Die für die Bepflanzung mit fest installierten PV-Anlagen geeigneten Kulturen, sowie die Wachstumsparameter der Pflanzen, gilt es zu ermitteln.
- 3) Regenwasser aufgefangen von APV-Systemen sollte für die tägliche Bewässerung der Pflanzen genutzt werden.

⁵ CFD, engl. Computational Fluid Dynamics ist die numerische Strömungsmechanik. Sie stellt eine etablierte Methode zur Lösung von Problemen der Strömungsmechanik dar.

- 4) Geeignete Strategien für die APV sollten umgesetzt werden, um die Konkurrenz um landwirtschaftliche Flächen und das Eindringen in Wälder zu verringern und auch die lokale Bevölkerung zu unterstützen.

Eine weitere wichtige Rolle bei der Betrachtung von APV-Anlagen spielt der Faktor Biodiversität, da APV-Anlagen dazu beitragen, die Landschaft nachhaltiger, effizienter und schöner zu gestalten (Buscemi 2022). Eine umfassende Untersuchung wurde für 75 PV-FFA in Deutschland durchgeführt und folgende Ergebnisse ermittelt (Peschel, et al. 2019):

- Klimaschutzbeitrag durch Erzeugung erneuerbarer Energie
- Flächenaufwertung durch Erhaltung der biologischen Vielfalt
- Naturverträgliche Ausgestaltung steigert Artenvielfalt
- Dauerhaft extensive Nutzung (in den Reihenzwischenräumen / an den Aufständungen) führt zu arten- und individuenreicher Besiedlung aus unterschiedlichen Tiergruppen
- Gesteigerte Artenvielfalt im Vergleich zur umgebenden Landschaft (Nachweis von Tagfalter, Heuschrecken und Brutvögel)
- Kleinere PV-Anlagen wirken als „Trittsteinbiotope“ und erhalten Habitatkorridore
- Größere PV-Anlagen bilden Habitate, die den Erhalt oder den Aufbau von Populationen (z. B. Zauneidechsen, Brutvögel) ermöglichen
- PV-Anlagen auf Konversionsflächen können die Sukzession der Vegetation, die zu einem Verlust offener, besonderer Habitate führt, stoppen

Diese Ergebnisse können bei entsprechender Planung und Auslegung auch auf APV-Anlagen angewandt, sowie weitere Biodiversitätssteigernde Maßnahmen umgesetzt werden [siehe auch Wydra, et al. (2022)]

Tabelle 9: Literaturrecherche APV - Bereich "Pflanzenbau, Biodiversität und Ertragssteigerung" (eigene Darstellung, WP = wissenschaftliches Paper mit Peer-Review, W = wissenschaftliches Paper ohne Peer-Review; EP = empirische Primärdaten, SP = Sekundärdaten und Metastudien).

	Autor(en)	Journal / Bericht	Titel	Jahr	Validität	Datentyp	DOI / URL	Anlagentyp	Thema	Keywords
37	L. Dubina; SolarPower Europe	SolarPower Europe	Solar, Biodiversity, Land Use - Best Practice Guidelines	2022	WP	SP	ISBN: 9789464518696.	PV	Biodiv	Leitfaden
38	H. Montag; G. Parker; T. Clarkson	Clarkson and Woods and Wychwood Biodiversity	The Effects of Solar Farms on Local Biodiversity: a Comparative Study	2016	WP	SP	https://helapco.gr/wp-content/uploads/Solar_Farms_Biodiversity_Study.pdf	PV	Biodiv	Biodiv
39	M. Graham; S. Ates; A. Melathopoulos; A. Moldenke; S. DeBano; L. Best; C. Higgins	Scientific Reports	Partial Shading by Solar Panels Delays Bloom, Increases Floral Abundance during the Late-Season for Pollinators in a Dryland, Agrivoltaic Ecosystem	2021	WP	EP	https://doi.org/10.1038/s41598-021-86756-4	PV	Biodiv FFA	Biodiv FFA, Pflanzensammensetzung, Blühzeitpunkt, Bestäuber
40	P. Juillion; G. Lopez; D. Fumey; V. Lesniak; M. Génard; G. Vercambre	Elsevier - Scientia Horticulturae	Shading Apple Trees with an Agrivoltaic system - Impact on Water Relations, Leaf Morphophysiological Characteristics and Yield Determinants	2022	WP	EP	https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111434	APV	Ertrag Apfelbau	Verschattungsversuche Ertragsmessungen bei Apfelplantage + APV
41	V. Hernández; J. Cos; M. Blasi; M. Genovese; R. Andrés; L. Merlo; A. Guevara; P. Hellín; J. Jimenes; C. Colomer; F. Contreras; P. Flores	AgriVoltaics 2022	Agrivoltaic in a Semi-Aride Climate: Coexistence of Agricultural Activities in Utility-Scale Plants of EGP for Multiple and Sustainable Land Use	2022	W	EP	https://cms2022.agrivoltaics-conference.org/file/display_attachment/96ec274164c840ba32ad50e6e96ab0f?filename=María+Genovese+-+Abstract.pdf	APV	Ertragsmessung	Kapern, Paprika, Aloekulturen
42	P. Chauhan; M. Dulawat	AgriVoltaics 2022	Studies on Crop Cultivation under Agrivoltaic System	2022	W	EP	https://cms2022.agrivoltaics-conference.org/file/display_attachment/2c8d460831d554bcfce15348cfc412b?filename=Pushpendra+M+Chauhan+-+Abstract.pdf	APV	Ertragsmessung	Parametermessung

	Autor(en)	Journal / Bericht	Titel	Jahr	Validität	Datentyp	DOI / URL	Anlagentyp	Thema	Keywords
43	H. Helsen; B. Maestrini; E. Meijers; M. Hermelink; W. de Vries; P. Balk; F. de Ruijter	AgriVoltaics 2022	Crop Response to Agrivoltaics in Soft Fruit Production	2022	W	EP	https://cms2022.agrivoltaics-conference.org/file/display_attachment/7b0045b30cbaf33c63ae41549b191c4?filename=Herman+Helsen++Abstract.pdf	APV	Ertragsmessung Beeren	Ersatz Plastikfolie Solarpaneele, NL
44	G. Barron-Gafford; M. Pavao-Zuckerman; R. Minor; et al.	Nature Sustainability	Agrivoltaics Provide Mutual Benefits across the Food–Energy–Water Nexus in Drylands	2019	WP	EP	DOI: 10.1038/s41893-019-0364-5	APV	FEW-Nexus, Pflanzen- (System-) technik	Mikroklima, Temp, Pflanzenproduktion, Wasser, Solarleistung
45	V. Rana; S. Sharma; N. Rana; U. Sharma; V. Patiyal; Banita; H. Prasad	Environmental Chemistry Letters	Management of Hailstorms under a Changing Climate in Agriculture - a Review	2021	WP	EP	https://doi.org/10.1007/s10311-022-01502-0	/	Hagelmanagement	Anpassungen Klimawandel
46	S. Zainali; O. Qadir; S. Parlak; S. Lu; A. Avelin; B. Stridh; P. Campana	Energy Nexus Journal	Computational Fluid Dynamics Modelling of Microclimate for a Vertical Agrivoltaic System	2022	W	EP	DOI: 10.48550/arXiv.2209.01971	APV	Mikroklima	Vertikal, CFD-Modellierung; Mikroklima; Temperaturen
47	J. Vervloesem; E. Marcheggiani; MD Abdul Mueed Choudhury; B. Muys	Sustainability - MDPI	Effects of Photovoltaic Solar Farms on Microclimate and Vegetation Diversity	2022	WP	EP	https://doi.org/10.3390/su14127493	PV	Mikroklima	Untersuchung PV, Temperatur, Biodiversität
48	E. Adeh; J. Selker; C. Higgins	PLoS ONE	Remarkable Agrivoltaic Influence on Soil Moisture, Micrometeorology and Water-Use Efficiency	2018	WP	EP	https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203256 ; 13(11): e0203256	APV	Mikroklima	Wasserbedarf, Boden
49	A. Armstrong; N. Ostle; J. Whitaker	Environmental Research Letter	Solar Park Microclimate and Vegetation Management Effects on Grassland Carbon Cycling	2016	WP	EP	doi:10.1088/1748-9326/11/7/074016	FFA	Mikroklima	Boden-; Luftmikroklima, Vegetation, Treibhausgasemissionen
50	J. Bím	AgriVoltaics 2022	Agrivoltaics as a Tool for Protective Belts Between Soil Blocks	2022	W	EP	https://cms2022.agrivoltaics-conference.org/file/display_attachment/917a30155d9d21515af8f2e084c4c74?filename=Ji%C5%99%C3%AD+B%C3%ADm++Abstract.pdf	APV	Ökologie	Schutzgürtel durch Biodiv mit APV

	Autor(en)	Journal / Bericht	Titel	Jahr	Validität	Datentyp	DOI / URL	Anlagentyp	Thema	Keywords
51	A. Buscemi	AgriVoltaics 2022	Ecosystem Approach in Agrivoltaic Parks Design	2022	WP	EP	https://cms2022.agrivoltaics-conference.org/file/display_attachment/33be7d38bb91bd8e2db471366e9c6ac?filename=A-gata+Buscemi+-+Paper.pdf	APV	Ökologie	Ökosystem APV Einklang
52	R. Peschel; T. Peschel; M. Marchand; J. Hauke	Bundesverband Neue Energiewirtschaft (bne) e.V.	Solarparks - Gewinne für die Biodiversität	2020	WP	EP	https://www.bne-online.de/fileadmin/bne/Dokumente/Leitfaeden_Branchenebersichten_usw/20200406_bne_kurzfassung_biodiv_studie_2019.pdf	PV	Ökologie	Biodiversität, Artennachweise
53	S. Zainali; S. Lu; B. Stridh; A. Avelin; S. Amaducci; M. Colauzzi; P. Campana	Mälardalen University	Direct and Diffuse Shading Factors Modelling for the Most Representative Agrivoltaic System Layouts	2022	WP	EP	https://doi.org/10.48550/arXiv.2208.04886	APV	PAR	Modellierung Verschattung, Photosynthetisch Aktive Strahlung
54	H. Marrou; L. Guilioni; L. Dufour; C. Dupraz; J. Wery	Elsevier - Agricultural and Forest Meteorology	Microclimate under Agrivoltaic Systems - Is Crop Growth Rate Affected in the Partial Shade of Solar Panels?	2013	WP	EP	DOI: 10.1016/j.agrfor-met.2013.04.012	APV	Pflanzenbau	Wachstumsrate, Boden-, Luft-, Pflanzentemperatur
55	S.-H. Chae; H. Kim; Hyeon-Woo Moon; Yoon Hyung Kim; Kang-Mo Ku	Agronomy - MDPI	Agrivoltaic Systems Enhance Farmers' Profits through Broccoli Visual Quality and Electricity Production Without Dramatic Changes in Yield, Antioxidant Capacity, and Glucosinolates	2022	WP	EP	https://doi.org/10.3390/agronomy12061415	APV	Pflanzenbau, Ökonomie	Mikrowerte Brokkoli, Wirtschaftlichkeit
56	M. Kumpanalaisatit; W. Setthapun; H. Sintuya; A. Pattiya; S. Jansri	Elsevier - Sustainable Production and Consumption	Current Status of Agrivoltaic Systems and their Benefits to Energy, Food, Environment, Economy, and Society	2022	WP	SP	DOI: 10.1016/j.spc.2022.08.013	PV	Pflanzung unter PVA (Review)	Unterscheidung APV-Systeme, Optimierung LER, Hinweise ohne landw. Vorplanung
57	R. Adolfo; P. Kyle; D. Azad; G. Maggie; A. Serkan; K. M.; C. Higgins	AgriVoltaics 2022	Photovoltaic Panels do not Alter Substantially the Spectral Composition, Particularly the Red/Far-Red Ratio, of the Transmitted Radiation	2022	W	EP	https://cms2022.agrivoltaics-conference.org/file/display_attachment/e7b63fd9f777c4e2df059c83c74685a?filename=Adol	APV	Spektralverteilung	Untersuchung Lichtspektren, Verhalten Pflanzen

	Autor(en)	Journal / Bericht	Titel	Jahr	Validität	Datentyp	DOI / URL	Anlagentyp	Thema	Keywords
58	E. Drumm; C. Higgins; F. Chaplen	AgriVoltaics 2022	Soil Inorganic Nitrogen Content in Solar Arrays	2022	W	EP	https://cms2022.agrivoltaics-conference.org/file/display_attachment/2a2b0fb7489f255bd90dd37630ef1cf?file-name=Erin+Drumm+-+Abstract.pdf	APV	Stickstoffgehalt	Messung Vergleichswerte, Ammonium, Nitrat, Nitrit
59	M. Tawalbeh; A. Al-Othman; Feras Kafiah; E. Abdelsalam; F.Almomani; M. Alkasrawi	Science of the Total Environment	Environmental Impacts of Solar Photovoltaic Systems - A Critical Review of Recent Progress and Future Outlook	2020	WP	EP	https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143528	FFA	Umweltauswirkungen	Emissionen bei Herstellung, Entsorgung
60	C. Jedmowski; S. Kherde; A. Pahwa; V. Schlechtrimen; M. Meier-Grüll; O. Muller	AgriVoltaics 2022	Effect of Shading in an Agri-PV System on Structure and Growth of Ornamental Plants	2022	W	EP	https://cms2022.agrivoltaics-conference.org/file/display_attachment/2e0a04a43dfab41d7ab9198c80447f2?filename=Christoph+Jedmowski+-+Abstract.pdf	APV	Verschattung	Zierpflanzenertrag, Pflanzenwachstumsparameter
61	K. Lepley; G. Barron-Gafford; A. Salazar; P. Murphy	AgriVoltaics 2022	Monitoring Agrivoltaic Crop Performance and Phenology with a Low-Cost Camera System	2022	W	EP	https://cms2022.agrivoltaics-conference.org/file/display_attachment/2fce2160297c47d86994e7ecb5dd1b8?file-name=Kai+Lepley+-+Abstract.pdf	APV	Wachstumsdokumentation	Kamerasystem, Unterschiede unter APV
62	T. Hickey; J. Boussetot	AgriVoltaics 2022	A Rooftop Agrivoltaic System: Pollinator Plant Establishment	2022	W	EP	https://cms2022.agrivoltaics-conference.org/file/display_attachment/5028d16f2f7cdb247e529416229859d?file-name=Thomas+Hickey+-+Abstract.pdf	APV	Wachstumsindex	USA, Vergleich Sonne, Schatten

	Autor(en)	Journal / Bericht	Titel	Jahr	Validität	Datentyp	DOI / URL	Anlagentyp	Thema	Keywords
63	G. Barron-Gafford; K. Lepley; A. Salazar; I. Barnett-Moreno; C. Ortega; M. Rogers; P. Murphy	AgriVoltaics 2022	Agrivoltaics as a Cure for Midday Depression - Shade from PV Provides Respite for Food Crops in Drylands	2022	W	EP	https://cms2022.agrivoltaics-conference.org/file/display_attachment/0c03ccc36b00f0e93d3c67ae12178e8?filename.pdf	APV	Wassermanagement	Wasserbedarf unter APV, Photosynthese
64	J. Teng; C. Soh; S. Devihosur; R. Tay; S. Jusuf	Sustainability - MDPI	Effects of Agrivoltaic Systems on the Surrounding Rooftop Microclimate	2022	WP	EP	https://doi.org/10.3390/su14127089	APV	Modulertrag	Verdunstungsrate, Mikroklima PV

3.5 Spezifische Studien

Zahlreiche Studien gibt es für Projekte, die wichtige Ergebnisse hervorbrachten, jedoch sehr standortspezifisch sind. Eine Übertragung auf andere Projekte ist nur schwer beziehungsweise mit zusätzlichen Untersuchungen möglich. Die Ergebnisse einiger Projekte sollen nun vorgestellt werden (Tabelle 10).

In Boston (USA) wurde eine APV-Anlage errichtet, bei der die Leistungserträge verschiedener Systeme untersucht worden sind (Katsikogiannis, et al. 2022). Drei Haupttopologien wurden analysiert: Süd-Nord-ausgerichtet, Ost-West-leicht aufgeständert in Spitzdachform und Ost-West-vertikal. Es wurde festgestellt, dass die O-W-Vertikale aus Sicht der Verschattungsverhältnisse am besten für Dauerkulturen geeignet ist und die Süd-Nord-Ausrichtung für Schattenkulturen ungeeignet, wenn die Stromerzeugung im Vordergrund stehe. Das optimale Szenario würde das Ost-West-Spitzdach darstellen, da das Licht gleichmäßig verteilt werde und die Pflanzen zur Mittagszeit effektiv beschattet. Diese Ergebnisse wurden an einem Projektstandort in den USA erzielt und sind damit spezifisch für die dortigen Lichtverhältnisse und die verwendeten Kulturen (ebd.).

Derartige Publikationen gibt es beispielsweise auch für die Forschungsanlage in Heggelbach (Trommsdorff, et al. 2020, Weselek, 2022). Heute wird die Anlage in der Aufständigung als viel zu massiv eingeschätzt, mit einem zu hohen Stahleinsatz. Dies steigerte unnötig die Investitionskosten. Dennoch konnten viele Ergebnisse ermittelt werden, die Auskunft über die untersuchten Pflanzenkulturen geben und damit Hinweise und Grundlagenwissen für künftige Projekte bieten (siehe auch Kapitel 5.1). Besonders fokussiert wurde bei den Untersuchungen das Thema Mikroklima, wobei vor allem das „Hitzejahr“ 2018 die Ergebnisse spezifizierte (Weselek, et al. 2021).

Eine spezifische Anwendung findet sich auch in der Kombination aus APV und Kaninchenweide (Lytle, et al. 2021). Die Analyse umfasst die wirtschaftlichen Vorteile für den PV-Betreiber, die sich aus der Weidehaltung von Kaninchen in einer Dichte ergeben, die ausreicht, um das Wachstum der Vegetation zu kontrollieren und so die wirtschaftlichen und ökologischen Kosten des Mähens zu reduzieren; eine doppelte Einnahmequelle aus dem Verkauf von Kaninchen und Strom entsteht, die mit den geschätzten Investitionskosten für Kaninchen an einem gemeinsamen Standort und unabhängig von der PV-Anlage verglichen wird. Weiterhin wird der wirtschaftliche Wert für den Kaninchenzüchter durch höhere Wachstumsraten der Kolonie ermittelt, der ermöglicht wird durch die Verschattung und den Schutz vor Raubtieren durch die PV-Anlagen. Die Kosten für die Umzäunung können durch den Doppelnutzen reduziert werden. Sie stellen die größten Kapitalkosten dar. Eine Umweltanalyse wurde erstellt, die darauf hindeutet, dass die Kaninchen-Zucht unter APV einen Weg zu einer messbaren Reduzierung der durch die Landwirtschaft verursachten Treibhausgasemissionen darstellt. Die

gemeinsame Nutzung von APV und Kaninchenfarm kann damit eine rentable Form der landwirtschaftlichen Photovoltaik sein, die die Gesamteinnahmen des Standorts um 2,5% bis 24,0% steigert im Vergleich zu den prognostizierten Stromeinnahmen. Dies ist abhängig vom Standort und der damit verbundenen Pacht/Besitz von Kaninchen. Gleichzeitig kann ein hochwertiges landwirtschaftliches Produkt generiert werden, das in Summe deutlich weniger Umweltauswirkungen hat als Rinder (Lytle, et al. 2021).

Eine in der Po-Ebene in Italien durchgeführte Studie zeigt die ökologische und ökonomische Leistung eines innovativen agrivoltaischen Systems auf, das mit einer Drahtseilaufhängung (siehe auch Kapitel 4.1.4.1) in der Po-Ebene statisch abgespannt ist (Agostini, et al. 2020). Die erarbeitete Ökobilanz zeigt, dass diese Systeme in allen untersuchten Umweltbereichen (Klimawandel, Eutrophierung, Luftqualität und Ressourcenverbrauch) ähnliche Umweltleistungen aufweisen wie andere PV-Systeme. Die APV-Anlagen weisen vergleichbare Stromgestehungskosten auf wie boden- oder dachmontierte PV-Anlagen, was sowohl auf die höhere Produktivität dieser Tracking-Systeme als auch auf die Materialeinsparungen durch die Montage auf die abgespannte Drahtseilstruktur zurückzuführen ist. Die Verwendung von Drahtseilen war wirtschaftlich sicher und mit dem derzeitigen italienischen Net-Metering-Konzept zur Förderung von PV-Anlagen vereinbar. Es konnte gezeigt werden, dass die wirtschaftlichen und ökologischen Kosten dieser APV-Systeme mit denen anderer PV-Systeme vergleichbar sind, obwohl die geringeren Auswirkungen auf die Landnutzung und die Stabilisierung der Pflanzenproduktion relevante Mehrwerte darstellen, die in einem zukünftigen Energiesystem, das von zunehmender menschlicher Landaneignung und dem Klimawandel geprägt ist, angemessen gewürdigt werden sollten (ebd.).

Eine Machbarkeitsanalyse, Empfehlungen und künftige Richtungen für die APV in Mali und in Afrika zeigt, dass APV - insbesondere bei größeren Systemen - aufgrund von Skaleneffekten im Durchschnitt kostengünstiger als konventionelle Energierzeugungsanlagen realisiert werden kann, sodass erneuerbare Energie vor allem für ländliche Gemeinden in Afrika erschwinglich bleibt (Cheo, et al. 2022). Der Klimawandel und die zunehmende Wasserknappheit in der Region Mali erfordern neue Ansätze in der Landwirtschaft, insbesondere, um den Sektor wirtschaftlich und ökologisch widerstandsfähig zu halten. Die technische und wirtschaftliche Tragfähigkeit des integrierten Dreifach-Landnutzungssystems aus PV, Wassermanagement durch eine Regenwasserauffangkonstruktion an den Modulen und Landwirtschaft muss sich jedoch in den ländlichen Gemeinden Malis erst noch erweisen. Die APV kann also dazu beitragen, die Ernährungssicherheit zu erhöhen, den Zugang zu Wasserressourcen und deren Bewirtschaftung für die menschliche und landwirtschaftliche Nutzung zu verbessern und neue Geschäftsmöglichkeiten zu schaffen, die den Lebensunterhalt der lokalen Gemeinschaften verbessern würden (ebd.).

Tabelle 10: Literaturrecherche APV - Bereich "Spezifische Studien" (eigene Darstellung, WP = wissenschaftliches Paper mit Peer-Review, W = wissenschaftliches Paper ohne Peer-Review; EP = empirische Primärdaten, SP = Sekundärdaten und Metastudien).

	Autor(en)	Journal / Bericht	Titel	Jahr	Validität	Datentyp	DOI / URL	Anlagentyp	Thema	Keywords
64	O. Katsikogiannis; H. Ziar; O. Isabella	Elsevier - Applied Energy	Integration Of Bifacial Photovoltaics In Agrivoltaic Systems - A Synergistic Design Approach	2021	WP	EP	https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118475	APV	Ausrichtung USA	Optimierung Ertrag, Modellierungsansatz USA
65	M. Trommsdorff; J. Kang; C. Reise; S. Schindele; G. Bopp; A. Ehmann; A. Weselek; P. Hógy; T. Obergfell	Elsevier - Renewable and Sustainable Energy Reviews	Combining Food and Energy Production - Design Of An Agrivoltaic System Applied In Arable And Vegetable Farming In Germany	2020	WP	EP	https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110694	APV	Heggelbach	Ergebnisauswertung
66	A. Weselek	Der kritische Agrarbericht 2022	Photovoltaik und Photosynthese – doppelte Sonnenernte	2022	WP	EP	https://kritischer-agrarbericht.de/agrarberichte/2022#	APV	Heggelbach	Review Heggelbach
67	A. Weselek; A. Bauerle; J. Hartung; S. Zikeli; I. Lewandowski; P. Hógy	Agronomy for Sustainable Development	Agrivoltaic System Impacts on Microclimate and Yield of Different Crops Within an Organic Crop Rotation in a Temperate Climate	2021	WP	EP	https://doi.org/10.1007/s13593-021-00714-y	APV	Heggelbach Mikroklima	Fruchtfolge, Ernteertrag
68	M. Tajima; T. Iida	AIP Conference Proceedings	Evolution of Agrivoltaic Farms in Japan	2021	WP	EP	https://doi.org/10.1063/5.0054674	APV	Japan	Entwicklung APV in Japan
69	J. Pearce	Sustainability - MDPI	Agrivoltaics in Ontario Canada - Promise and Policy	2022	WP	EP	https://doi.org/10.3390/su14053037	APV	Kanada Review	Landnutzungspolitik, Fallstudien Kanada
70	W. Lytle; T. Meyer; N. Tankella; L. Burnham; J. Engel; C. Schelly; J. Pearce	Journal of Cleaner Production	Conceptual Design and Rationale for a New Agrivoltaics Concept - Pastured-Raised Rabbits and Solar Farming	2021	WP	EP	https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124476	APV	Kaninchenweide	Ökonomie, Umsetzung
71	A. Cheo; N. Adelhardt; T. Krieger; J. Berneiser	Albert-Ludwigs-Universität Freiburg	Agrivoltaics Across the Water-Energy-Food-Nexus in Africa - Opportunities and Challenges for Rural Communities in Mali	2022	WP	EP	https://ssrn.com/abstract=4088544	APV	Machbarkeit Afrika	Mali, Empfehlungen, Potentiale
72	A. Agostini; M. Colauzzi; S. Amaducci	Applied Energy	Innovative Agrivoltaic Systems to Produce Sustainable Energy: An Economic and Environmental Assessment	2020	WP	EP	https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116102	APV	Italien Ökologie, Ökonomie	APV, Klimawandel, LCA, Ökonomie, APV auf Zugstrukturen

3.6 Systemkomponenten

Die meisten Publikationen finden sich zum Thema Auslegung der Anlage oder zu einzelnen Systemkomponenten. Im Folgenden sollen die wichtigsten Ergebnisse vorgestellt werden, die Zusammenfassung der betrachteten Literatur ist in Tabelle 11 ersichtlich.

Modelle und Simulationen in der Landschaft

Für eine gelungene Planung einer APV-Anlage wurde ein 3D-Modellierungstool entwickelt, welches standortspezifisch mögliche Verschattungen simuliert und die Wirtschaftlichkeit der Anlage berechnet (Willockx, et al. 2020). Das Tool wurde speziell für Obstkulturen entwickelt, die eine spezifische Blütezeit aufweisen, wobei der Verschattungszeitpunkt ausschlaggebend ist. Die Ergebnisse der Modellierung zeigen, dass die Menge der Sonneneinstrahlung von den verwendeten Modulen abhängt, wobei Flächen mit halbtransparenten Modulen eine bessere Lichtverteilung und geringere Ernteverluste aufweisen. Auf der Grundlage der Modellierung wurde in Bierbeek, Belgien, ein Prototyp einer agrovoltaischen Anlage mit Birnbäumen und halbtransparenten Modulen errichtet (ebd.). Das Hagelnetz-Schutzsystem wurde durch halbtransparente PV-Module ersetzt, die in einer Kuppelanordnung über der Birnenplantage angebracht wurden (Campana, et al. 2022). Die Anlage ist mit mehreren Sensoren zur Messung des Mikroklimas (Bestrahlungsstärke, Temperatur, Windgeschwindigkeit, Windrichtung), der PAR unter Referenz- und APV-Bedingungen und des Energieertrags (AC-Stromzähler) ausgestattet. Die erste Komponente des Simulationstools berechnet den relativen PAR-Wert, der die Pflanzen erreicht. Zur Bewertung der Modellierungsergebnisse wurde eine Zwillingversion erstellt, die auf den physikalischen Eigenschaften des APV von Bierbeek basiert. Die Ergebnisse des digitalen Zwillingmodells zeigen eine leicht überhöhte Schätzung der PAR-Werte. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die Simulationen die Verschattung durch die Birnenbäume selbst und andere Strukturelemente nicht berücksichtigen. Andererseits zeigte die Energiekomponente den Vorteil eines datenbasierten Modells mit stabileren und genaueren Schätzergebnissen (ebd.).

Da die APV eine neuere Form der nachhaltigen Energieerzeugung in Europa ist, gibt es bisher wenig Erfahrung über Auswirkungen auf die Landschaft und die soziale Akzeptanz (Schauppenlehner, et al. 2022). Die derzeitigen Erwartungen an APV stammen häufig aus Studien, die sich mit der Entwicklung der Windenergie oder der PV-FFA befassen. Erste Untersuchungen deuten jedoch darauf hin, dass APV im Vergleich zu PV-FFA eine höhere Akzeptanz hat, weil sie eine doppelte Flächennutzung und Synergien ermöglicht, wodurch Standortkonflikte verringert werden können. Im Falle der APV spielt jedoch auch die Akzeptanz der Landwirte eine entscheidende Rolle, da sie die landwirtschaftlichen Praktiken und wirtschaftlichen Faktoren verändert. Die wichtigsten Akzeptanzfaktoren sind jedoch die Auswirkungen auf die Landschaft, die Bindung an den Standort und die Auswirkungen auf den Erholungswert,

was darauf hindeutet, dass eine angemessene Kommunikation der visuellen Auswirkungen ein wichtiges Instrument zur Erhöhung der Akzeptanz sein könnte. Abhängig von der Verfügbarkeit hochauflösender und detaillierter Geodaten können komplexe und realistische 3D-Umgebungen erstellt und die visuellen Auswirkungen großer APV-Installationen auf die umliegenden Landschaften vermittelt und bewertet werden. Durch die Verwendung komplexer Vegetationssysteme, hochwertiger Texturen, die Reflexionen und Rauheit unterstützen und physikalischer Modelle für atmosphärische Effekte kann eine hohe Qualität erreicht werden, um die visuellen Auswirkungen von APV-Installationen mit immersiven VR-Technologien zu bewerten (Abbildung 21, ebd.). Derartige 3D-Modellierungen werden auch für (A)PV-integrierte Gewächshäuser entwickelt (Boujdaini, et al. 2022). Weiterhin werden Untersuchungen durchgeführt, um anhand von Modellsimulationen das technische Potential ermitteln (H. Dinesh 2016). Die Ergebnisse zeigten einen Anstieg der PV-Leistung zwischen 40 und 70 GW, wenn allein der Salatanbau in den USA auf agrivoltaische Systeme umgestellt wird (ebd.).



Abbildung 21: Visualisierung eines hochaufgeständerten Systems aus Ich-Perspektive (links) und Vogelperspektive (rechts) anhand von Open Source Geodaten (Schauppenlehner, et al. 2022).

Für die Bestimmung der Strom- und Pflanzenproduktion von APV-Systemen mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung wird ein Modellierungsrahmen erstellt (Mikovits, et al. 2022). Die erforderlichen Eingabedaten sind die Konfiguration der PV-Anlage, Strahlungsdaten als globale horizontale Einstrahlung (GHI), eine digitale Bodenkarte (DGM) oder digitale Höhenkarte (DHM) und Landnutzungs- oder Landbedeckungsdaten, wobei alle Parameter und Werte in einer Konfigurationsdatei definiert sind. Zunächst werden die Landbedeckungsdaten, die in der Regel als Rasterdaten vorliegen, polygonisiert und Gebiete mit ungeeigneten Landbedeckungswerten entfernt; weitere Gebiete werden nach Neigung, Höhe, Größe und Kompaktheit gefiltert. Für jedes Gebiet werden je nach Größe ein oder mehrere repräsentative Punkt(e) durch Stichproben für die PV-Berechnungen erstellt. Als nächstes werden die Strahlungsdaten verarbeitet. Wenn keine stündlichen (oder hochauflösenden) Daten zur Verfügung stehen, werden die Tageswerte herunterskaliert und in diffuse horizontale Bestrahlungsstärke (DHI) und direkte normale Bestrahlungsstärke (DNI) aufgeteilt. Beide Parameter werden reduziert, um das lokale Gelände und die Horizonte für alle repräsentativen Punkte zu repräsentieren, die im vorherigen Schritt erzeugt wurden. Die

PV-Anlage wird simuliert und es werden Ausgangswerte für die Energieerzeugung und die Bodenbeschattung erzeugt. Die aktualisierten Sonneneinstrahlungswerte werden in ein biophysikalisches Anbausimulationsmodell eingespeist, um die Auswirkungen der Verschattung auf die Pflanzenproduktivität abzuleiten (ebd.).

Die Zusammenhänge zwischen Pflanzenwachstum und APV-Anlage anhand der Faktoren Licht, Wasser, Wärme und Biomasse simuliert das Projekt "Expert-N" und ermöglicht den Vergleich der Produktion auf einem freien, unverschatteten Feld mit Kulturen unter APV (Gross, et al. 2022). Ein Eckpfeiler für die Anwendbarkeit und Zuverlässigkeit des Modells sind die Überprüfungen anhand der aufgezeichneten Daten sowohl auf freiem Ackerland als auch unter APV-Anlagen (ebd.).

Ein Rahmenwerk zur Ermittlung techno-ökologischer Synergien (TES) wurde von den Autor*innen (Hernandez, et al. 2019) vorgestellt, um die Entwicklung gegenseitig vorteilhafter Beziehungen zwischen technologischen und ökologischen Systemen als Ansatz zur Verbesserung der Nachhaltigkeit der Solarenergie in einer Vielzahl von Empfängerumgebungen, einschließlich Land, Nahrung, Wasser und bebauter Systeme darzustellen (Hernandez, et al. 2019).

Konstruktion

Ein spezifisches Bauprinzip wird auch in der Publikation der Autor*innen Balz et al. beschrieben. Die Fallstudie zeigt die Konstruktionsprinzipien und den Bauprozess des APV-Prototyps auf, der in einer Kooperation zwischen den Firmen TubeSolar AG und sbp Sonne GmbH entwickelt wurde (Balz, et al. 2022). Während TubeSolar AG ein spezielles Dünnschicht-PV-Modul für den landwirtschaftlichen Einsatz entwickelt hat (vgl. Kapitel 4.2.8), verwendete die sbp Sonne GmbH eine innovative Tragstruktur. Der Prototyp umfasst eine Fläche von 1.200 m² und wurde im Frühjahr 2022 auf dem Campus der Hochschule Weihenstephan für angewandte Wissenschaften (HSWT) in Freising in Süddeutschland errichtet (Abbildung 22). Die HSWT wird ein 5-jähriges Forschungsprogramm über Wachstum und Entwicklung der Pflanzen durchführen. Das Entwurfskonzept und die daraus resultierenden Vorteile der Leichtbau-Langfeldstruktur und des TubeSolar-Moduls werden vorgestellt und mit dem Stand der Technik bei APV-Strukturen verglichen. Die Verwendung eines innovativen Spannstruktur-Systems der Aufständigung führt zu einem minimalen Gesamtgewicht der Struktur. Eine zusätzliche Gewichtsreduzierung ist möglich, wenn man die geringen windinduzierten Kräfte nutzt, die aus den niedrigen Formfaktoren des TubeSolar-Moduls resultieren. Diese werden in Windkanaltests untersucht. Kostenvorteile, Installationsvorteile und Nachhaltigkeitsaspekte werden diskutiert und ein Kostenausblick für den großtechnischen Einsatz gegeben (ebd.).



Abbildung 22: APV-Projekt an der HSWT mit TubeSolar-Modulen (Balz, et al. 2022).

Die Optimierung der Konstruktion ist vor allem von statischen Aspekten abhängig, da besonders die hochaufgeständerten Anlagen (je nach Standort) starken Witterungsverhältnissen, wie Wind, Hagel und Schneefall standhalten müssen (Lee, et al. 2022a). Besonders bei vertikalen Anlagen spielt die Windlast eine ausschlaggebende Rolle bei der Konstruktion der Anlage (Huwylar, et al. 2022). Neben der Entwicklung der APV-Anlage spielt auch die Installation eine wichtige Rolle. Erste Forschungsergebnisse zeigen, dass durch Rohrbiegekomponenten und Rotationssystemen die Montagezeit um bis zu 50% reduziert werden kann (Lee, et al. 2022a). Die Montage kann vollständig am Boden erfolgen, wodurch Material- und Arbeitskosten, sowie Zeit beim Aufbau eingespart werden können (Lee, et al. 2022).

Strahlung

Modelle, welche die einfallende solare Globalstrahlung zerlegen, zeigen auf, wie hoch der Anteil der diffusen Strahlung ist. Die diffuse Strahlung ist das Verhältnis aus diffuser horizontaler Strahlung zur globalen horizontalen Strahlung (Lu, et al. 2022). Es ist allgemein bekannt, dass diese beiden Strahlungskomponenten für die Vorhersage der Leistung von PV-Anlagen wesentlich sind. In APV-Systemen erhalten die angebauten Pflanzen eine ungleiche Menge an direkter, diffuser und reflektierter PAR. Die Größenordnung dieser Strahlungskomponenten hängt von der Anbaufläche ab, da die Verschattung aufgrund der Solarmodule (z. B. oberhalb der Kulturen, vertikal) nicht homogen ist. So ist die PAR unter Bedingungen mit diffusem Lichteinfall effizienter für die Photosynthese der Pflanzen als direkte PAR. Aus diesem Grund ist es von grundlegender Bedeutung, die diffuse PAR-Komponente in Studien zu APV-Systemen abzuschätzen, um den Ernteertrag richtig beurteilen zu können. Hierzu wurde ein Modell entwickelt (Lu, et al. 2022). Zerlegungsmodelle für die solare Globalstrahlung können zur Schätzung der diffusen PAR-Komponente eingesetzt werden, wenn keine Messungen verfügbar sind. Obwohl die Validierung in Schweden durchgeführt wurde, kann die Gesamtmethodik in ähnlicher Weise auf andere Länder angewendet werden (ebd.). Optische Simulationen im Feldmaßstab zeigen, dass die Nahinfrarot-(NIR)-Strahlung effektiv auf ein PV-Modul

umgeleitet werden kann, wobei die PAR-Strahlung, die die Pflanzen erreicht, nur begrenzt beeinträchtigt wird (Vitoshkin, et al. 2022).

In Indien wurde an einer vertikalen, bifazialen APV-Anlage untersucht, wie sich die Strahlenverteilung, die Temperaturänderung und Ertragsänderung bei der Silizium-Heterojunction-Technologie (SHJ) gegenüber PERC verhält (Vijayan 2022). Es wurde festgestellt, dass durch die gemeinsame Nutzung eines kleinen Teils des Spektrums durch die Paneele und die Pflanzen sowohl der Energie- als auch der Ernteertrag verbessert werden können (ebd.).

Reinigung

Eine Herausforderung beim Betrieb von PV-Paneele kann je nach Region und Umweltbedingungen die Notwendigkeit von Wartung und Reinigung sein. Die Wirkung einer selbstreinigenden, photokatalytischen, antireflektierenden Glasbeschichtung auf die Effizienz von PV-Paneele wurde in Arabatzis, et al. (2016) untersucht. Die optischen und photokatalytischen Eigenschaften der Beschichtung wurden bestimmt. Es wurde eine erhöhte Lichtdurchlässigkeit im Bereich des sichtbaren Lichts und eine verbesserte Selbstreinigung des beschichteten Glases im Vergleich zu unbeschichtetem Glas nachgewiesen. Die Haftung und die Stabilität der Beschichtung wurden unter den Bedingungen von Temperaturschwankungen, UV-Strahlung und Sandstrahlen getestet. Die Leistung beschichteter und unbeschichteter PV-Paneele und -Anlagen im Freien wurde über mehrere Monate unter verschiedenen Klimabedingungen (Griechenland und China) überwacht, um die durch die Beschichtung erzeugte zusätzliche Energie zu messen. In beiden Fällen wurde über den gesamten Zeitraum ein durchschnittlicher Gewinn von 5-6 % festgestellt. Die Effizienz der beschichteten Paneele sowie das kostengünstige Sprühverfahren ohne Nachbehandlung machen die Beschichtung besonders für nördliche Regionen mit begrenzter Sonneneinstrahlung wichtig (ebd.).

Solarzellentechnologie

Bei den weltweit installierten APV-Systemen werden meist konventionelle, undurchsichtige PV-Module verwendet, die eine Veränderung des Mikroklimas unter den Paneele verursachen, die bei hohen Verschattungsgraden kritisch wird (Gorjian, et al. 2021). Immer häufiger werden semitransparente PV-Module (STPV) eingesetzt, um dieses Problem zu entschärfen. Hierfür werden semitransparente Technologien auf der Grundlage von kristallinem Silizium (c-Si) geprüft, sowie Dünnschicht-PV, organische PV (OPV), Farbstoffsolarzellen (DSSC), konzentrierende PV (CPV) und lumineszierende Solarkonzentratoren (LSC) in offenen (Ackerland) und geschlossenen (Gewächshäuser) APV-Systemen (Abbildung 23). Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass c-Si-STPV-Module aufgrund ihrer extremen Vorteile wie niedrige Kosten, hohe Stabilität und hohe Effizienz im Vergleich zu anderen Technologien den höchsten Anteil am Einsatz in APV-Systemen haben, während in der Literatur nur selten über den Einsatz von Dünnschicht-STPV-Modulen berichtet wird. Darüber hinaus bieten STPV-Module mit

OPVs und DSSCs die Möglichkeit, wellenlängenselektive Transparenz zu erreichen, so dass die PAR durchgelassen wird, während das übrige Spektrum zur Stromerzeugung genutzt wird. Andere potentielle Lösungen sind CPVs und LSCs, bei denen diffuses Licht für das Wachstum von Kulturpflanzen zur Verfügung steht, während direktes, konzentriertes Sonnenlicht Strom erzeugen kann. Obwohl sich STPV-Module als praktikable Lösung für den Einsatz in APV-Systemen erwiesen haben, sind noch weitere Entwicklungen im Hinblick auf die Steigerung der Effizienz der Module und die Senkung der Kosten erforderlich, während die Reaktion der Kulturpflanzen noch eingehender untersucht werden muss, um diese Technologie zu einer tragfähigen, nachhaltigen Lösung für die Zukunft zu machen (ebd.). Der optimale Wert der PV-Integration sollte so gewählt werden, dass die Photosynthese im Vergleich zur unverschatteten Version um weniger als 10% reduziert wird (Villar-Fernández, et al. 2022). In diesem Fall könnten 38% der Gesamtfläche durch kristallines Silizium (c-Si) abgedeckt werden, während bei Perowskit der Anteil 53% erreicht. Aufgrund des höheren Wirkungsgrades erzeugen c-Si-Module jedoch mehr Jahresenergie (178 kWh/m²) als die halbtransparente Perowskit-Modulkonfiguration (114 kWh/m²) (ebd.).

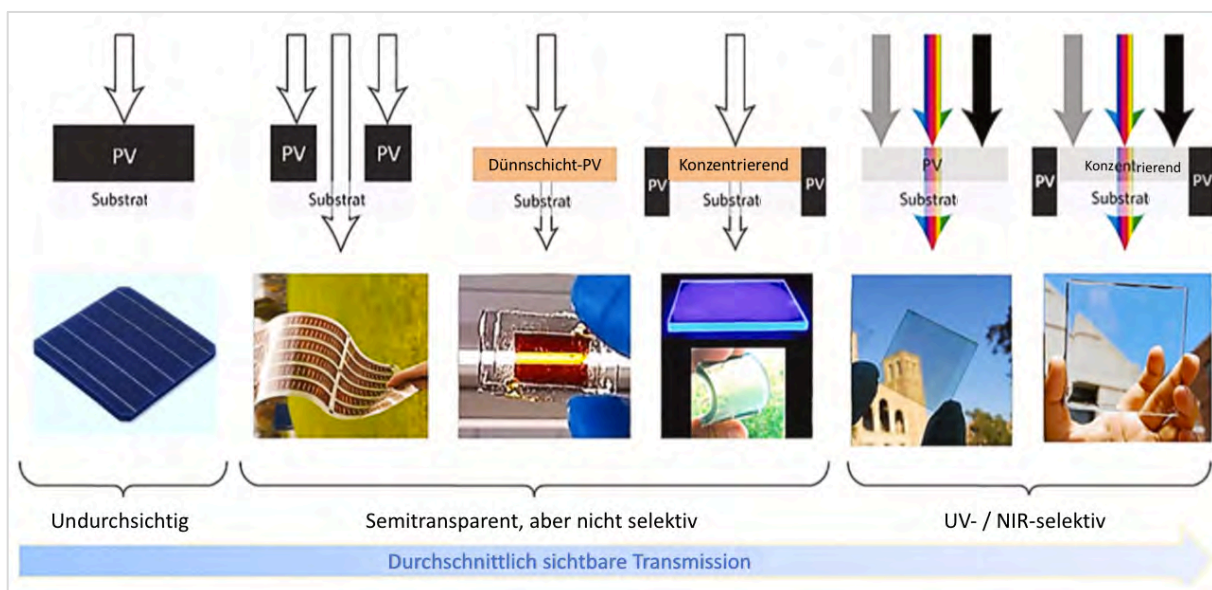


Abbildung 23: Variation der durchschnittlich sichtbaren Transmission für verschiedene (un-)durchsichtige, nicht-selektive und UV/NIR-selektive PV-Zelltechnologien (Gorjian, et al. 2021).

