

Hinweis: Bei diesem Dokument handelt es sich um eine nicht examensrelevante Version der von der Verfasserin vorgelegten Masterarbeit. Diese wurde überarbeitet und um sensible Daten, die von einem Sperrvermerk betroffen waren, bereinigt. Die entsprechenden Stellen, die aufgrund des Sperrvermerks herausgenommen wurden, sind im Text markiert.

## Agri-Photovoltaik im Apfelanbau

Eine Wirtschaftlichkeitsanalyse am Fallbeispiel eines Bio-Obsthofes in Rheinland-Pfalz

**Freie wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des  
akademischen Grades**

Master of Science (M.Sc.)

**in der Studienfachrichtung Erneuerbare Energien  
Management**

**in Kooperation mit Fraunhofer-Institut für Solare  
Energiesysteme ISE (Fraunhofer ISE)**

vorgelegt bei:

Erstgutachterin: Kerstin Wydra, Prof. Dr. sc. agr. habil.  
(Fachhochschule Erfurt)

Zweitgutachter: Max Trommsdorff, M.Sc. (Fraunhofer-Institut für  
Solare Energiesysteme ISE)

Von: Michaela Hopf

Adresse: xxx

Matrikel-Nr.: xxx

Am: 12. Juli 2021

## Zusammenfassung

Bedingt durch einen wirtschaftlichen Wettbewerb und Witterungsbedingungen, werden im Apfelanbau in vielen deutschen Anbauregionen Hagelschutzkonstruktionen eingesetzt. Vorliegende Arbeit soll untersuchen, ob und unter welchen Bedingungen eine Agri-PV-Anlage aus Sicht eines Landwirtes sinnvoll im Apfelanbau in Deutschland eingesetzt werden kann. Hierzu wurde anhand des Fallbeispiels eines Bio-Obsthofes in Rheinland-Pfalz eine Wirtschaftlichkeitsanalyse durchgeführt, die vergleichend eine Apfelanlage unter Hagelnetz und im Agri-PV-System untersucht. Die Analyse basiert auf realen Daten des Obsthofes, der implementierten Pilotanlage, der Auswertung von Experteninterviews sowie literaturbasierten Daten. Es wurden die Auswirkungen der Agri-PV auf die landwirtschaftliche Praxis herausgearbeitet, welche anschließend in Investitions- und Finanzkennzahlen eingeflossen sind. Die Ergebnisse zeigen, dass die Agri-PV aus Sicht der Landwirtschaft eine sinnvolle Investition sein kann. Die Investitionskosten der Landwirtschaftsseite ließen sich durch das Ersetzen der Hagelschutzkonstruktion um bis zu 26 %, die jährlichen Betriebskosten durch verringerte Landentgelt sowie Instandhaltungskosten um bis zu 8 % reduzieren. Jedoch sanken auch die jährlichen Einnahmen um etwa 8 %, was auf die Verminderung des Tafelapfelanteils zurückzuführen ist. Insgesamt steigt die Rentabilität und Profitabilität, und die Amortisationszeit verkürzt sich um 4 Jahre. Auch die Finanzierungsfähigkeit konnte verbessert werden. Eine Einkommensstabilisierung hingegen konnte nur festgestellt werden, wenn das komplette System der Agri-PV in Betracht bezogen wird, welches die Stromerzeugung ebenfalls umfasst. Bei der Gesamtbetrachtung des Systems konnte außerdem mit einer Querfinanzierung der Apfelproduktion durch Gewinne der Stromerzeugung eine Reduktion der Gestehungskosten von Äpfeln um fast 60 % gegenüber dem Referenzfall erreicht werden. Jedoch ist das Agri-PV-System deutlich kapitalintensiver. Ebenso zeigen die Ergebnisse vorliegender Arbeit, dass die Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems in erster Linie von der Höhe der Stromvergütung abhängt, welche für die ersten 20 Jahre der Stromerzeugung mit 11,17 ct/kWh angenommen wurde. Wie diese Arbeit zeigt, weist der Apfel schon heute in vielen Teilen Deutschlands eine Schutzbedürftigkeit vor Extremwetterlagen auf, welche sich in den nächsten Jahrzehnten mit hoher Wahrscheinlichkeit weiter steigern und damit die Bewertung der Wirtschaftlichkeit der Agri-PV in ein neues Verhältnis rücken wird. Denn mit steigender Notwendigkeit an Schutzkonstruktionen im Apfelanbau erhöhte sich auch das Potential der Agri-PV diese zu übernehmen und damit möglicher Synergien und

Kosteneinsparungspotentiale, die von der Agri-PV ausgehen. Das theoretische Flächenpotenzial der Agri-PV im Bio-Apfelanbau in Deutschland liegt bei 3,5 GWp, was immerhin 8 % der noch fehlenden PV-Kapazitäten decken könnte, die laut Vorgabe der Bundesregierung bis 2030 in Deutschland installiert werden sollen.