THEIA-Module (Transparenz- und Hocheffizienzmodule) werden aktuell in einem Projekt in der Schweiz untersucht, bei dem Erdbeeren und Himbeeren und APV angebaut und mit Erd- und Himbeeren unter Folientunneln verglichen werden (Petri, et al. 2022). Die Wahl von bifazialen Modulen führte zu einem jährlichen Zusatzstromertrag von 4 %, der die höheren Anschaffungskosten aufwiegt und die wirtschaftliche Leistung verbessert (Petri, et al. 2022). Der bifaziale Gewinn wurde durch das Vorhandensein von Bäumen um bis zu 50 % reduziert, was die Notwendigkeit eines standortspezifischen Umgebungs- beziehungsweise Verschattungsmodells verdeutlicht. Neben der Transparenz spielt auch die Anordnung der

Modulzellen eine wichtige Rolle. Es zeigte sich, dass ein speziell entworfenes Modul, bei dem die Zellen oberhalb des Baumes akkumuliert sind ("block inside") im Durchschnitt einen um 7% geringeren Energieverlust aufweist als ein Modul mit gleichmäßig verteilten Zellen und gleicher Transparenz. Die Analyse ergab, dass der Hauptgrund für die verbesserte Leistung in der Zunahme des Lichts liegt, das die vertikalen Ebenen des Baums erreicht (Bousi, et al. 2022). Derartige Schattenmodelle gilt es zu untersuchen, indem die Modultransparenz und Zellanordnungen simuliert werden, um damit die potentiellen Auswirkungen vorhersagen zu können und die Anlage optimal auszulegen (Esmaeilzad, et al. 2022). Schattenmodelle gehören zu den weltweiten Forschungsfragen, wobei vier prägnante Tage im Jahr gewählt werden, um Projekte miteinander vergleichen zu können (Santra et al. 2022, Ross-Rucker 2022).

Nachführung

Im Rahmen des „Symbizon“-Projekts werden Tracking-Algorithmen entwickelt, die sowohl den Pflanzenertrag als auch den Stromertrag optimieren sollen (Burgers, et al. 2022). Die Bodenbestrahlungsstärke wird in den landwirtschaftlich bewirtschafteten Flächen simuliert und der jährliche Stromertrag ermittelt. Dafür wird der Algorithmus zur Bestimmung des Nachführwinkels in Abhängigkeit von den Bedingungen variiert, einschließlich des Sonnenstandes und der Strahlungsintensität auf den Paneelen oder dem Boden. Diese Werte werden anschließend mit anderen Tracking-Systemen und Referenzflächen ohne PV-Anlage verglichen. Die Bodenbestrahlungsstärke beträgt für alle untersuchten Algorithmen mindestens 60 % der Bestrahlungsstärke des Streifenbaus mit einmaliger Nutzung (Abbildung 24). Darüber hinaus variiert die Stromproduktion des APV-Systems zwischen 20 % und 66 % einer optimierten PV-FFA. Dieses Modell soll künftig auch eine pflanzenoptimierte Nachführung untersuchen (Abbildung 24, ebd.). Derartige Untersuchungen werden auch im Rheintal (Schweiz) durchgeführt, wobei hier der Fokus auf der Pflanzenoptimierung liegt (Gfüllner, et al. 2022). Eins der ersten Ergebnisse stellt heraus, dass die Bewässerung neben der Bestrahlung der wichtigste Faktor zur Optimierung der Pflanzen ist (ebd.).

Die unterschiedlichen Antriebe zur Nachführung von Modulen wurden in einer Studie in der Türkei anhand von verschiedenen statischen und dynamischen Systemen untersucht (Cengiz, et al. 2016). Es wurde festgestellt, dass die Stromerzeugungskapazität aus der Sonne in Regionen mit hohen Durchschnittstemperaturen viel mehr gesteigert werden kann, wenn intensive Solarenergiesysteme wie das Stirlingmotorsystem verwendet werden, für das die Anwendung erfolgt (ebd.).

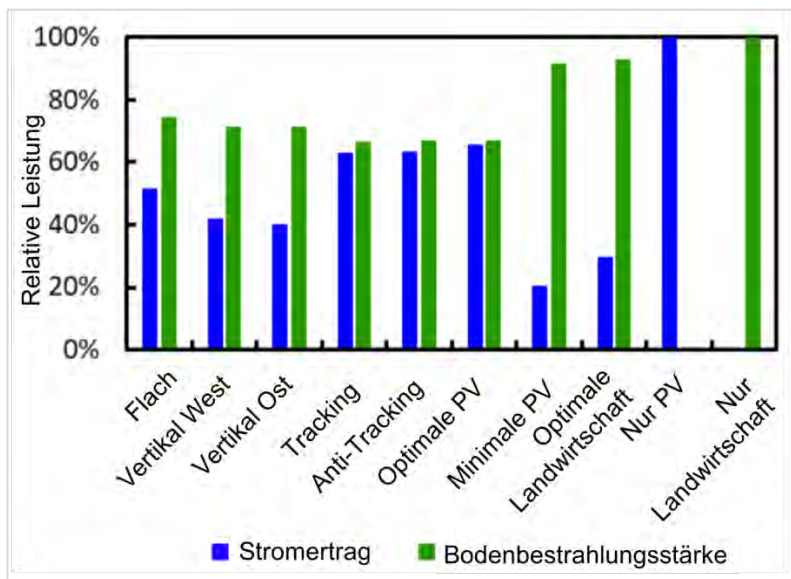


Abbildung 24: Energieertrag (blau) und Bodenbestrahlungsstärke (grün) für verschiedene Tracking-Algorithmen, relativ zu "nur PV" und "keine PV" (Burgers, et al. 2022).

In Frankreich wurden vier APV-Anlagen auf den veränderten Stromertrag aufgrund des Mikroklimas untersucht (Héraud, et al. 2022). Forschungsbestand waren eine Tracking-APV-Anlage, drei unterschiedlich ausgerichtete, feststehende APV-Anlagen. Unter der Anlage wurde Getreide, Leguminosen und Ölpflanzen angebaut. Es wurde festgestellt, dass das Mikroklima den monatlichen Stromertrag beeinflusst, je nach angebaute Kultur, saisonal unterschiedlich (ebd.).

Werden die Anlagen entsprechend des Mikroklimas unterhalb der APV-Anlage gesteuert, so gilt es zu beachten, dass die Lufttemperatur ein ungenaues Ergebnis des Mikroklimas darstellt. Ein genaueres Ergebnis bietet die Messung an verschiedenen Punkten der Blattkronen, da hier die Durchmischung in der Luft geringer ist (Chopard, et al. 2022).

Technische Integration in das Landschaftsbild

Um das Aussehen von Photovoltaikmodulen für die ästhetische Integration in die Landschaft zu optimieren, werden Textilien und andere handelsübliche Materialien auf die Vorderseite von PV-Modulen laminiert (Gewohn, et al. 2018). Dieser Ansatz ist in hohem Maße variabel, da jedes dünne UV-stabile Textil verwendet werden kann. Der durch das Textillaminat verursachte Kurzschlussstromdichteverlust beträgt 6-11% bei einem weißlichen Erscheinungsbild. Textilien können auf jedes Standard-PV-Modul laminiert werden. Durch die Verwendung handelsüblicher Materialien und Maschinen ist diese Methode wahrscheinlich kosteneffizient und leicht verfügbar und stellt damit auch eine Möglichkeit zur besseren Integration in das Landschaftsbild dar, indem beispielsweise grüne Textilien verwendet werden (ebd.).

In einer weiteren Studie wurde untersucht, wie sich eine bestehende PV-FFA in eine APV-Anlage umwandeln ließe, indem zwischen die bestehenden Modulreihen Bäume in einer

Hecke gepflanzt werden (Fernández-Ahumada, et al. 2022) (Abbildung 25). Es wurde festgestellt, dass es einen Bereich gibt, in dem die Pflanzen die Kollektoren nicht verschatten und damit die Energieproduktion nicht beeinflusst wird. Wachsen die Bäume über diesen Bereich hinaus, wird der Stromertrag durch die Verschattung reduziert (ebd.).

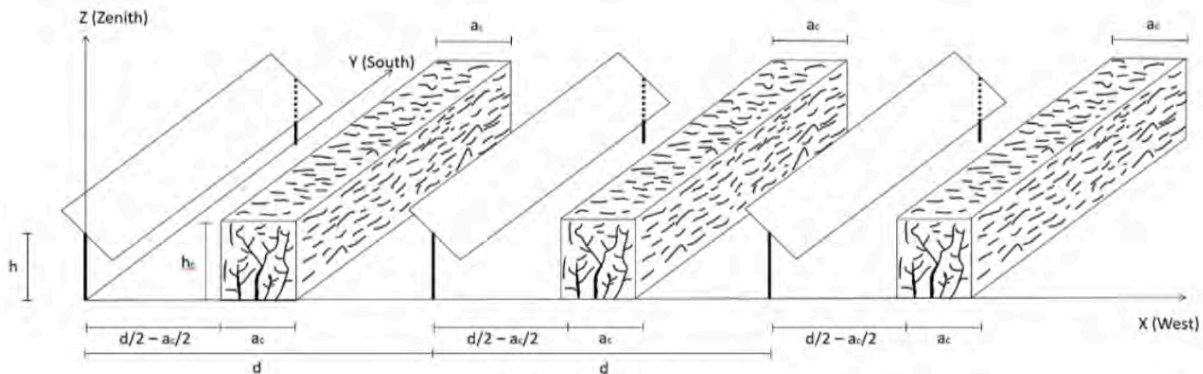


Abbildung 25: Umwandlung einer PV-FFA in eine APV durch Pflanzung von Baumkulturen zwischen den Modulreihen (Fernández-Ahumada, et al. 2022).

Die Auswirkungen der Flächenbelegungsichte der Module auf den Ertrag zeigen, dass sich die optimale Dichte bei verschiedenen Anordnungen erheblich unterscheiden kann (Alam und Butt 2022). Besteht das Ziel darin, die gesamte Nahrungsmittel- und Energieproduktion zu maximieren, liefert eine geringere Anlagendichte bessere Ergebnisse, sofern die Verfügbarkeit von Landflächen nicht eingeschränkt ist. In diesem Fall ist eine höhere Flächenbelegungsichte wünschenswert, wenn die Landnutzung für Nahrungproduktion maximiert werden soll. Der Rückgang der Ernteerträge und der Verschattungsverlust der Module muss unter den von der lokalen Politik festgelegten akzeptablen Grenzen liegen (vgl. DIN-SPEC91434). Um die wirtschaftliche Leistung zu maximieren, hängt die optimale Anlagendichte vom Wert der Feldfrüchte, den Landkosten und der Einspeisevergütung ab. Bei niedrigen Flächenpreisen und hochwertigen Kulturen kann eine geringere Anlagendichte rentabler sein. Das Gegenteil ist der Fall bei geringwertigen Kulturen und hohen Flächenpreisen, für die eine höhere Moduldicke erwünscht ist, und die Einspeisevergütung deutlich höher sein kann (ebd.).

Stromertragsoptimierung

Für die Weiterentwicklung von APV-Anlagen gilt es, diese möglichst zu optimieren und effizient zu gestalten. Hierfür sind viele verschiedene Faktoren notwendig, die erforscht werden müssen, um anschließend optimiert werden zu können (Herbig, et al. 2022).

Angesichts der sich abzeichnenden Vielfalt von monofacialen und bifacialen APV-Systemen hat das Fehlen einer standardisierten, kulturspezifischen Kennzahl zur Bewertung der Effizienz der Strahlungsaufteilung die Optimierung und Bewertung der Leistung von APV-Systemen erschwert (Riaz, et al. 2021). Die Einführung einer neuen Metrik - der Lichtproduktivitätsfaktor (LPF) -, der die Effektivität der gemeinsamen Nutzung der Bestrahlungsstärke für eine

bestimmte Kultur und das Design der PV-Anlage bewertet, ermöglicht es, optimale Design-Parameter zu identifizieren. Hiermit eingeschlossen sind die räumliche PV-Anlagendichte, die Panelausrichtung und die einachsigen Nachführsysteme, die speziell auf die PAR-Bedürfnisse der Kultur abgestimmt sind. Definitionsgemäß ist LPF gleich 1 für reine PV- oder reine Anbausysteme. Die APV-Systeme verbessern den LPF zwischen 1 und 2, je nach Verschattungsempfindlichkeit der Pflanze, der Konfiguration des PV-Systems und der Jahreszeit. Während herkömmliche Systeme mit fester Neigung den LPF deutlich über 1 erhöhen, wurde festgestellt, dass der LPF bei schattentoleranten Pflanzen mit einem APV-Tracking-System, das auf einem einachsigen Sonnennachführsystem basiert, bei 2 liegt. Unter den Systemen mit fester Neigung ist die bifaziale, vertikale APV-Anlage mit Ost/West-Ausrichtung vielversprechend, da sie bei schattenempfindlichen Kulturen die geringsten Schwankungen im saisonalen Ertrag erzeugt und gleichzeitig einen LPF bietet, der mit dem der PV-FFA mit Nord/Süd-Ausrichtung vergleichbar ist (ebd.).

Die Produktivität der Landwirtschaft kann durch die Integration von APV und die Digitalisierung und Vernetzung der Regelungstechnik (IoT – Internet of Things) verbessert werden, um den Landwirten die Arbeit zu erleichtern (Faizi, Verma und Madhwal, et al. 2022). Das Netzwerk wird durch die Verbindung eines automatischen Bodenfeuchtesensors, einer Bodenbewässerung und einer Solarpanelreinigung durch eine Solarpumpe zusammen mit einem ferngesteuerten Stromüberwachungssystem aufgebaut. Ein Flussdiagramm und Konzept wurden erstellt, um die Landwirtschaft zu optimieren zusammen mit dem IoT und APV (ebd.).

Hohe Temperaturen, denen das PV-Modul bei heißem Wetter ausgesetzt ist, reduzieren die Leerlaufspannung und damit den Wirkungsgrad (Sultan, Farhan und ALRikabi 2021). Es gibt zwei untersuchte Methoden zur Kühlung: Wasserkühlung und Luftkühlung. Die Luftkühlung erfolgt mit Hilfe eines Gleichstromventilators, der auf der Rückseite des PV-Moduls angebracht wird. Die Wasserkühlung kann auf zwei verschiedene Arten erfolgen: (1) Aluminiumstücke werden zur Kühlung (Wasserkühlungsblöcke) auf der Rückseite des PV-Moduls angebracht und (2) perforierte Kupferrohre werden zum Sprühen von Wasser auf der Vorderseite des PV-Moduls angebracht. Die Ergebnisse zeigen, dass die Verwendung der Sprühwasserkühlung die höchste Effizienzsteigerung im Vergleich zu anderen Techniken (Wasserkühlblöcke und Gleichstromlüfter) darstellt und bei hohen Modultemperaturen effektiver ist (ebd.).

Durch die Kombination von Bodenbedeckungsgrad und Panelhöhe ist es möglich, die Bestrahlungsstärke, die von den Pflanzen empfangen wird und ihre Heterogenität zu optimieren und sicherzustellen, dass das erzeugte Mikroklima für die Entwicklung der Pflanzen unter der Agri-Photovoltaik-Solaranlage geeignet ist (Mallet, et al. 2022). Um die Synergie des Systems besser bewerten zu können, wurde außerdem ein Steuerungsalgorithmus für die Photovoltaik-Paneele mit Hilfe von Mikroklimasimulationen für die wichtigsten Entwicklungsstadien der Kultur sowie die damit verbundenen elektrischen Produktionsverluste ermittelt (ebd.).

Albedo

Hinzu kommt, dass durch die sich aufgrund der Fruchtfolge jährlich ändernden Pflanzen und der saisonalen Wachstumsunterschiede innerhalb eines Jahres die Albedo in ständiger Veränderung ist (Boujdaini, et al. 2022). Dadurch entstehen Unsicherheiten bei der Simulation des Energieertrages. Die Albedo von grünem Gras beträgt typischerweise 14%, während sie bei den meisten in Europa vorkommenden Pflanzen im Bereich von 10-25% liegt. Die Albedo der Vegetation ist auch in hohem Maße spektral selektiv, was hauptsächlich auf die Photosynthese der Pflanzen zurückzuführen ist. Zusätzlich zu den spektralen Schwankungen weist die Albedo von nacktem Boden und Vegetation eine anisotrope Winkelverteilung auf. Eine 3D-Methode wird auf die Bewertung der einfallenden und reflektierten Bestrahlungsstärke am Boden und an den PV-Modulen angewendet. Sobald das Einstrahlungsprofil für jede PV-Zelle der APV-Anlage und für jedes 10-minütige Zeitintervall des Jahres ermittelt wurde, wird die Einstrahlung mithilfe eines PV-Simulationsmodells, das die PV-Umwandlungsverluste im gesamten System berücksichtigt, in PV-Leistung umgewandelt. Für die meisten dieser Energieverluste können Standardsimulationsroutinen verwendet werden. Dadurch lassen sich die Unsicherheiten bei der Berechnung des möglichen Energieertrages reduzieren (ebd.).

Ökonomie

Für die Realisierung eines APV-Projektes ist eine positive Wirtschaftlichkeit notwendig, daher existieren verschiedene Studien zur Untersuchung und Optimierung dieser in Deutschland und auch anderen Ländern, wie beispielsweise China (Chalgynbayeva und Bai 2022). Die Gewinne der Stromproduktion sind generell ein Vielfaches höher als die Gewinne der Pflanzenproduktion. Dass dennoch die Optimierung der Pflanzenerträge im Vordergrund stehen sollte, wurde oben bereits erläutert und wird beispielhaft am Anbau von Reis unter APV beschrieben. In typischen Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen wird die Auswirkung der Pflanzenerträge nicht berücksichtigt. In der Studie der Autor*innen Ahmed et al. (2022) wurde jedoch die PAR als Maß für die Pflanzenproduktion anstelle des wetterabhängigen Erntemodells betrachtet und auch die standortspezifische Variabilität untersucht. Verschiedene Bankparameter wie Zinssatz, Inflationsrate und Diskontsatz, sowie die Material- und Arbeitskosten für die Installation von PV-Anlagen wurden in Bangladesch in die ökonomische Betrachtung einbezogen, ebenso die lokale Einspeisevergütung und der Verkaufspreis von Reis, der von der lokalen Regierungspolitik abhängig ist. Ein dreistufiger technisch-ökonomischer Modellierungsrahmen analysierte die Effizienz und Wirtschaftlichkeit des APV-Systems für die Lebensmittel- und Energieproduktion. Als Ergebnis wurde festgestellt, dass die Energieerzeugung pro Flächeneinheit aufgrund der höheren Investitionsmöglichkeiten und des Nettogewinns aus der PV einen größeren Einfluss auf den wirtschaftlichen Ertrag eines APV-Betriebs hat als die Reisproduktion. In der Regel ist die Planung einer dichteren PV-Anlage (selbst bei drastisch reduzierter Reisproduktion) in einem APV-System wirtschaftlich vorteilhafter. Das bedeutet, dass es auf

politischer Ebene eine Mindestanforderung für die Reisproduktion geben sollte, um die Ernährungssicherheit zu gewährleisten, wenn APV-Konfigurationen angenommen werden sollen. Bei Beibehaltung von 90 % (oder 80 %) der konventionellen Reiserzeugung kann der Gesamtgewinn 22-115 (oder 30-132) Mal höher sein als beim konventionellen Reisanbau ohne APV (Ahmed, et al. 2022).

Ähnliches wurde auch im Weinanbau in Indien untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass der wirtschaftliche Wert der Weinbaubetriebe, die die vorgeschlagenen agrivoltaischen Systeme einsetzen, im Vergleich zum konventionellen Anbau um mehr als das 15-fache steigen kann, wobei die gleiche Traubenproduktion beibehalten wird (Malu, et al. 2017). Wenn diese Doppelnutzung von Land in ganz Indien umgesetzt wird, kann sie einen erheblichen Einfluss auf die Wirtschaft haben, indem sie über 16.000 GWh Strom erzeugt. Dies entspricht einem Potential um den Energiebedarf von mehr als 15 Millionen Menschen in Indien zu decken. Darüber hinaus kann die auf Trauben basierende APV in ländlichen Gebieten eingesetzt werden, um die Elektrifizierung von Dörfern zu ermöglichen (ebd.).

Organische Agri-Photovoltaik

APV-Folientunnel auf der Grundlage organischer PV können künftig eine wichtige Rolle in der Landwirtschaft einnehmen (Meitzner, et al. 2022). Sie können insbesondere in warmen, trockenen Klimazonen ihr volles Potential entfalten, da in diesen Regionen das Pflanzenwachstum in der Regel nicht durch das verfügbare Licht, sondern durch Faktoren wie Hitzestress und Wasserverfügbarkeit begrenzt wird. Halbtransparente, organische Solarzellen mit verschiedenen transparenten Elektroden zeigen, wie unterschiedliche Elektrodenkonstellationen zu einer Verringerung des Wärmezufusses durch die Sonneneinstrahlung führen können, während gleichzeitig ein hoher Zufluss von Photonen im photosynthetisch aktiven Teil des Sonnenspektrums möglich ist. Solche Elektroden können die Leistung der halbtransparenten Solarzelle selbst weiter steigern, da sie im NIR-Spektralbereich, in dem die Solarzelle absorbiert, als Reflektoren wirken (ebd.). Die Optimierung der elektrischen und optischen Eigenschaften wird auch mit Hilfe von Modellierungen genutzt, um die besten Betriebsbedingungen für die Solarzellen zu finden (Madalaimuthu, et al. 2022). Es wird theoretisch ein Wirkungsgrad von 17% vorhergesagt. Unterstützt wird dieser Vorschlag durch die Existenz einer Reihe von organischen Verbindungen, die bereits eine gute spektrale Kompatibilität mit dem typischen photosynthetischen Wirkungsspektrum von Chloroplasten aufweisen. Es ist zu hoffen, dass die Entwicklung weiterer, geeigneter Materialien durch diesen Forschungsversuch angestoßen und befruchtet wird (Meitzner, et al. 2020).

Das Potential der Integration von OPV-Modulen in ein Gewächshaus (AgrOPV) für den Tomatenanbau wird vielerorts untersucht. Basierend auf den Ergebnissen früherer Experimente (Friman-Peretz, et al. 2020) wurden in einem Forschungsprojekt in Israel die OPV-Module

innerhalb des Gewächshauses und nicht außerhalb installiert, um eine Beeinträchtigung durch Windkräfte und die Ansammlung von Staub und Tau zu vermeiden. Es konnte gezeigt werden, dass die OPV-Module ausreichend Sonnenstrahlung in einem Spektralbereich durchlassen, der das Wachstum von Tomatenpflanzen ermöglicht und gleichzeitig Strom erzeugt, wobei die Module offensichtlich langsamer als in der vorherigen Studie degradiert werden (ebd.).

Regenwassermanagement

Als potentielle Nutzungsmöglichkeiten des gesammelten Regenwassers in den APV-Systemen wurden ermittelt: die Bewässerung der Pflanzen, zur Grundwasseranreicherung und zur Säuberung der Module (Rößner 2022). Besonders bietet sich die Möglichkeit zur Installation von HighTech-Bewässerungssystemen, die vom erzeugten Solarstrom betrieben werden (Rößner, 2022a).

Tabelle 11: Literaturrecherche APV - Bereich "Systemkomponenten" (eigene Darstellung, WP = wissenschaftliches Paper mit Peer-Review, W = wissenschaftliches Paper ohne Peer-Review; EP = empirische Primärdaten, SP = Sekundärdaten und Metastudien).

	Autor(en)	Journal / Bericht	Titel	Jahr	Validität	Datentyp	DOI / URL	Anlagentyp	Thema	Keywords
74	B. Willockx; B. Herteleer; J. Cappelle	37th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition	Techno-Economic Study of Agrovoltaic Systems Focusing on Orchard Crops	2020	WP	EP	DOI: 10.4229/EUPV-SEC20202020-6DO.14.2	APV	3D-Systemmodellierung	Bsp. Birnenanlage
75	L. Fernández-Ahumada; M. Varo-Martínez; R. López-Luque; J. Ramírez-Faz; J. Gómez-Uceda; F.J. Casares de la Torre	AgriVoltaics 2022	New Tracking / Backtracking Strategy for Agrivoltaic Plants with N-S Horizontal Solar Trackers and Tree Crop in Hedge.	2022	W	EP	https://cms2022.agrivoltaics-conference.org/file/display_attachment/f904aa3f30b48b88d4d78067d1f24c7?filename=Luis+Ma-nuel+Fern%C3%A1ndez+de+A-humada+-+Abstract.pdf	APV	Agroforst-Tracking	Hecken, MPP mit zeitl. Wachstum
76	H. Alam; N. Butt	AgriVoltaics 2022	Selection of Optimal Module Array Density for Agrivoltaic Systems	2022	W	EP	https://cms2022.agrivoltaics-conference.org/file/display_attachment/61f310be30e52f1fd0c66b3afaea7ff?file-name=Nauman+Butt+-+Paper.pdf	APV	Anlagendichte	Untersuchung Ernte-, Stromertrag nach Belegungsdichte
77	M. Faizi; A. Verma; D. Madhwal; V. Jain	AgriVoltaics 2022	Internet of Things for Smart Agrivoltaics System: AV-IoT	2022	W	EP	https://cms2022.agrivoltaics-conference.org/file/display_attachment/716267a97d26d54e2cff258397b6ffc?file-name=Mohd+Adil+Faizi+-+Abstract.pdf	APV	Automation	Bodensensoren, Bewässerung, Solarpanelreinigung
78	M. Balz; M. Frank; A. Schweitzer; M. Bohn	AgriVoltaics 2022	Low-Cost Long-Span AgriPV Prototype for Large-Scale Application	2022	W	EP	https://cms2022.agrivoltaics-conference.org/file/display_attachment/b78fff245b66bc04d861af7d303e16a?filename=Mar-kus+Balz+-+Abstract.pdf	APV	Baukastensystem	Optimierung großflächige Anlage

	Autor(en)	Journal / Bericht	Titel	Jahr	Validität	Datentyp	DOI / URL	Anlagentyp	Thema	Keywords
79	S. Ma Lu; S. Zainali; P. Campana; B. Stridh; A. Avelin	AgriVoltaics 2022	Decomposition Models for Photosynthetically Active Radiation Agrivoltaic Systems Solar Radiation Assessment	2022	W	EP	https://cms2022.agrivoltaics-conference.org/file/display_attachment/517d84b4d6b09120dd0bd37ab8435ec?filename=Silvia+Ma+Lu+-+Abstract.pdf	APV	Berechnung Solarstrahlungsverteilung	Berechnung PAR, Verteilung Solarstrahlung
80	I. Arabatzis; N. Todorova; I. Fasaki; C. Tsesmeli; A. Pappas; W. Li; Z. Zhao	Elsevier - Solar Energy	Photocatalytic, Self-Cleaning, Antireflective Coating for Photovoltaic Panels: Characterization and Monitoring in Real Conditions	2016	WP	EP	http://dx.doi.org/10.1016/j.soler.2017.10.088	PV	Beschichtung PV-Module	antireflektierend, selbstreinigend, photokatalytisch
81	T. Schauppenlehner; K. Bittner; M. Baumgaringer-Seiringer	AgriVoltaics 2022	Large-Scale AgriVoltaics Visualisations for Assessing Landscape Impacts and Social Acceptance	2022	W	EP	https://cms2022.agrivoltaics-conference.org/file/display_attachment/62785de3cedc87909328f3e00d4d790?filename=Thomas+Schauppenlehner+-+Abstract.pdf	APV	Design, Akzeptanz	Visualisierungsansatz durch Programm, Akzeptanzsteigerung
82	T. Sultan; M. Farhan; H. Alrikabi	IICESAT	Using Cooling System for Increasing the Efficiency of Solar Cell	2021	WP	EP	doi:10.1088/1742-6596/1973/1/012129	PV	Effizienz Kühlung	Wirkungsgrad erhöhen
83	A. Villar-Fernández; J. Montes-Romero; L. Ruiz-Torres; A. Manzaneda; F. Almonacid; E. Fernández	AgriVoltaics 2022	Global Investigation of Different Transparent PV Materials for Maximizing Agrivoltaics.	2022	W	EP	https://cms2022.agrivoltaics-conference.org/file/display_attachment/b9ab2d402fbd5ae58b32df71bd85ea9?filename=Antonio+Villar+Fern%C3%A1ndez+-+Abstract.pdf	APV	Ertrag	Photosynthese und Photovoltaik, Verschattung
84	A. Burgers; E. Tonnaer; C. Kooij; B. Aken	AgriVoltaics 2022	Optimised Tracker Algorithm Enables an Agri-PV Plant with Organic Strip Farming and Solar Electricity Generation	2022	WP	EP	https://cms2022.agrivoltaics-conference.org/file/display_attachment/424ea00391fe1e3df2d7c32db08b24c?filename=Bas+Van+Aken+-+Paper.pdf	APV	Ertragsoptimierung Tracking	Stromertrag und Erntertrag, Tracking Pflanze UND Strom

	Autor(en)	Journal / Bericht	Titel	Jahr	Validität	Datentyp	DOI / URL	Anlagentyp	Thema	Keywords
85	L. Gföllner; O. Muller; M. Meier-Grüll; C. Jedmowski; M. Berwind	AgriVoltaics 2022	Yield Optimization Through Control Strategies in Tracked Agrivoltaic Systems	2022	W	EP	https://cms2022.agrivoltaics-conference.org/file/display_attachment/5f583e5a078743fde9361d4d05ad7b3?filename=Leon-hard+Gf%C3%BClner+-+Abstract.pdf	APV	Ertragsoptimierung Tracking	Photosynthese und Photovoltaik
86	C. Kutter; B. Bläsi; H. Wilson; T. Kroyer; M. Mittag; O. Höhn; M. Heinrich	35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition	Decorated Building-Integrated Photovoltaic Modules - Power Loss, Color Appearance and Cost Analysis	2018	WP	EP	DOI: 10.4229/35thEUPV-SEC20182018-6AO.8.6	PV	Farbmodule	BIPV, Leistungsverlust, Ökonomie, Farb-, Strukturänderung
87	T. Gewohn; S. Blankemeyer; M. Vogt; H. Schulte-Huxel; M. Köntges; B. Lim; C. Schinke; R. Brendel	35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition	Laminated Textiles Enabling Custom Appearance of Building Integrated Photovoltaic Modules	2018	WP	EP	DOI: 10.4229/EUPV-SEC20202020-6DO.12.3	PV	Farbmodule	BIPV, Design, farbliche Anpassung Module
88	M. Riaz; H. Imran; H. Alam; M. Alam; N. Butt	Creative Commons	Crop-Specific Optimization of Bifacial PV Arrays for Agrivoltaic Food-Energy Production - The Light-Productivity-Factor Approach	2021	W	EP	https://doi.org/10.48550/arXiv.2104.00560	APV	Lichtproduktivitätsfaktor	Einordnung APV - Vergleichsansatz zwischen APV-Systemen
89	I. Boujdaini; R. Bruhwiler; J. Robledo; B. Sarr; J. Leloux; F. Lebeau	AgriVoltaics 2022	3D Irradiance and Energy Yield Simulation for Agrivoltaics in Greenhouses with Bifacial Photovoltaic (PV) Modules	2022	W	EP	https://cms2022.agrivoltaics-conference.org/file/display_attachment/61194071f11c5e64840d30283653df0?filename=lbra-him+El+Boujdaini+-+Abstract.pdf	APV	Lichtverteilung	Reflexion, Modellierung, Albedo, Alterungssimulation
90	H. Vitoshkin; G. Mittelman; S. Baron; B. Shalom; I. Halperin; E. Ravishankar; R. Hernández; A. Kribus	AgriVoltaics 2022	Agrivoltaic Field with Spectral Splitting Collectors: Performance Modeling and Lab-Scale Experimental Results	2022	W	EP	https://cms2022.agrivoltaics-conference.org/file/display_attachment/309e73d139d918ff22aae11a46636a5?filename=Helen+Vitoshkin+-+Abstract.pdf	APV	Lichtverteilung	Photosynthese und Photovoltaik

	Autor(en)	Journal / Bericht	Titel	Jahr	Validität	Datentyp	DOI / URL	Anlagentyp	Thema	Keywords
91	P. Campana; J. Scragg; B. Stridh; S. Zainali; S. Ma Lu; S. Amaducci; M. Colauzzi	AgriVoltaics 2022	Validation of High Spatial Resolution of Photosynthetically Active Radiation Distribution under Agrivoltaic Systems	2022	W	EP	https://cms2022.agrivoltaics-conference.org/file/display_attachment/e5bf7f91cc1d5bb95e61202e23e5aa0?filename=Brecht+Willockx+-+Abstract.pdf	APV	Messung	Birnenplan- tage, Senso- ren, PAR, Wind, Temp, Ertrag
92	I. Boujdaini; R. Bruhwylter; J. Robledo; B. Sarr; J. Leloux; F. Lebeau	AgriVoltaics 2022	Agrivoltaics with Vertical Bifacial Photovoltaic (PV) Modules: Irradiance and Energy Yield Modelling with Lusim	2022	W	EP	https://cms2022.agrivoltaics-conference.org/file/display_attachment/16868d540ffb2941f3edccb851471b6?filename=lbra-him+El+Boujdaini+-+Abstract.pdf	APV	Modellierung Strahlung, Ertrag	Albedo, Strahlungs- verteilung,
93	S. Gorjian; E. Bousi; O. Ozdemir; M. Trommsdorff; N. Kumar; A. Anand; K. Kant; S. Chopra	Elsevier - Renewable and Sustainable Energy Reviews	Progress and Challenges of Crop Production and Electricity Generation in Agrivoltaic Systems Using Semi-Transparent Photovoltaic Technology	2021	WP	EP	https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112126	APV	Module	Vergleich Modultypen (semitrans- parent, Dünnschicht, C-Si, OPV, etc.)
94	J. Teng; C. Soh; S. Devihosur; R. Tay; S. Jusuf	Sustainability - MDPI	Effects of Agrivoltaic Systems on the Surrounding Rooftop Microclimate	2022	WP	EP	https://doi.org/10.3390/su14127089	APV	Modulertrag	Verduns- tungsrate, Mikroklima PV
95	S. Reker; J. Schneider; C. Gerhards	Elsevier - Smart Energy	Integration of Vertical Solar Power Plants into a Future German Energy System	2022	WP	EP	https://doi.org/10.1016/j.segy.2022.100083	APV verti- kal	Netzintegration	Vertikale Deutschland, Netz, Spei- cher, Ersatz fossile Kraft- werke
96	A. Chalgybayeva; A. Bai	AgriVoltaics 2022	Analyzing Potential and Economic Effects of Agrophotovoltaic with the Key Influencing Factors		WP	EP	https://cms2022.agrivoltaics-conference.org/file/display_attachment/aca055af85660988bb921e76be6d9f2?filename	APV	Ökonomie	Investitions- kostenana- lyse

	Autor(en)	Journal / Bericht	Titel	Jahr	Validität	Datentyp	DOI / URL	Anlagentyp	Thema	Keywords
97	S. Schindele; M. Trommsdorff; A. Schlaak, T. Obergefell; G. Bopp; C. Reise; Christian Braun; et al.	Elsevier - Applied Energy	Implementation of Agrophotovoltaics - Techno-economic Analysis of the Price-performance Ratio and its Policy Implications	2020	WP	EP	https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114737	APV	Ökonomie	Fraunhofer Ökonomie, Zusammenhang Kosten APV - LW,
98	M. Hopf; K. Wydra; M. Trommsdorff	Fraunhofer ISE, FH Erfurt	Agri-Photovoltaik im Apfelanbau - Eine Wirtschaftlichkeitsanalyse am Fallbeispiel eines Bio-Obsthofes in Rheinland-Pfalz	2021	WP	EP	/	APV	Ökonomie Apfel	Anlage Gelsdorf
99	M. Ahmed; M. Khan; A. Haque; M. Khan	Applied Energy 323 (2022) 119560	Agrivoltaics Analysis in a Techno-Economic Framework: Understanding Why Agrivoltaics on Rice will always be profitable	2022	WP	EP	https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119560	APV	Ökonomie PV + Pflanzenertrag	Reisanbau
100	P. Malu; U. Sharma; J. Pearce	Sustainable Energy Technologies and Assessments	Agrivoltaic Potential on Grape Farms in India	2017	WP	EP	doi: 10.1016/j.seta.2017.08.004	APV	Ökonomie Weinanbau	Untersuchung Weinanbau Indien
101	A. Feuerbacher; T. Herrmann; S. Neuenfeldt; M. Laub; A. Gocht	Renewable and Sustainable Energy Reviews	Estimating the Economics and Adoption potential of Agrivoltaics in Germany using a Farm-Level Bottom-Up Approach	2022	WP	EP	https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112784	APV	Ökonomie, Potential	Okonomie, Vorteile Landwirte, Potential Deutschland
102	P. Campana; B. Stridh; S. Amaducci; M. Colauzzi	Mälardalen University	Optimization of Vertically Mounted Agrivoltaic Systems	2021	WP	EP	https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129091	APV	Optimierung vertikal	Optimierungsmodell vertikale APV: Verschattung, Pflanzen-, Stromertrag
103	R. Grimberg; M. Teitel; S. Ozer; A. Levi; H. Vitoshkin; E. Ziffer; F. Geoola; S. Gantz; et al.	AgriVoltaics 2022	Effect of Semi-Transparent OPV Modules Installed Inside Greenhouses on Microclimate and Crops	2022	W	EP	https://cms2022.agrivoltaics-conference.org/file/display_attachment/3d2e9ac39cdccf11267907261ff79aa?filename=Roei+Grimberg+-+Abstract.pdf	APV	OPV	Gewächshaus, Optimierung Alterung

	Autor(en)	Journal / Bericht	Titel	Jahr	Validität	Datentyp	DOI / URL	Anlagentyp	Thema	Keywords
104	R. Meitzner; J. Madalaimuthu; A. Anand; M. Islam; U. Schubert; H. Hoppe	AgriVoltaics 2022	Multifunctionality of Semi-Transparent Organic Solar Cells for Agrivoltaics Applications	2022	W	EP	https://cms2022.agrivoltaics-conference.org/file/display_attachment/c3eb2c873e84bb9c321dc809c35d7e2?filename=Jose+Prince+Madalaimuthu+-+Abstract.pdf	APV	OPV	Polytunnel, Photosynthese und Photovoltaik, Entwicklung, Optimierung
105	J. Madalaimuthu; C. Ugokwe; R. Meitzner; A. Anand; M. Islam; Z. Xu; U. Schubert; H. Hoppe	AgriVoltaics 2022	Optimization of Organic Solar Cells for AgrOPV	2022	W	EP	https://cms2022.agrivoltaics-conference.org/file/display_attachment/d4c05abdba21fa2fd5707241d3f3be98?filename=Jose+Prince+Madalaimuthu+-+Abstract.pdf	APV	OPV	Modellierung Photosynthese, Photovoltaik, Optimierung, Entwicklung
106	R Meitzner; U. Schubert; H. Hoppe	Advanced Energy Materials	Agrivoltaics—The Perfect Fit for the Future of Organic Photovoltaics	2020	WP	EP	DOI: 10.1002/aenm.202002551	OPV	Organische APV (GWH, Polytunnel)	Organische APV, Gewächshäuser
107	C. Mikovits; T. Krexner; I. Kral; A. Bauer; T. Schauppenlehner; M. Schönhart; E. Schmid; J. Schmidt	AgriVoltaics 2022	Combined Simulation of Electricity and Crop Outputs of AgriVoltaic Systems	2022	W	EP	https://cms2022.agrivoltaics-conference.org/file/display_attachment/ee25c73d071d74acc95b5d1527b3244?filename=Christian+Mikovits+-+Abstract.pdf	APV	Potential	Software-Simulation, DGM, Strahlung
108	H. Dinesh; J. Pearce	Renewable and Sustainable Energy Reviews	The Potential of Agrivoltaic Systems	2016	WP	EP	DOI: 10.1016/j.rser.2015.10.024	APV	Potential, Ökonomie	Vgl. Energie-, Ernteertrag
109	M. Cengiz; M. Mamiş; Y. Yurci	Bitlis Eren University Journal of Science and Technology	Cost Comparison of Constant and Tracking System PV Panels with Stirling Motor-Operated Systems	2016	WP	EP	DOI: 10.17678/beujst.92728	PV / Tracking	PV - Tracking, Historie	PV-Potential Welt, Türkei, Geschichte, Kosten, vgl. Tracking - feststehend
110	J. Rößner	AgriVoltaics 2022	Possible Uses for Rainwater in Agrivoltaic Systems - Overview, Research and Development Potential	2022	W	EP	https://cms2022.agrivoltaics-conference.org/file/display_attachment/e8dd76131441ce2d76046d46e51060e?filename=Johanna-Viktoria+R%C3%B6%C3	APV	Regenwassermanagement	Nutzungsmöglichkeiten, Status Quo

	Autor(en)	Journal / Bericht	Titel	Jahr	Validität	Datentyp	DOI / URL	Anlagentyp	Thema	Keywords
111	J. Rößner	WCPEC-8, 8th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion	Rainwater Management in Agrivoltaic Systems	2022	WP	EP	https://www.agrisolarclearinghouse.org/rainwater-management-in-agrivoltaic-systems-research-development-potential/	APV	Regenwassermanagement	Regenwasser
112	F. Gross; M. Balz; S. Gayler; T. Weber	AgriVoltaics 2022	Development of APV Simulation Tool	2022	W	EP	https://cms2022.agrivoltaics-conference.org/file/display_attachment/60e17fa642b4d1fd4866376d7ecd369?filename=Fabian+Gross+-+Abstract.pdf	APV	Simulation	Programmentwicklung
113	A. Mallet; A. Martinez; S. Héraud	AgriVoltaics 2022	Solar Sharing - Optimization of Agrivoltaics Solar Plant Sizing using Numerical Simulations of Irradiance	2022	W	EP	https://cms2022.agrivoltaics-conference.org/file/display_attachment/7fa05e4a5d588d6c58ec626b90de37f?filename=Antoine+Martinez+-+Abstract.pdf	APV	Simulation	Reihenabstand, Panelhöhe, optimales Wachstum
114	R. Vijayan	AgriVoltaics 2022	Spectral Advantage of Vertical Bifacial AgriVoltaics Systems	2022	W	EP	https://cms2022.agrivoltaics-conference.org/file/display_attachment/49db9ae747c605ff0d6f59574015161?filename=Ramachandran+Ammamet+Vijayan+-+Abstract.pdf	APV	Spektrum -Vertikal	Wellenlängenuntersuchung vertikale
115	S. Héraud; A. Martinez; A. Mallet	AgriVoltaics 2022	Study of the Impact of Crop Development Duration Variability on Agrivoltaic Electrical Production	2022	W	EP	https://cms2022.agrivoltaics-conference.org/file/display_attachment/2d2284e3f77e6b4a5735d0f182b449f?filename=St%C3%A9phane+H%C3%A9raud+-+Abstract.pdf	APV	Stromertragsmessung	Beeinflussung Stromertrag durch Mikroklima, Vgl. FFA
116	R. Hernandez; A. Armstrong, Jennifer Burney; G. Ryan; K. Moore-O'Leary; I. Diédhiou, S. Grodsky; et al.	nature Sustainability	Techno-Ecological Synergies of Solar Energy for Global Sustainability	2019	WP	EP	https://doi.org/10.1038/s41893-019-0309-z	APV	Synergien	Techno-Ökologische Auswirkungen

	Autor(en)	Journal / Bericht	Titel	Jahr	Validität	Datentyp	DOI / URL	Anlagentyp	Thema	Keywords
117	U. Herbig; K. Berger; D. Damjanovic; J. Eizinger; T. Neubauer; U. Pont; T. Schuppenlehner; et al.	AgriVoltaics 2022	PlusIQ - Agri Photovoltaics: Integration as a Path to the Plus-Energy-Quarters	2022	W	EP	https://cms2022.agrivoltaics-conference.org/file/display_attachment/85d7b4d0c0bedc598146147ca896e83?filename=Ulrike+Herbig+-+Abstract.pdf	APV	System-Review	gesamtheitliche Betrachtung
118	L. Svanera; G. Ghidesi; R. Knoche	AgriVoltaics 2022	Comparison Between Tracking and Fixed Agrovoltaico® Systems	2022	W	EP	https://cms2022.agrivoltaics-conference.org/file/display_attachment/1a9741604987e242911e8c891992498?filename=Laura+Svanera+-+Abstract.pdf	APV	Systemaufbau	REM TEC, Seilaufhängung
119	K. Lee; M. Kim; S. Kim; J. Lim; G. Do; S.-Y. Oh; J. Jung	AgriVoltaics 2022	Developing Cost Effective Agriphotovoltaic Structural System with Rain Collecting Means	2022	W	EP	https://cms2022.agrivoltaics-conference.org/file/display_attachment/9d3d3ff949ee7c934f9403b7ade6bd8?filename=Kyoung-Ho+Lee+-+Abstract.pdf	APV	Systemoptimierung	Reduzierung Installationskosten, Wassermanagement
120	S.-I. Lee; J.-H. Lee; Y.-H. Jeong; B. H. Seo; D.-S. Kim; Y.-J. Seo; W. Choi	AgriVoltaics 2022	Standard Model of Agrivoltaic System Considering Structural Safety and Crop Cultivation Conditions	2022	W	EP	https://cms2022.agrivoltaics-conference.org/file/display_attachment/43cd1fdff6106a3e82655d18d62b8fc?filename=Sang-ik+Lee+-+Abstract.pdf	APV	Systemoptimierung	Stabilität bei klimatischen Einflüssen, Wind, Schneefall, Verschattung
121	O. Badelt; R. Niepelt; J. Wiehe; S. Matthias; T. Gewohn; M. Stratmann; R. Brendel; C. von Haaren	Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz	Integration von Solarenergie in die Niedersächsische Energielandschaft (IN-SIDE)	2020	WP	SP	https://www.umwelt.uni-hannover.de/de/forschung/forschungsprojekte/forschungsprojekt-detailansicht/projects/integration-von-solarenergie-in-die-niedersaechsische-energielandschaft-inside/	APV	Systemvergleich, hoch, vertikal, tracking	Vergleich Anlagentypen, Wirtschaftlichkeit

	Autor(en)	Journal / Bericht	Titel	Jahr	Validität	Datentyp	DOI / URL	Anlagentyp	Thema	Keywords
122	J. Chopard; G. Lopez; S. Persello; D. Fumey	AgriVoltaics 2022	Modelling Canopy Temperature of Crops with Heterogeneous Canopies Grown Under Solar Panels	2022	W	EP	https://cms2022.agrivoltaics-conference.org/file/display_attachment/d69f36b25e1f066084d9fdc6c46319e?filename	APV	Temperaturmessung	Temperaturunterschiede Kronendach, Pflanze
123	E. Bousi; L. Gfüllner; M. Hopf; M. Trommsdorff; M. Berwind	AgriVoltaics 2022	Effect of Module Transparency and Cell Layout on the Performance of an Orchard Agrivoltaic System	2022	W	EP	https://cms2022.agrivoltaics-conference.org/file/display_attachment/4d2d2d3b6aa17d24f102d75de2a93ec?filename=E-rion+Bousi+-+Abstract.pdf	APV	Transparenz	Obstanlage
124	D. Petri; J. Levrat; D. Chudy; M. Despeisse; C. Ballif; M. Duchemin; G. Nardin; D. Ziegler; L. Anglade; M. Ackermann; M. Baumann; B. Christ; A. Ancay; C. Carlen	AgriVoltaics 2022	Insolagrín: A Solution for Dynamic Agrivoltaics	2022	W	EP	https://cms2022.agrivoltaics-conference.org/file/display_attachment/34485af9703afd5ac0001588e4bea9e?filename=Delphine+Petri+-+Abstract.pdf	APV	Untersuchung THEIA	Optimierung, Messungen
125	N. Esmailzad; I. Dino; Y. Yıldırım; R. Turan; T. Özden	AgriVoltaics 2022	Shading Effect of Transparent Photovoltaic Panels on Crops Underneath Agrivoltaic Systems	2022	W	EP	https://cms2022.agrivoltaics-conference.org/file/display_attachment/2c62a262a4b534d8c8b405c4fe411a1?filename=Nasim+Seyedpour+Esmailzad+-+Paper.pdf	APV	Verschattung	Bifazial, semitransparent
126	S. Zainali; S. Lu; P. Campana, Bengt Stridh; A. Avelin; S. Amaducci; M. Colauzzi	AgriVoltaics 2022	Shading Factor Modelling for Different Agrivoltaic System Typologies	2022	W	EP	https://cms2022.agrivoltaics-conference.org/file/display_attachment/281e7e62dd700fae0542b62320d97df?filename=Sebastian+Zainali+-+Abstract.pdf	APV	Verschattung	Optimierung Simulationssoftware
127	P. Santra; H. Meena	AgriVoltaics 2022	Whether Variation in Shade of Solar PV Module may be an Important Criterion for Designing Agrivoltaic System?	2022	W	EP	https://cms2022.agrivoltaics-conference.org/file/display_attachment/596b0080d02e2395fbd05260ac252d8?filename	APV	Verschattung	Berechnungsgrundlagen; IN-DIEN!

	Autor(en)	Journal / Bericht	Titel	Jahr	Validität	Datentyp	DOI / URL	Anlagentyp	Thema	Keywords
128	F. Johansson; B. Gustafsson; B. Stridh; P. Campana; et al	Elsevier - Energy Nexus 5	3D-Thermal Modelling of a Bifacial Agri-voltaic Aystem: a Photovoltaic Module Perspective	2021	WP	EP	https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100052	APV	Vertikal (Wärmebild)	Bifazial, vertikal Vgl. mit FFA, konv. Bifazial APV, Wärmebild (CFD-Modell)
129	W. Rucker; D. Birnie	AgriVoltaics 2022	Modelling the Impact of Array Wiring on Electrical Output of Vertical Bifacial Agri-voltaic Installations	2022	WP	EP	https://cms2022.agrivoltaics-conference.org/file/display_attachment/d9b2ba219bdbbb35f05e93bc28752a3?filename=Ross+Rucker+-+Paper.pdf	APV	Vertikal Stromertrag	Reihenabstand, Panelhöhe, optimaler Stromertrag
130	M. Riaz; H. Imran; Y. Alam; N. Butt	IEEE Journal of Photovoltaics	Module Technology for Agrivoltaics - Vertical Bifacial Versus Tilted Monofacial Farms	2021	WP	EP	https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2020.3048225	APV/PV	Vgl. Vertikal - FFA	Leistung, PAR, Ertrag Vgl. FFA - vertikal
131	R. Huwlyer; P. Brunet; G. Dabadie; A. Thiery; J. Chapon; E. Drahi; A. Boukouya; B. Delahaye; C. Jennet; P. Souquet; F. Lebeau	AgriVoltaics 2022	Assessing Windbreak Effect of Vertical Agrivoltaics on the Reduction of Evapotranspiration in Different Climates	2022	WP	EP	https://cms2022.agrivoltaics-conference.org/file/display_attachment/1e6c598e755ed59e7dd96c47cf78ebd?filename=Ro-xane+Bruhwlyer+-+Paper.pdf	APV	Windfang	Modellierung Vor-/Nachteile Windfang

4 Stand der Technik

Die verschiedenen Definitionsansätze von APV-Anlagen haben gezeigt, dass es diverse Klassifikationen von APV gibt und damit eine noch vielfältigere Variation an technischen Modellen. Wie in Kapitel 2.3.2 gezeigt wurde, sollte eine APV-Anlage möglichst eine schützende Funktion für landwirtschaftliche Kulturen darstellen. Demnach benötigt eine APV-Anlage Pfeiler, welche die Module tragen beziehungsweise die „Dach“-Verstrebung stützen. Die Pfeiler sind im Boden verankert. Am Aufbau einer typischen APV-Anlage (Abbildung 26) sind die wichtigsten Kenngrößen definierbar (Trommsdorff, et al. 2021a).

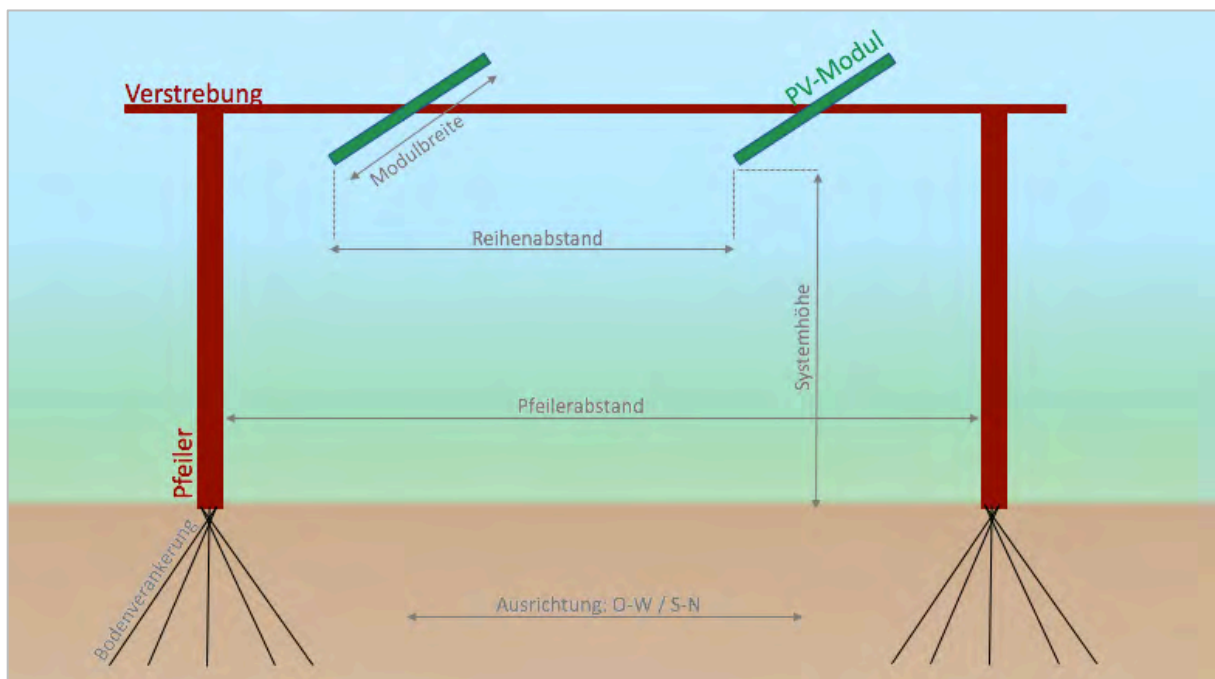


Abbildung 26: Skizzierter Aufbau einer APV-Anlage (Seitenansicht) mit wichtigen Kenngrößen [eigene Darstellung in Anlehnung an Trommsdorff, et al. (2021a)].

Nach den Klassifizierungen kann die Aufständertechnik unterschieden werden. Das Fraunhofer ISE hat dabei eine Einteilung von APV-Anlagen in offene (PV-FFA) und geschlossene Systeme (Gewächshaus-PV) vorgenommen (vgl. Abbildung 27) (Willockx 2020). Bei den offenen Systemen wird unterschieden in die „Zwischenreihen-PV“ und die „Überdach-PV“. Diese können starr, 1- oder 2-achsig nachgeführt sein (vgl. Kapitel 4.1.3). Während die „Zwischenreihen-PV“ auf Grünlandflächen den Anbau von Heu, Silage und die Beweidung durch Tiere umfasst, werden inzwischen auch auf Ackerflächen konventionelle Ackerkulturen (Getreide, Kartoffeln, und weitere) angebaut (Fraunhofer ISE 2022). Die „Überdach-PV“ findet in Pilotprojekten im Ackerbau in den regional üblichen Fruchtfolgen Verwendung, aber auch bei gartenbaulichen Kulturen. Insbesondere für Sonderkulturen (Obstbau, Wein, Hopfen, und weitere) hat sich die Überdach-PV in Deutschland in Pilotprojekten, europaweit aber auch in der kommerziellen Produktion etabliert. Gartenbauliche Kulturen (Gemüse, Kräuter, und weitere)

können sowohl in geschlossenen Systemen (Gewächshäuser) als auch in offenen Systemen (Gartenbau) Anwendung finden (ebd.). Weiterhin gibt es kombinierte Nutzungspotentiale mit Photovoltaik, wie beispielsweise Aquakulturen, Imkerei, Indoor-Farming (beispielsweise Pilze, Fleisch-, Milchprodukte) und die Biodiversitätsphotovoltaik. Hierbei gilt es allerdings klare Grenzen zu konventionellen PV-FFA zu ziehen, um Normen und Förderbedingungen definieren zu können (Trommsdorff, et al. 2020a).

Auch das Ziel der APV-Anlage könnte als Differenzierungsmerkmal verstanden werden: einerseits eine optimale Stromproduktion, eine primär landwirtschaftliche Produktion („Anti-Tracking“) oder ein integriertes System (Hörnle, et al. 2021). Empfehlenswert ist jedoch immer die primär landwirtschaftliche Produktion oder wenigstens ein integriertes System (Wydra, et al. 2022). Diese Spezifikation wird zukünftig auch die Fördermöglichkeiten und das Konzept der APV definieren (vgl. DIN-SPEC91434:2021-05).

Die diversen Systemmöglichkeiten in Kombination mit den verschiedenen technischen Ansätzen werden im Folgenden erläutert. Dies wird in die Systemkomponenten Aufständigung, Module, Fundamentierung und Wassermanagement unterteilt. Weiterhin werden Potentiale zur Landschaftseingliederung und Netzeinspeisung betrachtet.

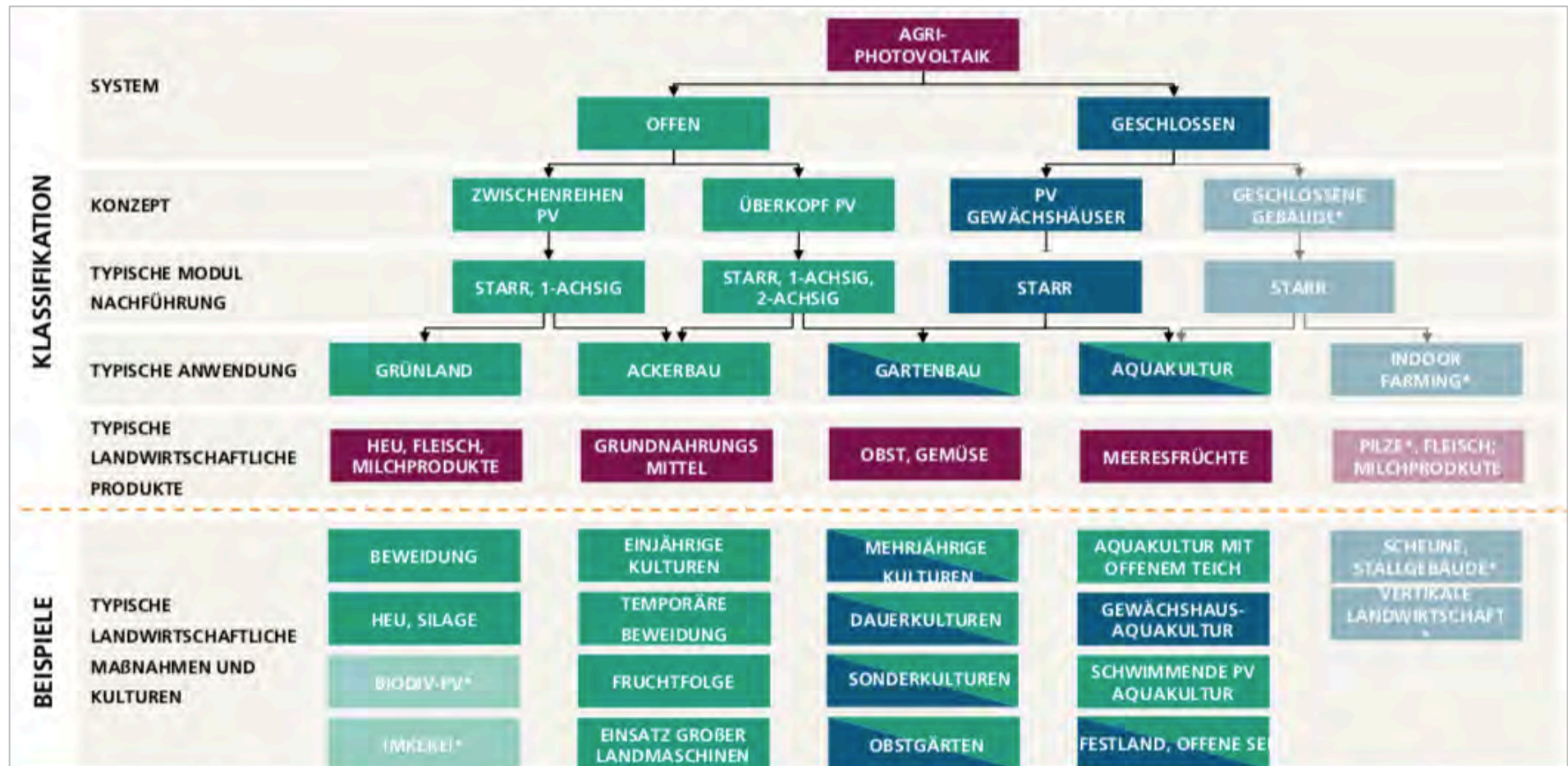


Abbildung 27: Klassifikation und Beispiele von APV-Systemen nach Konzept, Anwendung und Aufständigung, wobei einige Variationen (*) typischerweise nicht als APV eingestuft werden (Willcockx 2020).

4.1 Aufständering

Die APV-Anlage ohne Fundamentierung, Module und potentielle Systemteile (wie beispielsweise Bewässerungstechnik) wird als Aufständering bezeichnet. Diese umfasst die Pfeiler und die (Dach-)Verstrebung der Anlage. Da es hierbei diverse Varianten gibt, soll im Folgenden auf die unterschiedlichen Funktionstechniken eingegangen werden. Die Systematisierung erfolgt anhand der DIN-SPEC91434:2021-05.

4.1.1 Hochaufgeständerte Anlagen / Kategorie I

Kategorie I der DIN-SPEC91434:2021-05 beinhaltet hochaufgeständerte APV-Anlagen. Hoch bedeutet eine lichte Höhe (entspricht der Systemhöhe vgl. Abbildung 26) von über 2,1 m. Es empfiehlt sich die Anlage an die verwendeten landwirtschaftlichen Maschinen anzupassen, sodass eine möglichst äquivalente Bewirtschaftung stattfinden kann im Vergleich zum Zeitraum vor dem Bau der Anlage. Aus diesem Grund weisen die hochaufgeständerten Anlagen im Gartenbau in Deutschland eine durchschnittliche Höhe von 4,1 m auf, sowie im Grünland von 5,1 m und im Ackerbau von 4,6 m, sowie einen durchschnittlichen Reihenabstand von 18,4 m (Ackerbau), 10 m (Grünland) beziehungsweise 11 m (Gartenbau) (vgl. Tabelle 11, Abbildung 28).

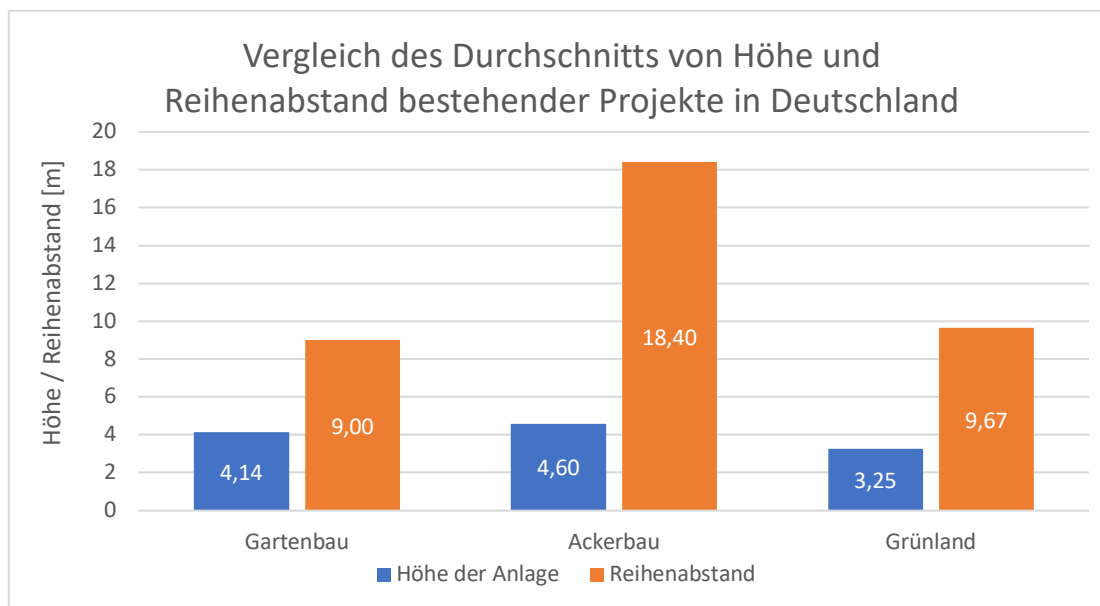


Abbildung 28: Vergleich bestehender Projekte in Deutschland nach durchschnittlicher Höhe und durchschnittlichem Reihenabstand in den Kategorien Ackerbau, Gartenbau und Weide (eigene Darstellung).

An der Aufständering werden die Solarmodule angebracht, die je nach Nutzungsart unterschiedliche Abstände, Ausrichtungen und Winkel aufweisen können (Abbildung 29). Die landwirtschaftliche Fläche wird je nach Reihenabstand, Ausrichtung und Wahl der Module unterschiedlich stark verschattet. Die landwirtschaftlich nutzbare Fläche A_L entspricht der Fläche zwischen den Reihen, also ohne die Flächen der Aufständering (Fraunhofer ISE 2022). Es

entsteht ein Flächenverlust von maximal 10 % (Deutsches Institut für Normung e.V. 2021). Die DIN-SPEC91434 gibt keine Anforderung an die Auswahl der Kultur, daher können die Kulturen frei gewählt werden. In den hochaufgeständerten APV-Anlagen wird jedoch oft nach Ackerbau und Gartenbau unterschieden. Da im Ackerbau größere beziehungsweise breitere Maschinen verwendet werden, sind hier die Reihenabstände und Höhen der Anlage meist größer als im Gartenbau. Im Gartenbau hingegen findet die Bewirtschaftung aufgrund der Kulturen mit kleinerer Maschinerie beziehungsweise manuell statt (vgl. Tabelle 11, Abbildung 28) (Wydra, et al. 2022).

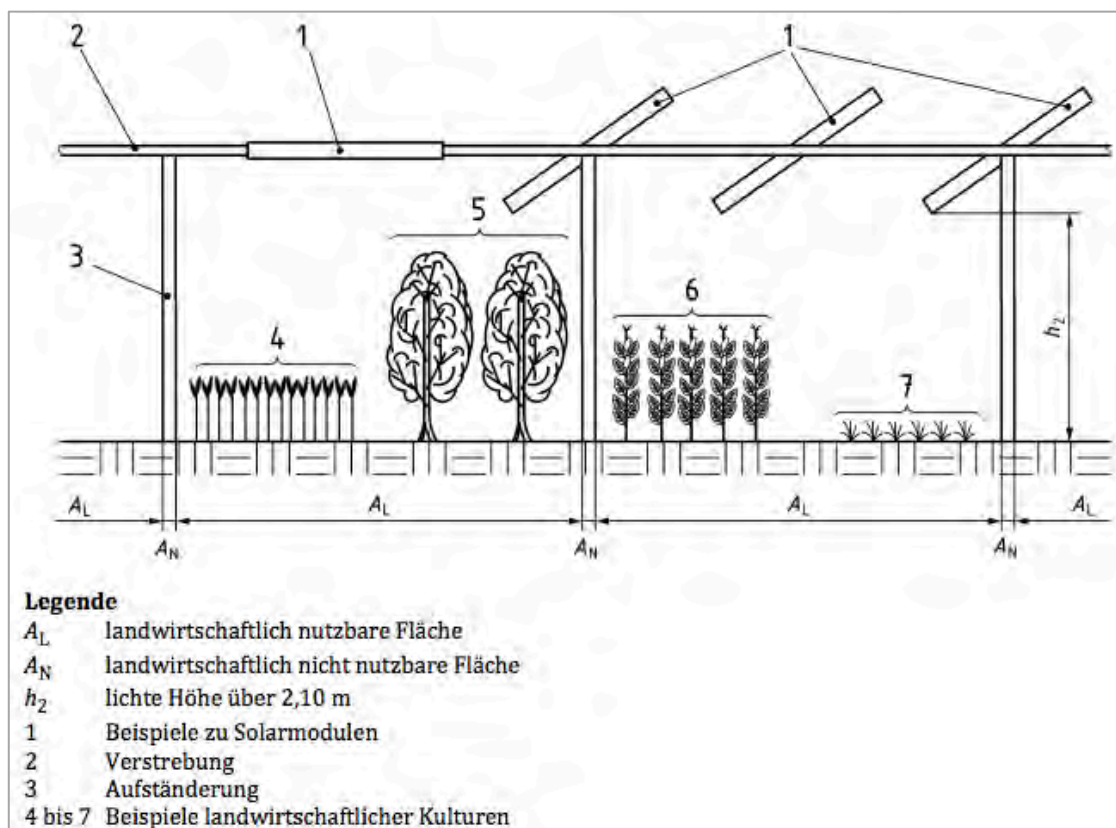


Abbildung 29: Darstellung APV-Anlage Kategorie I nach DIN SPEC 91434 (Deutsches Institut für Normung e.V. 2021).

Wie bereits unter Kapitel 3.6 beschrieben werden immer öfter semitransparente Module verwendet, um eine ausreichende PAR für das Pflanzenwachstum zu gewährleisten (s. Kapitel 4.2.1) (Gorjian, et al. 2021). Damit werden kleinere Reihenabstände zwischen den Modulreihen möglich, wodurch wiederum eine höhere Flächenbelegungsrate der Module (GCR^6) sowie eine höhere LER machbar ist (Fraunhofer ISE 2022, Scharf, et al. 2021). Je höher die Aufständering desto höher ist der Materialaufwand und damit von höheren Investitionskosten auszugehen (s. Kapitel 6), unter anderem da aufgrund der Windlast hohe statische Anforderungen an die Konstruktion entstehen (ebd.).

⁶ **GCR** ist ein Akronym für engl. „ground cover ratio“. Die Flächenbelegungsrate gibt die Belegung der Grundfläche mit Modulen in Prozent an. Eine vollständige Belegung entspricht 100%.

Ein wesentlicher Vorteil hochaufgeständerter Anlagen ist die Schutzwirkung der dachartigen Konstruktion, die die Kulturpflanzen vor Hagel, Starkregen oder Sonnenbrand schützen kann (Badelt, et al. 2020). Ein Verschmutzen der Module durch landwirtschaftliche Tätigkeiten, wie beispielsweise Bodenbearbeitung, Erntestaub und Auswirkungen der Kulturen, wie beispielsweise Blütenstaub, und weitere ist möglich, gilt es aber weiterhin zu untersuchen (vgl. Kapitel 3.6). Der Standort und die standortspezifischen Niederschläge entscheiden darüber, inwiefern eine Reinigung der Module nötig und wirtschaftlich sinnvoll ist.

Im Gartenbau bei sogenannten Sonderkulturen sind die Anlagen oft etwas niedriger aufgeständert. Ausnahmen bilden die hochwachsenden Sonderkulturen wie beispielsweise Hopfen mit einer Höhe von bis zu 7 m (Wydra, et al. 2022). Die Aufständerungen können als Rankbeziehungsweise Leithilfe für angebaute Kulturen verwendet werden, sodass ein Flächenverlust von unter 1 % entsteht, wie beispielweise im Apfelanbau (Abbildung 30) (ebd.).



Abbildung 30: a) APV-Anlage in Kressbronn (BW) mit Sonderkultur Apfel, wobei Teile der Aufständerung als Leithilfen verwendet werden ©BerndSchumacher (Gentner 2022) und b) Schematische Darstellung der Rankhilfe (Vandest und Hemetsberger 2021).

4.1.2 Bodennahe Anlagen / Kategorie II

Eine Bewirtschaftung zwischen den Modulreihen erfolgt bei den sogenannten bodennahen Anlagen (Kategorie II) und beinhaltet alle Anlagen unter einer lichten Höhe von 2,1 m (Deutsches Institut für Normung e.V. 2021). Die Fläche unter den Modulen gilt hier zumeist als landwirtschaftlich nicht nutzbare Fläche (A_N). Ist dennoch eine Bearbeitung direkt unter den Modulen möglich und wird ein Ertrag von mindestens 66 % erreicht, so reduziert sich die Fläche A_N . Dies gilt es jedoch in einem Nutzungskonzept festzuhalten (ebd.). Bei den bodennahen Anlagen sind die Module nicht über den Pflanzen angeordnet und erfüllen damit nicht die

dachartige Schutzfunktion. Die Pflanzen erhalten jedoch einen hohen Lichteinfall, eine Verschattung entsteht in den Vor- und Nachmittagsstunden (vgl. Abbildung 32).

Die Maschinenhöhe wird nicht eingeschränkt, die Reihenabstände können entsprechend der benötigten Maschinenbreite gewählt werden. Es ist kein Regenwasserauffangsystem mit einer Wasserverteilung notwendig, da die Pflanzen uneingeschränkt die Niederschläge nutzen können (Scharf et al., 2021). Bei den bodennahen Anlagen wird ein Flächenverlust von maximal 15 % anberaumt (Deutsches Institut für Normung e.V. 2021). Die geringere Aufständerungshöhe verringert die Kosten der Anlagen der Kategorie II im Gegensatz zu den hochaufgeständerten Anlagen.

Es wird unterschieden zwischen APV-Anlagen der Varianten 1 und 2, bei denen die Solarmodule auf einem oder zwei Pfeilern in einem Winkel zwischen 10° und 60° (Süd-Ausrichtung) beziehungsweise zwischen 0° und 20° (Ost-West-Ausrichtung) fest aufgebaut sind (Variante 1), oder APV-Anlagen, deren Module vertikal (VA) oder mit einem Trackingsystem installiert sind (Variante 2, Abbildung 31).

Bei Variante 1 werden die Module auf einem oder zwei Pfeilern fest installiert (Abbildung 31). Unterhalb der Module ist die Fläche kaum landwirtschaftlich nutzbar (Wydra et al. 2022, Kümpe 2022).

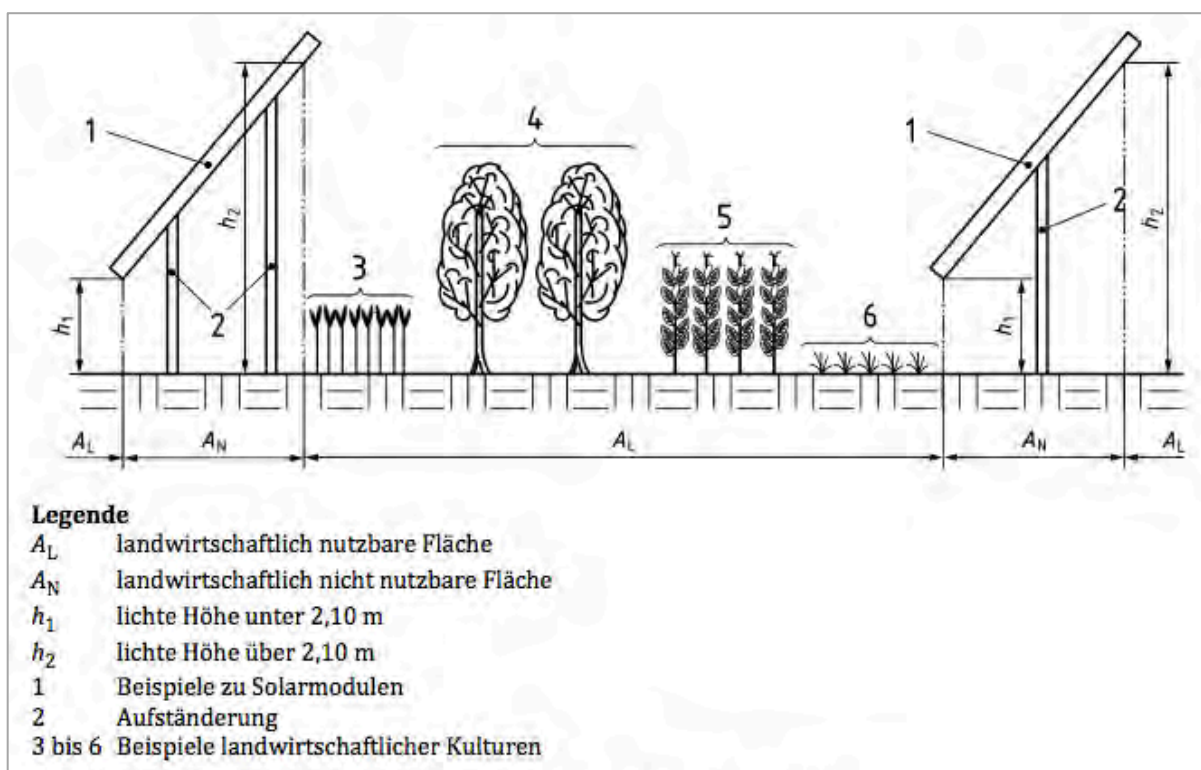


Abbildung 31: Darstellung APV-Anlage Kategorie II, Variante 1 nach DIN SPEC 91434 (Deutsches Institut für Normung e.V., 2021).

Vertikale feststehende oder nachgeführte Anlagen werden häufig im Grünland errichtet (Variante 2, Abbildung 33). Durch die vertikale Ausrichtung erzeugen sie in der Stromproduktion

statt einer typischen „Glockenkurve“ eine „Kamelkurve“ (vgl. Abbildung 32). Die Möglichkeit für eine alternative Stromvergütung beziehungsweise einen günstigeren Netzanschluss entsteht, da die typische Mittagsspitze auf den Vor- und Nachmittag verteilt wird (Reker, et al. 2022, Fuhs 2017).

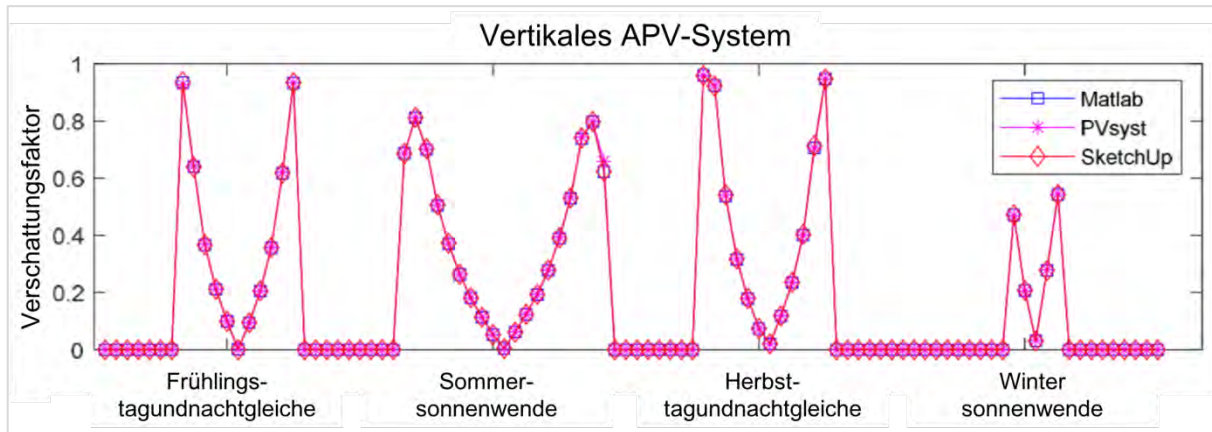


Abbildung 32: Verschattungsfaktor für vertikale APV-Systeme an vier repräsentativen Tagen. Vergleich zwischen Matlab®, PVsyst®- und SketchUp®-Modell (Zainali, Lu, et al. 2022).

Bei vertikalen APV-Systemen werden bifaziale Module (s. Kapitel 4.2.2) verwendet, deren Vorder- und Rückseiten abwechselnd nebeneinander angeordnet sind, wodurch je nach Tageszeit eine gleichmäßige Leistung erzielt wird. In einer Höhe von circa 20-80 cm über dem Boden werden (meist zwei) Module übereinander angebracht (Next2Sun GmbH 2021). Die Oberkante erreicht maximal 3 m Höhe, da größere Höhen wegen verstärkter Windlasten höhere Ansprüche an die Statik aufweisen würden und kostenintensiver wären (ebd.). Statt der „dachartigen“ Konstruktion bilden die vertikalen Anlagen eine Art Wand, die sich als Windfang nutzen ließen und bei Ausrichtung quer zur Hauptwindrichtung an besonders windigen Standorten eine Schutzfunktion bieten. Bei ungünstigen Windrichtungen kann sich aber auch eine Winderosion verstärken. Die mögliche Nachführungsfunktion dieser Module wird im nächsten Abschnitt erläutert.

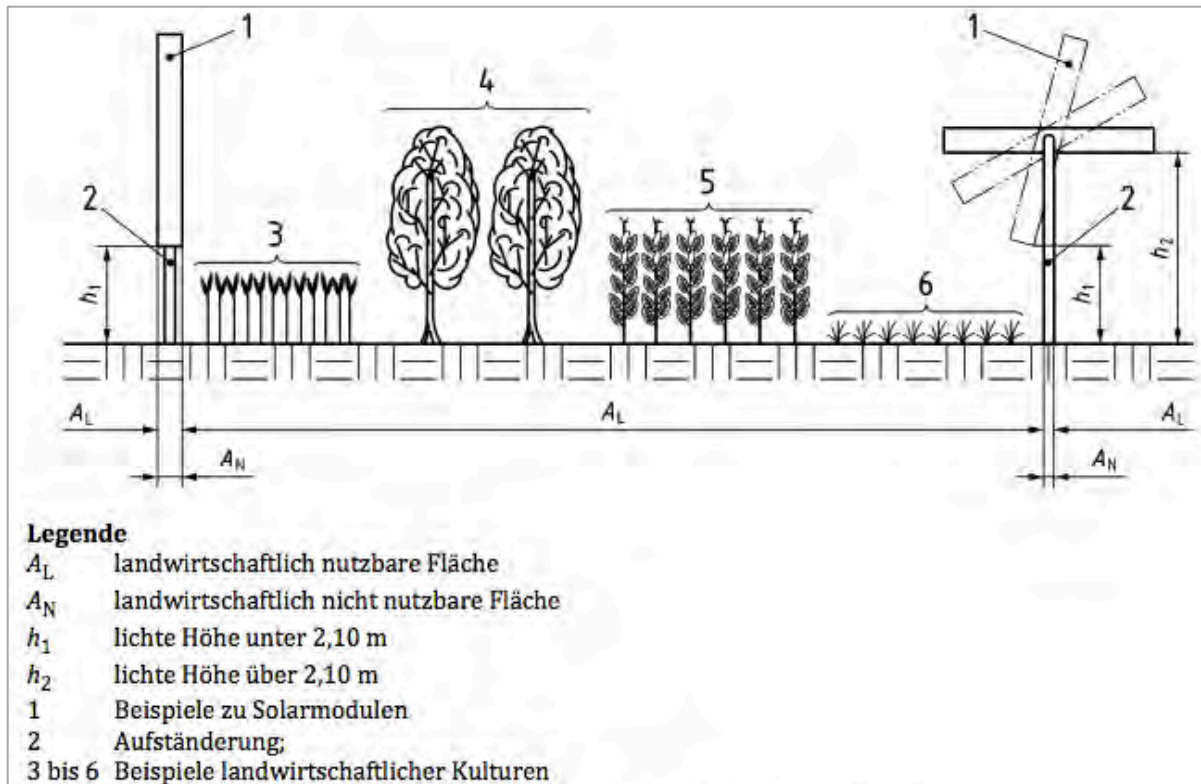


Abbildung 33: Darstellung APV-Anlage Kategorie II, Variante 2 nach DIN SPEC 91434 (Deutsches Institut für Normung e.V. 2021).

4.1.3 Tracking-Systeme

Über „Tracking“-Anlagen ist eine zeitspezifische Regulierung des möglich. Das Unterkonstrukt ist beweglich und lässt sich einachsiger (horizontal oder vertikal) oder zweiachsiger (horizontal und vertikal) entweder dem Sonnenstand nachführen oder kann den Kulturen volle Sonneneinstrahlung ermöglichen. Dadurch ist ein optimales Lichtmanagement möglich. Die beweglichen Modultische können unterschiedliche Mindesthöhen aufweisen und demnach in Kategorie I und II eingeordnet werden (Deutsches Institut für Normung e.V. 2021). Die Pfeilerabstände sollten auch hier den Maschinenbreiten angepasst werden. In beiden Kategorien bestehen keine Unterschiede in den Pfeilerabständen, da die technischen Anlagen bei Bewirtschaftung und Ernte senkrecht gestellt werden können und somit der Pfeilerabstand als maximale Maschinenbreite anzunehmen ist. Die Aufständerung ist auch auf landwirtschaftlichen Flächen mit sehr steiler Hangneigung möglich (Axial Structural Solutions o.J.). Durch die Nachführung der Systeme sind zwischen 30 % und 45 % höhere Stromerträge möglich (Cengiz et al., 2016). Zudem können sogenannte „Mittagsspitzen“ umgangen werden, wenn eine Netzüberlastung droht, indem die Anlagen suboptimal zur Sonne ausgerichtet werden, um die Netzeinspeisung zu reduzieren. Es besteht auch die Möglichkeit, den Trackingalgorithmus entsprechend des Lichtbedarfs der Pflanzen („Anti-Tracking“) anzupassen (Hörnle, et al. 2021). So würden beispielsweise die Module morgens und abends für mehr Lichtverfügbarkeit ausgerichtet und somit würde das PAR-Level der Pflanzen erhöht werden. Dies ermöglicht vor

allein eine saisonale Steuerung der Module, um beispielsweise in kritischen Entwicklungsphasen eine höhere PAR zu gewährleisten, als es mit fixierten Modulen möglich wäre. Dennoch wäre so die Option gegeben, eine höhere GCR zu wählen, da der Lichteinfall spezifisch gesteuert werden kann (Hörnle, et al. 2021). Die unterschiedlichen PAR-Ausbeuten und Leistungspotentiale zwischen Tracking-, Anti-Tracking- und konventionellen APV-Systemen sind in Abbildung 34 dargestellt.

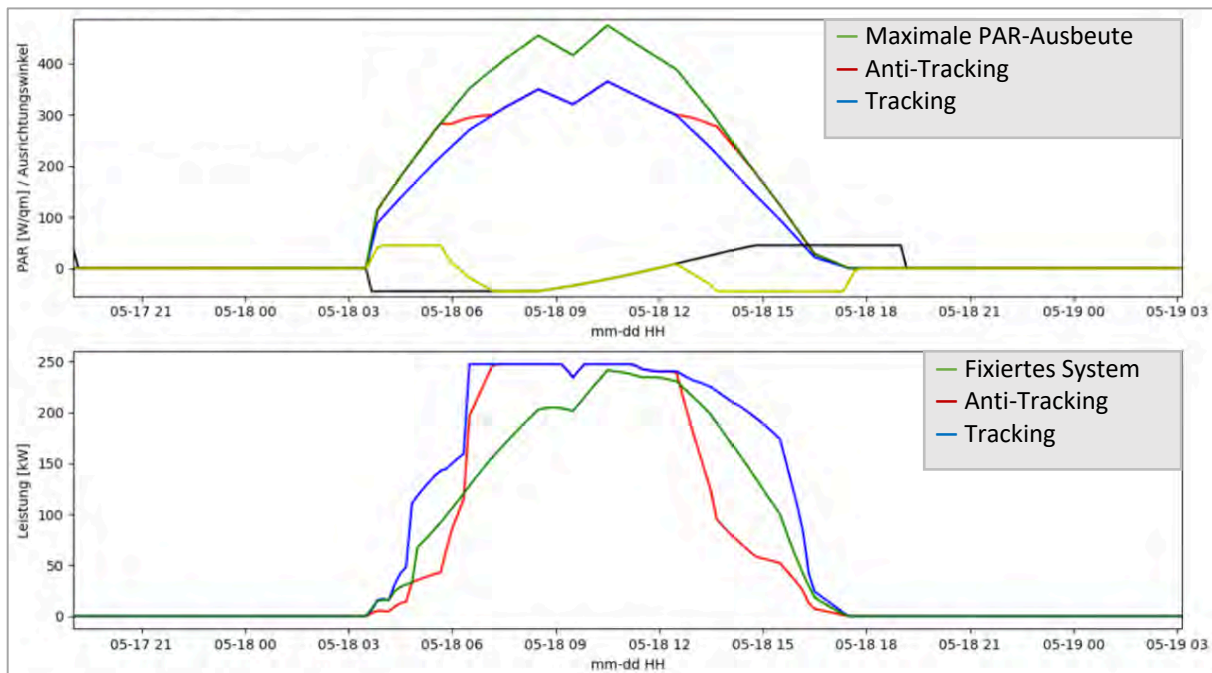


Abbildung 34: Simulation der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) der Pflanzen in den Varianten Tracking, Anti-Tracking und feststehend (oben), sowie die Leistungsverläufe der Module der drei Varianten (unten) [verändert nach Hörnle et al. (2021)].

Der Schutz der Pflanzen vor Umwelteinflüssen ist bei Tracking- beziehungsweise Anti-Tracking-APV-Anlagen besonders erwähnenswert. Durch die Nachführung ist es nicht nur möglich, die Bewirtschaftung der landwirtschaftlichen Fläche zu vereinfachen, den Stromertrag zu regulieren oder die PAR der Pflanzen zu erhöhen, sondern es kann entsprechend der Wetterereignisse auch ein umfassender Schutz der Kulturen vor Hagel, Schneefall, Starkregenereignissen, Frost und Sonnenbrand erfolgen (Abbildung 35) (Vandest und Hemetsberger 2021).

Damit bestehen die Optionen durch (Anti-)Tracking-Systeme (Wydra, et al. 2022):

- die Pflanzen vor Umwelteinflüssen zu schützen
- den Lichteinfall der Pflanzen anzupassen
- das Regenwasser aufzufangen
- Stromproduktion zu Spitzenlastzeiten beziehungsweise Leistungshöhen zu regulieren.