## Abstract

Due to economic competition and weather conditions, hail protection structures are used by apple farmers in many German regions. This work aims to investigate whether and under which conditions an agrivoltaic system can be economically implemented in apple cultivation in Germany from a farmer's perspective. An agrivoltaic system is one in which agricultural activity and electricity generation use the same area. For this purpose, a case study of an organic fruit farm in Rhineland-Palatinate was used to perform an economic analysis, which comparatively examines an apple plant under hail nets and in the agrivoltaic system. The analysis is based on real data of the orchard, the implemented pilot plant, the evaluation of expert interviews and literature-based data. The impact of Agri-PV on farming practices was elaborated, which was subsequently incorporated into investment and financial ratios. The results show that agrivoltaics can be economically feasible from an agricultural point of view. Investment costs from the farming side could be reduced by up to 26% by replacing the hail protection structure and annual operating costs could be reduced by up to 8% through reduced land charges and maintenance costs. However, annual revenues also decreased by about 8% due to the reduction in high quality yield. Overall, profitability increased, and the payback period was reduced by 4 years. Financing capability was also improved. Income stabilization, on the other hand, could only be observed when the complete system of Agri-PV is considered, which includes electricity generation as well. In addition, when considering the system as a whole, a cross-financing of apple production through profits from electricity generation resulted in a reduction of the unit cost of apples by almost 60% compared to the reference case. However, the agrivoltaic system is significantly more capital intensive. Likewise, the results of the present work show that without a corresponding EEG remuneration, which is assumed here to be 11.17 ct/kWh, an investment in the PV system of the agrivoltaic system is not reasonable and the economic viability of the system depends primarily on the level of the power remuneration. At an electricity tariff of 8.43 ct/kWh the PV system would just refinance itself over the assumed lifetime of 32 years. As the work shows, the theoretical potential of agrivoltaics in organic apple production in Germany is 3.5 GWp, which could still cover 8 % of the still missing PV capacities to be installed in Germany by 2030 according to the German government's target.

## Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>II</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>IV</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>VIII</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>X</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>XII</b>
<b>Begriffsbestimmungen</b> .....	<b>XIV</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>2</b>
<b>2 Apfelanbau in Deutschland</b> .....	<b>5</b>
2.1 Verbreitung und Struktur .....	5
2.2 Ökonomische Einflussgrößen im Apfelanbau .....	7
2.3 Ausgewählte Extremwetterlagen und ihre Gefahr für den Apfelanbau .....	10
2.3.1 Hagel .....	11
2.3.2 Spätfrost .....	12
2.3.3 Trockenheit, Hitze und Sonneneinstrahlung .....	13
2.3.4 Dauer- und Starkregen, Staunässe und Wind .....	14
2.4 Risikomanagementinstrumente und Kulturschutzmaßnahmen .....	14
2.4.1 Extremwetter- und Ernteversicherungen.....	15
2.4.2 Hagelschutzmaßnahmen .....	16
2.4.3 Frostschutzmaßnahmen.....	19
2.4.4 Maßnahmen für eine optimale Wasserverfügbarkeit .....	20
2.4.5 Zwischenfazit.....	20
<b>3 Das Konzept der Agri-Photovoltaik</b> .....	<b>21</b>
3.1 Definition, Entwicklung und Verbreitung .....	21
3.2 Anwendungsformen und Systemanlagendesign.....	22
3.3 Potenziale der Agri-PV – Synergieeffekte schaffen .....	24
3.4 Wirtschaftlichkeit von Agri-PV-Anlagen .....	25
3.4.1 Investitions- und Betriebskosten: Landwirtschaft und Stromerzeugung .....	25
3.4.2 Gesamtwirtschaftliche Bewertung der Agri-PV .....	27
3.4.3 Geschäftsmodelle.....	28
3.4.4 Marktakzeptanz und -entwicklung.....	29
3.4.5 Besonderes Potenzial von Sonder- und Dauerkulturen .....	30
3.5 Agri-PV im Apfelanbau .....	31
<b>4 Fallbeispiel: Agri-PV-Pilotanlage im Apfelanbau auf einem Bio-Obsthof in Rheinland-Pfalz</b> .....	<b>35</b>
4.1 Verortung des Projektes .....	35
4.2 Pilotanlage und Versuchsaufbau .....	36
<b>5 Regulatorische Rahmenbedingungen</b> .....	<b>40</b>