Ein mögliches Problem der nachgeführten Anlagen besteht darin, dass unterhalb der verstellbaren Module ein Kernschatten besteht, der einen Anbau von Kulturen erschwert, wenn kein

Anti-Tracking für diese Zonen vorgesehen ist. Der Flächenverlust wird daher mit maximal 15 % angenommen (Deutsches Institut für Normung e.V. 2021). Weitere Probleme ergeben sich durch den technischen Aufwand. Die beweglichen Teile sind empfindlich gegenüber Verschleiß und Störungen. Daher sind neben den höheren Investitionskosten auch höhere Wartungs- beziehungsweise Betriebskosten zu erwarten (Cengiz et al., 2016).



Abbildung 35: Mögliche Schutzwirkungen der Kulturen durch verschiedene Ausrichtungswinkel bei (Anti-)Tracking-Systemen (Vandest und Hemetsberger 2021).

4.1.4 Innovationen

In Konstruktion und Design eines APV-Systems bestehen eine Vielzahl von Möglichkeiten. Da der Markt der APV international sehr dynamisch ist, werden im Folgenden einige innovativen APV-Systeme vorgestellt.

4.1.4.1 Seilaufhängung

Anstelle einer massiven, statischen Konstruktion kann eine alternative Aufständermöglichkeit mit Seilaufhängung verwendet werden (Abbildung 36). Die Technik der Draht- oder Stahlseile stammt aus der Seilbahntechnik. Ein erheblicher Teil der eigentlich massiven Stahlkonstruktion kann so durch weniger materialaufwändige Seile ersetzt werden. Durch die Seilverbindungen sind Fundamentabstände von bis zu 40 m möglich, welche die Chance bieten, auch große Maschinenbreiten zu verwenden. Für dieses System sind allerdings Module in Leichtbauweise (s. Kapitel 4.2.3) notwendig (Wydra, et al. 2022).

Bei einem in Frankreich installierten System werden seit dem Frühling 2022 Forschungsarbeiten durchgeführt, um das System zu optimieren. Hier ist eine GCR von 40-45% möglich und damit eine Flächenleistung von bis zu 3 MWp pro Hektar, je nach Modulauswahl (TSE 2022) bei einer Höhe von bis zu 5 m und Reihenabständen von 27 m, hier mit Trackingsystem (ebd.).

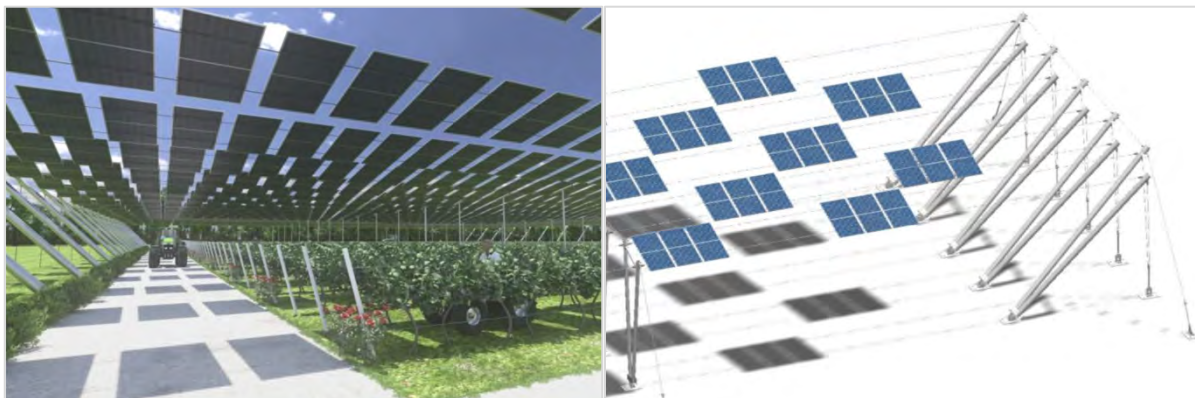


Abbildung 36: Modell einer APV-Anlage mit Seilaufhängung (REM Tec 2022).

Für die Seilkonstruktion inkl. der Aufständering werden circa 10 % der Kosten der massiven Stahl-Aufständering veranschlagt (Badelt et al., 2020). Da Module in Leichtbauweise bisher noch nicht in der Massenproduktion üblich sind, beeinflussen sie die Investitionskosten noch erheblich. Durch verschiedenartige Anordnungen der Module beziehungsweise die Verwendung von semitransparenten Modulen (siehe 4.2.1) kann die Erreichung der notwendigen PAR gewährleistet werden. Damit sind diese Anlagen in Zukunft als wirtschaftlich attraktiv einzustufen (siehe Kapitel 6). Nach Hörnle et al. (2021) sind die Anlagen bezüglich mikroklimatischer und verschattungsbedingter Einflüsse noch zu optimieren. Je nach Anordnung der Leichtbaumodule besteht die Möglichkeit Regenwasser aufzufangen. Bisher wurde bereits eine Pilotanlage in Straßkirchen (Deutschland) mit einem abgespannten Drahtseil-System errichtet (Abbildung 37). Die einzelnen Stahlpfeiler werden hier mit Drahtseilen statisch gesichert.



Abbildung 37: Abgespannte Seilaufhängung einer APV-Anlage in Straßkirchen, Bayern (Krinner Carport GmbH, Harlander, 2021).

Ein anderes Prinzip stellt das Baukastensystem dar, das ähnlich wie ein Zelt funktioniert. Dieses besteht aus Trag-, Vorspann- und Positionierungsseilen, sowie aus Druckstäben. Hier können die Stützpfeiler im Raster von 40 m x 40 m errichtet werden, was sich besonders für große Landmaschinen eignet. Am Schaft der Druckstäbe sind für eine optimale Statik über geeignete Aufnahmevorrichtungen die Tragseile befestigt (parabelförmig nach oben geöffnet). Die Vorspannseile bilden eine nach unten geöffnete Parabel. Die Druckstäbe werden zwischen dem Haupt- und dem Nebentragwerk eingespannt, und die Module auf der Oberseite befestigt. Durch diese Konstruktionsweise entsteht ein stabiles System, welches auch statische Festigkeit gegenüber Wind und anderen Wetterereignissen aufweist.

Von der Firma REM Tec wurden drei verschiedene Seil-APV-Systeme untersucht (REM Tec 2022): ein 3D-Nachführsystem mit Seilaufhängung stellt eine flexible technische Lösung in Bezug auf das Schattenmanagement dar, da die 3D-Nachführeinrichtungen die Kulturen bei Bedarf voll beleuchten können, indem sie die Module parallel zu den Sonnenstrahlen platzieren (Abbildung 38, a). Damit ist der Schatten auf dem Boden dynamischer und ist daher geeignet für jene Kulturen, die während bestimmter Wachstumsperioden viel Licht benötigen. Andererseits erzeugt ein feststehendes System einen Schatten, der vom Sonnenstand abhängt (Abbildung 38, b). Eine sogenannte „Schachbrettkonfiguration“ sorgt für eine bessere Verteilung des Schattens und der täglichen Einstrahlung auf den Boden als eine Streifennachführung und die 3D-Nachführung (Abbildung 38, c). Das feste System muss hauptsächlich in südlicher Richtung aufgestellt werden, während der 3D-Tracker in jeder beliebigen Ausrichtung aufgestellt werden kann, je nachdem, welche für die Pflanzen am besten geeignet ist. Das feste System ist flexibler in Bezug auf das Design, da nicht nur der Abstand zwischen den Reihen an die Pflanzen angepasst werden kann, sondern auch der Abstand zwischen den PV-Modulen entlang der Reihe (Svanera, et al. 2022). Außerdem kann das feste System im Vergleich zum 3D-Tracking-System höheren und unterschiedlichen Neigungen folgen (REM Tec 2022).

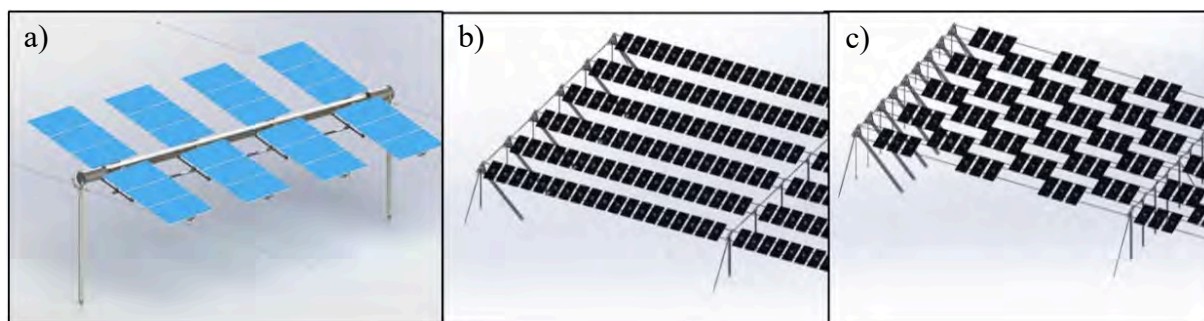


Abbildung 38: Verschiedene APV-Seilsysteme Agrivoltaico®. a) 3D-Nachführsystem, b) feststehendes Streifensystem, c) feststehendes Schachbrettsystem (REM Tec 2022).

4.1.4.2 Faltdachanlagen

Die Verwendung der innovativen Faltdachanlagen bietet die Möglichkeit, die Anlage ein- und auszufahren, beispielsweise bei der Bewirtschaftung oder Ernte des Feldes, bei Schneefall oder Sturm, nachts oder bei Wartungsarbeiten (Abbildung 39). Auch hier werden Module in Leichtbauweise verwendet. Die Unterkante muss eine Mindesthöhe von 2,10 m aufweisen (Deutsches Institut für Normung e.V. 2021). Das Faltdach wird ebenfalls über Draht- oder Stahlseile aufgehängt, sodass auch hier Fundamentabstände von bis zu 40 m möglich sind. Durch Abstandshalter ist das System auch für APV-Anlagen geeignet und bietet die Möglichkeit, auch reihenweise eingefahren zu werden, sodass ein optimales Lichtmanagement gegeben ist. Zudem kann Regenwasser aufgefangen werden und die Durchführung von Reinigungsarbeiten als auch der Feldbearbeitung wird erleichtert. Durch die beweglichen Teile ist, wie auch bei den nachgeführten Anlagen, ein höherer Wartungsaufwand gegeben. Dadurch und da es sich bisher immer um Sonderanfertigungen handelt, sind die Faltdachanlagen aktuell noch sehr kostenintensiv (Monn 2021).



Abbildung 39: Beispiel einer Faltdachanlage mit Solarmodulen, kommerziell bereits über Parkplätzen und Infrastrukturanlagen (DHP, o.J.).

Bei Starkwind kann die Anlage eingefahren werden, sodass potentielle Schäden der Anlage reduziert werden können, was die Ansprüche an die Statik reduziert. Allerdings ist dann auch kein Schutz der Pflanzenkulturen vor Stürmen gewährleistet. Aus Sicht der Stromproduktion wird in Thüringen aktuell von Stromertragsverlusten von unter 1% ausgegangen, wenn bei Windstärken über 15 m/s das Solardach eingefahren würde. Diese Verluste werden jedoch reduziert, wenn die Verluste durch Schneebeleg gegengerechnet werden. In schneereichen Regionen können hier bis zu 3% zusätzlicher Ertrag erwirtschaftet werden. Ein weiterer Vorteil

besteht bei Falтанlagen darin, dass die Anlage bis auf die Unterkonstruktion werkseitig montiert werden kann. Somit wäre eine Neupositionierung der APV-Anlage mit geringerem Aufwand möglich und es werden Kosten beim Auf- und Abbau eingespart. Damit entfällt hier eine Standortbindung über viele Jahre, was auch eine Flexibilisierung in der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung der Fläche ermöglicht. Bei speziellen Solarfaltanlagen werden die PV-Module beim Ein- und Ausfahren aus einer Box gereinigt (Hörnle, et al. 2021).

4.1.4.3 Holzaufständering

Die Aufständering aus Holz anstelle von Stahl zu errichten ist eine innovative Möglichkeit, um den mit der Stahlproduktion verbundenen Ressourcen- und Energieverbrauch und auch den technischen Charakter der Anlage zu verringern (Abbildung 40). Entsprechend auf Haltbarkeit behandelte Holzständer, ggf. mit einem Spinnanker-Sockel im Boden (s.u.), können Verwendung finden (Wydra, et al. 2022).

Hierbei könnten Investitionskosten eingespart werden, wenn beispielsweise unbehandeltes Holz verwendet wird. Es besteht allerdings die Gefahr, dass sich das Holz bei extremen Witterungsbedingungen verdreht oder verzieht, wodurch die Leistung des Systems beeinträchtigt werden kann. Daher gilt es zu beachten, dass eine regelmäßige Kontrolle der Holzaufständering notwendig ist, um potentiellen Verfall des Holzes frühzeitig erkennen und behandeln zu können (Rodriguez 2014). Für flachaufgeständerte PV-Anlagen könnten durch Holzaufständeringen circa 75% der Aufständeringskosten in den USA eingespart werden (Vandewetering, et al. 2022).



Abbildung 40: PV-Anlage mit Aufständering aus behandeltem Holz, Montpellier Frankreich (Toledo und Scognamiglio 2021).

Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass die Aufständering nach dem Rückbau der Anlage unkompliziert recycelt werden kann. In Japan wird zunehmend auf Verwendung von Holzaufständeringen zurückgegriffen, um die lokale Forstwirtschaft zu fördern und die Nachhaltigkeit

der Anlage zu verbessern. Wird das Holz entsprechend behandelt, wird eine Lebensdauer des Holzes von 30 Jahren angegeben (Rodriguez 2014). Einige Installateure verwenden dagegen unbehandeltes Holz und geben eine Lebensdauer von 20 Jahren an. Durch die Verwendung von einheimischem Holz kann die lokale Wirtschaft profitieren. Allerdings gelten Holzaufständerungen als brandgefährdeter als herkömmliche Stahlaufständerungen (ebd.). An einer Anlage in Montpellier, Frankreich, werden Holzaufständerungen und deren Brandgefahr erforscht (Toledo und Scognamiglio 2021, Fraunhofer ISE 2022).

4.1.4.4 Dome-Struktur

Die Errichtung von Dome-Strukturen⁷ wird ursprünglich auf Flachdächern oder Freiflächen angewandt, um eine zügige Montage und eine günstige Aufständerungsmöglichkeit zu gewährleisten. Oft werden diese in Ost-West-Richtung aufgeständert, mit einem Neigungswinkel von 5° bis 10° (Abbildung 41).

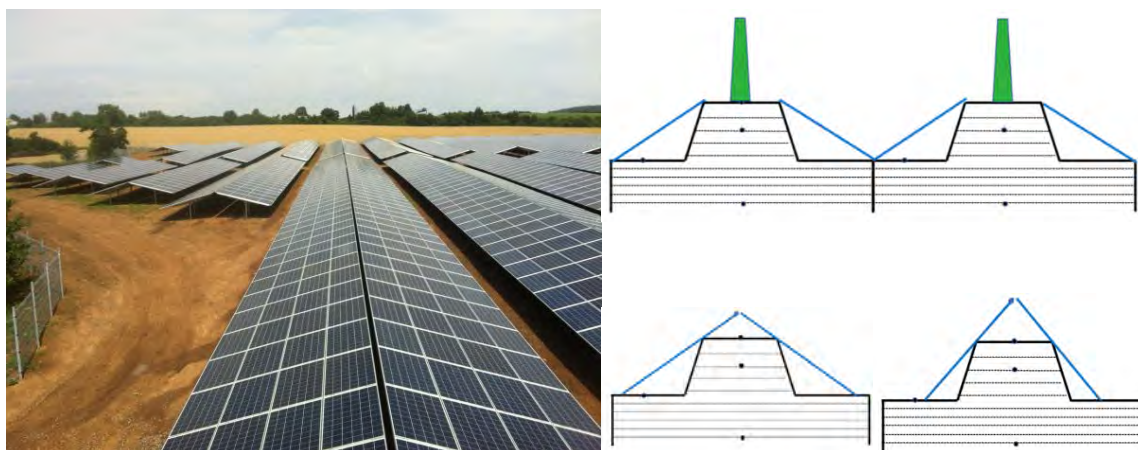


Abbildung 41: Darstellung Dome-Struktur Ost-West-Ausrichtung der Freiflächenanlage in Hölzengraben, Kaiserslautern (IBC Solar 2013) und rechts schematische Darstellung über Spargelkulturen (Willockx, 2020).

Eine Sonderform der Dome-Struktur sind die Faltanlagen auf Rollen (H2arvester 2022). Besonders für Thüringen interessant, bietet sich in der APV die Möglichkeit Dome-Strukturen (auf fahrbaren Gestellen auf Rad-Schienen-Basis) in Feldern über Dämmen mit weißem Spargel aufzubauen. Im November würden die Dämme freigelegt, sodass die Beete umgestaltet oder neu angelegt werden können. Während der Wachstumsperiode benötigt Spargel keinen Licht einfall und profitiert von der Erwärmung durch die dunkle Farbe der Module zwischen den Dämmen. Anschließend werden die Dämme bedeckt durch die Solarmodule bedeckt. Im Sommer werden die Kuppeln zwischen den Beeten errichtet, um das Unkrautwachstum zu verhindern. Eine mobile Anlage auf Rädern wurde kürzlich in den Niederlanden installiert (ebd.).

⁷ Dome-Struktur kommt aus dem Englischen von *dome* für dt. „Kuppel“.

4.1.4.5 Solarbogen

Durch die Integration der Module in die Unterkonstruktion entsteht eine feste Einheit als Solarbogen (Abbildung 42). Dieser ist statisch stabil und bietet die Chance für eine zukünftig kostengünstige APV-Anlage. Durch die statische Konstruktionsweise auf einem integrierten Schienensystem kann der Bogen über große Flächen verschoben werden und bietet damit verschiedene Möglichkeiten zur Beschattung und Belichtung der Pflanzen, als Wetterschutz und zur Bewirtschaftung der Fläche unterhalb der Module. Die Module sind in Ost-West-Richtung mit verschiedenen Neigungswinkeln ausgerichtet. Pfeilerabstände können hier 9 m erreichen beziehungsweise bis zu 20 m² mit Stützpfeilern. Damit lässt sich im optimalen Fall eine Flächenbelegung für eine Stromproduktion von 2 MWp pro Hektar erreichen, zum Beispiel während einer Brachezeit zwischen dem Anbau von Kulturen, oder zur Erhöhung der Stromproduktion im Winter. Auch eine Verwendung in der Tierhaltung ist möglich (Abbildung 42).



Abbildung 42: Solarbogen "Modular Arc System" der Firma GoldbeckSolar mit Tierhaltung (Goldbeck o.J.).

4.1.4.6 Mobile Anlage auf Rädern

Eine weitere Innovation stellt die APV „auf Rädern“ dar, die als mobile Anlage nicht standortabhängig ist. Die mobilen Anlagen bestehen aus einer Solarmodul-Matrix, die sich autonom auf der landwirtschaftlichen Fläche bewegen können. Die Anlage der niederländischen Firma H2arvester soll Anwendung im Rotationsanbau finden und zur Erzeugung von Wasserstoff genutzt werden. Eine erste Anlage findet sich in Polen.



Abbildung 43: Mobile Anlage auf Rädern der Firma H2arvester (H2arvester 2022).

4.2 Module

Neben den diversen Aufständerungsmöglichkeiten bieten sich in der APV auch vielfältige Potentiale durch die Verwendung verschiedener Modultechnologien. Einige davon sollen im Folgenden vorgestellt werden.

4.2.1 Semitransparente Module

Die Verwendung von semitransparenten Modulen birgt den Vorteil der höheren Lichtdurchlässigkeit und damit einer gesteigerten PAR (Abbildung 44). Die Module bestehen oft aus Glas oder lichtdurchlässiger Folie auf Vorder- und Rückseite, wodurch Transparenz zwischen den PV-Zellen entsteht. Die PV-Zellen weisen einen größeren Abstand innerhalb des Moduls auf als bei konventionellen PV-Modulen. Statt des typischen Alu- beziehungsweise Metallrahmens werden Klemmhalterungen verwendet, um auch hier die Transparenz zu erhöhen. Bei üblichen Modulen liegt der Flächenanteil der Zwischenräume bei vier bis fünf Prozent. Werden die Abstände erhöht, so ergibt sich eine größere Fläche, die die Pflanzen vor Wettereinflüssen schützt und mehr Lichttransmissionen ermöglicht (Hopf, 2021, Trommsdorff et al., 2020).



Abbildung 44: Semitransparente Module, hier als Überdachung für Äpfel in Gelsdorf (BW) (©GridParity AG 2022).

Durch die Vergrößerung der Abstände zwischen den Zellen wird zusätzliches Licht durchgelassen und in diffuses Licht umgewandelt, wodurch die Lichtabsorption in der Pflanze erhöht

wird. Durch die geringere Solarzellendichte pro Fläche ergibt sich zwischen Energieertrag und PAR ein umgekehrt proportionaler Zusammenhang: die PAR nimmt mit zunehmender Transparenz zu, während der Energieertrag abnimmt (Abbildung 45).

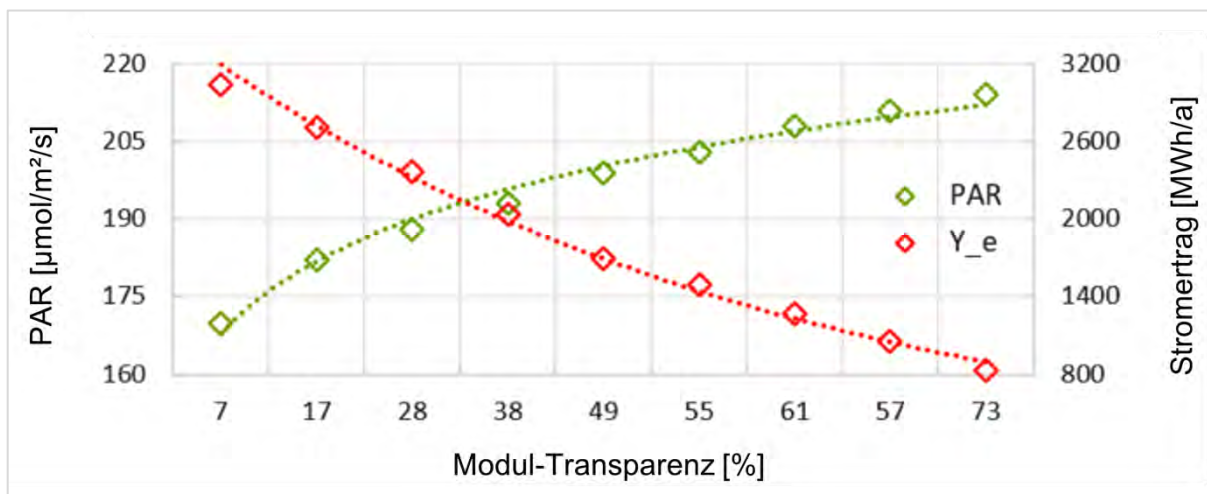


Abbildung 45: Zusammenhang zwischen Stromertrag und PAR bei zunehmendem Transparenzgrad von semitransparenten-Modulen (Katsikogiannis, et al. 2022).

4.2.2 Bifaziale Module

Bifaziale können rückseitig den Lichteinfall nutzen und somit auf Vorder- und Rückseite der Module Strom produzieren. Hierbei wird von einer Leistung von 85 % auf der Rückseite im Vergleich zur Vorderseite ausgegangen (Next2Sun GmbH 2021, Böhm, 2021), wodurch insgesamt bis zu 25 % höhere Stromerträge generiert werden können. Durch die besondere Aufständigung bei den meisten APV-Anlagen erhalten die Rückseiten der bifazialen Module besonders viel Lichtstrahlung. Häufig werden bifaziale Module bei vertikalen APV-Anlagen verwendet, aber auch bei hochaufgeständerten. Bei Ersteren werden sie wechselseitig angeordnet, um eine ausgeglichene Stromproduktion zu gewährleisten (Abbildung 46). Die Module weisen eine beidseitige Verglasung auf und bieten damit eine homogenere Lichtverteilung unter den Modulen. Als Zellen können auch hier unterschiedliche Zelltypen verwendet werden (beispielsweise PERC⁸). Bifaziale Module sind heute für den Massenmarkt verfügbar (Trommsdorff et al., 2020, Next2Sun GmbH, 2021).

⁸ „Passivated Emitter and Rear Cell“ ist eine Solarzelle mit Rückseitenpassivierung. Dies ist eine Schicht an der Rückseite des PV-Moduls, welche nicht umgewandelte Lichtwellen an der Rückseite reflektieren, sodass eine Wandlung stattfinden kann. Dadurch erhöht sich der Modulwirkungsgrad.

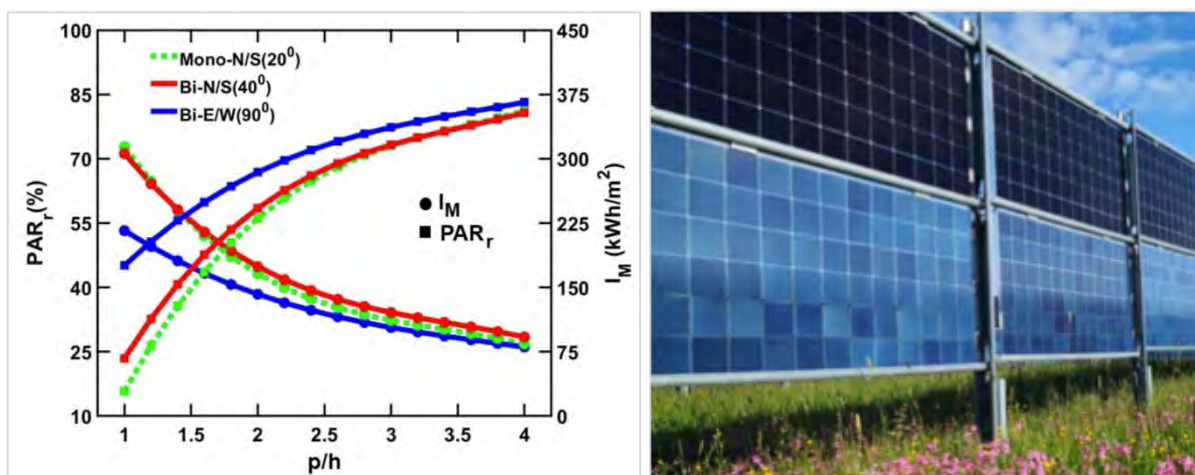


Abbildung 46: PAR (Viereck) und flächenspezifischer Ertrag (Kreis) als Funktion der Flächenbelegung ($p/h=1$ entspricht einfacher Belegung) für monofaziale Module (grün) und bifaziale Module in Ost-West-Ausrichtung (E/W, blau) und Nord-Süd-Ausrichtung (N/S, rot) (Riaz, et al. 2021) und wechselseitige Anordnung einer vertikalen, bifazialen APV-Anlage (Next2Sun GmbH 2021).

4.2.3 Leichtmodule

Bei Solarmodulen in Leichtbauweise werden das Glas auf Vorder- und Rückseite durch beispielsweise glasfaserverstärkten Kunststoff und der Metallrahmen beispielsweise durch Klemmhalterungen ersetzt. Damit wiegen Leichtmodule bis zu 70 % weniger als herkömmliche PV-Module, was Einsparungen bei Transport und bei Material in der Aufständering ermöglicht. Durch die Verstärkung der Vorder- und Rückseiten widerstehen Leichtmodule dennoch hohen Schnee- und Windlasten. Mit Leistungen von bis zu 430 W bieten diese Module eine hohe Effizienz (Sunman Energy o.J.). Es gilt weiterhin zu erforschen, wie eine höhere Lichtdurchlässigkeit bei Leichtbaumodulen erreicht werden kann, ohne die gewünschten Eigenschaften zu beeinträchtigen.

4.2.4 Dünnschicht-Module

Flexible Solarmodule beruhen oft auf Dünnschichttechnologie. Sie sind mechanisch flexibel und können lichtdurchlässig gestaltet werden. Hierbei wurden Zellwirkungsgrade von 20,4 % erreicht (Flisom AG 2021), was unterhalb der gewöhnlichen, starren Siliziumzellen liegt. Je nach Biegefähigkeit der Module wird unterschieden in flexible und semi-flexible Typen. Durch ihre sehr geringe Materialstärke sind sie sehr leicht und bieten vielseitige Verwendungsmöglichkeiten. Viele flexible Module sind begehrbar und damit sehr robust gegenüber äußeren Einflüssen, allerdings weniger stabil gegenüber Umweltbedingungen als Silizium-Module. Anwendung könnten derartige Module als Ersatz für Kulturschutzfolien finden. Als leistungsfähigste,

flexible Module werden die CIGS-Module⁹ genannt, für die kein Silizium benötigt wird, wodurch die PV-aktive Schicht nur wenige Mikrometer stark ist (Flisom AG 2021).

4.2.5 Organische Module

In Nantes, Frankreich wurden organische Module an Gewächshäusern getestet. Die halbtransparenten, ultraleichten und wenig lichtempfindlichen Module wurden auf der Innen- und Außenseite des Gewächshauses angebracht (

Abbildung 47). Untersuchungen zeigten, dass die PAR bei den Pflanzen genauso ankommt, wie bei einem konventionellen Kunststoffgewächshaus, welches das Licht streut. Die dort verwendeten, organischen PV-Module konnten auch in aus- und einfahrbare Systeme integriert werden (Vandest und Hemetsberger 2021).

Eine weitere Option bietet die organische Photovoltaik (OPV) dadurch, dass nur bestimmte Wellenlängen selektiert werden können. Dadurch können die Wellenlängen durchgelassen werden, welche die Pflanze benötigt und die übrigen Wellenlängen in Strom umgewandelt werden (Ravishankar, et al. 2021).



Abbildung 47: Verschiedene Anwendungsmöglichkeiten von OPV beispielsweise an Gewächshäusern (Vandest und Hemetsberger 2021).

Im Projekt „ADAPT“ des Fraunhofer ISE sollen hochtransparente organische Solarzellen entwickelt werden, die das für Pflanzen wichtige sichtbare Licht hindurchlassen und den infraroten Anteil zur Stromerzeugung nutzen, um so Folienabdeckungen zu ersetzen und Müllprobleme zu reduzieren (Fraunhofer ISE 2021a).

4.2.6 Farbige Module

Die farbige Gestaltung der Module spielt besonders für die Integration in das Landschaftsbild, oder bei bauwerksintegrierter PV in das Gebäudebild eine wichtige Rolle und damit für die Akzeptanz, zum Beispiel bei grünen Modulen zur besseren Anpassung an das Landschaftsbild. Eine Möglichkeit stellt hier auch die Kombination aus OPV und farbigen Modulen dar: rote

⁹ Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid-(CIGS)-Solarzellen haben einen Absorber mit direkter Bandlücke, weshalb eine geringere Materialdicke notwendig ist als bei Silizium-Solarzellen.

Module mit Wellenlängenselektion bieten optimale Photosynthesebedingungen. Das Fraunhofer ISE hat farbige Module erforscht, die 90% der Moduleffizienz beibehalten und seit kurzem an der Fassade des Fraunhofer ISE Zentrums in Freiburg getestet werden, wobei dieses dadurch mit 11 MWh Strom im Jahr versorgt werden soll (Fraunhofer ISE 2022c).

4.2.7 Konzentrierende PV

Konzentrierende PV-Module kombinieren eine hohe Ertragsleistung mit einstellbarer Lichtdurchlässigkeit und bieten damit ein hohes Potential für APV-Anlagen (Agroscope 2021).

Hier wird durch ein optisches Mikronachführsystem entweder selektiv direktes Sonnenlicht auf die PV-Zellen konzentriert oder Licht durch das Modul zu den Pflanzen geleitet. Auf diese Weise können die Kulturen optimal mit Licht versorgt werden. Wirkungsgrade von 30% wurden bestätigt, wobei 78% des Sonnenlichts durchtreten. Die Zellen bedecken circa 0,5% der Oberfläche des Panels und sind mit Schutzglas und optischen Linsen versehen, um das Sonnenlicht zu bündeln und mit etwa 100-facher Intensität als bei herkömmlichen Modulen auf die Zellen zu richten. Die Zellen sind nach Aussage der Firma in der Lage, der Sonne durch horizontale Bewegung zu folgen. Durch diese sogenannte „Mikro-Tracking-Technologie“ wirkt das Modul wie eine Art intelligenter Sonnenschutz, der die transmittierte Lichtmenge nach Bedarf anpasst, beispielsweise je nach Jahreszeit und Pflanzenbedarf. Da es sich um eine innovative neue Technologie handelt, sind die Preise aktuell noch sehr hoch einzustufen.

4.2.8 Tube Solar

Eine innovative Anlagen-Formation stellt das System der Firma TubeSolar AG dar. Hier werden gerollte PV-Dünnschichtfolien in ein Glasrohr eingesetzt (Abbildung 48). Damit könnte eine homogene Wasser- und Lichtverteilung generiert werden. Aufgrund der runden Oberfläche der Module wird angenommen, dass die Module selbstreinigend sind. Die runden Glasrohre sollen außerdem einen über den Tag gleichmäßigen Stromertrag liefern (Hörnle, et al. 2021). Weiterhin benötigt das winddurchlässige System eine weniger massive Unterkonstruktion, da damit die Windlasten weniger hoch sind. Aktuell wird eine landwirtschaftstaugliche Aufständehaltung entwickelt, die in Leichtbauweise mit Tragbändern umgesetzt werden soll. Diese Anlagen befinden sich derzeit noch nicht im Praxistest, dies soll aber zeitnah erfolgen (Hörnle, et al. 2021). Der Materialaufwand für die Fertigung wird als gering angenommen. Eine großflächige Überspannung ohne Lückenbildung ist möglich, da die Röhren zu 1 m x 1 m Modulen zusammengeführt werden. Die Tragschienen werden anschließend zu einer Modulgröße von 2 m x 1 m zusammengesetzt. Damit ist eine schnelle und einfache Montage möglich (Hörnle, et al. 2021).



Abbildung 48: Veranschaulichung des Aufbaus und der Konstruktionsweise der Modultechnologie der Firma TubeSolar AG (TubeSolar AG o.J.).

4.2.9 Anti-Reflexbeschichtung

Heutzutage sind PV-Module mit einer Antireflexschicht beschichtet, die eine Spiegelung oder Sonnenblendung der Oberfläche vermeiden. Die innovative, bioreplizierte PV-Beschichtung, analog der Oberflächenmikrostruktur von Rosenblättern, wurde entwickelt, um polarisierte Lichtemissionen zu verringern (Fritz, et al. 2020). Das Phänomen der spiegelnden oder leuchtenden PV-Anlage tritt somit nicht ein. Da die Beschichtung auch die Verluste durch Reflexion des Lichtes reduzieren, sind derartige Beschichtungen heute auf allen PV-Modulen aufgebracht (Bartels 2019).

4.2.10 Kombinierte Photovoltaik und Photosynthese

Es bietet sich an eine Solarzelle mit einem Transmissionsspektrum zu verwenden, das sich leicht auf die spezifischen Absorptionsanforderungen von Algen und Pflanzen abstimmen lässt. Erreicht wird dies durch einen Mehrschichtresonator als Rückreflektor, der das Transmissions- und Absorptionsspektrum der Solarzelle bestimmt und somit das Absorptionsspektrum von Chlorophyll a und b für die gleichzeitige Nutzung von Stromerzeugung und Photosynthese anzupassen (Osterthun, et al. 2021).

4.3 Fundamentierung

Die Fundamentierung kann im standardisierten Verfahren wie in PV-FFA durch Betonierung erfolgen. Wegen der schwierigen Reversibilität empfiehlt es sich sogenannte Spinn-Anker zu verwenden (Abbildung 49). Diese, den Wurzeln eines Baumes nachempfunden, sind vollständig reversibel und werden durch Rammung installiert. Es findet keine Bodendurchmischung statt, die Verwendung von Stahl verursacht im Lebenszyklus weniger CO₂-Emissionen als die von Beton und sie können nahezu in allen Bodentypen eingesetzt werden.



Abbildung 49: Direkte Verankerung im Boden von APV-Anlagen mithilfe von Spinnankern (Spinnanker GmbH 2021).

„Je nach Type variiert der Ankerplattendurchmesser zwischen 270 mm und 370 mm. In die Ankerplatte werden 6 Stäbe beziehungsweise 12 Stäbe eingedreht und im Boden verankert. Die Lage der Gewindestäbe ist mit 30° und 45° gegen die Vertikale vorgegeben, Anzahl und Stablänge richten sich nach Bodenbeschaffenheit und Traglast. Standardlänge der Stäbe ist 2 m, 3 m oder 4 m, in Sonderfällen können bis 12 m lange Gewindestäbe – etwa zur Hangsicherung – eingebracht werden. Die hoch festen Gewindestäbe haben einen Durchmesser von 15 mm.“ (Spinnanker GmbH 2021).

Rammfundamentierung

Bei der Rammfundamentierung werden Rammpeiler mit Hilfe einer hydraulischen Ramme in den Boden eingebracht. Die Rammtiefe wurde im Vorfeld anhand eines Bodengutachtens ermittelt. Die Rammfundamentierung findet oft Anwendung bei PV-FFA und ist rückstandslos rückbaubar. Nicht geeignet ist das Rammen bei steinigem, sandigen oder moorigen Böden und steilen Hängen (SL Rack 2021).

4.4 Regenwasserauffangsystem

Da das Regenwasser auf der Moduloberseite von diagonal ausgerichteten Modulen gebündelt wird und die Abtropfkante die Pflanzen schädigen beziehungsweise den Boden verschlammern könnte, ist ein Regenwasserauffangsystem möglich. Dies kann aus einfachen Regenrinnen bestehen, die das Wasser auffangen, welches abtransportiert und ggf. zu trockeneren Zeiten

über Tröpfchenbewässerung den Pflanzen wieder zugeführt werden kann (Wassermanagementsystem) (Abbildung 50). Hier bestehen unterschiedliche Möglichkeiten der Wasserspeicherung (kurzzeitig oder saisonal). Auch Drainagen bieten vor allem bei Sonderkulturen, wie dem Beerenanbau eine attraktive Lösung. So wird die Abtropfkante mittig zwischen den (Beeren-)Reihen platziert. Darunter befindet sich ein Drainagesystem, welches das Wasser über Sammelleitungen zum Speichertank zurückführt (Karthaus 2021). Regenwasser ist aufgrund seiner Wasserhärte besser für Bewässerungszwecke geeignet als Brunnenwasser. Weiterhin kann durch ein geschlossenes System mit der Sammlung von Be- und Entwässerung und mit Düngemitteln angereichertes Wasser recycelt werden. Durch den reduzierten Stoffeintrag wäre somit eine Schonung der Umwelt möglich. Den benötigten Strom für die Steuerung der Tröpfchenbewässerung und der Pumpen und deren Betrieb würde die APV-Anlage direkt bereitstellen können (Hörnle, et al. 2021).

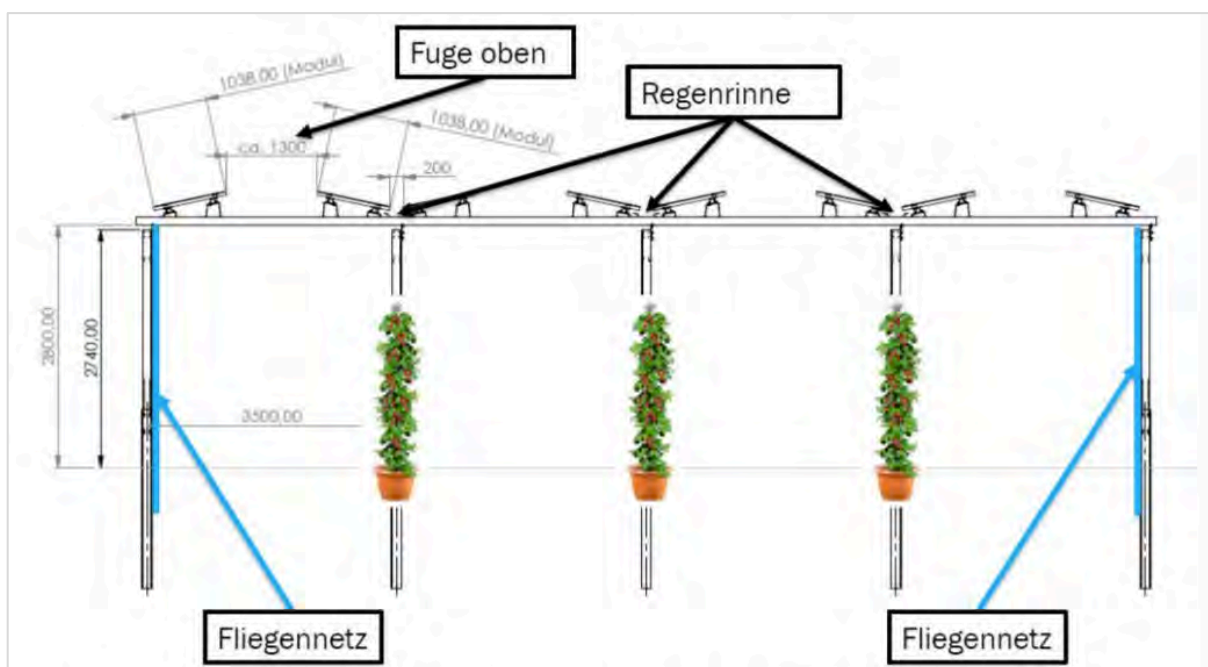


Abbildung 50: Variation eines Bewässerungssystems von APV-Anlagen (Hörnle, et al. 2021).

4.5 Lichtmanagement

Die Verschattung durch PV-Module einer APV-Anlage variiert je nach Sonnenstand über den Tag und das Jahr. Gerade im Ackerbau ist eine homogene Lichtverteilung für ein gleichmäßiges Pflanzenwachstum und eine gleichmäßige Reifung wünschenswert. Um dies zu gewährleisten, gibt es verschiedene Möglichkeiten des Lichtmanagements (Trommsdorff, et al. 2022). Durch eine Abweichung der Modulreihenausrichtung nach dem optimalen Stromertrag nach Osten oder Westen wird eine homogenere Verschattung auf dem Feld erreicht. Dadurch werden "Verschattungsgräben" vermieden, in denen einige Kulturen deutlich weniger Licht erhalten als andere. In einer Fallstudie in Süddeutschland führte eine solche Ausrichtungsabweichung zu einer Verringerung des elektrischen Ertrags von weniger als 5 %. Weiterhin können

kleinere Module so eingesetzt werden, dass die Verschattung minimiert wird und das Licht gleichmäßiger verteilt wird. Diese Methode wird in Japan häufig angewendet. Abbildung 51 zeigt, dass eine alternative Anordnung der Module einen großen Einfluss auf die Lichtverteilung hat.

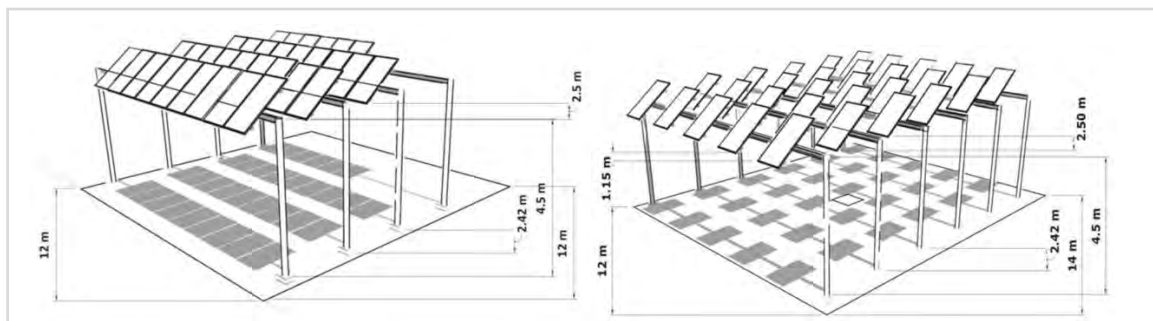


Abbildung 51: Lichtverteilung anhand unterschiedlicher Modulanordnungen (Faizi, Verma und Jain 2022).

Bei Glas-Glas-Modulen können die Solarzellen mit Abstand in den Modulen angebracht werden. Die semitransparenten Module ermöglichen eine partielle Verschattung unter den PV-Modulen und kleinere Reihenabstände bei gleichbleibender Lichtverfügbarkeit. Dies ist vor allem für den Gartenbau interessant, in welchem die Pflanzen vom Schutz der größeren PV-Module profitieren. Die maximale Bewegung der Verschattung über einen Tag wird durch eine Ost-West-Ausrichtung der Modulreihen erreicht (Abbildung 52, Faizi, et al. 2022). Dies kann mit einer ein- oder zweiachsigen Nachführung kombiniert werden, um die Lichtverhältnisse gezielt an die kulturspezifischen Bedürfnisse anzupassen. Ein größerer vertikaler Abstand der PV-Module erhöht ebenfalls die Lichtverfügbarkeit auf dem Feld (Trommsdorff, et al. 2022).

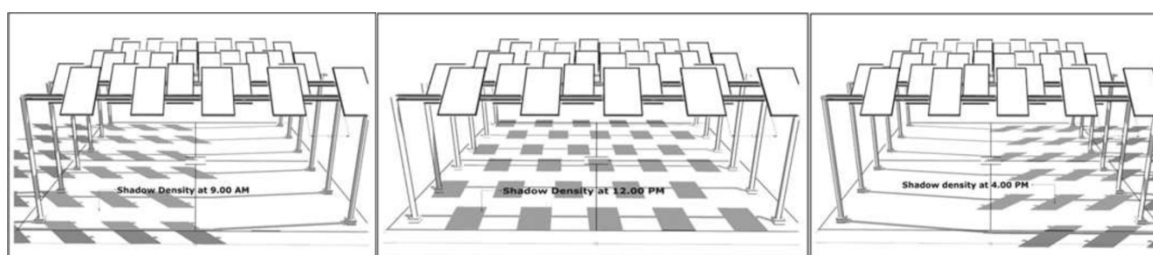


Abbildung 52: Verschattung hochaufgeständerter APV-Anlagen (Faizi, Verma und Jain 2022).

4.6 Eingliederung und Standortwahl

Im Folgenden soll auf die Möglichkeiten der APV-Anlagen zur Eingliederung in die Landschaft eingegangen und Forschungserkenntnisse zur Standortwahl vorgestellt werden.

4.6.1 Anordnung

Nicht nur für die Sammlung von Regenwasser, sondern auch für eine optimale Integration von PV in die Landwirtschaft spielt vor allem die Anordnung der Komponenten eine ausschlaggebende Rolle. Werden beispielsweise Standardmodule verwendet, ist ein größerer Abstand

nötig, um eine ausreichende Lichtversorgung der Pflanzen zu gewährleisten. Wird der Abstand zwischen den Modulen beziehungsweise zwischen den Modulreihen größer, so bietet die APV-Anlage allerdings keinen Schutz für alle darunter befindlichen Kulturen. Daher sollte projektspezifisch ermittelt werden, welche Anordnung der Module geeignet erscheint. Die Verwendung von Glas-Glas-Modulen bietet die Möglichkeit den Flächenanteil an Glas zu erhöhen, um somit eine größere, transparente Fläche zu schaffen, welche die Kulturen schützt, aber nicht zu stark verschattet. Dies wird unter anderem in der Forschungsanlage APV-Obstbau in Geldorf, Rheinland-Pfalz (s. Kapitel 5.5). untersucht. Hier wurden Module unterschiedlich angeordnet, um die Auswirkungen auf die Pflanzenkulturen zu erforschen. In der Anordnung „Zebra“ sind die Solarzellen gleichmäßig in großen Abständen auf der Modulfläche verteilt, in der Anordnung „Block“ sind die Solarzellen in der Mitte des Moduls blockförmig angeordnet, mit großen Bereichen aus Glas an den Seitenrändern (Abbildung 53).

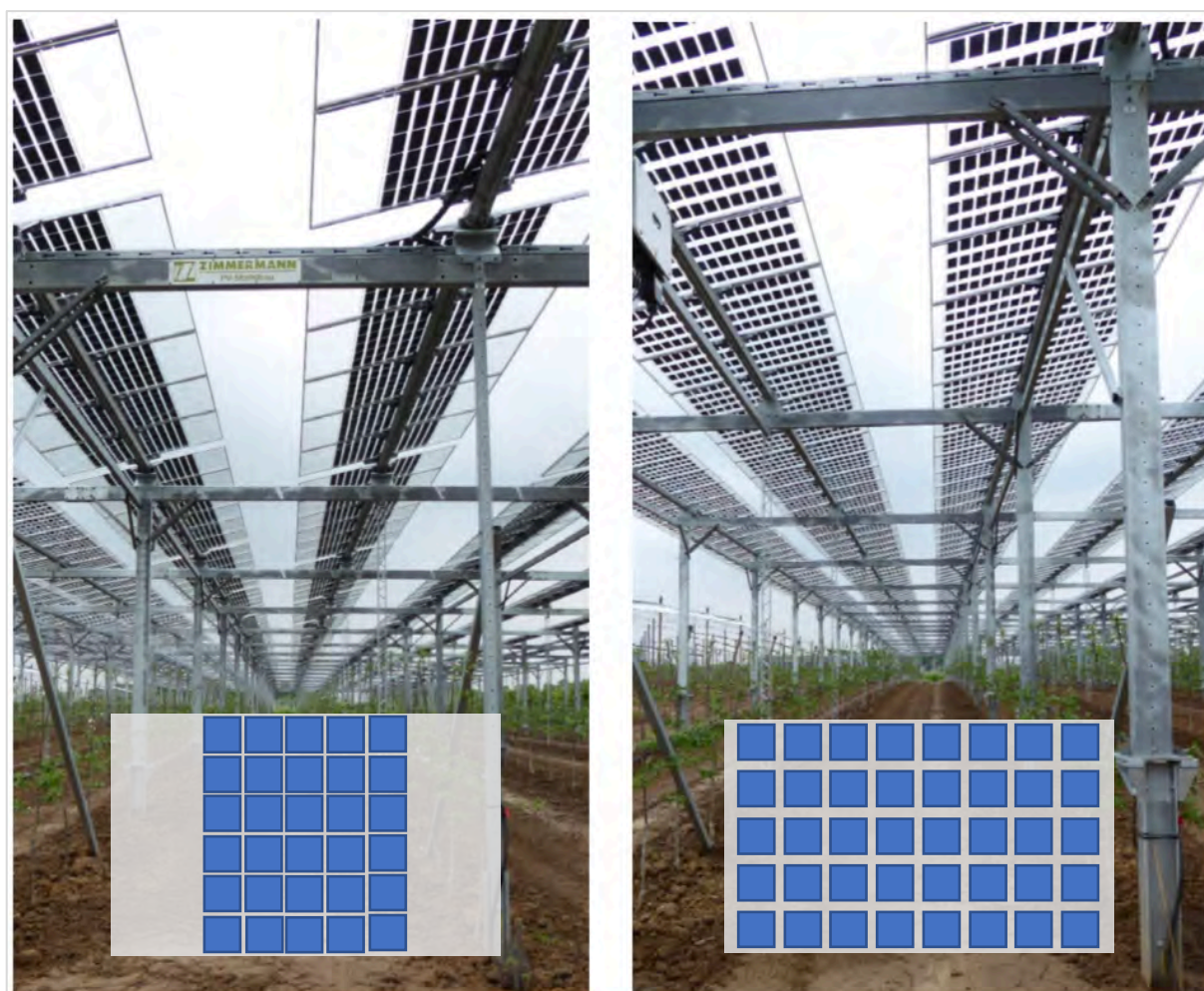


Abbildung 53: Vergleich Anordnung „Block“ (links) und Anordnung „Zebra“ (rechts) [verändert nach Hopf, et al. (2021)].

4.6.2 Eignungsflächen

Grundsätzlich sind alle Ackerflächen für APV-Anlagen geeignet. Flächen, die einen natürlichen Sichtschutz bieten, wie beispielsweise Waldränder oder abgelegene Flächen in Tälern oder

auf Kuppen stellen aus landschaftsästhetischer Sicht eine gute Option dar. Hierbei sollten jedoch der Netzanschluss und die Verbrauchernähe beachtet werden. Thüringen weist großflächige Regionen im Ackerbau auf. Hier wäre die Installation großer Systemanlagen sinnvoll. Vor allem im Thüringer Becken befinden sich viele ebene, gut geeignete Landwirtschaftsflächen. Eine Umrandung mit Gehölzstreifen kann die Sichtbarkeit der Anlagen reduzieren (siehe Kapitel 4.6.3). Die in Thüringen auftretende, in manchen Gebieten geringere Höhe der Sonneneinstrahlung könnte durch Skaleneffekte, die große Anlagen mit sich bringen, wirtschaftlich kompensiert werden.

4.6.3 Landschaftsbild

Die Integration in das Landschaftsbild könnte je nach Standort bei den hochaufgeständerten Anlagen eher eine Herausforderung darstellen, würde die APV-Anlage einzeln betrachtet. Wird jedoch die Referenzfläche „Landwirtschaft“ im Vergleich betrachtet, so zeigen besonders Schutzvorrichtungen von Obstkulturen optisch kaum einen Unterschied, wie bereits in Abbildung 12 gezeigt wurde. Beispielsweise kann eine Umrandungsbepflanzung in einer Agrarlandschaft auch positive Effekte auf das Landschaftsbild haben. Das derzeitige „konventionelle“ Design von PV-FFA zielt auf die Maximierung der Energieerzeugung ab. Ein integrativer Gestaltungsansatz würde jedoch eine Eingliederung in das Landschaftsbild optimieren. Hierzu zählen beispielsweise die Strukturen der Landschaft (Linien, Punkte, Wellen, und weitere) in der Anlage widerzuspiegeln oder Sichtschutzhecken zu pflanzen, welche sich in das Landschaftsbild eingliedern und die APV-Anlage verdecken (Abbildung 54). Damit können Anlagen in Verbindung mit Gehölzstreifen in ausgeräumten Agrarlandschaften auch eine positive, strukturgebende Wirkung auf das Landschaftsbild erzielen (siehe Kapitel 3.2).



Abbildung 54: Integrativer Gestaltungsansatz von APV-Anlagen. (a) Mosaik-Anordnung angepasst an natürliches Landschaftsbild, (b) Bodennahe Anlagen, die der natürlichen Linienstruktur der Landschaft folgen (Scognamiglio 2015).

Durch schematische Integrationsmöglichkeiten werden Anlagen in verschiedenen Mustern angelegt (Abbildung 55): „typische“ PV-Muster (0); Anordnung in parallelen Streifen (1), die Anpassung an natürlich-landwirtschaftliche Muster (2), sowie die Einordnung in Inselflächen (3). Es gilt zu beachten, dass eine individuelle Anpassung an das Landschaftsbild zwar die

Akzeptanz steigert, aber auch kostenintensiver ist als standardisierte Anlagen. Es sollten bei Auswahl der Module generell die inzwischen standardisierten Module mit einer Anti-Reflexbeschichtung verwendet werden.

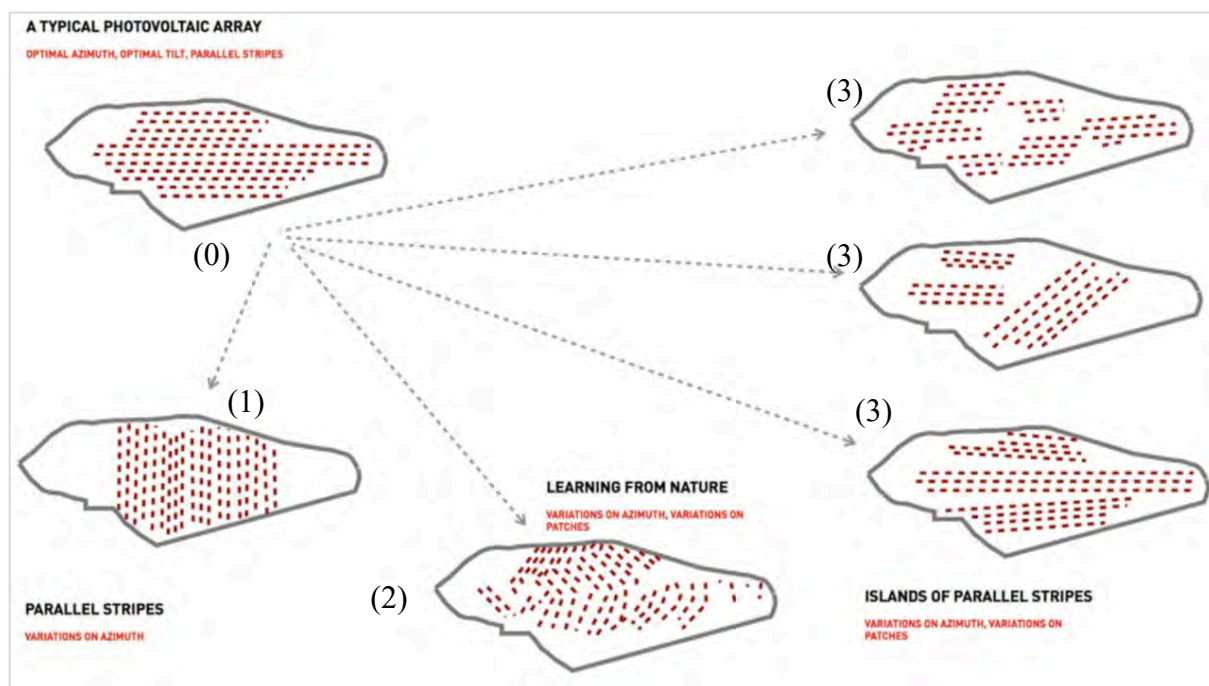


Abbildung 55: Schematische Darstellung verschiedener PV-Muster. (0) konventionell, (1) parallele Streifen, (2) traditionelle Anordnung, (3) Inselflächen [verändert nach Scognamiglio, (2015)].

4.7 Netzeinspeisung, Eigenverbrauch und Stromerlöse

Neben der Bestimmung geeigneter Flächen ist auch die Anbindung an das Stromnetz ein wichtiger Faktor bei der Errichtung einer APV-Anlage. Vor dem Bau der Anlage sollte daher entschieden werden, ob der produzierte Strom eigenverbraucht oder in das anliegende Stromnetz eingespeist wird, wobei der Eigenverbrauch derzeit am wirtschaftlichsten ist. Bei (gewerblichen) Strombezugskosten in Höhe von circa 15 ct/kWh (Stand 2021) ließen sich bei Stromgestehungskosten zwischen 6 ct/kWh und 8 ct/kWh (siehe Kapitel 6) Einsparungen von 7 ct/kWh bis 9 ct/kWh erwirtschaften. Bei Eigenverbrauch ist die Nähe des Verbrauchers zur Anlage wichtig. Außerdem sollte der Verbraucher ein dem Erzeugungsprofil ähnliches Lastprofil aufweisen. Das heißt, dass besonders im Sommer hohe Energiemengen benötigt werden, und je nach Ausrichtung der Anlage zur Mittagszeit (Süd-Ausrichtung) oder in den Vormittags- und Nachmittagsstunden (Ost-West-Ausrichtung). Bei Verwendung eines Tracking-Systems sollten die Komponenten auf den voraussichtlichen Energiebedarf - je nach Pflanzenbedarf - eingestellt sein.

Die Sektorenkopplung kann den Eigenverbrauch erhöhen. Nach Birth (2020) wird die Speicherung von Energie durch Wandlung von Strom in Wärme, Kälte, Gas oder synthetische Kraftstoffe sowie chemische Produkte zum fundamentalen Bestandteil der modernen

Energiewirtschaft. Weiterhin kann die Ergänzung durch Speichersysteme den Anteil an Eigenverbrauch erhöhen. Während die installierte Leistung der APV pro Fläche um den Faktor 4 bis 5 kleiner ist, ermöglicht die duale Landnutzung (Solar- und Landwirtschaft) ein technisches Potential im Terawattstundenbereich pro Jahr, das mit der Hälfte des gesamten deutschen Primärenergiebedarfs vergleichbar ist (Reker, et al. 2022). In einem Simulationsmodell (Deutschland im Jahr 2030 mit 80% CO₂-Reduktion bezogen auf 1990) wird die Wirkung unterschiedlicher PV-Kraftwerksauslegungen untersucht. Im Modell wird ein optimaler Anteil von rund 80% vertikaler PV-Anlagen ohne Stromspeicher und 70% mit Stromspeichermöglichkeiten gefunden. Es konnte gezeigt werden, dass vertikale PV-Anlagen geringere Speicherkapazitäten oder eine geringere Auslastung von Gaskraftwerken ermöglichen. Ohne Speichermöglichkeiten ist eine Reduktion der gesamten Kohlendioxidemissionen um bis zu 10,2 Mt/a möglich (ebd.). Eine weitere Option vor allem in der Landwirtschaft stellt das Laden von elektrisch betriebenen Fahrzeugen oder Arbeitsgeräten dar. Dies wird in Zukunft eine zunehmende Rolle spielen, da das autonome Fahren und die Robotik in der Landwirtschaft zunehmend Verwendung finden. Die Flächen können somit effizienter bearbeitet werden und durch intelligentes Lademanagement beispielsweise die Mittagsspitzen der Stromerzeugung optimal genutzt werden.

Die Hofgemeinschaft der Forschungsanlage Heggelbach konnte ihren Strombedarf im Jahr 2017 fast vollständig durch die APV-Anlage decken. Die Anteile der eingespeisten und eigenverbrauchten Energiemengen sind in Abbildung 56 dargestellt.

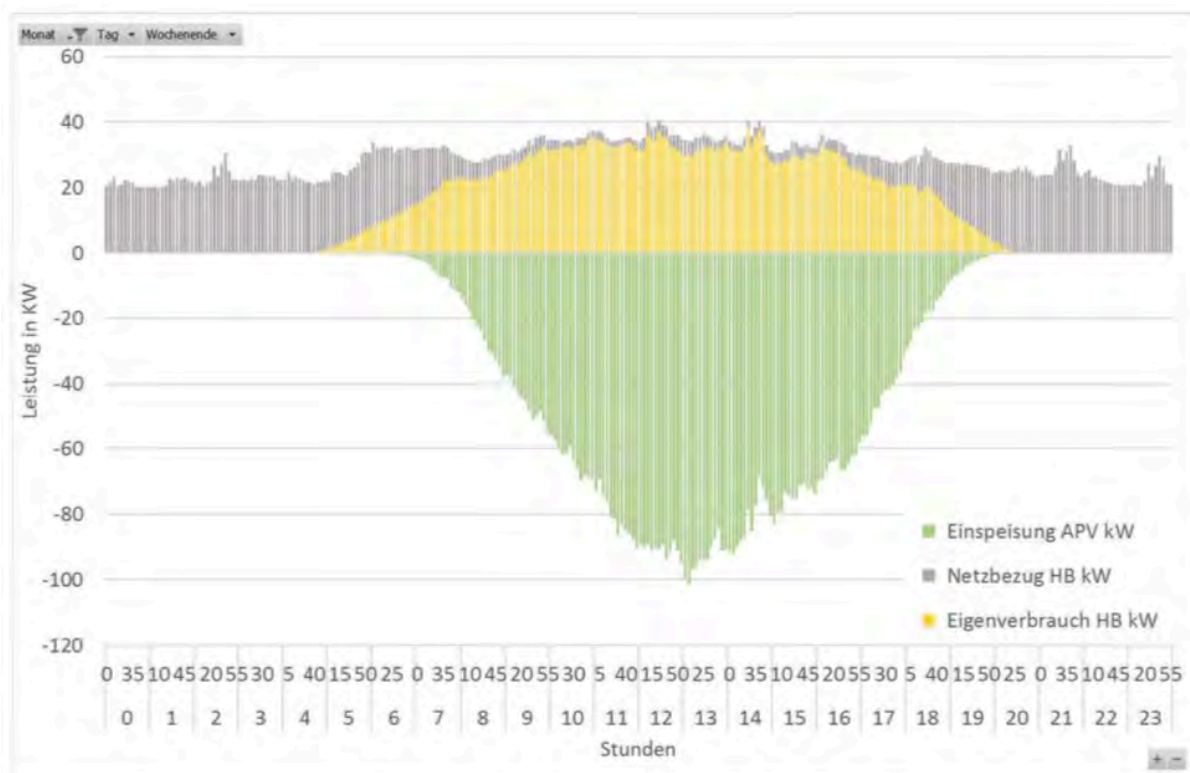


Abbildung 56: Vergleich Einspeisung, Erzeugung und Eigenverbrauch der Hofgemeinschaft der Forschungsanlage Heggelbach (©BayWa r.e. Trommsdorff et al., 2020).

Bei Netzeinspeisung ist die Wirtschaftlichkeit von der Höhe der Vergütung abhängig. Hierbei gibt es unterschiedliche Möglichkeiten: EEG, Power Purchase Agreements (PPA), Direktvermarktung oder sogenannte Clouds (siehe Kapitel 6).

Ein wichtiger Kostenfaktor von APV-Anlagen mit Netzeinspeisung ist die Nähe zu sogenannte Netzknotenpunkten. Mit steigender Entfernung nehmen die Kosten erheblich zu. Auch gilt es zu prüfen, ob der Einspeisepunkt für den Anschluss des APV-Kraftwerks ausreichend ist. Eine frühzeitige Abstimmung mit dem zuständigen Netzbetreiber ist unbedingt erforderlich.

4.8 Fazit

Die Technik der APV-Anlagen bietet zahlreiche Anpassungsmöglichkeiten an die optimale Nutzung für die Landwirtschaft und die Energiegewinnung. Dies betrifft sowohl inzwischen schon standardisierte wie auch innovative Formen der Aufständerung, der Modultechnik als auch des Anlagendesigns, im integrierten System und in der Landschaft. Eine Übersicht über verschiedene Systemtechniken gibt Tabelle 12.

Tabelle 10: Übersicht Modultechnologien und deren Vorteile [modifiziert nach Wydra, et al. (2022)].

	Technik	Funktion	Kosten [€/kWp]	Besonderheit / Vorteile / innovativer Gehalt
Module	Semitransparenz	Lichteinfall	500	<ul style="list-style-type: none"> • Hoher Lichteinfall
	Bifazial	Stromproduktion	250	<ul style="list-style-type: none"> • Höherer Stromertrag auf gleicher Fläche / Ost-West-Ausrichtung möglich (Vormittag/Nachmittag) • Auf Massenmarkt verfügbar
	Leichtbau	Aufhängung	350	<ul style="list-style-type: none"> • Weniger massive Unterkonstruktion nötig
	Organische	Wellenabsorption	-	<ul style="list-style-type: none"> • Absorption / Passage bestimmter Wellenlängen
	Farbigkeit	Landschaftsbild	-	<ul style="list-style-type: none"> • Integration in Landschaftsbild
	Konzentrierend	Stromertrag, Lichtverteilung	-	<ul style="list-style-type: none"> • Gute Lichtverteilung bei gleichzeitigem hohen Stromertrag
	Tube	Licht- und Wasserverteilung	-	<ul style="list-style-type: none"> • Schutz, Stromertrag und gute Wasserverteilung
	Anti-Reflex	Landschaftsbild	-	<ul style="list-style-type: none"> • Geringere Beeinträchtigung des Landschaftsbildes
	Photosynthese	PV und Photosynthese	-	<ul style="list-style-type: none"> • Kombination aus photosynthetischer Strahlung und Solarstromerzeugung

5 Ausgewählte Forschungsprojekte und -anlagen in Deutschland

„Das bisher größte Agri-PV-Projekt, in dem Goji Beeren angebaut werden, wurde in China am Rand der Wüste Gobi realisiert und wird momentan auf eine Leistung von 1 GWp ausgebaut.“ (Fraunhofer ISE o.J.). In Deutschland sind aktuell (November 2022) circa 25 APV-Anlagen bekannt, welche errichtet wurden, beziehungsweise sich noch in Planung befinden, jedoch in Kürze gebaut werden sollen (siehe Tabelle 11). Davon wurden 14 Anlagen zu Forschungszwecken errichtet. Einige dieser Anlagen werden im Folgenden vorgestellt.

5.1 Forschungsprojekt „APV-Resola“

Im Jahr 2016 wurde im Zuge des Forschungsprojekts „APV-Resola“ bei der Hofgemeinschaft Heggelbach in Baden-Württemberg unter Betreuung des Fraunhofer ISE eine APV-Anlage auf einer Fläche von 2.500 m² errichtet (Weselek 2022, Fraunhofer ISE 2022). Gefördert wurde das Projekt durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). Die Höhe der Anlage beträgt 5 m (Oberkante 8 m), die installierte Leistung 194 kWp, der Reihenabstand der Pfeiler beträgt 18,4 m, sodass auch große landwirtschaftliche Maschinen unter der Anlage wirtschaften können (Abbildung 57). Es wurden 720 bifaziale, lichtdurchlässige Solarmodule mit einer Leistung von jeweils 270 Wp installiert. Die damals verwendete massive Aufständering ist nach heutigem Kenntnisstand unnötig massiv und mit zu hohem Materialaufwand errichtet wurden (Fraunhofer ISE 2022). Ein Folgeprojekt („Hyperfarm“) konnten demgegenüber zwei Drittel des Stahleinsatzes reduziert werden (Fraunhofer ISE 2022b).

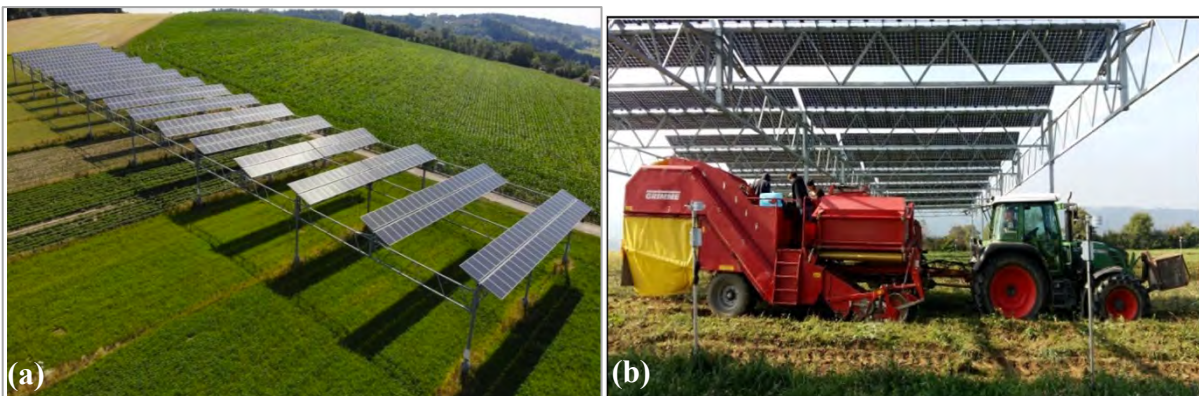


Abbildung 57: APV-Forschungsanlage in Heggelbach, (a) aus Blickrichtung Westen, sowie (b) bei der Bewirtschaftung unterhalb der Anlage [©BayWa r.e. (Fraunhofer ISE 2022)]

Die Hofgemeinschaft Heggelbach ist Demeterbetrieb, daher erfolgt eine ökologische Bewirtschaftung für die hoftypische Fruchtfolge: Kartoffeln, Sellerie, Winterweizen und Klee gras. Ein Monitoring erfolgte zu Pflanzenentwicklung, Boden- und Wetterparametern, sowie Energieausbeute. Neben den pflanzlichen Ertragsänderungen konnte ein Stromertrag von durchschnittlich 248.000 kWh/a erzielt werden (Weselek 2022). Die Nutzpflanzen erhalten 70% der PAR durch die Modulreihenabstände und die hohe Aufständering (ebd.). Weiterhin wurden

mikroklimatische Veränderungen gemessen: die Lufttemperatur war in den Sommermonaten im Durchschnitt $1,1\text{ °C}$ niedriger als in den Referenzjahren, ebenso die Bodentemperatur ($1,3\text{ °C}$) (Weselek, et al. 2021). Im Jahr 2017 wurden bei allen Kulturen Ertragsverluste von 19% ermittelt, ebenso im Jahr 2019 von 33%. Im trockenen, heißen Sommer 2018 wurden hingegen Ertragssteigerungen festgestellt: Kartoffeln +11%, Winterweizen +3% und Knollensellerie +12% (Abbildung 58). Die Kartoffeln wurden 2019 nicht ausgewertet, da die Fläche aufgrund der ungünstigen versuchsbedingten Fruchtfolge (drei Sommerungen nacheinander) zu verunkrautet war (Weselek 2022).



Abbildung 58: Relative Ertragsveränderungen der angebauten Kulturen der Forschungsanlage Heggelbach (Weselek 2022).

5.2 Forschungsanlage Weihenstephan

Im Jahr 2013 wurde in Freising (BY) eine nachgeführte APV-Anlage an der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf errichtet. Auf einer Fläche von 483 m^2 wurde eine Leistung von $22,5\text{ kWp}$ installiert (Abbildung 59). Die Anlage weist eine Durchfahrtsbreite von 7 m auf und eine lichte Höhe von $3,60\text{ m}$. Installiert wurden 90 Tracking-Module mit einer Leistung von 245 Wp (Fraunhofer ISE 2022). Die Module sind schwenkbar gelagert und wurden in unterschiedlichen Abständen angebracht, um die Verschattungsauswirkungen zu untersuchen. Dies soll die landwirtschaftliche Nutzung darunter erleichtern, indem die Module zur Seite geschwenkt werden können, wenn große Landwirtschaftsmaschinen die Fläche befahren. Die Bewirtschaftung der Anlage bei horizontal ausgerichteten Modulen ist in Abbildung 59 ersichtlich (ebd.).

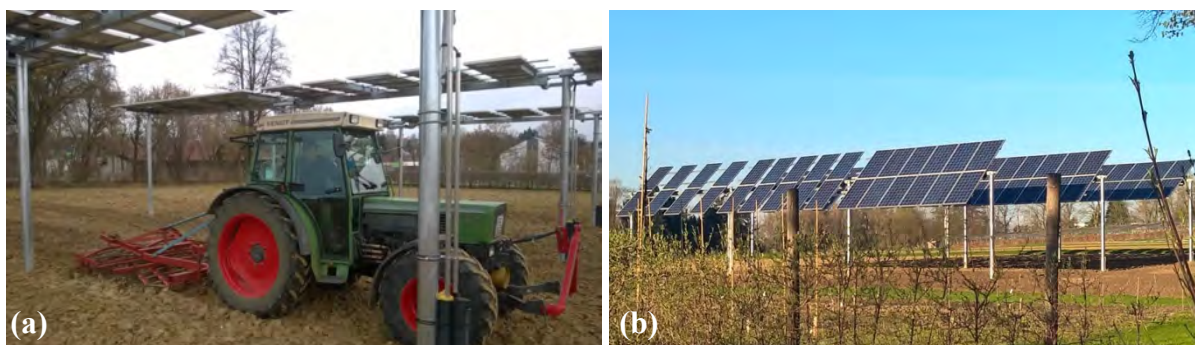


Abbildung 59: (a) Bewirtschaftung der APV-Anlage in Freising an der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf (Beck, o.J.) und nach dem Sonnenstand ausgerichtete APV-Anlage in Freising (HSWT o.J.).

Die Module werden kalendergesteuert in Richtung Ost-West nachgeführt. Angebaut werden Chinakohl und Spitzkohl (Schindele, Trommsdorff, et al. 2020). Es wurden Ertragsverluste von 50% (Chinakohl) und 15% (Spitzkohl) verzeichnet. Als mögliche Ursache dieser Verluste wird die Bodenverdichtung bei Errichtung der Anlage angeführt, sowie die Abtropfkante der Module, welche durch die Anbringung von Regenrinnen reguliert wurde. Eine weitere Anlage in Freising mit röhrenförmigen PV-Modulen (tubuläre PV) hat eine geringere Verschattung und wurde mit Spinat, verschiedenen Salatarten und Kartoffeln getestet (Fraunhofer ISE 2022).

5.3 Forschungsprojekt „HyPERFarm“

Im Projekt HyPERFarm werden multidisziplinär (mit Wasserstoffproduktion, Elektrifizierung landwirtschaftlicher Maschinen und Produktion von Biokohledünger) kosteneffektive APV-Systeme durch das Fraunhofer ISE getestet.



Abbildung 60: Forschungsanlage HyPERFarm - Seilaufhängung der Firma Krinner Carport GmbH (Fraunhofer ISE 2022c).

Dafür wurde 2020 in Straßkirchen (BY) eine APV-Anlage mit abgespannter Seilaufhängung errichtet. Die Anlage besteht aus 78 Modulen mit einer Gesamtleistung von 35 kWp

(Modulleistung je 450 Wp). Die Bewirtschaftung von Kartoffeln, Mais und Blühstreifen erfolgt unter der Anlage. Der Fokus liegt auf der Änderung der mikroklimatischen Verhältnisse, sowie dem Einfluss der APV-Anlage auf die angebauten Kulturen. Weiterhin wird eine Lebenszyklusanalyse durchgeführt (Harlander, 2021; Fraunhofer ISE, o.J.).

Im Oktober 2022 wurde eine weitere seilabgespannte APV-Anlage errichtet (Abbildung 60) (Fraunhofer ISE 2022c, Fraunhofer ISE 2022b). Auch hier ist die Firma Krinner Solar verantwortlich für den Bau und den Betrieb der Anlage mit nachgeführten PV-Modulen. Die Entwicklung der Seilzug-Unterkonstruktion und die landwirtschaftlichen Aktivitäten werden von Krinner Solar übernommen. Die Forschungsaktivitäten betreut das Fraunhofer ISE, zusammen mit der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf und der Hochschule Offenburg. Der Einsatz von Pflanzenkohle wird getestet, ebenso die Auswirkungen der APV-Anlage auf mikroklimatische Verhältnisse und deren Einfluss auf Pflanzen wie Kartoffeln, Kohl, Gerste und Weizen (Fraunhofer ISE 2022c).

5.4 Forschungsprojekt „Modellregion Agri-PV BaWü“

APV als flächeneffiziente Landnutzungsform soll in Baden-Württemberg fest etabliert werden und besonders das Potential vor allem im Bereich der Sonderkulturen, wie dem Obstbau, gezielt gefördert (Fraunhofer ISE 2022d). Nachdem eine Durchführbarkeitsstudie erstellt wurde, sollen nun fünf der dort untersuchten Anlagen gebaut und beforscht werden mit dem Ziel „Potentiale und Schwierigkeiten der APV zu identifizieren und die Entwicklung der neuen Technologie landesweit voranzutreiben“ (ebd.).

Im ersten Projektabschnitt liegt der Fokus auf Kern- und Beerenobst, wobei insgesamt innerhalb der fünf Projektstandorte eine Gesamtleistung von 1.700 kWp installiert werden soll.

Die Forschung werden neben dem Fraunhofer ISE vom Kompetenzzentrum Obstbau Bodensee (KOB), dem Landwirtschaftlichen Technologiezentrum Augustenberg (LTZ Augustenberg) und der Staatlichen Lehr- und Versuchsanstalt für Wein- und Obstbau Weinsberg (LVWO) betreut. Die Standorte der APV-Anlagen befinden sich in (Fraunhofer ISE 2022d):

- Ravensburg (KOB)
- Karlsruhe (LTZ Augustenberg)
- Heuchlingen (LVWO)
- Kressbronn am Bodensee (Integration in bestehenden Praxisbetrieb, Abbildung 61)
- Nußbach (Integration in bestehenden Praxisbetrieb).

Es werden sowohl Standard-, bifaziale und semitransparente Module verwendet, als auch dynamische und statische Systeme errichtet. Ziel ist unter anderem die Optimierung der Pflanzenerträge. Weiterhin wird aktuell (2022) eine Projektwebseite entwickelt, welche die Öffentlichkeit von den Fortschritten des Projektes informieren soll, sowie interessierten

Landwirt*innen den Prozess zum Bau einer APV-Anlage offenlegen. Die erhobenen Monitoring-Daten sollen in Zukunft ebenfalls öffentlich verfügbar gemacht werden (ebd.). Detaillierte Informationen zu bereits errichteten Anlagen sind in Tabelle 11 aufgeführt.



Abbildung 61: Semitransparente Module einer APV-Anlage in Kressbronn (BW) über bestehender Apfelplantage (SWR 2022).

5.5 Forschungsprojekt „APV-Obstbau“

In Gelsdorf (Rheinland-Pfalz) wurde im Jahr 2021 eine feststehende und nachgeführte APV-Anlage am Bio-Obsthof Nachtwey über einer Apfelplantage errichtet (Hopf, et al. 2021). Die Grundfläche umfasst 3.500 m². Die Anlage besteht aus 8 Modulreihen mit einer feststehenden Aufständering und einer Länge von jeweils 111 m, sowie aus 3 Reihen nachgeführter Aufständering mit einer Länge von ebenfalls je 111 m. Die installierte Leistung beträgt 258 kWp und der Reihenabstand 5 m. Als Module wurden einachsigt nachgeführte, semitransparente Glas-Glas-Module mit einer Lichttransmission von circa 70 % verwendet (Abbildung 62). Das System wurde Ost-West ausgerichtet, um optimalen Hagel- und Regenschutz zu gewährleisten. Durch die Reihenanordnung entlang der Aufständeringe entsteht kein Flächenverlust (ebd.).



Abbildung 62: APV-Anlage im Apfelanbau in Gelsdorf (Hugo und ZDF 2022).

Die Versuchsanlage wird unterteilt in vier verschiedene Sektoren (Hopf, Wydra und Trommsdorff 2021): (1) feststehende APV-Anlage (nicht regendurchlässig), (2) nachgeführte APV-Anlage (bei Bedarf regendurchlässig), (3) Referenzanlage mit Folienüberdachung (nicht regendurchlässig), (4) Referenzfläche mit konventionellen Hagelschutznetzen (regendurchlässig). Die Bewirtschaftung der Apfelplantage erfolgt unter den Modulen, Folien und Hagelschutznetzen. Der Fokus des Forschungsprojekts liegt auf der Untersuchung der Schutzfunktion des APV-Systems. Weiterhin werden Erkenntnisse zu Anlagendesign und Ernteertrag gesammelt (Hopf, Wydra und Trommsdorff 2021, Hörnle, et al. 2021).

5.6 Fazit

Die APV erlebt aktuell sowohl national als auch international einen Aufschwung. In Deutschland entstehen vor allem Forschungsprojekte, wobei in Baden-Württemberg die meisten Anlagen errichtet beziehungsweise geplant werden (Tabelle 11) (Wydra, et al. 2022). Dennoch steht aktuell der Forschungsaspekt im Vordergrund, da derzeit mehr Forschungsanlagen als Praxisanlagen existieren. Die bestehenden und geplanten Forschungs- und Praxisanlagen sind in Tabelle 11 aufgelistet, wobei die technischen Details und die angebauten Kulturen aufgeführt wurden. In Zukunft ist von der Errichtung weiterer Praxisanlagen auszugehen, insbesondere wenn Forschungsergebnisse und neue Erkenntnisse zur Optimierung der Anlagen und Erträge verbreitet wurden. Weiterhin wird der voranschreitende Klimawandel eine Steigerung der Resilienz von Pflanzenkulturen notwendig machen, die Nahrungsmittelproduktion muss gesichert werden und eine Einkommensdiversifizierung für die Anbauer*innen geschaffen werden. Dies macht den Ausbau von APV-Anlagen in Deutschland notwendig.

Tabelle 11: Forschungs- und Praxisanlagen in Deutschland mit verschiedenen Systemtechniken: V=Vertikale Anlage, T=Trackinganlage, HA=Hochaufgeständert, LA=Leichtaufgeständert, SA=Seilaufhängung, R=Solarröhren, G = Gartenbau, W = Weide, A = Ackerbau (eigene Darstellung).

	Nr.	Gebiet/Region	Bundesland	Institut / Firma	Gesamt-Fläche [ha]	Leistung [kWp]	flächen-spez. Leistung [kWp/ha]	Ertrag [kWh/a]	System	Module	Kategorie	Angebaute Kulturen	Inbetriebnahme	Abstand [m]	Höhe [m]	Ansprechpartner
Praxisanlagen	1	Warmisried	BY	Elektro Guggemoos	-	70	-	-	LA	-	A	Kartoffeln, Winterweizen, Gerste, Rote Beete, Lauch, Sellerie	2004	-	3	www.elektro-guggenmos.de
	2	Bürstadt	HE	Gärtnerei Haller	-	250	-	-	-	-	G	Blumen, bspw. Pfingstrose	2010	-	-	*
	3	Lampertheim Rosengarten	HE	Krug's Spargel	-	5.000	-	-	-	-	G	Ginseng	2013	-	-	*
	4	Bürstadt	HE	Krug's Spargel	-	5.000	-	-	-	-	G	Ginseng	2015	-	-	*
	5	Eppelborn-Dirmingen	SL	Next2Sun	7	2.000	286	2.150	V	Bifazial	W	Weide	2018	10	3	www.next2sun.com
	6	Büren	NW	Fabian Karthaus	0,42	750	1.786	800.000	T	Transparent	G	Himbeeren, Erdbeeren, Heidelbeeren, Apfel, Wein	2020	0	3,5	www.update.phoenixcontact.com
	7	Donaueschingen	BW	Next2Sun	14	4.146	296	4.850	V	Bifazial	G	Futtermittel	2020	10	3,5	www.next2sun.com
	8	Althegenberg	BY	Thomas Rebitzer (FOS/BOS Friedberg)	2,2	749	340	1.235	T	Tracking	G	Sonderkulturen, Beeren	2020	14	4,4	www.bauernzeitung.de
	9	Lüptitz	S	SolVerde	16	1.046	65	1.350	T, HA	Bifazial	G	Nutztierhaltung, Gemüseanbau, Bienenweide	2021	12	3,5	Leitfaden ISE www.solveerde-buergerkraftwerke.de www.pv-magazine.de
	10	Lüchow	NS	Steinicke GmbH; BE Solutions & Blue Systems Design GmbH	1,2	700	583	756.000	HA	Bifazial	G	Schnittlauch	2022	18	6	www.ndr.de

Forschungsanlagen	11	Apenburg	SA	Solar Provider Group	34	20000	588	20.000	T	Tracking		Noch im Bau	2023	14	0	www.mdr.de
	12	Freising	BY	Weihenstephan	0,0483	22	455	35.000	T		G	Chinakohl, Spitzkohl	2013	7	3,6	Leitfaden ISE
	13	Freising	BY	Weihenstephan	-	14	-	-	R	-	G	Kartoffeln, Salate	2015	-	3,6	Leitfaden ISE
	14	Heggelbach	BW	Fraunhofer ISE	0,34	194	572	256.000	HA	Standard	A	Winterweizen, Gräser, Sellerie, Kartoffeln	2016	18,4	5	Leitfaden ISE
	15	Dresden	S	HTW Dresden	-	13	-	-	-	-	G	Spinat, Erbsen, Bohnen, Radieschen, Mangold	2018	-	-	*, Frau Feistel HTW Dresden
	16	Straßkirchen	BY	Krinner GmbH		35	550		SA	Bifazial	A	Kartoffeln, Mais, Blühstreifen	2020	-	5,8	Email Andreas Harlander – Krinner GmbH
	17	LK Düren (Alt-Morschenich)	NW	Forschungszentrum Jülich	1	750	-	-	T, HA	-	G	Arnika, regenempfindliche Beerenfrüchte, Medizin- und Heilpflanzen oder Pflanzen für die stoffliche Verwertung für Öle, Fasern etc.	2021	-	-	www.fz-juelich.de www1.wdr.de
	18	Gelsdorf	RP	Nachtwey - Fraunhofer ISE	0,3552	258	726	276.000	T	Transparent	G	Apfel	2021	3	4	Leitfaden ISE
	19	Pillnitz / Dresden	S	HTW Dresden	10	398	40	426.000	V	Bifazial	W	Grünland	2022	9	-	www.htw-dresden.de
	20	Kressbronn	BW	Fraunhofer ISE, Obsthof Bernhard	0,4	250	625	260.000*	HA	Transparent	G	Apfel	2022	-	-	www.kressbronn.de
	21	Köllitsch	S	LfULG	0,08	85	1.063	-	HA	-		Noch in Planung	2023	27	-	Andre Hatscher (LfULG)
	22	Ravensburg	BW	Fraunhofer ISE	-	-	-	-	-	-	-	Noch in Planung	n.n.	-	-	-
	23	nahe Weinsberg (Kreis Heilbronn)	BW	Fraunhofer ISE	-	-	-	-	-	-	-	Noch in Planung	n.n.	-	-	-
	24	Karlsruhe	BW	Fraunhofer ISE	-	-	-	-	-	-	-	Noch in Planung	n.n.	-	-	-
	25	Oberkirch-Nußbach	BW	Fraunhofer ISE	1,5	826	551	-	HA, T	Tracking, Standard	G	Apfel, Zwetschgen, Heidelbeeren, Kiwi	2023		4	www.intechcleanenergy.de

Quellennachweise: *Schindele et al., 2020; siehe Kapitel 7.1 – 7.6

6 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Neben den Vorteilen für Land- und Solarwirtschaft und der Notwendigkeit gegenüber dem Klimawandel sollte eine APV-Anlage wirtschaftlich sinnvoll sein, da es sich meist um hohe Investitionskosten und eine langfristige Nutzung der Anlage handelt. Die finanzielle Umsetzbarkeit steigert die Chance der Realisierung.

Die Aufgabe einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ist es, die erzielten Einsparungen durch den verringerten Energiebedarf beziehungsweise den zusätzlich erzielbaren Gewinn mit der einmalig getätigten Investition und den jährlichen Betriebskosten zu vergleichen. Die Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsberechnung sind der VDI-2067-Reihe „Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen“ angelehnt. Im Folgenden werden drei Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen verschiedener APV-Systeme vorgestellt. Weiterhin wird nicht auf die Erträge und Kosten auf Seite der Landwirtschaft eingegangen, da diese von der ausgewählten, spezifischen Kultur pro Anlagentyp abhängen und sich daraus zahlreiche, individuelle Varianten ergeben. Es werden die technisch-ökonomischen Aspekte seitens der APV betrachtet. Die Wirtschaftlichkeit einer APV-Anlage richtet sich nach der Konzeption, der Größe der bewirtschafteten Ackerfläche, der eingesetzten PV-Technologie, dem Standort und der damit verbundenen jährlichen Sonneneinstrahlung.

6.1 Berechnungsgrundlage

Die benötigten Kosten werden den Einnahmen durch Stromverkauf bzw. Kosteneinsparungen durch eigenverbrauchten Strom gegenübergestellt. Als wirtschaftlich sinnvoll gilt die APV-Anlage, wenn innerhalb der Standzeit der Anlage mehr Einnahmen erzielt als Kosten verursacht werden. Zahlreiche Einflussfaktoren bestimmen die Ökonomie einer APV-Anlage (Schindele, Trommsdorff, et al. 2020, Fraunhofer ISE 2022):

1. Investitionskosten
2. Betriebs- und Wartungskosten
3. Zinssätze
4. Eigenverbrauchs- und Einspeisemenge
5. Energiepreissteigerungsrate.

Dabei entstehen bei APV-Anlagen Gesamtkosten in verschiedenen Bereichen:

- Investitionskosten für Bau und Installation der Anlage
- Betriebskosten der Anlage (Reparaturen, Versicherungen, ggf. Reinigung)
- Finanzierungsbedingungen (Zinsen, Laufzeit, Rendite)
- Ggf. Rückbaukosten (Wirth, 2022).

Zusammen mit den Kosten für die Systemkomponenten setzen sich die Investitionskosten (CAPEX¹⁰) aus Kosten für die Installation, Genehmigung und Netzanbindung zusammen (Schindele, Trommsdorff, et al. 2020). Die Entfernung zum Netzeinspeisepunkt beeinflusst die Kosten für den Netzanschluss erheblich. Auch die Genehmigungskosten sind stark abhängig von den politischen Rahmenbedingungen, sowie vom Genehmigungsprozess und ggf. erforderlichen Gutachten. Die Kosten für Genehmigung und Netzanschluss wurden hier an Hörnle et al. (2021) angelehnt, wobei sich die Autor*innen auf Erfahrungswerte aus vergleichbaren Projekten beziehen.

Unter „Systemkomponenten“ werden die Module, die Unterkonstruktion, Wechselrichter, elektrische Komponenten und evtl. eine Umzäunung, sowie ggf. ein Regenwassermanagementsystem verstanden. Ein großes Investitionsvolumen [nach Wirth (2022) ca. ein Drittel der Gesamtinvestitionen, im Fall von konventionellen PV-Kraftwerken] stellen die verwendeten Module dar. Die Investitionskosten sind meist höher als bei PV-FFA, da die neuartigen Module, die aufwändigere und materialintensivere Aufständigung – je nach Anlagentyp –, und die noch nicht eingetretenen Skaleneffekte die Kosten derzeit noch in die Höhe treiben. Die Massenfertigung der Module und die Verwendung von Seilaufhängungen statt massiver Stahlkonstruktionen kann jedoch zukünftig für geringere Investitionskosten sorgen (Hopf, Wydra und Trommsdorff 2021). Weiterhin spielt die Anlagengröße eine wichtige Rolle, da auch hier Skaleneffekte auftreten (Wydra, et al. 2022).

Nach den AfA-Tabellen des Bundesfinanzministeriums gemäß §7 Abs. 1 Einkommensteuergesetz beträgt die Abschreibungs- beziehungsweise Tilgungsdauer für PV-Anlagen 20 Jahre. Hierbei gilt es zu beachten, dass für APV-Anlagen eine Abschreibungsdauer von 25 Jahren angesetzt wird, da die Unterkonstruktion meist entsprechend massiv ausgebaut ist und eine lange Standzeit der PV-Anlage auch der Standzeit einiger Kulturen entspricht (z.T. bei Dauerkulturen). Einige Module weisen aktuell (Stand 2022) eine Leistungsgarantie von 40 Jahren auf (SunPower GmbH 2022).

Für die ökonomische Berechnung der APV-Anlage werden weitere Komponenten betrachtet (Wydra, et al. 2022): Der Kalkulationszinssatz i gibt an, mit welchem Zins die einmalige Investitionssumme über den betrachteten Zeitraum (25 Jahre) gleichmäßig verteilt wird. Er wird mit 5% pro Jahr angenommen. Die Preissteigerungsrate j wird mit 2% pro Jahr angenommen (Wesselak, et al. 2017). Der korrigierte Zinsfaktor z berücksichtigt die Inflation innerhalb des betrachteten Zeitraumes. Aus diesem Wert ist der Annuitätenfaktor a ermittelbar. Wird der Annuitätenfaktor multipliziert mit der Investitionssumme ergibt sich der Kapitaldienst K pro Jahr. Die spezifische Stromerzeugung e wird ermittelt durch die Division der Anlagenleistung durch den voraussichtlichen jährlichen Ertrag aus Landwirtschaft und Stromerzeugung. Die absolute Stromerzeugung pro Jahr entspricht dem voraussichtlichen jährlichen Ertrag. Die

¹⁰ CAPEX ist ein Akronym für engl. „Capital expenditures“.

Aufteilung des Verbrauchs in Eigenverbrauch beziehungsweise Netzeinspeisung ermöglicht die Ermittlung zusätzlicher Einnahmen. Hierfür gilt es den jährlichen Stromertrag des Nutzers (Landwirt*in, Betrieb, Kommune, und weitere) zu betrachten und wie hoch der Anteil an Netzeinspeisung und Eigenverbrauch ist.

Des Weiteren werden die Betriebskosten (OPEX¹¹) aufgeschlüsselt. Diese setzen sich zusammen aus Wartungsverträgen, Reparaturrücklagen, Kosten für Reinigung, Versicherungen, Überwachung, Verwaltung und Instandhaltung. Die jährliche Flächenpacht ist grundsätzlich niedriger als bei PV-FFA, da die landwirtschaftliche Fläche meist geringere Pachthöhen aufweist als oftmals wertvolle, weniger vorhandene Standorte für PV-FFA (Fraunhofer ISE 2022). Weiterhin ist durch die Doppelnutzung der Agrarfläche die Sicherheitsüberwachung kostengünstiger, da die Fläche regelmäßig durch Landwirt*innen aufgesucht wird, und im Fall der hochaufgeständerten Anlagen eine Umzäunung entfällt (Hörnle, et al. 2021). Da der Rückbau von APV-Anlagen unterschiedlich gehandhabt und evtl. auch ein Repowering der Anlage möglich wäre, werden die Kosten für diesen hier nicht weiter betrachtet.

Die Erlöse ergeben sich aus der Vergütung für die Netzeinspeisung des Stroms und den Kosteneinsparungen durch den Eigenverbrauch. Hierfür gilt es die Strombezugskosten ins Verhältnis zu setzen. Neben dem Eigenverbrauch erhält der Anlagenbetreiber für jede in das öffentliche Stromnetz eingespeiste Kilowattstunde Strom eine Vergütung. Diese kann entweder per Direktvermarktung, Einspeisevergütung nach §21 EEG 2021 (ab 01.01.2023 nach EEG 2023), Einspeisung in eine sogenannte Cloud oder über PPA erzielt werden. Wie bereits unter Kapitel 2.4 beschrieben, wird es nach §38 Abs. 1 Satz 2 EEG 2023 einen Bonus für APV-Anlagen geben. Die Vergütung setzt sich für APV-Anlagen (< 20 MWp) nach EEG 2023 zusammen aus dem Höchstwert der anzulegenden Werte der Ausschreibungen von 5,9 ct/kWh für Anlagen über einem Megawattpeak Leistung und dem gestaffelten APV-Bonus. Für das Jahr 2023 wäre eine Vergütung von maximal 7,1 ct/kWh für Anlagen über 1 MWp möglich. Für Anlagen mit einer Leistung kleiner 1 MWp gibt es derzeit (Stand 2022) keinen Bonus und damit wäre der Höchstwert des anzulegenden Werts der Ausschreibungen 5,9 ct/kWh. Nach EEG 2023 kann die kombinierte Nutzung aus Eigenverbrauch und Einspeisung vergütet werden, nach aktuellem EEG 2021 ist nur eine der beiden Optionen nutzbar für Anlagen über 750 kWp. Damit kann lediglich die Volleinspeisung vergütet werden.

Eine weitere Möglichkeit wäre die Einspeisung über Stromlieferverträge, wie beispielsweise PPA. Bei diesen wird ein langfristiger Stromliefervertrag zwischen Stromproduzent*innen und Stromabnehmer*innen geschlossen. Die Konditionen (Strommenge, Preise, und weitere) werden zwischen den beiden Vertragspartner*innen abgestimmt. Bei einer Direktvermarktung hingegen wird der eingespeiste Strom über das Marktprämienmodell an der Strombörse verkauft (Hörnle, et al. 2021). Immer weiter verbreiten sich aktuell auch sogenannte „Stromclouds“.

¹¹ OPEX ist ein Akronym für engl. „operational expenditure“.

Hier wird die Möglichkeit geboten, überschüssigen Strom bilanziell zu „speichern“ und später wieder abzurufen (Next Kraftwerke GmbH 2021).

Aufgrund der aktuellen, geopolitischen Lage („Energiekrise“) weichen die Preise stark von den typischen, historisch entwickelten Preisen ab. Für PPA werden derzeit Preise von 11,7 ct/kWh (Stand 2021: 5,5 ct/kWh) angenommen (Enervis 2022) und Strombezugskosten in Höhe von 23,23 ct/kWh¹² (Stand 2021: 15 ct/kWh) (Süddeutsche 2022). Da die künftige Preisentwicklung momentan schwer abzuschätzen ist, wird in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ein Variantenvergleich der Strompreise aktuell und vor einem Jahr durchgeführt.

Bei einigen Pflanzenkulturen könnten die Einsparungen durch den Ersatz von Kulturschutzvorrichtungen addiert werden. Außerdem gilt, dass auf dieser Fläche nach wie vor Landwirtschaft betrieben wird und damit ein Doppelnutzen der Fläche erfolgt und zusätzlicher Gewinn erwirtschaftet wird.

Durch die APV-Anlage werden jährliche Einsparungen erzielt, welche über die Abschreibungsdauer von 25 Jahren summiert werden. Daraus wird der statische ROI¹³ berechnet. Er gibt an, in welcher Zeit die Investitionssumme durch den Erlös relativiert wird. Dividiert werden die Investitionskosten durch die Differenz aus Erlös und Betriebskosten. Neben der positiven finanziellen Situation für den Anlagenbetreiber wird durch die APV-Anlage auch die Emission von Kohlenstoffdioxid verringert. Laut UBA (2021) werden mit einer PV-FFA 0,647 Tonnen CO₂ pro Megawattstunde Strom eingespart. Damit ergibt sich insgesamt eine CO₂-Einsparung in Tonnen pro Jahr. Die Stromgestehungskosten (LCOE) bezeichnen das Verhältnis der Summe der Investitions- und Betriebskosten und der elektrischen Energieproduktion. Diese werden bezogen auf die wirtschaftliche Nutzungsdauer (Wirth, 2022). Die Versicherung der landwirtschaftlichen Erträge kann durch den zusätzlichen Schutz der Kulturen abnehmen. Die Verwendung eines Bewässerungssystems bietet die Chance, die Ernteerträge unter geringem finanziellem Einsatz zu erhöhen.

6.2 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung anhand eines Beispiels

Im Folgenden wird auf drei verschiedene Fallbeispiele mit unterschiedlichen Vergütungsvarianten eingegangen.

Die Auflistung der verschiedenen Systemvarianten, sowie der verwendeten Systemgrößen und -kosten ist in Tabelle 12 ersichtlich. Es wurde sich an bisher realisierten Projekten, sowie Herstellerangaben und Expertenmeinungen orientiert und keine firmenbezogenen Angebote eingeholt.

¹² Es muss berücksichtigt werden, dass dieser Preis bereits vom April 2021 ist. Aktuelle Durchschnittswerte, die momentan tatsächlich greifbar sind, können noch nicht öffentlich eingeschätzt werden.

¹³ ROI ist ein Akronym für engl. „return on investment“.

Ein großer Kostenunterschied zwischen den einzelnen Systemtechniken entsteht durch die Module. Hierbei wurden verschiedene Modultypen gewählt, die unterschiedliche Kosten aufweisen. Eine Anpassung sollte immer zugunsten der angebauten Kulturen stattfinden, beispielsweise indem semi-transparente Module gewählt werden. Diese weisen je nach Transparenzgrad unterschiedliche Kosten auf (Abbildung 63) (Bousi, et al. 2022).

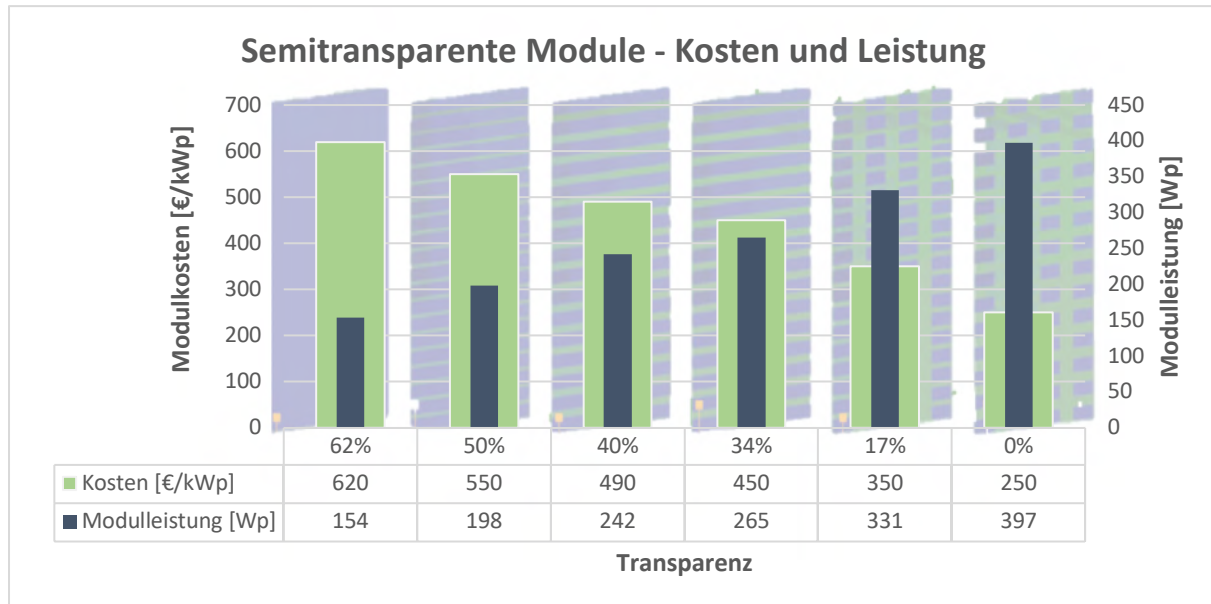


Abbildung 63: Kostenunterschiede semitransparenter Module nach Transparenzgrad [eigene Darstellung modifiziert nach Bousi, et al. (2022)].

Auch die Unterkonstruktion beinhaltet verschiedene Möglichkeiten. Hierbei bestehen jedoch noch Kostenunsicherheiten, da je nach Design und potentiellen Skaleneffekten große Preisspannen entstehen. Bei Installation und Standortvorbereitung könnten sich Maßnahmen zum Bodenschutz kostentreibend auswirken, allerdings sind standardisierte Maßnahmen zur Verminderung der Bodenverdichtung bereits Routine (Wydra, et al. 2022). Die übrigen elektrischen Komponenten können nach aktuellem Stand als vergleichbar angenommen werden. Bei den operativen Kosten sind Einsparungen gegenüber PV-FFA zu erwarten. Beispielsweise in der Flächenpflege, die bei APV-Anlagen durch die landwirtschaftliche Nutzung nicht notwendig ist. Die Verwendung von Tracking-Systemen birgt aufgrund der Beweglichkeit der Teile höhere operative Kosten. Unsicherheit besteht in den Annahmen der Reinigungskosten, daher wurden diese nicht einkalkuliert. Je nach Höhe und Nutzung der Anlage und auch Modultyp ist mit unterschiedlichem Reinigungsaufwand zu rechnen. Beispielsweise gibt es zu den Auswirkungen von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln auf die Module noch keine Erfahrungen; dies sollte im Fall der bodennahen Module Beachtung finden – allerdings findet im Grünland generell keine Ausbringung von Pflanzenschutzmitteln und wenig Düngung statt (Wirtschaftsdünger). Bei hoch aufgeständerten Anlagen würden ausgebrachte Mittel die Oberseite der Module kaum erreichen. Kommerzielle Dünger würden von den Anlagen abrieseln und Wirtschaftsdünger (Gülle) werden zumeist in den Boden eingebracht.

Nicht berücksichtigt wurde bei der Betrachtung, dass der Bau von großen Anlagen (im Ackerbau) auf großen Ackerflächen Skalierungseffekte hervorrufen könnte gegenüber kleineren Anlagen (beispielsweise im Gartenbau). Die Genehmigungskosten sollten dementsprechend mit zunehmender installierter Leistung sinken. Dies gilt es zukünftig zu untersuchen beziehungsweise in der Praxis zu testen. Hohe Investitionssummen könnten über geeignete Kredite den Landwirt*innen zu Verfügung gestellt werden. Der Ersatz von Kulturschutzvorrichtungen (Hagelschutznetze, Folientunnel, und weitere) könnte Kosteneinsparungen von bis zu 8.000 €/ha pro Jahr erzielen (Badelt et al., 2020).

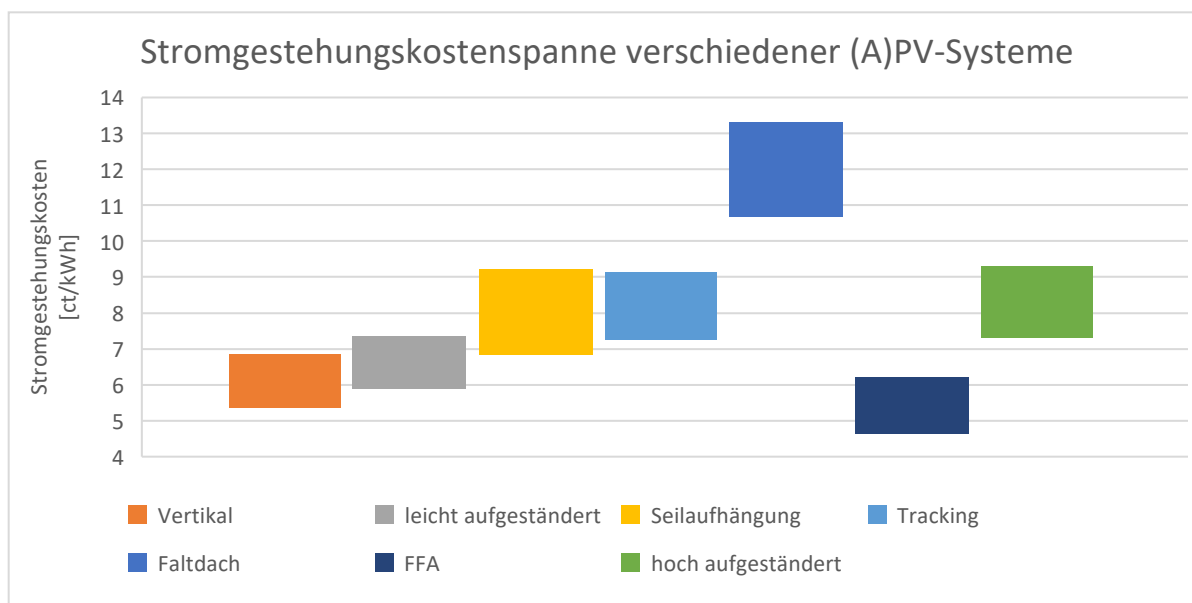


Abbildung 64: Vergleich der Stromgestehungskosten verschiedener (A)PV-Systeme auf Datenbasis von Tabelle 15 (eigene Darstellung).

Die Kosten in Tabelle 12 wurden unterteilt in minimale und maximale Gestehungskosten. Für die minimalen Kosten wurden nur unbedingt notwendige Kosten betrachtet. Die maximalen Kosten beinhalten zusätzliche Kosten (grau hinterlegte Felder), die nicht unbedingt erforderlich sind, wie beispielsweise Umzäunung und Bewässerungssystem. Als Anlagenbetreiber*in wird der/die Landwirt*in selbst angenommen, sodass eine Flächenpacht entfällt. Eine Reinigung der Module wird künftig als nicht notwendig eingestuft, da nach der, guten fachlichen Praxis keine Verschmutzung durch Düngemittel und Pflanzenschutzmittel geschehen sollte (Wydra, et al. 2022). Die Genehmigungskosten wurden unter zukünftigen Bedingungen angenommen. Hierbei wird die Genehmigung vereinfacht und es entstehen keine Kosten für spezifische Gutachten. Die fiktive APV-Anlage befindet sich in Hofnähe, sodass die Kosten geringer sind als bei weiter entfernten Flächen. Angenommen wurde ein Abstand von 2 km zum nächsten Netzanschlusspunkt. Ein Neubau eines Trafos wird als nicht erforderlich eingeordnet.

Mit diesen Annahmen ergeben sich Stromgestehungskosten für die verschiedene APV-Systeme (hochaufgeständert, vertikal, leichtaufgeständert, Faltdach, Seilaufhängung, Tracking) im Vergleich zur PV-FFA (Abbildung 64).

Tabelle 12: Kostenauflistung verschiedener APV-Systeme [modifiziert nach Wydra et al. (2022)].

	Parameter	Hochaufgeständert	Vertikal	Leicht-aufgeständert	Seilaufhängung	Tracking	Faltdach	PV-FFA
Parameter	Modultyp	Semitransparent	bi-fazial	Standard	Leichtbau	Tracking	Falt-/Leichtbau	Standard
	Leistungsdichte Stromertrag [kW/ha]	600 ¹	395 ⁶	700 ¹	530 ¹⁰	875 ¹	530 ¹⁰	1.000 ¹
	spezifische Stromerzeugung [kWh/kWp]*	1.100 ^{1,2}	1.100 ⁷	1.100 ^{1,2}	923 ¹⁰	1314 ¹	947 ¹⁰	1.100 ¹¹
	Reihenabstand [m]	18	10	4	40	7	50	2
	Flächeneinbuße maximal [%]	10 ³	15 ³	10 ³	10 ³	10 ⁵	10 ³	100 ³
	Lichte Höhe [m]	6	<2,1	3	5	5 ⁴	3	1
Investitionskosten [€/kWp]	Module	326 ¹	326 ¹	240 ¹	350 ¹	330 ⁵	900 ^{5,10}	220 ¹
	Unterkonstruktion	372 ¹	132 ¹	274 ¹	75 ⁶	550 ⁵	300 ^{5,10}	76 ¹
	Standortvorbereitung, Installation	228 ¹	93 ¹	137 ¹	200 ⁵	296,4 ⁵	93 ^{5,10}	84 ¹
	Wechselrichter	100 ⁵	100 ⁵	100 ⁵	100 ⁵	100 ⁵	100 ⁵	100 ^{5,6}
	Elektrische Komponenten	15 ⁴	15 ⁴	15 ⁴	15 ⁴	15 ⁴	15 ⁴	15 ⁴
	Netzanbindung	64 ¹²	64 ¹²	64 ¹²	64 ¹²	64 ¹²	64 ¹²	64 ¹²
	<i>Genehmigung</i>	<i>200⁵</i>	<i>200⁵</i>	<i>200⁵</i>	<i>200⁵</i>	<i>200⁵</i>	<i>200⁵</i>	<i>200⁵</i>
	<i>Wassersystem</i>	<i>5,33⁹</i>	<i>0,0⁹</i>	<i>5,33⁹</i>	<i>5,33⁹</i>	<i>0,0⁹</i>	<i>5,33⁹</i>	<i>0,0⁹</i>
	<i>Umzäunung</i>	<i>0⁴</i>	<i>18²</i>	<i>0^{2,4}</i>	<i>0⁴</i>	<i>0⁴</i>	<i>0⁴</i>	<i>18^{2,4}</i>
	CAPEX min [ct/kWh]	5,73	3,79	4,31	4,97	5,89	8,87	2,90
CAPEX max [ct/kWh]	6,80	4,92	5,37	6,24	6,75	10,10	4,03	

	Parameter	Hochaufgeständert	Vertikal	Leicht-aufgeständert	Seilaufhängung	Tracking	Faltdach	PV-FFA
Betriebskosten [€/kWp·a]	Versicherungen	2 ⁴	2 ⁴	2 ⁴	2 ⁴	3 ⁴	2 ⁴	2 ⁴
	Wartung, Reparaturen	1,7 ⁴	1,7 ⁴	1,7 ⁴	1,7 ⁴	2 ⁴	1,7 ⁴	1,5 ⁴
	kaufmännische Betriebsführung	5,5 ⁴	5,5 ⁴	5,5 ⁴	5,5 ⁴	5,5 ⁴	5,5 ⁴	5,5 ⁴
	Reserve	1 ⁴	1 ⁴	1 ⁴	1 ⁴	1 ⁴	1 ⁴	1 ⁴
	Sicherheitsüberwachung	1,44 ⁴	1,44 ⁴	1,44 ⁴	1,44 ⁴	1,44 ⁴	1,44 ⁴	1,8 ⁴
	Monitoring	2,4 ¹	2,4 ⁴	2,4 ⁴	2,4 ⁴	2,4 ⁴	2,4 ⁴	2,4 ⁴
	Instandhaltung, Flächenpflege	0,08 ⁴	0,08 ⁴	0,08 ⁴	0,08 ⁴	0,08 ⁴	0,08 ⁴	1,6 ⁴
	Verwaltungskosten	2 ⁴	2 ⁴	2 ⁴	2 ⁴	2 ⁴	2 ⁴	2 ⁴
	Sonstiges	1,1 ⁴	1,1 ⁴	1,1 ⁴	1,1 ⁴	1,1 ⁴	1,1 ⁴	1,1 ⁴
	<i>Reinigung</i>	9 ⁵	3 ¹	3 ^{1,9}	9 ⁵	12 ⁵	12 ⁵	3 ⁹
	<i>Flächenpacht</i>	1,3 ¹	1,3 ¹	1,6 ¹	1,3 ⁴	1,3 ⁴	1,3 ⁴	2 ¹
	OPEX min [ct/kWh]	1,57	1,55	1,57	1,87	1,36	1,82	1,72
OPEX max [ct/kWh]	2,50	1,96	1,99	3,02	2,39	3,22	2,27	
LCOE	Stromgestehungskosten min [ct/kWh]	7,30	5,35	5,87	6,84	7,27	10,69	4,62
	Stromgestehungskosten max [ct/kWh]	9,30	6,88	7,36	9,22	9,15	13,33	6,21

Quellennachweise: 1 – Fraunhofer ISE. (2022), 2 - Scharf et al. (2021), 3 - Deutsches Institut für Normung e.V. (2021), 4 - Schindele et al. (2020), 5 - Hörnle et al. (2021), 6 - Badelt et al. (2020), 7 - Next2Sun GmbH (2021), 8 – Hildebrandt (2021), 9 – Karthaus (2021), 10 – Monn (2021), 11 – UM BWL (2019), 12 – in Anlehnung an Hörnle et al. (2021) *Die spezifische Stromerzeugung ist abhängig von der Sonneneinstrahlung am gewählten Standort.

6.3 Ökonomische Fallbeispiele

Im Folgenden werden Fallbeispiele für Wirtschaftlichkeitsberechnungen von APV-Anlagen dargelegt. Hierbei handelt es sich um beispielhafte Berechnungen von nichtexistierenden Anlagen mit einer Größe von 1 ha. Es wird die technische Anlage (APV) betrachtet, keine spezifischen Pflanzenkulturen. Damit wurden keine Erträge auf landwirtschaftlicher Seite integriert. Hierbei wurde sich an bisher realisierten Projekten, sowie Herstellerangaben und Expertenmeinungen orientiert und es wurden keine firmenbezogenen Angebote eingeholt.

Es werden fünf Varianten vorgestellt, bei dem verschiedene Vergütungen und Nutzungsarten berechnet werden in den Szenarien „Energiekrise“ mit aktuellen hohen Strompreisen und „bisherige Energiesituation“, wobei sich hier an den Strompreisen des vergangenen Jahres orientiert wurde:

- (1) hundertprozentige Eigennutzung des Stroms (Szenario „Energiekrise“)
- (2) hundertprozentige Netzeinspeisung mit EEG-Vergütung (Szenario „Energiekrise“)
- (3) hundertprozentige Netzeinspeisung mit PPA (Szenario „Energiekrise“)
- (4) hundertprozentige Eigennutzung des Stroms (Szenario „bisherige Energiesituation“)
- (5) hundertprozentige Netzeinspeisung mit PPA (Szenario „bisherige Energiesituation“)

Es gilt zu beachten, dass die verwendeten Investitionskosten und Betriebskosten aus Publikationen bestehender Projekte und Anlagen der vergangenen Jahre ermittelt wurden. Daher wurde nicht einkalkuliert, dass die aktuelle Energiesituation künftig auch bei den CAPEX und OPEX für weitaus höhere Kosten sorgen könnte. Die EEG-Vergütung beinhaltet den Höchstwert des anzulegenden Wertes von 5,9 ct/kWh, da eine Leistung von 1 MWp nicht überschritten wird und daher der Bonus nicht greift.

6.3.1 Ökonomisches Fallbeispiel 1: leichtaufgeständerte APV-Anlage

Es wird ein Reihenabstand von 4 m und damit eine Flächenleistung von 700 kWp/ha auf einem Hektar angenommen. Durch den geringeren Reihenabstand wird empfohlen, schattentolerante Kulturen anzubauen. Gewählt wurden Standardmodule mit einer Modulleistung von 400 Wp und einem Wirkungsgrad von 21%. Der spezifische Stromertrag wird mit 1.100 kWh/kWp angenommen (Fraunhofer ISE 2022). Auf der Fläche von 1 ha ergäbe sich ein Stromertrag von 700.000 kWh/a. Die Investitionskosten belaufen sich in Höhe von circa 581.200 €. Zusammen mit den Betriebskosten von circa 12.000 €/a ergeben sich jährliche, finanzielle Lasten von etwa 45.000 € über die Zeit von 25 Jahren. Je nach Anbaukultur würden auch hier die erwirtschafteten Pflanzenerträge hinzugerechnet werden. Die Parameter der berechneten Anlage sind in Tabelle 13, sowie in Tabelle 14 die Berechnungsgrundlage aufgeführt.

Tabelle 13: Parameter der leichtaufgeständerten APV-Anlage auf einem Hektar Fläche; Weiterführung in Tabelle 14 (eigene Darstellung).

1. PV-Anlagendimensionierung		
Anlagenleistung	700	kWp
Ertrag	770.000	kWh/a
spezifische Stromerzeugung	1.100	kWh/kWp
Anlagenfläche	1	ha
2. Investitionskosten		
spezifische Investitionskosten	830	€/kWp
Investitionssumme	581.200	€
Kalkulationszins	5	%
Preissteigerung / Jahr	2	%
korrigierter Zinsfaktor	0,02941	%
Annuitätenfaktor	0,05705	%/a
Nutzungsdauer	25	a
Annuität & Kapitaldienst	33.158,69	€/a

Tabelle 14: Berechnungsgrundlage der beispielhaften leichtaufgeständerten APV-Anlage auf einem Hektar (eigene Darstellung).

Berechnung leichtaufgeständerte APV-Anlage	Einheit	
Investition		
Investitionskosten gesamt	T€	581
Tilgungs-/Abschreibungsdauer	a	25
Kalkulationszins	%/a	5
Preissteigerungsrate	%/a	2
Annuitätenfaktor		0,0571
jährlicher Kapitaldienst	T€/a	33,16
technische Daten der Anlage		
Anlagenleistung	kWp	700
spezifische Stromerzeugung pro Jahr	kWh/kWp	1.100
absolute Stromerzeugung pro Jahr	MWh/a	770
Betriebskosten		
Versicherungen	T€/a	1,40
Wartung, Reparaturen	T€/a	1,19
kaufmännische Betriebsführung	T€/a	3,85
Reserve	T€/a	0,70
Sicherheitsüberwachung	T€/a	1,008
Monitoring	T €/a	1,68
Instandhaltung, Flächenpflege	T €/a	0,056
Inflation	T €/a	0,014
Verwaltungskosten	T €/a	1,40

Sonstiges	T €/a	0,77
Reinigung	T €/a	0
Flächenpacht	T €/a	0
OPEX	T€/a	12,068
Umweltemissionen		
CO ₂ Emissionseinsparung	t/a	498,19
CO ₂ Vermeidungskosten	T€/t/a	1,15

Die verschiedenen Szenarien und Varianten wurden vergleichend in **Tabelle 15** aufgeführt. Die ökonomisch sinnvollste Variante ist die 100%ige Eigennutzung des Stroms bei aktuellen Strombezugskosten in Höhe von 25 ct/kWh. Die Anlage mit einer Leistung von 700 kWp hätte sich nach drei Jahren bereits amortisiert. Die am wenigsten wirtschaftliche Variante ist die 100%ige Netzeinspeisung bei einer Vergütung durch PPA von 5,5 ct/kWh, da die Amortisation erst nach fast 20 Jahren erfolgen würde. Die Amortisationszeit der Variante „hunderprozentiger Eigenverbrauch bei Strombezugskosten (gewerblich) von 15 ct/kWh“ wird in Abbildung 65 grafisch dargestellt.

Tabelle 15: Ökonomischer Variantenvergleich leichtaufgeständerter APV-Anlage nach Nutzung und Vergütung (eigene Darstellung).

Szenario	Variante	Energiekrise			bisherige Energiesituation	
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	Einheit	100% Eigenverbrauch	100% Netz, EEG	100% Netz, PPA	100% Eigenverbrauch	100% Netz, PPA
Einspeisevergütung	ct/kWh	-	5,90	11,60	-	5,50
Einnahmen Einspeisung	T €/a	0	45,43	89,32	0	42,35
Strombezugskosten Netto	ct/kWh	25,00	-	-	15,00	-
Kosteneinsparung Eigenverbrauch	T €/a	192,50	0	0	115,50	0
Summe Erlöse	T€/a	192,50	45,43	89,32	115,50	42,35
Einsparungen / Verlust	T €/a	147,27	0,20	44,09	70,27	-2,87
ROI statisch	a	3,22	17,42	7,52	5,62	19,19
Rendite	%/a	5,81	1,00	1,97	2,55	0,94

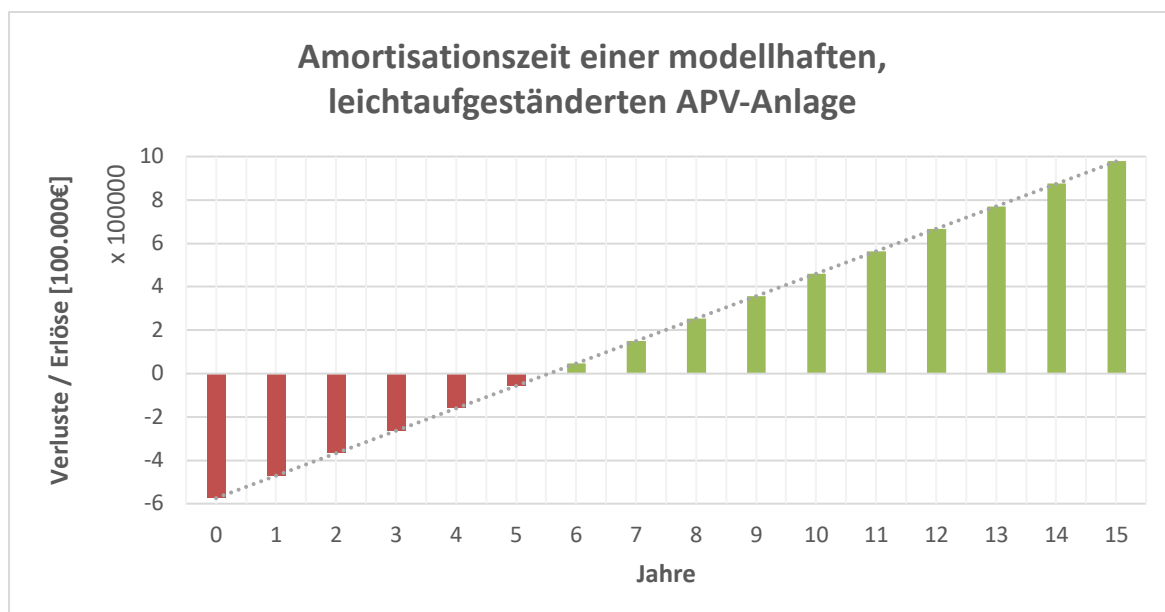


Abbildung 65: Amortisationszeit Berechnungsbeispiel leichtaufgeständerte APV-Anlage (eigene Darstellung).

6.3.2 Ökonomisches Fallbeispiel 2: hochaufgeständerte Anlagen

Es wird ein Reihenabstand von 18 m und damit eine Flächenleistung von 600 kWp/ha auf einem Hektar angenommen. Gewählt wurden bifaziale Glas-Glas-Module. Der spezifische Stromertrag wird mit 1.100 kWh/kWp angenommen (Fraunhofer ISE 2022). Auf der Fläche von 1 ha ergäbe sich ein Stromertrag von 660.000 kWh/a. Die Investitionskosten belaufen sich in Höhe von 663.171 €. Zusammen mit den Betriebskosten von 10.344 €/a ergeben sich jährliche, finanzielle Lasten von etwa 48.000 € über die Zeit von 25 Jahren. Je nach Anbaukultur würden auch hier die erwirtschafteten Pflanzenerträge hinzugerechnet werden. In Tabelle 16 sind die Parameter der berechneten Anlage, sowie in Tabelle 17 die Berechnungsgrundlage aufgeführt.

Tabelle 16: Parameter hochaufgeständerte APV-Anlage auf einem Hektar Fläche; Weiterführung in Tabelle 17 (eigene Darstellung).

1. PV-Anlagendimensionierung		
Anlagenleistung	600	kWp
Ertrag	660.000	kWh/a
spezifische Stromerzeugung	1.100	kWh/kWp
Anlagenfläche	1	ha
2. Investitionskosten		
spezifische Investitionskosten	1.105	€/kWp
Investitionssumme	663.171	€
Kalkulationszins	5	%
Preissteigerung / Jahr	2	%
korrigierter Zinsfaktor	0,02941	%
Annuitätenfaktor	0,05705	%/a
Nutzungsdauer	25	a
Annuität & Kapitaldienst	37.835,33	€/a

Tabelle 17: Berechnungsgrundlage der beispielhaften hochaufgeständerten APV-Anlage auf einem Hektar (eigene Darstellung).

Berechnung leichtaufgeständerte APV-Anlage	Einheit	
Investition		
Investitionskosten gesamt	T€	663
Tilgungs-/Abschreibungsdauer	a	25
Kalkulationszins	%/a	5
Preissteigerungsrate	%/a	2
Annuitätenfaktor		0,0571
jährlicher Kapitaldienst	T€/a	37,84
technische Daten der Anlage		
Anlagenleistung	kWp	600
spezifische Stromerzeugung pro Jahr	kWh/kWp	1.100
absolute Stromerzeugung pro Jahr	MWh/a	660
Betriebskosten		
Versicherungen	T€/a	1,20
Wartung, Reparaturen	T€/a	1,02
kaufmännische Betriebsführung	T€/a	3,30
Reserve	T€/a	0,60
Sicherheitsüberwachung	T€/a	0,86
Monitoring	T €/a	1,44
Instandhaltung, Flächenpflege	T €/a	0,05
Inflation	T €/a	0,01
Verwaltungskosten	T €/a	1,20

Sonstiges	T €/a	0,66
Reinigung	T €/a	0
Flächenpacht	T €/a	0
OPEX	T€/a	10,344
Umweltemissionen		
CO ₂ Emissionseinsparung	t/a	427,02
CO ₂ Vermeidungskosten	T€/t/a	1,55

Die verschiedenen Szenarien und Varianten wurden vergleichend in Tabelle 18 aufgeführt. Die ökonomisch sinnvollste Variante ist auch hier die 100%ige Eigennutzung des Stroms bei aktuellen Strombezugskosten in Höhe von 25 ct/kWh. Die Anlage mit einer Leistung von 600 kWp hätte sich nach vier Jahren amortisiert. Die am wenigsten wirtschaftliche Variante ist auch hier die 100%ige Netzeinspeisung bei einer Vergütung durch PPA von 5,5 ct/kWh, da die Amortisation erst nach 25 Jahren erfolgen würde. Auch die hundertprozentige Netzeinspeisung mit aktueller EEG-Vergütung von 5,9 ct/kWh (durch Ausschreibungen) würde einer Amortisation erst nach 23 Jahren gewährleisten. Dies deutet daraufhin, dass kleinere APV-Anlagen (mit einer Leistung unter 1 MWp) in den Ausschreibungen des ersten Segments (EEG2021) ebenfalls einem Bonus bedürfen.

Tabelle 18: Ökonomischer Variantenvergleich hochaufgeständerter APV-Anlage nach Nutzung und Vergütung (eigene Darstellung).

Szenario		Energiekrise			bisherige Energiesituation	
Variante		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	Einheit	100% Eigen- verbrauch	100% Netz, EEG	100% Netz, PPA	100% Eigen- verbrauch	100% Netz, PPA
Einspeisevergütung	ct/kWh	-	5,9	11,6	-	5,5
Einnahmen Einspeisung	T €/a	0	38,94	76,56	0	36,30
Strombezugskosten Netto	ct/kWh	25	-	-	15	-
Kosteneinsparung Eigenverbrauch	T €/a	165,00	0	0	99,00	0
Summe Erlöse	T€/a	165,00	38,94	76,56	99,00	36,30
Einsparungen / Verlust	T €/a	116,82	-9,23	28,38	50,82	-11,88
ROI statisch	a	4,29	23,19	10,02	7,48	25,55
Rendite	%/a	3,42	0,81	1,59	2,05	0,75

6.3.3 Ökonomisches Fallbeispiel 3: APV-Anlage mit Seilaufhängung

Es wird ein Reihenabstand von 40 m und damit eine Flächenleistung von 530 kWp/ha auf einem Hektar angenommen. Gewählt wurden Leichtbau-Module. Der spezifische Stromertrag wird mit 923 kWh/kWp angenommen (Fraunhofer ISE 2022). Auf der Fläche von 1 ha ergäbe sich ein Stromertrag von 489.200 kWh/a. Die Investitionskosten belaufen sich in Höhe von 426.271 €. Zusammen mit den Betriebskosten von 9.140 €/a ergeben sich jährliche, finanzielle Lasten von etwa 33.500 € über die Zeit von 25 Jahren. Je nach Anbaukultur würden auch hier die erwirtschafteten Pflanzenerträge hinzugerechnet werden. In Tabelle 19 sind die Parameter der berechneten Anlage, sowie in

Tabelle 20 die Berechnungsgrundlage aufgeführt.

Tabelle 19: Parameter APV-Anlage mit Seilaufhängung auf einem Hektar Fläche; Weiterführung in Tabelle 20 (eigene Darstellung).

1. PV-Anlagendimensionierung		
Anlagenleistung	530	kWp
Ertrag	489.199,8	kWh/a
spezifische Stromerzeugung	923,0	kWh/kWp
Anlagenfläche	1	ha
2. Investitionskosten		
spezifische Investitionskosten	804	€/kWp
Investitionssumme	426.271	€
Kalkulationszins	5	%
Preissteigerung / Jahr	2	%
korrigierter Zinsfaktor	0,02941	%
Annuitätenfaktor	0,05705	%/a
Nutzungsdauer	25	a
Annuität & Kapitaldienst	24.319,69	€/a

Tabelle 20: Berechnungsgrundlage der beispielhaften APV-Anlage mit Seilaufhängung auf einem Hektar (eigene Darstellung).

Berechnung leichtaufgeständerte APV-Anlage	Einheit	
Investition		
Investitionskosten gesamt	T€	426
Tilgungs-/Abschreibungsdauer	a	25
Kalkulationszins	%/a	5
Preissteigerungsrate	%/a	2
Annuitätenfaktor		0,0571

jährlicher Kapitaldienst	T€/a	24,32
technische Daten der Anlage		
Anlagenleistung	kWp	530
spezifische Stromerzeugung pro Jahr	kWh/kWp	923
absolute Stromerzeugung pro Jahr	MWh/a	489
Betriebskosten		
Versicherungen	T€/a	1,06
Wartung, Reparaturen	T€/a	0,90
kaufmännische Betriebsführung	T€/a	2,92
Reserve	T€/a	0,53
Sicherheitsüberwachung	T€/a	0,76
Monitoring	T €/a	1,27
Instandhaltung, Flächenpflege	T €/a	0,04
Inflation	T €/a	0,01
Verwaltungskosten	T €/a	1,06
Sonstiges	T €/a	0,58
Reinigung	T €/a	0,00
Flächenpacht	T €/a	0,00
OPEX	T€/a	9,14
Umweltemissionen		
CO ₂ Emissionseinsparung	t/a	316,51
CO ₂ Vermeidungskosten	T€/t/a	1,35

Die verschiedenen Szenarien und Varianten wurden vergleichend in Tabelle 21 aufgeführt. Die ökonomisch sinnvollste Variante ist ebenfalls die hundertprozentige Eigennutzung des Stroms bei aktuellen Strombezugskosten in Höhe von 25 ct/kWh. Die Anlage mit einer Leistung von 530 kWp hätte sich nach 3,7 Jahren amortisiert. Die am wenigsten wirtschaftliche Variante ist auch hier die hundertprozentige Netzeinspeisung bei einer Vergütung durch PPA von 5,5 ct/kWh, da die Amortisation erst nach 24 Jahren erfolgen würde. Auch die hundertprozentige Netzeinspeisung mit aktueller EEG-Vergütung von 5,9 ct/kWh (durch Ausschreibungen) würde einer Amortisation erst nach 21,6 Jahren gewährleisten. Demnach wäre auch bei dieser Anlage ein Bonus im Sinne des §38 EEG 2023 sinnvoll.

Tabelle 21: Ökonomischer Variantenvergleich APV-Anlage mit Seilaufhängung nach Nutzung und Vergütung (eigene Darstellung).

Szenario		Energiekrise			bisherige Energiesituation	
Variante		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	Einheit	100% Eigenverbrauch	100% Netz, EEG	100% Netz, PPA	100% Eigenverbrauch	100% Netz, PPA
Einspeisevergütung	ct/kWh	-	5,9	11,6	-	5,5
Einnahmen Einspeisung	T €/a	0	28,86	56,75	0	26,91
Strombezugskosten Netto	ct/kWh	25	-	-	15	-
Kosteneinsparung Eigenverbrauch	T €/a	122,30	0	0	73,38	0
Summe Erlöse	T€/a	122,30	28,86	56,74	73,38	26,90
Einsparungen / Verlust	T €/a	88,84	-4,59	23,29	39,92	-6,55
ROI statisch	a	3,77	21,61	8,95	6,64	23,99
Rendite	%/a	3,66	0,86	1,70	2,19	0,80

6.4 Fazit

Der Variantenvergleich der verschiedenen Systeme zeigt, dass die Höhe der Vergütung beziehungsweise die Nutzung (Eigenverbrauch oder Netzeinspeisung) ausschlaggebend für die Wirtschaftlichkeit einer APV-Anlage sind. Eine Steigerung der Anzahl realisierter APV-Anlagen führt zu Skaleneffekten und damit sinkenden Kosten. Auch bleibt abzuwarten, ob der Bonus nach §38 EEG 2023 künftig auch für kleinere APV-Anlagen unter 1 MWp Leistung gilt. Weiterhin wurde nicht die Variante „50% Eigenverbrauch, 50% Netzeinspeisung“ betrachtet, da dies im aktuellen EEG 2021 einen Sonderfall darstellt.

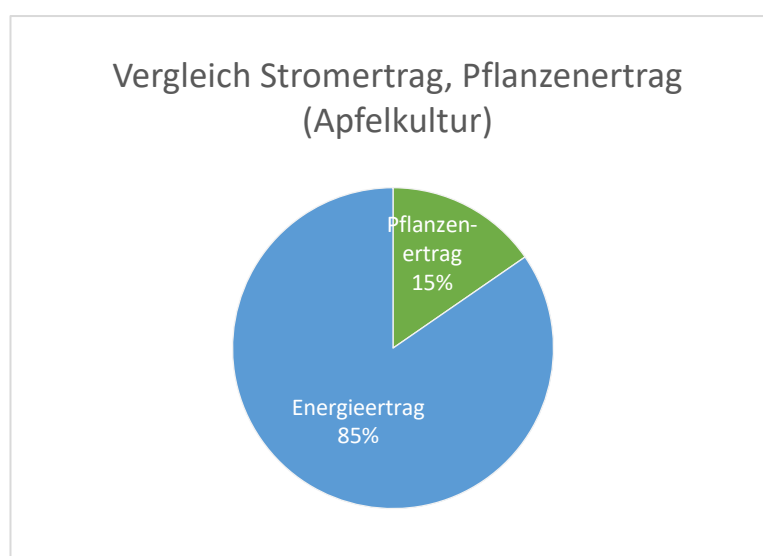


Abbildung 66: Quantitativer Gewinnvergleich von Strom- und Pflanzenertrag einer hochaufgeständerten APV-Anlage bei 100% Eigenverbrauch und Strombezugskosten von 15 ct/kWh (eigene Darstellung).

Auf landwirtschaftlicher Seite entstehen neben den Kosten für die Bewirtschaftung unter der APV-Anlage auch Gewinne durch den Verkauf der Pflanzenerträge. Da die landwirtschaftlichen Gewinne von der Pflanzenkultur abhängig sind, wurden sie nicht in die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung einbezogen. Es bleibt allerdings zu erwähnen, dass die Gewinne aus den Strom- und Pflanzenerträgen einen erheblichen Unterschied aufweisen (Abbildung 66).

Da der Ausbau der APV in Deutschland noch weiter voranschreiten muss, sind künftig neben den Skaleneffekten auch Optimierungsmöglichkeiten auf technischer und ökonomischer Seite zu erwarten. Einen zusammenfassenden Vergleich der verschiedenen Anlagentypen durch Investitions-, Betriebs- und Stromgestehungskosten zeigt Abbildung 67. Der Vergleich ist bezogen auf einen Hektar APV-Fläche, sodass hier keine Skaleneffekte einbegriffen wurden.

Der Vergleich der Szenarien hat gezeigt, dass ein möglichst hoher Eigenverbrauchsanteil immer die wirtschaftlich sinnvollste Variante ist. Hingegen schlossen die hundertprozentigen Netzeinspeisungen mit geringen Vergütungssätzen am schlechtesten ab, da die Amortisationszeit bei über 20 Jahren lag. Hier gilt es dringend, die Vergütungssätze auch für kleine APV-Anlagen anzupassen beziehungsweise den Bonus auszuweiten.

Innerhalb der Anlagensysteme bieten die kostengünstigen Seilaufhängungen an Stelle von massiven Stahl-Aufständern ein großes Potential, wobei die Bewirtschaftung und der Schutz der Pflanzen immer im Vordergrund stehen sollte. Die innovative Faltdachanlage ist aktuell noch die teuerste Variante, da sie die kürzeste Zeit am Markt ist. Aufgrund der langjährigen Marktverfügbarkeit sind PV-FFA bisher noch am günstigsten, dies wird sich künftig jedoch ändern, insbesondere wenn APV als „der Landwirtschaft dienende Funktion“ betrachtet wird. Die Schutzwirkung der APV-Anlage gleicht die derzeit noch höheren Kosten im Vergleich zur PV-FFA aus.

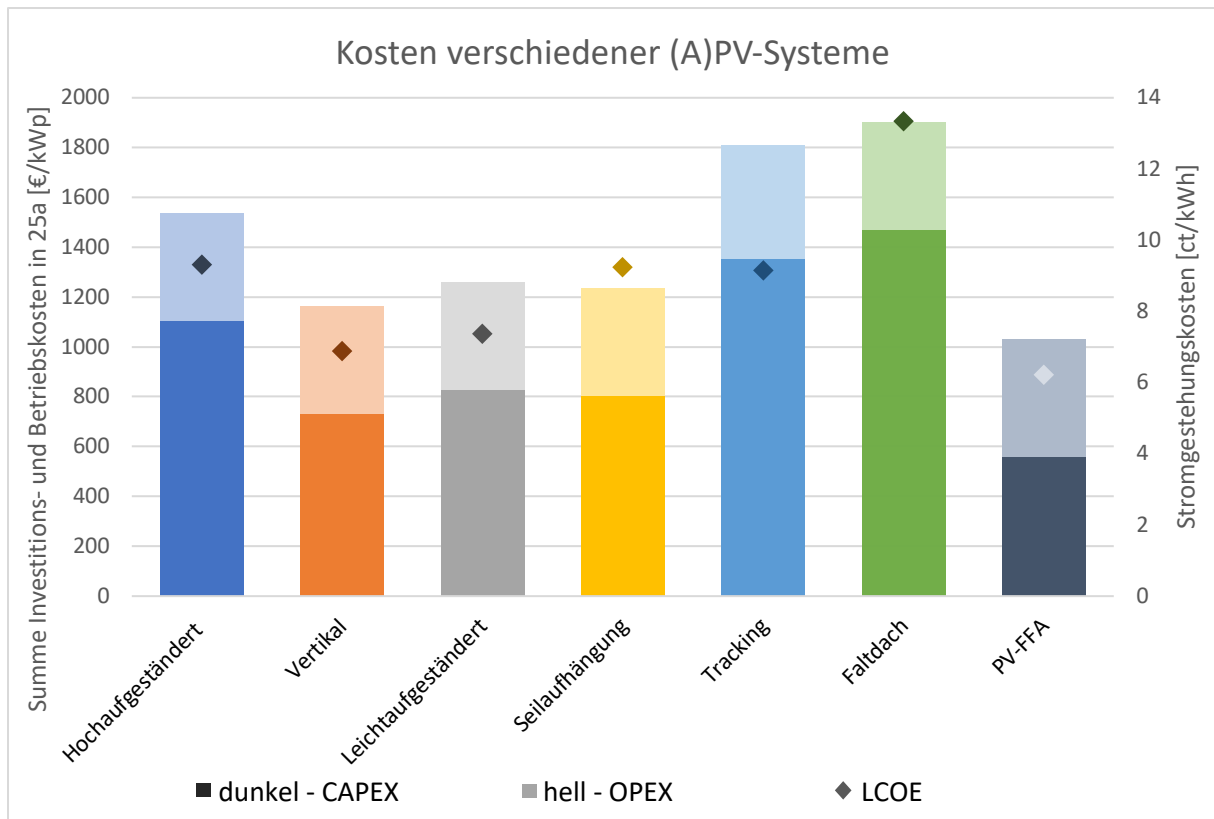


Abbildung 67: Ökonomischer Vergleich der Stromgestehungs-, Investitions- und Betriebskosten verschiedener APV-Systeme und PV-FFA auf einem Hektar (eigene Darstellung).

7 Fazit, Diskussion und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde gezeigt, dass die APV in Deutschland einen Lösungsansatz zur Entschärfung der Flächennutzungskonkurrenz, zur Stärkung der landwirtschaftlichen Resilienz und zum Voranbringen von Natur-, Umweltschutz und Energiewende bieten kann.

Die APV erlebt derzeit einen regelrechten Aufschwung in Deutschland und weltweit. Eine Vielzahl an neu erschienenen Publikationen bestätigt diesen Trend. Dennoch stellt die APV eine neue Technologie mit einigen Herausforderungen dar. Dies wurde anhand einer fehlenden allgemeinen Definition von APV-Systemen, sowie der rechtlich noch nicht vollständig geregelten Situation gezeigt. Verschiedene Definitionsansätze bieten jedoch eine gute Grundlage und mit Einführung des EEG 2023 wird sich auch künftig die rechtliche Situation der APV vereinfachen.

Die in der deutschen Nachhaltigkeitsstrategie festgesetzten Ziele zur Treibhausgasreduktion, Flächenschonung und Klimaneutralität machen erneuerbare Energien notwendig. APV-Anlagen verursachen durch die doppelte Flächennutzung keinen Flächenverlust. Verschiedene Publikationen geben ein Potential für Deutschland zwischen 130 GW (praktisch) und 1.700 GW (theoretisch) an. Die aktuellen klimatischen Auswirkungen auf die Landwirtschaft könnten durch die Installation von APV-Anlagen reduziert werden. Die Schutzwirkung der APV-Anlage verringert Pflanzenschäden, die durch Hagel, Starkregenereignisse, Dürre, Hitzestress und Schlammlawinen entstehen würden. Die Installation von APV-Anlagen könnte dazu beitragen, dass die Biodiversität erhöht wird, indem eine Extensivierung der landwirtschaftlichen Flächen stattfindet und Bestäuberhabitate errichtet werden. Weiterhin kann mit geringem Aufwand ein Regenwassermanagement erfolgen, sodass einerseits übermäßiger Starkregen abgeschwächt wird, andererseits die Pflanzen gezielt bewässert werden können und so der Pilzbefall reduziert, das Grundwasser angereichert und das Pflanzenwachstum gefördert werden kann. Auch das Mikroklima kann je nach Auslegung der APV-Anlage so beeinflusst werden, dass der Pflanzenertrag gesteigert wird. Weiterhin kann die Kombination von Landwirtschaft und Solarwirtschaft den Wirkungsgrad der Solaranlage durch Evapotranspiration unterhalb der Module steigern. Durch APV-Anlagen können CO₂-Emissionen reduziert werden, der ökologische Fußabdruck in der Landwirtschaft optimiert, landwirtschaftliche Erträge gesichert, das Einkommen in der Landwirtschaft diversifiziert, Stromkosten für landwirtschaftliche Prozesse reduziert, die Biodiversität gesteigert und die Energiesicherheit gestärkt werden. Damit besteht die Notwendigkeit zum Ausbau von APV-Anlagen.

Die Auswirkungen von APV auf Umwelt, Landwirtschaft und die PV-Anlage selbst, sind noch nicht vollständig erforscht. Die oben genannten Argumentationen entsprechen aktuellen Forschungserkenntnissen. Diese gilt es künftig weiter zu prüfen und zu belegen, sowie auf andere Projekte zu übertragen. Durch zusätzliche Untersuchungen können weitere, detaillierte

Ergebnisse zur Notwendigkeit von APV-Anlagen im Sinne der Stärkung der landwirtschaftlichen Resilienz und Optimierung der Pflanzenerträge in Deutschland ermittelt werden.

Die Literaturrecherche zeigt ein breites Spektrum an Forschungsthemen, die im Bereich der APV untersucht werden. Betrachtet wurden 129 Publikationen, von denen zwei Drittel im Jahr 2022 veröffentlicht wurden. Im Bereich „Allgemeiner Überblick und Reviews“ wurden 17 Publikationen vorgestellt, die das Prinzip der APV erläutern, einen zusammenfassenden Überblick über verschiedene Themengebiete geben, diese aber nicht tiefgreifend erläutern oder erforschen. In diesem Bereich finden sich viele Studien mit Sekundärdaten und Metastudien, wodurch gezeigt wird, dass es sich oft um Literaturrecherchen handelt und nicht um empirische Forschungserkenntnisse. Im Bereich „Design, Gestaltung und optische Anlagenkonstruktion“ wurden lediglich drei Publikationen gesichtet. Diese zeigen mögliche Integrationsmaßnahmen zur optischen Eingliederung der APV-Anlage in die Landschaft auf, wie beispielsweise die Anpassung der Linienstruktur der Anlage an vorhandene Strukturelemente in der Natur. Hierbei gilt es zu erwähnen, dass eine Studie auf PV-FFA bezogen ist. Die gewonnenen Erkenntnisse können dennoch auf APV übertragen und Hinweise bei der Anlagengestaltung berücksichtigt werden. Im Bereich „Entwicklung und Potential“ (16 Publikationen) werden Akzeptanzbefragungen und Potentialanalysen vorgestellt. Diese beziehen sich auf verschiedene Länder oder werden global betrachtet. Weiterhin werden die Entwicklungen der APV in den einzelnen Ländern betrachtet, sowie die Gewichtung von Herausforderungen der APV in den Ländern verglichen. Es wurden 27 Publikationen im Bereich „Pflanzenbau, Biodiversität und Ertragssteigerung“ gesichtet. Diese betrachten die Ertragsveränderungen, sowie mikroklimatische Verhältnisse unter APV-Anlagen. Die Publikationen wurden in unterschiedlichen Ländern veröffentlicht und beziehen sich auf eine Vielzahl an Pflanzenkulturen. Die betrachteten Pflanzenkulturen beinhalten sowohl gartenbauliche Kulturen, Dauerkulturen, Ackerfrüchte, Zierpflanzen als auch Sonderkulturen. Weiterhin werden Systemkomponenten optimiert, die unmittelbar den Pflanzenertrag steigern können, wie beispielsweise Regenwassermanagement-Systeme. In diesem Bereich finden sich sieben Publikationen, die sich ausschließlich mit Biodiversitätsmaßnahmen und der Optimierung der Ökologie befassen, wobei die meisten dieser Studien für PV-Anlagen allgemein gelten bzw. speziell für PV-FFA sind. Hier kann ebenfalls die Übertragung auf APV-Anlagen erfolgen. Länderspezifische Studien bzw. projektspezifische Publikationen, die nur mit (hohem) Aufwand auf andere Projekte übertragbar sind, werden im Bereich „Spezifische Studien“ ersichtlich. Betrachtet wurden neun Publikationen, wobei sich davon drei auf die Forschungsanlage Heggelbach beziehen, fünf speziell auf Länder und eine davon auf die Haltung von Kaninchen unter APV-Anlagen. Der Bereich „Systemkomponenten“ umfasst die meisten Publikationen. Hier werden 57 Untersuchungen veröffentlicht, die die stromertragssteigernden Komponenten der Anlage erforschen und Optimierungsmöglichkeiten vorstellen. Dies umfasst unter anderem Simulationen und Modelle zur

technischen Integration in die Landschaft. Weiterhin wird die eigentliche Konstruktion der Anlage betrachtet und sowohl statisch als auch technisch optimiert und in einigen Publikationen werden Innovationen zur Kostenreduktion erforscht. Wie sich die Strahlung und die Albedo unter der APV-Anlage verhält und besser verteilt wird, sowie die Solarzellentechnologie, die für eine bessere Licht- und Strahlungsverteilung sorgen kann, ist ebenfalls Gegenstand der Forschung. Weiterhin werden Optimierungen des Regenwassermanagement- und Nachführungssystem entwickelt und erforscht, sowie Stromertragssteigerungen, Innovationen (AgroPV) und die Verbesserung der ökonomischen Aspekte von APV-Anlagen.

Da die APV derzeit einen Aufschwung erlebt, werden stetig neue Publikationen zur APV veröffentlicht. Hier gilt es die Möglichkeit der Literaturrecherche fortzuführen, den Untersuchungsrahmen zu erweitern und die Ergebnisse detaillierter aufzubereiten.

Im Stand der Technik wurden verschiedene Systemtechniken vorgestellt und die Einordnung in die Kategorien der DIN-SPEC91434 erläutert. Die Herausforderungen, Vor- und Nachteile, sowie innovative Neuerscheinungen am Markt und noch nicht marktreife Technologien wurden für die verschiedenen Komponenten vorgestellt. Diese beinhalten vor allem die Aufständertechnik und die Modultechnologien. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es zahlreiche Möglichkeiten gibt, um die APV in bestehende Landschafts- und Landwirtschaftssysteme zu integrieren. Werden Technologien verwendet, die es breit verfügbar am Markt gibt, so reduziert dies den Kostenaufwand. Hierbei sollte jedoch die Optimierung des Pflanzenertrags und vor allem der Schutz der Pflanzenkulturen im Vordergrund stehen. Daher gilt es weiterhin zu erforschen, wie diese optimiert werden können. Aktuell scheinen semitransparente und bifaziale Module eine vielversprechende Lösung für optimale Strom- und Pflanzenerträge darzustellen. Die APV kann in das Landschaftsbild integriert werden, wenn beispielsweise Strukturelemente übernommen werden oder die APV-Anlage über Kulturen installiert wird, die ansonsten eine alternative Schutzeinrichtung (Hagelschutznetz, Folientunnel) benötigen würden.

Beispielhaft wurden im nächsten Schritt in Deutschland bestehende Forschungsanlagen erläutert, sowie eine Übersicht zu bestehenden Praxis- und Forschungsanlagen gegeben. Den größten Anteil an Forschungsprojekten betreut das Fraunhofer ISE. Aktuell sind fünf weitere APV-Anlagen zu Forschungszwecken in Planung und können bald realisiert werden. Nicht abzuschätzen ist, wie viele Anlagen sich aktuell in Planung oder bereits in der Umsetzung befinden, aber noch nicht publiziert wurden. Daher besteht eine gewisse Unsicherheit in der Anzahl der bestehenden Anlagen in Deutschland. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass in den nächsten Jahren zahlreiche weitere APV-Anlagen errichtet werden. Dies wird auf den fortschreitenden Klimawandel und dessen Auswirkungen auf die Landwirtschaft, sowie neue Forschungserkenntnisse und langfristig auch die Entstehung erster Skalierungseffekte zurückzuführen sein.

Für drei spezifische Fallbeispiele wurde eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durchgeführt. Hierbei wurden die Kosten aus Literaturrecherchen und Erfahrungen bestehender Projekte übernommen. Es wurden aufgrund der aktuellen, geopolitischen Situation keine firmenbezogenen Angebote eingeholt. Es wurden verschiedene Nutzungs- und Vergütungsmöglichkeiten betrachtet. Im Szenario I wurden aktuelle Preise verwendet, wobei im Szenario II Preise aus der bisherigen Energiesituation verwendet wurden (Stand 2021). Dabei wurden jeweils drei Varianten betrachtet: eine hundertprozentige Eigennutzung des APV-Stroms, eine hundertprozentige Netzeinspeisung mit PPA-Vergütung und eine hundertprozentige Netzeinspeisung mit EEG-Vergütung, wobei es für die EEG-Vergütung nur ein Szenario gibt, da sich diese noch nicht geändert hat. Als Ergebnis wurde ermittelt, dass die hundertprozentige Eigennutzung des Stroms bei allen Systemvarianten (leichtaufgeständert, hochaufgeständert und Seilaufhängung) die wirtschaftlich sinnvollste Variante ist. Am unwirtschaftlichsten hingegen ist die hundertprozentige Netzeinspeisung mit PPA in Höhe von 5,5 ct/kWh. Eine Förderung für kleinere Anlagen ist damit erforderlich, um APV-Anlagen in Deutschland weitläufig auszubauen. Dennoch können APV-Anlagen bereits jetzt ökonomisch sinnvoll sein, sowie die Stromkosten des landwirtschaftlichen Betriebs erheblich reduzieren. Aufgrund der Vorteile und positiven Auswirkungen der APV-Anlage auf die Pflanzenerträge wird ein Ausbau der APV in Zukunft stattfinden. Dadurch werden Skaleneffekte auftreten und eventuell auch die Vergütung angepasst, sodass APV-Anlagen künftig wirtschaftlich sinnvoller werden. Die Wirtschaftlichkeitsberechnung kann durch die Betrachtung weiterer APV-Systeme ergänzt werden. Die Validität der Ökonomieberechnung könnte beeinflusst werden, wenn firmenbezogene Angebote eingeholt werden würden. Die landwirtschaftlichen Erträge wurden nicht in die Berechnung einbezogen, sollten jedoch bei einer projektspezifischen Kalkulation Beachtung finden. Weitere Forschungsfragen entstehen durch die Ergänzung der berechneten Anlagen mit Regenwassermanagementsystemen, Reinigungsarbeiten, Umzäunungen, Robotik, Sektorenkopplung (Speicherung und Ladung der landwirtschaftlichen Maschinerien), sowie der Erweiterung der Rahmenbedingungen (Netzanschlusskosten, Genehmigungskosten).

Es wurde gezeigt, dass die Forschung bereits viele Lösungsansätze und Erkenntnisse zu Herausforderungen der APV bietet. Auch ist bereits eine wirtschaftliche Umsetzung von APV-Systemen möglich. Damit kann die APV einen wichtigen Beitrag zur sicheren Lebensmittel- und Strombereitstellung leisten - besonders in Hinsicht auf die zunehmenden Auswirkungen des Klimawandels, trotz derzeit noch bestehender Herausforderungen.

Literaturverzeichnis

- Abidin, M. A., Mahyuddin, M. N., Zainuri, M. A. (2021).** Solar Photovoltaic Architecture and Agronomic Management In Agrivoltaic System - A Review. Malaysia: Sustainability - MDPI. 2021. 13, 7846. <https://doi.org/10.3390/su13147846>.
- Adeh, E. H., Selker, J. S., Higgins, C. W. (2018).** Remarkable Agrivoltaic Influence on Soil Moisture, Micrometeorology and Water-Use Efficiency. Italien: Plos ONE. 2018. 13(11): e0203256. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203256>.
- ADEME, et al. (2021).** Characterising Solar PV Projects on Agricultural Land and Agrivoltaism. Frankreich. : s.n., 2021. <https://librairie.ademe.fr/>.
- Adolfo, R., Kyle, P., Azad, D., Maggie, G., Serkan, M., et al. (2022).** Photovoltaic Panels do not Alter Substantially the Spectral Composition, Particularly the Red/Far-Red Ratio, of the Transmitted Radiation. Agrivoltaics 2022.
- AEE. (2017).** Agentur für Erneuerbare Energien. Abgerufen am 02. 11 2022 von Entwicklung Bäuerlicher Investitionen in Erneuerbare Energien: https://www.unendlich-viel-energie.de/media/image/17631.aee_grafik_investitionen_landwirtschaftlicher_betrieb_e_2009_2017_nov17_72dpi.jpg
- AEE. (2021).** Agentur für Erneuerbare Energien. Abgerufen am 10. 10 2022 von AEE-Akzeptanzumfrage 2021: <https://www.unendlich-viel-energie.de/mediathek/grafiken/ae-akzeptanzumfrage-2021>
- Agostini, A., Colauzzi, M., Amaducci, S. (2020).** Innovative Agrivoltaic Systems to Produce Sustainable Energy: an Economic and Environmental Assessment. Italien: Applied Energy - Elsevier. 2020. 281 (2021) 116102. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116102>.
- Agroscope. (2021).** Launch of a Multi-Functional Pilot Agrivoltaic Installation by Insolight, Romande Energie and Agroscope. Federal Department of Economic Affairs, Education and Research EAER, Agroscope, Schweiz.
- Ahmed, M. S., Khan, M. R., Haque, A., Khan, M. R. (2022).** Agrivoltaics Analysis In A Techno-Economic Framework: Understanding why Agrivoltaics on Rice Will Always Be Profitable. Bangladesh: Applied Energy. 2022. 323 (2022) 119560. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119560>.
- Al Mamun, M. A., Dargusch, P., Wadley, D., Zulkarnain, N. A., Aziz, A. A. (2022).** A Review of Research on Agrivoltaic Systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier(161). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112351>.
- Alam, H., Butt, N. Z. (2022).** Selection of Optimal Module Array Density for Agrivoltaic Systems. Agrivoltaics 2022.
- Arabatzis, I., Todorova, N., Fasaki, I., Tsesmeli, C., Peppas, A., Li, W. X., Zhao, Z. (2016).** Photocatalytic, Self-Cleaning, Antireflective Coating for Photovoltaic Panels: T Characterization and Monitoring In Real Conditions. Griechenland, China: Elsevier - Solar Energy. 2016. 159 (2018) 251–259. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2017.10.088> .
- Armstrong, A., Ostle, N. J., Whitaker, J. (2016).** Solar Park Microclimate and Vegetation Management Effects on Grassland Carbon Cycling. England: Environmental Research Letter. 2016. 11 074016. doi:10.1088/1748-9326/11/7/074016.
- Arnett, J. C., Schaffer, L. A., Rumberg, J. P., Tolbert, R. E. (1984).** Design, Installation and Performance of the ARCO Solar one-Megawatt Power Plant. In D. Dordrecht (Hrsg.), Photovoltaic Solar Energy Conference; Proceedings of the Fifth International Conference. Athen: Reidel Publishing Co. A85-11301 02-44. S. 314-320

- Axial Structural Solutions. (O.J.).** Axialtracker's Product Range. Abgerufen am 03. 03 2022 Von Adaptive Solar Tracking System: <https://www.axialstructural.com/solar-tracker?lang=en>
- Badelt, O., Niepelt, R., Wiehe, J., Matthies, S., Gewohn, T., Stratmann, M., Haaren, C. V. (2020).** Integration von Solarenergie in die Niedersächsische Energielandschaft (INSIDE). Hannover: Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz; Institut für Solarenergieforschung GmbH Hameln/Emmerthal (ISFH); Institut für Umweltplanung (IUP); Institut für Festkörperphysik (FKP).
- Balz, M., Frank, M., Schweitzer, A., Bohn, M. (2022).** Low-Cost Long-Span Agrivoltaics Prototype for Large-Scale Application. *Agrivoltaics 2022*. 2022. https://cms2022.agrivoltaics-conference.org/file/display_attachment/b78fff245b66bc04d861af7d303e16a?filename=Markus+Balz+-+Abstract.pdf.
- Barron-Gafford, G., Kai Lepley, A. S., Barnett-Moreno, I., Ortega, C., Rogers, M., Murphy, P. (2019).** Agrivoltaics As A Cure for Midday Depression - Shade From PV Provides Respite for Food Crops In Drylands. USA: *Agrivoltaics 2022*. 2019. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0364-5>.
- Bartels, S. (2019).** Stellungnahme: Reflexionsverhalten Photovoltaikmodule. Viersen: NEW AG. S.8.
- BBH. (2022).** Agri-PV Als Steuerprivilegierte Landwirtschaft: Die Katze Ist Aus Dem Sack! Abgerufen am 05. 10 2022 von <https://www.bbh-blog.de/alle-themen/steuern/agri-pv-als-steuerprivilegierte-landwirtschaft-die-katze-ist-aus-dem-sack/>
- BDEW. (2021).** Anteil Der Photovoltaik An Der Bruttostromerzeugung In Deutschland In Den Jahren 2002 Bis 2021. Deutschland: Statista Research Department.
- Beckmann, M., Gerstner, K., Akin-Fajjiye, M., Ceaușu, S., Kambach, S., Kinlock, N. L., Seppelt, R. (2019).** Conventional Land-Use Intensification Reduces Species Richness and Increases Production: A Global Meta-Analysis. Leipzig: Wiley - *Global Change Biology*. 2019. DOI: 10.1111/gcb.14606.
- Bigler, C., Bugmann, H. (2018).** Climate-Induced Shifts In Leaf Unfolding and Frost Risk of European Trees and Shrubs. *Scientific Reports* 8, 9865. 2018. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-27893-1>.
- Bím, J. (2022).** Agrivoltaics As A Tool for Protective Belts Between Soil Blocks. Prague: *Agrivoltaics 2022*.
- Blum, M., Colell, A., Hoffmann, J., Karohs, K., Kowarsch, M., Krude, M., Thiel, H. (2021).** Was Ist Uns Wichtig Bei Verkehrs- und Stromwende? Bürgerinnen und Bürger Sprechen Über Herausforderungen und Ziele. Potsdam: Kopernikus-Projekt Ariadne - Potsdam-Institut Für Klimafolgenforschung (PIK), 2021.
- BMEL. (2022).** Statista. Abgerufen am 07. 10 2022 Von Getreideernte In Deutschland Insgesamt In Den Jahren 2010/11 Bis 2020/21: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/164076/umfrage/getreideernte-in-deutschland-insgesamt/>
- BMUV. (2022).** Flächenverbrauch – Worum Geht Es? Abgerufen am 15. 08 2022 Von <https://www.bmuv.de/themen/nachhaltigkeit-digitalisierung/nachhaltigkeit/strategie-und-umsetzung/flaechenverbrauch-worum-geht-es>
- BMWK. (2022).** Gesetzentwurf Der Bundesregierung . Abgerufen am 10. 10 2022 Von Entwurf Eines Gesetzes Zu Sofortmaßnahmen Für Einen Beschleunigten Ausbau Der Erneuerbaren Energien Und Weiteren Maßnahmen Im Stromsektor : https://www.bmwk.de/redaktion/DE/Downloads/Energie/04_EEG_2023.Pdf?__blob=publicationfile&V=8

- Boujdaini, I. E., Bruhwylers, R., Robledo, J., Sarr, B., Leloux, J., Lebeau, F. (2022).** 3D Irradiance and Energy Yield Simulation for Agrivoltaics In Greenhouses With Bifacial Photovoltaic (PV) Modules. Belgien: Agrivoltaics 2022.
- Boujdaini, I. E., Bruhwylers, R., Robledo, J., Sarr, B., Leloux, J., Lebeau, F. (2022).** Agrivoltaics With Vertical Bifacial Photovoltaic (PV) Modules: Irradiance and Energy Yield Modelling With Lusim. Belgien: Agrivoltaics 2022.
- Bousi, E., Gfüllner, L., Hopf, M., Trommsdorff, M., Berwind, M. (2022).** Effect of Module Transparency and Cell Layout on the Performance of An Orchard Agrivoltaic System. Agrivoltaics 2022. 2022.
- Bringewat, D. J. (2021).** VBvH: Von PV-Anlagen und Landwirtschaft: Der VGH Bayern Bestätigt Die Fördermöglichkeit. Von Bredow Valentin Herz Rechtsanwälte. Abgerufen am 13. Oktober 2021 Von Agri-PV: <https://www.vbv.de/News-Detail/Pv-Anlagen-und-Landwirtschaft-Der-Vgh-Bayern-Bestaetigt-Die-xFoerdermoeglichkeit-Von-Agri-Pv/>
- Bundesgesetzblatt. (2022).** Sofortmaßnahmen für Einen Beschleunigten Ausbau Der Erneuerbaren Energien und Weiteren Maßnahmen Im Stromsektor. Abgerufen am 06.08.2022 Von https://www.bgbl.de/Xaver/Bgbl/Text.Xav?SID=&Tf=Xaver.Component.Text_0&Tocf=&Qmf=&Hlf=Xaver.Component.Hitlist_0&Bk=Bgbl&Start=%2F%2F%5B%40node_Id%3D%271034948%27%5D&Skin=Pdf&Tlevel=-2&Nohist=1&Sinst=74ED3973
- Bundesnetzagentur. (2022).** Marktstammdatenregister. (G. T. für Elektrizität, Produzent) Abgerufen am 13.08.2022 Von <https://www.marktstammdatenregister.de/Mastr/Einheit/Einheiten/Oeffentlicheeinheitenuebersicht>
- Bundesregierung. (2020).** Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie. Berlin. : s.n., 2020. S. 36. <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/998006/1873556/b84e1a8f091845c8880ffb397d1fe6cb/2021-05-12-dns-2021-kurzfassung-final-barrierefrei-data.pdf?download=1>.
- Burgers, A. R., Tonnaer, E., Kooij, C., Aken, B. B. (2022).** Optimised Tracker Algorithm Enables An Agri-PV Plant With Organic Strip Farming and Solar Electricity Generation. Niederlande: Agrivoltaics 2022.
- Buscemi, A. (2022).** Ecosystem Approach In Agrivoltaic Parks Design. Spanien: Agrivoltaics 2022.
- Busch, C., Wydra, K. (2022).** Life Cycle Assessment of An Exemplary Agrivoltaic System In Thuringia (Germany). Erfurt: FH Erfurt.
- Butz, A. F. (2018).** Einfluss von Bewässerung auf Ertrag und Ertragsstabilität bei Ackerbaukulturen. Baden-Württemberg: Landinfo - Pflanzen- und Tierproduktion.
- Campana, P. E., Scragg, J. S., Stridh, B., Zainali, S., Lu, S. M., Amaducci, S., Colauzzi, M. (2022).** Validation of High Spatial Resolution of Photosynthetically Active Radiation Distribution under Agrivoltaic Systems. Schweden, Italien: Agrivoltaics 2022.
- Campana, P. E., Stridh, B., Amaducci, S., Colauzzi, M. (2021).** Optimization of Vertically Mounted Agrivoltaic Systems. Schweden, Italien: Mälardalen University. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129091>.
- Cengiz, M., Mamiş, M., Yurci, Y. (2016).** Cost Comparison of Constant and Tracking System PV Panels With Stirling Motor-Operated Systems. Türkei: Bitlis Eren University Journal of Science and Technology. 2016. 10.17678. DOI: 10.17678/beujst.92728.
- Chae, S.-H., Kim, H. J., Moon, H.-W., Kim, Y. H., Ku, K.-M. (2022).** Agrivoltaic Systems Enhance Farmers' Profits Through Broccoli Visual Quality and Electricity Production Without Dramatic Changes In Yield, Antioxidant Capacity, and Glucosinolates. Agronomy - MDPI. 2022. 12, 1415. <https://doi.org/10.3390/agronomy12061415>.

- Chalgynbayeva, A., Bai, A. (2022).** Analyzing Potential and Economic Effects of Agrophotovoltaic With the Key Influencing Factors. Ungarn: Agrivoltaics 2022.
- Chauhan, P. M., Dulawat, M. S. (2022).** Studies on Crop Cultivation under Agrivoltaic System. Indien: Agrivoltaics 2022.
- Cheo, A. E., Adelhardt, N., Krieger, T., Berneiser, J., et al. (2022).** Agrivoltaics Across the Water-Energy-Food-Nexus In Africa - Opportunities and Challenges for Rural Communities In Mali. Freiburg: Albert-Ludwigs-Universität Freiburg. <https://ssrn.com/abstract=4088544>.
- Chopard, J., Lopez, G., Persello, S., Fumey, D. (2022).** Modelling Canopy Temperature of Crops With Heterogeneous Canopies Grown under Solar Panels. Agrivoltaics 2022.
- Cosgun, A. E. (2021).** The Potential of Agrivoltaic Systems In Turkey. Türkei: Energy Reports Volume 7, Supplement 3, September 2021, S.105-111. 6th International Conference on Advances on Clean Energy Research, ICACER 2021 April 15–17, 2021, Barcelona, Spain. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.06.017>.
- CRED. (2016).** EM-DAT: the OFDA/CRED International Disaster Database. Statista. Wirtschaftliche Schäden infolge bedeutender Schlammlawinen weltweit von 1900 bis 2016*.
- DBV. (2021).** Anzahl der Erwerbstätigen in der Land- und forstwirtschaft und Fischerei in Deutschland in den Jahren 1991 bis 2021. Deutscher Bauernverband (DBV), Statistisches Bundesamt. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/2189/umfrage/erwerbstaetige-in-landwirtschaft-forstwirtschaft-fischerei/>.
- DBV; Fraunhofer ISE; Hochschule Kehl. (2022).** Agri-Photovoltaik: Bessere Chancen für Kleinere Anlagen und Hochaufgeständerte Systeme. Positionspapier. <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Positionspapier-Agri-PV-ISE-DBV.pdf>.
- Deutscher Bundestag. (2018).** zum Rückgang Der Biomasse Fliegender Insekten In Europa. Dokumentation, Berlin. <https://www.bundestag.de/resource/blob/565012/dbe480eb0a2e488771f4b002f8d3b6cb/WD-8-048-18-pdf-data.pdf>.
- Deutscher Wetterdienst. (2020).** 2019 Global Zweitwärmstes Jahr: Temperaturentwicklung In Deutschland Im Globalen Kontext. Abgerufen am 26. 08 2022 Von F. Kaspar, K. Friedrich, F. Imbery: https://www.Dwd.De/DE/Leistungen/Besondereereignisse/Temperatur/20200128_Vergleich_De_Global.Pdf;Jsessionid=124F3C6268E26B73E279F133EA393EF8.Live31081?__Blob=Publicationfile&V=4
- Deutscher Wetterdienst. (2021).** Gesamtverband Der Deutschen Versicherungswirtschaft. Abgerufen am 21. 08 2022 Von Drying Stripes - Die Böden In Deutschland Werden Trockener: <https://www.Gdv.De/Resource/Blob/66902/385d0367b222ed3a98a0f3fa0908d65e/Download-Drying-Stripes-Data.Pdf>
- Deutscher Wetterdienst. (2022).** Phänologische Uhr. Abgerufen am 12. 10 2022 Von https://www.Dwd.De/DE/Leistungen/Phaeno_Uhr/Phaenouhr.Html?Nn=16102
- Deutsches Institut für Normung e.V. (2021).** Agri-Photovoltaik-Anlagen – Anforderungen An Die Landwirtschaftliche Hauptnutzung. Berlin: Beuth Verlag. 2021. S. 26. DIN SPEC 91434:2021-05.
- Deutsches Klima-Konsortium, et al. (2022).** Was Wir Heute Übers Klima Wissen - Basisfakten zum Klimawandel, Die In Der Wissenschaft Unumstritten Sind. Deutsche Meteorologische Gesellschaft; Deutscher Wetterdienst; Extremwetterkongress Hamburg; Helmholtz-Klima-Initiative; Klimafakten.de. 2022. <https://www.klimafakten.d>

e/meldung/was-wir-heute-uebers-klima-wissen-unser-faktenpapier-zum-stand-der-klimaforschung-jetzt.

- Die Bundesregierung. (2021).** Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie - Weiterentwicklung 2021. Berlin. <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/998006/1873516/3d3b15cd92d0261e7a0bc8f43b7839/2021-03-10-dns-2021-finale-langfassung-nicht-barrierefrei-data.pdf#page=270>.
- Drumm, E., Higgins, C. W., Chaplen, F. (2022).** Soil Inorganic Nitrogen Content In Solar Arrays. *Agrivoltaics* 2022.
- Dubina, L., Solarpowereurope. (2022).** Solar, Biodiversity, Land Use - Best Practice Guidelines. Belgien: Solarpower Europe. 2022. ISBN: 9789464518696. https://api.solarpowereurope.org/uploads/4222_SPE_Biodiversity_report_03_mr_ba11900938.pdf?updated_at=2022-10-27T08:28:18.591Z.
- Dupraz, C., Talbot, G., Marrou, H., Wery, J., Roux, S., Liagre, F., Nogier, A. (2011).** To Mix Or Not To Mix - Evidences for the Unexpected High Productivity of New Complex Agrivoltaic and Agroforestry Systems. Paris: INRA. 2011. https://www.researchgate.net/publication/230675951_To_mix_or_not_to_mix_evidences_for_the_unexpected_high_productivity_of_new_complex_agrivoltaic_and_agroforestry_systems.
- Enervis. (2022).** PPA-Price-Tracker. Abgerufen am 19. 11 2022 von https://Www.Pv-Magazine.De/Wp-Content/Uploads/Sites/4/2022/08/Enervis_PPA-Price_Tracker_Juli2022.Png
- Esmaeilzad, N., Dino, I., Yıldırım, Y., Turan, R., Özden, T. (2022).** Shading Effect of Transparent Photovoltaic Panels on Crops underneath Agrivoltaic Systems. *Agrivoltaics* 2022.
- Eueco GmbH. (2021).** Finanzielle Bürgerbeteiligung An Erneuerbaren Energien - Leitfaden Für Kommunen, Regionen und Klimaschutzmanagerinnen. München: EUECO. https://www.eueco.de/blog/aktuelles/Leitfaden_Buergerbeteiligung_Kommunen.
- Ewind Betreiber- und Vertriebs-GmbH. (2022).** Irrigation Nets - Flutpräventions-Photovoltaik. Abgerufen am 12. 10 2022 von <http://Irrigationnets.Com/#Imprint>.
- Johansson, F., Gustafsson, B. E., Stridh, B., Campana, P. E. (2022).** 3D-thermal Modelling of A Bifacial Agrivoltaic System: A Photovoltaic Module Perspective . *Agrivoltaics* 2022.
- Faizi, M. A., Verma, A., Jain, A. V. (2022).** Design and Optimization of An Agrivoltaics System. Indien: Renewable Energy and Storage Devices for Sustainable Development. 2022. DOI: 10.1007/978-981-16-9280-2_5.
- Faizi, M. A., Verma, A., Madhwal, D., Jain, V. K. (2022).** Internet of Things for Smart Agrivoltaics System: AV-lot. *Agrivoltaics*. 2022.
- Fernández-Ahumada, L., Varo-Martínez, M., López-Luque, R., Ramírez-Faz, J., Gómez-Uceda, J., Torre, F. C. (2022).** New Tracking / Backtracking Strategy for Agrivoltaic Plants With N-S Horizontal Solar Trackers and Tree Crop In Hedge. Spanien: *Agrivoltaics* 2022.
- Feuerbacher, A., Herrmann, T., Neuenfeldt, S., Laub, M., Gocht, A. (2022).** Estimating the Economics and Adoption Potential of Agrivoltaics In Germany Using A Farm-Level Bottom-Up Approach. Universität Hohenheim. Hohenheim: Renewable and Sustainable Energy Reviews. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112784>.
- Flisom AG. (2021).** Flexible Solar Module. Abgerufen am 16. 01 2022 Von Hocheffiziente Solarenergie: <Https://Www.Flisom.Com/De/>
- Fraunhofer ISE. (2022).** Agri-Photovoltaik: Chancen für Landwirtschaft und Energiewende. Ein Leitfaden für Deutschland. S.91. <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/APV-Leitfaden.pdf>.

- ©**Fraunhofer ISE. (2021).** Fraunhofer ISE. Abgerufen am 14. 10 2022 von Erste Agri-PV-Anlage für CO₂-Neutralen Obstanbau Im Test: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2021/erste-agri-pv-anlage-fuer-co2-neutralen-obstanbau-im-test.html>
- Fraunhofer ISE. (2022).** Agri-PV. Abgerufen am 07. 07 2022 von Von Der Idee zur Umsetzung - Die Entwicklung Der Agri-Photovoltaik : <https://Agri-Pv.Org/De/Das-Konzept/Von-Der-Idee-zur-Umsetzung/>
- Fraunhofer ISE. (2022).** APV Obstbau – Agri-Photovoltaik Als Resilienzkonzept zur Anpassung An Den Klimawandel Im Obstbau. Abgerufen am 10. 10 2022 Von <https://Www.Ise.Fraunhofer.De/De/forschungsprojekte/Apv-Obstbau.Html>
- Fraunhofer ISE. (2022a).** Agri-PV - Von Der Idee zur Umsetzung. Abgerufen am 23. 07 2022 Von Synergien Durch Doppelte Landnutzung - Schutz Der Landwirtschaft: online Verfügbar Unter: <https://Agri-Pv.Org/De/Synergien/Kulturschutz/>
- Fraunhofer ISE. (2022b).** HyPERFarm - Hydrogen and Photovoltaic Electrification on Farm. Abgerufen am 17. 11 2022 von <https://Www.Ise.Fraunhofer.De/De/forschungsprojekte/Hyperfarm.Html>
- Fraunhofer ISE. (2022c).** Newsletter Agri-Photovoltaik. Abgerufen am 18. 11 2022 von Projekt Hypeerfarm Setzt Neue Maßstäbe für Agri-PV Im Ackerbau: <https://Newsletter.Fraunhofer.De/-Viewonline2/17114/1628/126/Eusmg3pe/Edfh1pu3tv/1>
- Fraunhofer ISE. (2022d).** Modellregion Agri-PV Bawü Erste Umsetzungsphase Der Modellregion Agri-Photovoltaik Baden-Württemberg. Abgerufen am 12. 11 2022 von <https://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/agri-pv-bawue.html>
- Fraunhofer ISE. (O.J.).** Agri-PV. Abgerufen am 12. 02 2022 von Von Der Idee zur Umsetzung: <https://Agri-Pv.Org/De/Das-Konzept/Von-Der-Idee-zur-Umsetzung/>
- Friman-Peretz, M., Ozer, S., Geoola, F., Magadley, E., Yehia, I., Levi, A., et al. (2020).** Microclimate and Crop Performance In A Tunnel Greenhouse Shaded By Organic Photovoltaic Modules– Comparison With Conventional Shaded and Unshaded Tunnels. *Biosystems Engineering*.197, 12-31.
- Fritz, B., Horváth, G., Hünig, R., Pereszélyi, A., Egri, A., Guttmann, M., Gomard, G. (2020).** Bioreplicated Coatings for Photovoltaic Solar Panels Nearly Eliminate Light Pollution That Harms Polarotactic Insects. *PLOS ONE*, 15(12). 2020. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0243296>.
- Fuhs, M. (2017).** Pv Magazine. Abgerufen am 4. Oktober 2021 von Pv Magazine Award für Senkrechte Montage Bifazialer Solarmodule: <https://Www.Pv-Magazine.De/2017/09/22/Pv-Magazine-Award-Fuer-Senkrechte-Montage-Bifazialer-Solarmodule/>
- Gözl, S., Larisch, F. (2022).** Acceptance of Agrivoltaics – A Multi-Stakeholder Survey for A German Agrivoltaic System In Fruit Farming. Freiburg: Agrivoltaics 2022.
- Gentner, A. W. (2022).** Photovoltaik - Solartechnik für Installateure, Planer, Architekten. Abgerufen am 10. 10 2022 von Agri-PV: Zielgerichtete Förderung und Einfachere Genehmigung Gefordert: https://www.Photovoltaik.Eu/Sites/Default/Files/Styles/Content__Zoomed/Public/Aurora/232796.Jpeg?Itok=HB-_O58b
- Gerhards, C., Schubert, L., Lenz, C., Wittmann, F., Richter, D., Volz, B., et al (2022).** Agri-PV – Kombination Von Landwirtschaft und Photovoltaik. Dresden: Sächsisches Landesamt Für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie. 2022. Heft 1/2022. <https://slub.qucosa.de/api/qucosa%3A77460/attachment/ATT-0/>.

- Gewohn, T., Blankemeyer, S., Vogt, M. R., Schulte-Huxel, H., Köntges, M., Lim, B., Brendel, R. (2018).** Laminated Textiles Enabling Custom Appearance of Building Integrated Photovoltaic Modules. Emmerthal, Hannover: 35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. 2018. DOI: 10.4229/EUPVSEC20202020-6DO.12.3.
- Gfüllner, L., Müller, O., Meier-Grüll, M., Jedmowski, C., Berwind, M. (2022).** Yield Optimization Through Control Strategies In Tracked Agrivoltaic Systems. Freiburg, Jülich: Agrivoltaics 2022.
- Goetzberger, A., Zastrow, A. (1981).** Kartoffeln Unter Dem Kollektor. Sonnenenergie. 1981. 81 (3), 19–22.
- Goldbeck, J. (O.J.).** Goldbecksolar. Abgerufen am 06. 02 2022 von Modular Arc System: <https://Goldbecksolar.Com/De/Marcs/>
- Gorjian, S., Bousi, E., Özdemir, Ö. E., Trommsdorff, M., Kumar, N. M., Anand, A., Chopra, S. S. (2021).** Progress and Challenges of Crop Production and Electricity Generation In Agrivoltaic Systems Using Semi-Transparent Photovoltaic Technology. Freiburg, Iran, China, Indien, USA: Elsevier - Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021. 158 (2022) 112126. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112126>.
- Graham, M., Ates, S., Melathopoulos, A. P., Moldenke, A. R., DeBano, S. J., Best, L. R., Higgins, C. W. (2021).** Partial Shading By Solar Panels Delays Bloom, Increases Floral Abundance During the Late-Season for Pollinators In A Dryland, Agrivoltaic Ecosystem. USA: Scientific Reports. 2021. 11:7452. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86756-4>.
- Grave, K., Hazrat, M., Boeve, S., Blücher, F. V., Bourgault, C., Bader, N., Großmann, A. (2015).** Stromkosten Der Energieintensiven Industrie Ein Internationaler Vergleich. Fraunhofer ISI, Ecofys, GWS. Bmwi. 2015. S.88.
- ©Gridparity AG. (2022).** Gridparity - Next Generation Photovoltaic. Abgerufen am 11. 11 2022 Von Ästhetik der PV mit den Innovativen PV Bausätzen von Gridparity: <https://de.gridparityag.com>
- Gross, F., Balz, M., Gayler, S., Weber, T. (2022).** Development of APV Simulation Tool. Hohenheim: Agrivoltaics 2022.
- Dinesh, H., Pearce, J. M. (2016).** The Potential of Agrivoltaic Systems. USA: Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. 54, 299-308. DOI:10.1016/j.rser.2015.10.024.
- Hörnle, O., Riedelsheimer, J., Trommsdorff, M., Keinath, T., Binder, F., Weinmann, E., et al (2021).** DURCHFÜHRBARKEITSSTUDIE zur Ermittlung Möglicher forschung- und Demonstrations- Felder Für Agri-Photovoltaik In Baden-Württemberg. Abschlussbericht, Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme, Erneuerbare Energien, Freiburg Im Breisgau. 2021. S. 165.
- Hänsel, P., Kaiser, A., Buchholz, A., Böttcher, F., Langel, S., Schmidt, J., Schindewolf, M. (2018).** Mud Flow Reconstruction By Means of Physical Erosion Modeling, High-Resolution Radar-Based Precipitation Data, and UAV Monitoring. Freiberg: Geosciences - MDPI. 2018. doi:10.3390/geosciences8110427.
- H2arvester. (2022).** Harvesting Hydrogen on Agricultural Land While Maintaining Agricultural Production. Abgerufen am 14. 05 2022 von <https://www.H2arvester.NI/?Lang=En>
- Heißenhuber, A., Haber, W., Krämer, C. (2015).** 30 Jahre SRU-Sondergutachten „Umweltprobleme Der Landwirtschaft“ - Eine Bilanz. Dessau-Roßlau: Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. 2015. <http://www.umweltbundesamt.de/>.

- Helsen, H., Maestrini, B., Meijers, E., Hermelink, M., Vries, W. D., Balk, P., Ruijter, F. D. (2022).** Crop Response to Agrivoltaics In Soft Fruit Production. Niederlande: Agrivoltaics 2022.
- Héraud, S., Martinez, A., Mallet, A. (2022).** Study of the Impact of Crop Development Duration Variability on Agrivoltaic Electrical Production. Frankreich: Agrivoltaics 2022.
- Herbig, U., Berger, K., Damjanovic, D., Eizinger, J., Neubauer, T., Pont, U., et al. (2022).** Plusiq - Agri Photovoltaics: Integration As A Path to the Plus-Energy-Quarters. Agrivoltaics 2022.
- Hernández, V., Cos, J., Blasi, M. D., Genovese, M., andrés, R., Merlo, L., Flores, P. (2022).** Agrivoltaic In A Semi-Aride Climate: Co-Existence of Agricultural Activities In Utility-Scale Plants of EGP for Multiple and Sustainable Land Use. Spanien: Agrivoltaics 2022.
- Hickey, T., Boussetot, J. (2022).** A Rooftop Agrivoltaic System: Pollinator Plant Establishment. USA: Agrivoltaics 2022.
- Honecker, H., List, M., Vorderbrügge, T., Busch, M., et al. (2015).** Gute Fachliche Praxis - Bodenbewirtschaftung und Bodenschutz. Bonn: Aid Infodienst Ernährung, Landwirtschaft, Verbraucherschutz e.V. https://www.ig-gesunderboden.de/Portals/0/doc/Literatur/BLE_GfP_3614_508_web.pdf.
- Hopf, M., Wydra, K., Trommsdorff, M. (2021).** Agri-Photovoltaik Im Apfelanbau - Eine Wirtschaftlichkeitsanalyse Am Fallbeispiel Eines Bio-Obsthofes In Rheinland-Pfalz. Freiburg, Erfurt: Fraunhofer ISE, FH Erfurt. Masterarbeit.
- HSWT. (O.J.).** Weihenstephan-Triesdorf University of Applied Sciences. Abgerufen am 11. 11 2022 von Hydrogen and Photovoltaic Electrification on Farm (Hyperfarm): <https://forschung.Hswt.De/De/forschungsprojekt/1539-Hyperfarm>
- Hugo, M., ZDF. (2022).** Agri-Photovoltaik. Abgerufen am 12. 08 2022 von Das Potential Von Obst Unter Dem Solardach: <https://Www.Zdf.De/Nachrichten/Wirtschaft/Klima-Agri-Photovoltaik-Solar-100.Html>
- Huwylar, R., Brunet, P., Dabadie, G., Thiery, A., Chapon, J., Drahi, E., Lebeau, F. (2022).** Assessing Windbreak Effect of Vertical Agrivoltaics on the Reduction of Evapotranspiration In Different Climates. Agrivoltaics 2022.
- IBC Solar. (2013).** IBC Solar. Abgerufen am 06. 03 2022 Von IBC SOLAR Finalisiert Solarparks für WVE Gmbh Kaiserslautern: <https://www.lbc-Solar.De/Unternehmen/Presse/Presseartikel/News/Detail/News/lbc-Solar-Finalisiert-Solarparks-Fuer-Wve-Gmbh-Kaiserslautern/>
- Jain, P., Raina, G., Sinha, S., Malik, P., Mathur, S. (2021).** Agrovoltaics - Step Towards Sustainable Energy-Food Combination. Indien: Bioresource Technology Reports. 2021. 15 100766. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100766>.
- Jedrowski, C., Kherde, S., Pahwa, A., Schlechtrimer, V., Meier-Grüll, M., Muller, O. (2022).** Effect of Shading In An Agri-PV System on Structure and Growth of Ornamental Plants. Jülich, Berlin: Agrivoltaics 2022.
- Jossi, F. (2018).** Scientificamerican. Abgerufen am 28. 11 2021 von Solar Farms Produce Power—and Food. <https://www.Scientificamerican.Com/Article/Solar-Farms-Produce-Power-and-Food/>
- Juillion, P., Lopez, G., Fumey, D., Lesniak, V., Génard, M., Vercambre, G. (2022).** Shading Apple Trees With An Agrivoltaic System - Impact on Water Relations, Leaf Morphophysiological Characteristics and Yield Determinants. Frankreich: Elsevier - Scientia Horticulturae. 2022. 306 (2022) 111434. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111434>.

- Juillion, P., Lopez, G., Fumey, D., Lesniak, V., Génard, M., Vercambre, G. (2022).** Shading Apple Trees With An Agrivoltaic System: Impact on Water Relations, Leaf Morphophysiological Characteristics and Yield Determinants. *Frankreich: Scientia Horticulturae*. *Scientia Horticulturae*, 2022. 306 (2022) 111434. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111434> .
- Kümpel, N. (2022).** Wegatech. Abgerufen am 02. 03 2022 von Die Richtige Ausrichtung Einer PV-Anlage: <https://www.Wegatech.De/Ratgeber/Photovoltaik/Planung-und-Installation/Ausrichtung/>
- Karthus, F. (2021).** Landwirt Mit Eigener APV-Anlage. Emailverkehr. 05.05.2021
- Kaspar, F., Zimmermann, K., Polte-Rudolf, C. (2015).** An Overview of the Phenological Observation Network and the Phenological Database of Germany's National Meteorological Service (Deutscher Wetterdienst). *offenbach: Deutscher Wetterdienst, National Climate Monitoring*. 2015. <https://doi.org/10.5194/asr-11-93-2014>.
- Katsikogiannis, O. A., Ziar, H., Isabella, O. (2022).** Integration of Bifacial Photovoltaics In Agrivoltaic Systems - A Synergistic Design Approach. *Niederlande: Elsevier - Applied Energy*. 2022. 309 (2022) 118475. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118475>.
- Khele, I., Szabó, M. (2021).** Microclimatic and Energetic Feasibility of Agrivoltaic Systems - State of the Art. *Ungarn: Hungarian Agricultural Engineering*. 2021. No 40/2021 102-115. https://www.researchgate.net/publication/360894725_MICROCLIMATIC_AND_ENERGETIC_FEASIBILITY_OF_AGRIVOLTAIC_SYSTEMS_STATE_OF_THE_ART
- KU Leuven. (2022).** Agrivoltaics Webtool. Abgerufen am 05. 10 2022 von https://Agrivoltaics.one/Hyperfarm/Tool_Explanation.Html
- Kumpanalaisatit, M., Setthapun, W., Sintuya, H., Pattiya, A., Jansri, S. N. (2022).** Current Status of Agrivoltaic Systems and their Benefits to Energy, Food, Environment, Economy, and Society. *Thailand: Elsevier - Sustainable Production and Consumption*. 2022. 33. 2022. 952–963. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.08.013>.
- Kutter, C., Bläsi, B., Wilson, H. R., Kroyer, T., Mittag, M., Höhn, O., Heinrich, M. (2018).** DECORATED BUILDING-INTEGRATED PHOTOVOLTAIC MODULES: POWER LOSS, COLOR APPEARANCE AND COST ANALYSIS. *Fraunhofer ISE, Freiburg*. 2018. S.5.
- Lee, K., Kim, M., Kim, S., Lim, J., Do, G., Oh, S.-Y., Jung, J. (2022a).** Developing Cost Effective Agriphotovoltaic Structural System With Rain Collecting Means. *Agrivoltaics* 2022.
- Lee, S.-I., Lee, J.-H., Jeong, Y.-H., Seo, B. H., Kim, D.-S., Seo, Y.-J., Choi, W. (2022).** Standard Model of Agrivoltaic System Considering Structural Safety and Crop Cultivation Conditions. *Agrivoltaics* 2022.
- Lengfeld, K., Winterrath, T., Junghänel, T., Hafer, M., Becker, A. (2019).** Characteristic Spatial Extent of Hourly and Daily Precipitation Events In Germany Derived From 16 Years of Radar Data. *Stuttgart: Meteorologische Zeitschrift*. 2019. DOI: 10.1127/metz/2019/0964.
- Lepley, K., Barron-Gafford, G., Salazar, A., Murphy, P. (2022).** Monitoring Agrivoltaic Crop Performance and Phenology With A Low-Cost Camera System. *USA: Agrivoltaics* 2022.
- Lu, S. M., Zainali, S., Campana, P. E., Stridh, B., Avelin, A. (2022).** Decomposition Models for Photosynthetically Active Radiation Agrivoltaic Systems Solar Radiation Assessment. *Schweden: Agrivoltaics* 2022.
- Lytle, W., Meyer, T. K., Tanikella, N. G., Burnham, L., Engel, J., Schelly, C., Pearce, J. M. (2021).** Conceptual Design and Rationale for A New Agrivoltaics Concept - Pastured-

- Raised Rabbits and Solar Farming. USA; Finnland: Journal of Cleaner Production. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124476>.
- Macknick, J., Hartmann, H., Barron-Gafford, G., Beatty, B., Burton, R., Choi, C. S., Lehan, M. (2022).** the 5 Cs of Agrivoltaic Success Factors In the United States: Lessons From the Inspire Research Study. USA: NREL Is A National Laboratory of the U.S. Department of Energy office of Energy Efficiency & Renewable Energy Operated By the Alliance for Sustainable Energy, LLC. 2022. Technical Report NREL/TP-6A20-83566. <https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/83566.pdf>.
- Madalaimuthu, J. P., Ugokwe, C., Meitzner, R., Anand, A., Islam, M., Xu, Z., Hoppe, H. (2022).** Optimization of Organic Solar Cells for Agropv. Jena: Agrivoltaics 2022.
- Mallet, A., Martinez, A., Héraud, S. (2022).** Solar Sharing - Optimization of Agrivoltaics Solar Plant Sizing Using Numerical Simulations of Irradiance. Frankreich: Agrivoltaics 2022.
- Malu, P. R., Sharma, U. S., Pearce, J. M. (2017).** Agrivoltaic Potential on Grape Farms In India. Indien: Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2017. 23. doi: 10.1016/j.seta.2017.08.004 .
- Marrou, H., Guillioni, L., Dufour, L., Dupraz, C., Wery, J. (2013).** Microclimate under Agrivoltaic Systems - Is Crop Growth Rate Affected In the Partial Shade of Solar Panels? Frankreich: Elsevier - Agricultural and forest Meteorology. 2013. 177 (2013) 117–132 . DOI: 10.1016/j.agrformet.2013.04.012 .
- Marx, A. (2022).** Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ). Abgerufen am 25. 08 2022 von Jährliche Dürrestärken In Deutschland : <https://www.Ufz.De/Index.Php?De=47252>
- Matthes, F., Flachsbarth, F., Loreck, C., Hermann, H., Falkenberg, H., Cook, V. (2018).** ZUKUNFT STROMSYSTEM II Regionalisierung Der Erneuerbaren Stromerzeugung Vom Ziel Her Denken. Berlin: WWF Deutschland. 2018. S. 162, Studie. Online verfügbar unter: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Stromsystem-II-Regionalisierung-der-erneuerbaren-Stromerzeugung.pdf>.
- Meitzner, R., Madalaimuthu, J. P., Anand, A., Islam, M., Schubert, U. S., Hoppe, H. (2022).** Multifunctionality of Semi-Transparent Organic Solar Cells for Agrivoltaics Applications. Jena: Agrivoltaics 2022.
- Meitzner, R., Schubert, U. S., Hoppe, H. (2020).** Agrivoltaics—the Perfect Fit for the Future of Organic Photovoltaics. Jena: Advanced Energy Materials. 2020. 11, 2002551. DOI: 10.1002/aenm.202002551.
- Mikovits, C., Krexner, T., Kral, I., Bauer, A., Schauppenlehner, T., Schönhart, M., Schmidt, J. (2022).** Combined Simulation of Electricity and Crop Outputs of Agrivoltaic Systems. Wien: Agrivoltaics 2022.
- Monn, T. (2021).** Solarfaltdach HORIZON - Projektskizze für Den Parkplatz. Zizers Schweiz: Dhp Technology AG.
- Montag, H., Parker, G., Clarkson, T. (2016).** the Effects of Solar Farms on Local Biodiversity: A Comparative Study. UK: Clarkson and Woods and Wychwood Biodiversity. 2016. ISBN: 978-1-5262-0223-9. https://helapco.gr/wp-content/uploads/Solar_Farms_Biodiversity_Study.pdf.
- Munoz, D., Guillerez, S., Colin, H., Aimé, J. (2022).** Agrivoltaics: A Review of PV Technologies and Modeling Methods. Frankreich: Agrivoltaics 2022. 2022. Präsentation.https://cms2022.agrivoltaicsconference.org/file/display_attachment/ca21cecd82544996974a4ba920edcf2?filename=Delfina+Mu%C3%B1oz+-+Abstract.pdf.
- Next Kraftwerke GmbH. (2021).** Next Kraftwerke. Abgerufen am 23. 02 2022 von Power Purchase Agreements: <https://www.Next-Kraftwerke.De/Wissen/Power-Purchase-Agreement-Ppa>

- Next2Sun Gmbh. (April 2021).** Next2Sun. (Next2Sun) Abgerufen am 31. Juli 2021 von Referenzen - Agri-PV-Anlagen: <https://www.Next2sun.De/Referenzen/>
- Nier, H. (2018). Statista.** Abgerufen am 28. 02 2022 von Trockenheit Verursacht Größte Ernteschäden: <https://De.Statista.Com/Infografik/14926/Schadenaufwand-Durch-Wetterextreme/>
- Nikoleit, N., Schindler, A., Gömann, H., Frühauf, C. (2016).** Landwirtschaftliche Mehrgfahrenversicherung für Deutschland. Berlin: Gesamtverband Der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V., 2016. <https://www.gdv.de/resource/blob/8942/fa2dc37ecb8fafbb8b6fe7c2ae1a10d1/publikation---landwirtschaftlichemehrgfahren-versicherung-fuer-deutschland-data.pdf>.
- Pascher, P., Hemmerling, U., Stork, S. (2022).** Situationsbericht 2021/2022 - Trends und Fakten zur Landwirtschaft. Berlin: Deutscher Bauernverband e.V. (DBV). 2022. <https://www.bauernverband.de/fileadmin/berichte/2021/epaper/ausgabe.pdf>.
- Pearce, J. M. (2022).** Agrivoltaics In Ontario Canada: Promise and Policy. Schweiz: Sustainability - MDPI. 2022. 14,3037. <https://doi.org/10.3390/su14053037>.
- Pellegrino, M. (2022).** Looking for A Common Definition of Agrivoltaics. Italien: Agrivoltaics 2022.
- Peschel, R., Peschel, T., Marchand, M., Hauke, J. (2019).** Solarparks - Gewinne Für Die Biodiversität. Berlin: Bundesverband Neue Energiewirtschaft (Bne) e.V., 2019. Studie. https://www.bne-online.de/fileadmin/bne/Dokumente/Leitfaeden_Branchenuebersichten_usw/20200406_bne_kurzfassung_biodiv_studie_2019.pdf.
- Peterson, S. (2022).** The Agrisolar Clearinghouse – An Information-Sharing and Networking Hub for All Things Agrivoltaic. USA: Agrivoltaics 2022.
- Petri, D., Levrat, J., Chudy, D., Despeisse, M., Ballif, C., Duchemin, M., Carlen, C. (2022).** Insolagrín : A Solution for Dynamic Agrivoltaics. Agrivoltaics 2022.
- Picchi, P., Scognamiglio, A. (2022).** Agrivoltaics As Cultural Landscapes of the 21st Century. Italien: Agrivoltaics 2022.
- Pigott, S. (2019).** University of Arizona - News. Abgerufen am 28. 11 2021 von Agrivoltaics Proves Mutually Beneficial Across Food, Water, Energy Nexus: <https://News.Arizona.Edu/Story/Agrivoltaics-Proves-Mutually-Beneficial-Across-Food-Water-Energy-Nexus>
- Presse- und Informationsamt Der Bundesregierung. (2022).** Die Glorreichen 17. Abgerufen am 10. 10 2022 von <https://www.Dieglorreichen17.De/G17-De>
- Producegrower. (2017).** University of California - Santa Cruz. Abgerufen am 28. 11 2021 von UC Santa Cruz Grows First Tomatoes and Cucumbers In Solar Greenhouses: <https://Www.Producegrower.Com/Article/Uc-Santa-Cruz-Solar-Greenhouses/>
- Rößner, J. V. (2022).** Possible Uses for Rainwater In Agrivoltaic Systems - Overview, Research and Development Potential. Freiburg: Agrivoltaics 2022.
- Rößner, J. (2022).** Rainwater Management In Agrivoltaic Systems. Freiburg: WCPEC-8, 8th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion. 2022. <https://www.agrisolarclearinghouse.org/rainwater-management-in-agrivoltaic-systems-research-development-potential/>.
- Rösrath. (O.J.).** Ablaufschema Bebauungsplanverfahren. Abgerufen am 04. Januar 2022 von <https://www.Roesrath.de/Ablaufschema-Bebauungsplanverfahren.Pdfx?forced=True>
- Rüger, J., Buchheim, A. (2021).** Klimaschutz In Zahlen - Fakten, Trends und Impulse Deutscher Klimapolitik. Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Nukleare Sicherheit (BMU). 2021. https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/klimaschutz_zahlen_2021_bf.pdf.

- Rana, V. S., Sharma, S., Rana, N., Sharma, U., Patiyal, V., Banita, Prasad, H. (2021).** Management of Hailstorms under A Changing Climate In Agriculture - A Review. *Environmental Chemistry Letters*. 2021. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01502-0>.
- Ravishankar, E., Charles, M., Xiong, Y., Ade, H., Sederoff, H., O'Connor, B. (2021).** Balancing Crop Production and Energy Harvesting In Organic Solar-Powered Greenhouses. *Cell Reports Physical Science* 2, 100381. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2021.100381>.
- Reasoner, M., Ghosh, A. (2022).** Agrivoltaic Engineering and Layout Optimization Approaches In the Transition to Renewable Energy Technologies: A Review. UK: *Challenges - MDPI*. 2022. 13,43. <https://doi.org/10.3390/challe13020043>.
- Regionale Planungsgemeinschaft Mittelthüringen. (2019).** Regionalplan Mittelthüringen. 2019. S. 128. PLV 42/05/19.
- Reker, S., Schneider, J., Gerhards, C. (2022).** Integration of Vertical Solar Power Plants Into A Future German Energy System. Deutschland: Elsevier - *Smart Energy*. 2022. 7 - 100083. <https://doi.org/10.1016/j.segy.2022.100083>.
- REM Tec. (2022).** Greenpowertothepeople - REM TEC Agrovoltaico. Italien.
- Riaz, M. H., Imran, H., Alam, H., Alam, M. A., Butt, N. Z. (2021).** Crop-Specific Optimization of Bifacial PV Arrays for Agrivoltaic Food-Energy Production - the Light-Productivity-Factor Approach. Pakistan, USA: Creative Commons. 2021. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2104.00560>.
- Rodriguez, J. (2014).** Solar Choice. Abgerufen am 15. 01 2022 von Japanese PV Installers Choosing Wooden Racking for Solar Panel Ground-Mounting: <https://www.Solarchoice.Net.Au/Blog/News/Japanese-Firms-Choose-Wooden-Racking-for-Solar-Panel-Ground-Mounting-081014/>
- Rogers, M., Lepley, K., Barron-Gafford, G. (2022).** Consumer Preferences of Produce Grown In Traditional and Agrivoltaic Systems Based on Flavor, Texture, Color. USA: *Agrivoltaics* 2022.
- Süddeutsche. (2022).** Gewerbestrom. Abgerufen am 21. 11 2022 von <https://www.Sueddeutsche.De/Vergleich/Strom/Gewerbestrom>
- Santra, P., Meena, H. (2022).** Whether Variation In Shade of Solar PV Module May Be An Important Criterion for Designing Agrivoltaic System? *Agrivoltaics* 2022.
- Scharf, J., Grieb, M., Fritz, M. (2021).** Agri-Photovoltaik - Stand und offene Fragen. TFZ - Technologie und Förderzentrum, Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe. Straubing: Eigenverlag. 2021. S. 88. 1614-1008.
- Schauppenlehner, T., Bittner, K., Baumgaringer-Seiringer, M. (2022).** Large-Scale Agrivoltaics Visualisations for Assessing Landscape Impacts and Social Acceptancelarge-Scale Agrivoltaics Visualisations for Assessing Landscape Impacts and Social Acceptance. Österreich: *Agrivoltaics* 2022.
- Schindele, S. (2021).** Feldfrüchte und Strom Von Agrarflächen: Was Ist Agri-Photovoltaik und Was Kann Sie Leisten? 2021. *GAIA*(30/2), S. 87-95. Von https://www.oekom.de/_files_media/zeitschriften/artikel/GAIA_2021_02_87.pdf.
- Schindele, S. (2021).** Nachhaltige Landnutzung Mit Agri-Photovoltaik: Photovoltaikausbau Im Einklang Mit Der Lebensmittelproduktion. Tübingen: Creative Commons Attribution License. 2021. *GAIA* 30/2 (2021): 96 – 105. <https://doi.org/10.14512/gaia.30.2.7>.
- Schindele, S., Trommsdorff, M., Schlaak, A., Oberfell, T., Bopp, G., Reise, C., Schindele, S. (2020).** Implementation of Agrophotovoltaics: Techno-Economic Analysis of the Price-Performance Ratio and Its Policy Implications. *Applied Energy*, 265(114737).

- Scognamiglio, A. (2015).** 'Photovoltaic Landscapes': Design and Assessment. A Critical Review for A New Transdisciplinary Design Vision. ENEA - Italian National Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development. Italien: Elsevier Ltd. 2015. S. 33. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.072>.
- Sirnik, I., Sluijsmans, J., Ouders, D., Stremke, S. (2022).** Agrivoltaics Solutions In the Context of Circular Agriculture and Landscape Experience. A Systematic Review. Niederlande: Agrivoltaics 2022.
- SL Rack. (2021).** Freiflächensysteme Übersicht. Haag: Schletter Ludwig, 2021. https://www.sl-rack.com/wp-content/uploads/2021/03/SL_Rack_Uebersicht_Freiflaechensysteme_V9_DE-1.pdf.
- Solar Direktinvest Gmbh. (2021).** Solardirektinvest. Abgerufen am 23. 02. 2022 von Photovoltaik Investieren - Vergütung Nach 20 Jahren: <https://Solar-Direktinvest.De/Photovoltaik/Photovoltaik-Investieren/Verguetung-Nach-20-Jahren/>
- Spinnanker Gmbh. (2021).** Spinnanker - Innovative Betonlose Fundamenttechnik. Wien, Österreich.
- Stadtplanungsamt Frankfurt Am Main. (O.J.).** Planverfahren - Das Bebauungsplanverfahren. Abgerufen am 28. 12 2021 Von https://www.stadtplanungsamtfrankfurt.de/Impressum_4237.html?Psid=V7ben0skhpqqjsqn6jsq6qmds7
- Statistisches Bundesamt. (2022).** Statista. Abgerufen am 16. 08. 2022 von Landwirtschaftliche Nutzfläche In Deutschland In Den Jahren 1949 Bis 2021: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/206250/umfrage/landwirtschaftliche-nutzflaeche-in-deutschland/>
- Stiftung Klimaneutralität. (2021).** Photovoltaik (PV) – Potentiale. Literaturrecherche, Berlin.
- STMB. (2021).** Bau- und Landesplanerische Behandlung Von Freiflächen-Photovoltaikanlagen. In Abstimmung Mit Den Bayerischen Staatsministerien für Wissenschaft und Kunst, für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie, für Umwelt und Verbraucherschutz. Bayerischen Staatsministeriums für Wohnen, Bau und Verkehr. 2021. S. 44.
- Sultan, T. N., Farhan, M. S., & Alrikabi, H. T. (2021).** Using Cooling System for Increasing the Efficiency of Solar Cell. Irak: IICESAT.2021. 1973 (2021) 012129. doi:10.1088/1742-6596/1973/1/012129.
- Sunman Energy. (O.J.).** Lightweight Solar Pioneer. Abgerufen am 29. 12 2021 von <https://sunman-energy.com>
- Sunpower Gmbh. (2022).** Sunpower From Maxeon Solar Technology. Abgerufen am 02. 02 2022 von Sunpower Maxeon-Modul 40 Jahre Garantie: <https://sunpower.maxeon.com/de/solarmodul-produkte/garantie>
- Svanera, L., Ghidesi, G., Knoche, R. (2022).** Comparison Between Tracking and Fixed Agrovoltaico® Systems. Agrivoltaics 2022.
- SWR. (2022).** Pilotprojekt Am Bodensee - Agri-Photovoltaikanlage Auf Obstplantage In Kressbronn Eingeweiht. Abgerufen am 15. 09. 2022 von <https://www.swr.de/swr/aktuell/baden-wuerttemberg/friedrichshafen/agri-photovoltaik-in-kressbronn-100.html>
- Tajima, M., Iida, T. (2021).** Evolution of Agrivoltaic Farms In Japan. Tokio: AIP Conference Proceedings. 2021. 2361, 030002. <https://doi.org/10.1063/5.0054674>.
- Tawalbeh, M., Al-Othman, A., Kafiah, F., Abdelsalam, E., Almomani, F., Alkasrawi, M. (2020).** Environmental Impacts of Solar Photovoltaic Systems - A Critical Review of Recent Progress and Future Outlook. USA, Jordanien, Katarr: Science of the Total Environment. 2020. S0048-9697(20)37059-5. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143528>.

- Teitel, M., Peiper, U., Zvieli, Y. (1996).** Shading Screens for Frost Protection. Israel: Agricultural and forest Meteorology. 1996. Volume 81, Issues 3–4, November 1996, Pages 273-286. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(95\)02321-6](https://doi.org/10.1016/0168-1923(95)02321-6).
- Teng, J. W., Soh, C. B., Devihosur, S. C., Tay, R. H., Jusuf, S. K. (2022).** Effects of Agrivoltaic Systems on the Surrounding Rooftop Microclimate. Singapur: Sustainability - MDPI. 2022. 14(12), 7089. <https://doi.org/10.3390/su14127089>.
- ThEGA. (2022).** Solarrechner Thüringen. Abgerufen am 05. 07 2022 von <https://www.solarrechner-thueringen.de/#S=Solarinfotext;Vorteile>
- TMIL. (2021).** Ernte In Thüringen 2020 - Witterung, Erträge und Preise. Abgerufen am 11. 10 2022 von https://infrastruktur-landwirtschaft.thueringen.de/fileadmin/Landwirtschaft/00_Bilder_Landwirtschaft/Erntebericht_2020.pdf
- Toledo, C., Scognamiglio, A. (2021).** Agrivoltaic Systems Design and Assessment - A Critical Review, and A Descriptive Model Towards A Sustainable Landscape Vision (Three-Dimensional Agrivoltaic Patterns). Italien: Sustainability - MDPI. 2021. 13, 6871. <https://doi.org/10.3390/su13126871>.
- Toledo, C., Scognamiglio, A., Colonna, N., Picchi, P., Stremke, S. (2022).** Fostering Implementation of Sustainable Agrivoltaics Systems: Revised Terminology and Definitions. Italien, Niederlande: Agrivoltaics 2022.
- Torma, G., Aschemann-Witzel, J. (2022).** Perception on Dual Land Use Approaches: Drivers and Barriers to AV Adoption. Dänemark: Agrivoltaics 2022.
- Trommsdorff, M., Bieber, L.-M., Amelung, K., Riedelsheimer, J. (2022).** Classification Scheme for Agrivoltaics. Freiburg: Agrivoltaics 2022.
- Trommsdorff, M., Dhal, I. S., Zdemir, O., Ketzer, D., Weinberger, N., Rösch, C. (2022).** Agrivoltaics: Solar Power Generation and Food Production. In P. E. Campana, & S. Gorjian, Solar Energy Advancements In Agriculture and Food Production Systems (S. 177-228). United Kingdom: Elsevier. 2022, S. 177-228.
- Trommsdorff, M., Gruber, S., Keinath, T., Hopf, M., Hermann, C., Schönberger, F., Vollprecht, J. (2020).** Agri-Photovoltaik: Chance für Landwirtschaft und Energiewende - Ein Leitfaden für Deutschland. Fraunhofer Institut , Solare Energiesysteme, Freiburg. 2020. S. 56.
- Trommsdorff, M., Kang, J., Reise, C., Schindele, S., Bopp, G., Ehmann, A., Obergfell, T. (2020).** Combining Food and Energy Production - Design of An Agrivoltaic System Applied In Arable and Vegetable Farming In Germany. Freiburg: Elsevier - Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110694>.
- Trommsdorff, M., Kang, J., Reise, C., Schindele, S., Bopp, G., Ehmann, A., Obergfell, T. (2021).** Combining Food and Energy Production: Design of An Agrivoltaic System Applied In Arable and Vegetable Farming In Germany. Fraunhofer ISE Et Al. Freiburg: Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021. S. 13.
- TSE. (2022).** TSE Agrivoltaic Canopy Abstract. Frankreich.
- Tubesolar AG. (O.J.).** Tubesolar. Abgerufen am 31. 01 2022 von Agri-Photovoltaik Neu Definiert: <https://tubesolar.de>
- UMass. (o.J.).** University of Massachusetts Amherst. Abgerufen am 28. 11 2021 von Center for Agriculture, Food, and the Environment: <https://ag.umass.edu/crop-animal-research-education-farm>
- Vandest, E., Hemetsberger, W. (2021).** Agrisolar Best Practices Guidelines. Solarpower Europe. 2021. S. 52. <https://www.solarpowereurope.org/agrisolar-best-practice-guidelines/>.

- Vandewetering, N., Hayibo, K. S., Pearce, J. M. (2022).** Design and Economics of Manual Variable-Tilt Angle DIY Wood-Based Solar Photovoltaic Racking System. Kanada: MDPI - Design. 2022. 6(3), 54. <https://doi.org/10.3390/designs6030054>.
- VEE Sachsen e.V. (2022).** VEE Sachsen e.V. - Vereinigung zur Förderung Der Nutzung Erneuerbarer Energien. Abgerufen am 17. 02 2022 von Innovationen Aus Sachsen: Eine Sächsische Blaupause für Doppelte Acker-Energie: <https://www.vee-sachsen.de/Artikel/Innovationen-Aus-Sachsen-Eine-Saechsische-Blaupause-Fuer-Doppelte-Acker-Energie>
- Vervloesem, J., Marcheggiani, E., Choudhury, M. A., Muys, B. (2022).** Effects of Photovoltaic Solar Farms on Microclimate and Vegetation Diversity. Belgien, Italien: Sustainability - MDPI. 2022. 14, 7493. <https://doi.org/10.3390/su14127493>.
- Vijayan, R. (2022).** Spectral Advantage of Vertical Bifacial Agrivoltaics Systems. Indien: Agrivoltaics 2022.
- Villar-Fernández, A., Montes-Romero, J., Ruiz-Torres, L., Manzaneda, A. J., Almonacid, F., Fernández, E. F. (2022).** Global Investigation of Different Transparent PV Materials for Maximizing Agrivoltaics. Spanien: Agrivoltaics 2022.
- Vitoshkin, H., Mittelman, G., Baron, S., Shalom, B., Halperin, I., Ravishankar, E., Kribus, A. (2022).** Agrivoltaic Field With Spectral Splitting Collectors: Performance Modeling and Lab-Scale Experimental Results. Israel, USA: Agrivoltaics 2022.
- Vorast, M. (2022).** Challenges for Agrivoltaics In the International Context – An Analytical Hierarchy Process Survey. Graz: Fraunhofer ISE, Universität Leipzig. 2022. <https://unipub.uni-graz.at/obvugrhs/content/titleinfo/7648450>.
- W. Ross Rucker, D. P. (2022).** Modelling the Impact of Array Wiring on Electrical Output of Vertical Bifacial Agrivoltaic Installations. Agrivoltaics 2022.
- Waghmare, R., Jilte, R., Joshi, S., Tete, P. (2021).** Review on Agrophotovoltaic Systems With A Premise on thermal Management of Photovoltaic Modules therein. India: Sustainable Research for Energy and Environment. 2021. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23202-6>
- Walston, L. J., Barley, T., Bhandari, I., Campbell, B., McCall, J., Hartmann, H. M., Dolezal, A. G. (2022).** Opportunities for Agrivoltaic Systems to Achieve Synergistic Food-Energy-Environmental Needs and Address Sustainability Goals. USA: Frontiers - Sustainable Food and Energy. 2022. 6:932018. doi: 10.3389/fsufs.2022.932018.
- Weiland, M. (ThEGA). 2022.** [Befragte Person] Vera Vollmer. 05. 07 2022.
- Weselek, A. (2022).** Photovoltaik und Photosynthese – Doppelte Sonnenernte. Hohenheim: Der Kritische Agrarbericht 2022.
- Weselek, A., Bauerle, A., Hartung, J., Zikeli, S., Lewandowski, I., Högy, P. (2021).** Agrivoltaic System Impacts on Microclimate and Yield of Different Crops Within An Organic Crop Rotation In A Temperate Climate. Agronomy for Sustainable Development. 2021. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00714-y>.
- Weselek, A., Ehmann, A., Zikeli, S., Lewandowski, I., Schindele, S., Högy, P. (2019).** Agrophotovoltaic Systems - Applications, Challenges, and Opportunities -A Review. Agronomy for Sustainable Development. 2019. 39: 35. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0581-3>.
- Wesselak, V., Schabbach, T., Link, T., Fischer, J. (2017).** Handbuch Regenerative Energietechnik. Nordhausen, Thüringen, Deutschland: Springer Verlag. 2017. S. 60 ff.
- Willockx, B. (2020).** Agrivoltaic Systems: Why Not Prioritize Crops That Grow In the Dark? A Case Study With White Asparagus. KU Leuven, Belgien. 2020. S. 27.

- Willockx, B., Herteleer, B., Cappelle, J. (2020).** Techno-Economic Study of Agrovoltaic Systems Focusing on Orchard Crops. 37th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. 2020. DOI: 10.4229/EUPVSEC20202020-6DO.14.2.
- Willockx, B., Lavaert, C., Cappelle, J. (2022).** Geospatial Assessment of Elevated Agrivoltaics on Arable Land In Europe to Highlight the Implications on Design, Land Use and Economic Level. Belgien: Energy Reports. 2022. 8 - 8736–8751. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.06.076>.
- Willockx, B., Uytterhaegen, B., Ronsijn, B., Herteleer, B., Cappelle, J. (2020).** A Standardized Classification and Performance Indicators of Agrivoltaic Systems. Belgien: Research Group Energy & Automation, Faculty of Engineering Technology, KU Leuven. 2020. DOI: 10.4229/EUPVSEC20202020-6CV.2.47.
- Wirth, H. (2022).** Aktuelle Fakten zur Photovoltaik In Deutschland. Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme, Erneuerbare Energien, Freiburg. 2022. S. 99.
- Wirth, H., Kost, C., Kramer, K., Neuhaus, H., Peper, D., Rentsch, J., Senkpiel, C. (2021).** Solaroffensive Für Deutschland. Hamburg: Greenpeace, Fraunhofer ISE. 2021. <https://www.greenpeace.de/publikationen/20210806-greenpeace-kurzstudie-solaroffensive.pdf>.
- Wix, N., Rode, M., Reich, M. (2018).** Blühstreifen - Biodiversität und Produktionsintegrierte Kompensation. Hannover: Schriftenreihe – Institut für Umweltplanung Leibniz Universität Hannover. 2018. Umwelt und Raum 9, S. 255-280. <https://doi.org/10.15488/3698>.
- Wydra, K., Vollmer, V., Schmidt, S., Prichta, S., Kunze, R., Aulich, H. (2022).** Potential Der Agri-Photovoltaik In Thüringen. Erfurt: Solarinput e.V. 2022. https://solarinput.de/wp-content/uploads/2022/05/APV-Studie_19052022_Final.pdf.
- Xue, J. (2017).** Photovoltaic Agriculture - New Opportunity for Photovoltaic Applications In China. China: Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. 73:1-9. DOI: 10.1016/j.rser.2017.01.098.
- Zainali, S., Lu, S. M., Stridh, B., Avelin, A., Amaducci, S., Colauzzi, M., Campana, P. E. (2022).** Direct and Diffuse Shading Factors Modelling for the Most Representative Agrivoltaic System Layouts. Schweden, Italien: Mälardalen University. 2022. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2208.04886>.
- Zainali, S., Qadir, O., Parlak, S. C., Lu, S. M., Avelin, A., Stridh, B., Campana, P. E. (2022).** Computational Fluid Dynamics Modelling of Microclimate for A Vertical Agrivoltaic System. Schweden: Energy Nexus Journal. 2022. DOI: 10.48550/arXiv.2209.01971.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all denjenigen, die mich während meiner Masterarbeit unterstützt haben, meinen Dank aussprechen.

Zuallererst gebührt mein Dank Frau Prof. Dr. Kerstin Wydra von der FH Erfurt, die meine Masterarbeit betreut hat und durch deren Engagement ich vor wenigen Jahren auf das Thema der APV aufmerksam gemacht wurde.

Ebenso gilt mein Dank dem SolarInput e.V., Herr Dr. Hubert Aulich und Frau Dr. Sabine Schmidt für eine stets motivierte Zusammenarbeit und die Unterstützung innerhalb dieses Projektes. Durch zeitlichen Rückhalt haben Sie mir wertvollen Raum für die Bearbeitung ermöglicht.

Darüber hinaus danke ich allen weiteren Gesprächspartner*innen, die sich bereit erklärt haben meine Masterarbeit inhaltlich zu unterstützen. Vielen Dank für die Zeit und die wertvollen Informationen.

Weiterhin gilt mein besonderer Dank meiner Familie, die mir emotionalen Beistand leisteten und Denen, die mich durch ihr außerordentliches Engagement vorangebracht haben und nicht müde geworden sind, sich mit mir auszutauschen.

Danke für das Vertrauen, das mir entgegengebracht wurde.

Weißensee, 23. November 2022

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, Vera Lynn Vollmer, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen Hilfsmittel als die angegebenen verwendet habe. Die Stellen, die anderen Werken wörtlich oder sinngemäß entnommen sind, habe ich unter Angabe der Quelle und Einhaltung der Regeln wissenschaftlichen Zitierens kenntlich gemacht. Diese Versicherung umfasst auch in der Arbeit verwendete bildliche Darstellungen, Tabellen, Kartenskizzen und gelieferte Zeichnungen. Mir ist bewusst, dass Täuschungen nach der für mich gültigen Studien- und Prüfungsordnung geahndet werden.

_____ Ort, Datum

_____ Vera Lynn Vollmer