5.1	Baurechtliche Grundlagen .....	40
5.1.1	Hagelnetze .....	40
5.1.2	Agri-PV .....	40
5.2	Finanzielle Förderung .....	42
5.2.1	Landwirtschaft .....	42
5.2.2	Stromerzeugung .....	43
<b>6</b>	<b>Methodik.....</b>	<b>45</b>
6.1	Datengrundlage.....	45
6.1.1	Literaturrecherche .....	45
6.1.2	Expertenbefragung .....	46
6.1.3	Erhebung der Kosten- und Einnahmenezusammensetzung .....	47
6.1.4	Energieertragssimulationen .....	51
6.2	Datenaufbereitung und Modellannahmen.....	52
6.2.1	Anlagendesignparameter: Pflanzsystem, Hagelnetz, Agri-PV.....	52
6.2.2	Standzeit der Apfelanlage und Lebensdauer Schutzkonstruktionen .....	55
6.2.3	Einfluss der Agri-PV: Agri-PV sensitive Parameter.....	56
6.3	Datenanalyse .....	64
6.3.1	Untersuchungsrahmen – Stakeholder Konstellationen.....	64
6.3.2	Kalkulationstools im Obstbau und der Agri-Photovoltaik .....	65
6.3.3	Ökonomische Analysen.....	66
6.3.4	Gestehungskosten von Strom und Äpfeln.....	71
<b>7</b>	<b>Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsanalyse .....</b>	<b>74</b>
7.1	Betriebswirtschaftliche Finanzkennzahlen .....	74
7.1.1	Ausgaben .....	74
7.1.2	Einnahmen .....	77
7.1.3	Vergleich der jährlichen Ausgaben und Einnahmen .....	79
7.2	Gesamtwirtschaftliche Betrachtung .....	80
7.2.1	Rentabilität und Profitabilität .....	80
7.2.2	Gestehungskosten und Querfinanzierung.....	84
7.3	Zahlungsfähigkeit .....	85
7.4	Einkommensstabilität .....	85
<b>8</b>	<b>Szenarien-Analyse und Potenzialabschätzung .....</b>	<b>90</b>
8.1	Szenarien-Analyse .....	90
8.1.1	Parameter.....	90
8.1.2	Ergebnisse der Szenarien-Analyse.....	94
8.2	Potenzialanalyse .....	96
<b>9</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>98</b>
9.1	Evaluierung der Ergebnisse .....	98
9.2	Limitationen der Arbeit und mögliche Erweiterung.....	102
<b>10</b>	<b>Fazit und Ausblick.....</b>	<b>109</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>112</b>

---

<b>Danksagung .....</b>	<b>126</b>
<b>Eidesstattliche Erklärung .....</b>	<b>127</b>
<b>Anhang – Version 2 .....</b>	<b>i</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Anbauflächen im Obstbau in Deutschland in ha nach Kulturart mit Unterteilung der Kulturarten des Baumobstanbaus, eigene Darstellung nach Garming et al. (2018) und Destatis (2017b) .....	5
Abbildung 2: Apfel-Anbaufläche und Erntemengen der Jahre 2006 bis 2017 in Deutschland (Garming et al. 2018, S. 76) .....	6
Abbildung 3: Hagelschutzsysteme: Einzelreihensystem mit Querverspannung (oben links) und ohne Querverspannung (oben rechts) sowie Mehrreihensystem (unten links) nach Wiebusch und Hilbers (2017, S. 370ff).....	17
Abbildung 4: Agri-PV-Anlagen über Ackerbau in Deutschland, Weinbau in Frankreich und Dauergrünland in Deutschland (von links nach rechts), (Bildquellen: Bay Wa r.e., Sun'Agri, Next2Sun) .....	22
Abbildung 5: Agri-PV-Pilotanlage in Frankreich über Äpfeln (links) und in Belgien über Birnen (rechts) (Bildquellen: Sun'Agri, KU Leuven).....	34
Abbildung 6: Obstanbaufläche in Rheinland-Pfalz im Jahr 2017, modifiziert nach Garming et al. (2018, S. 52).....	35
Abbildung 7: Flächennutzung im Obstbau im Landkreis Ahrweiler nach Kulturart, eigene Darstellung nach Garming et al. (2018).....	36
Abbildung 8: Betriebsgelände des Bio-Obsthofes, Kennzeichnung der Agri-PV-Anlage mit roter Markierung (Bildquelle: Johannes Nachtwey) .....	36
Abbildung 9: Luftbildaufnahme mit 6 Reihen Hagelnetz, 6 Reihen Folienüberdachung und 11 Reihen Agri-PV (von links nach rechts), (Bildquelle: BayWa r.e.) .....	37
Abbildung 10: Systemdesign der Agri-PV in Seitenansicht aus Südosten, modifizierte Bildquelle: kgarchitektur.....	37
Abbildung 11: Agri-PV-Anlage mit Modultypen „Block“ (links) und „Zebra“ (rechts), sowie nachgeführter (links) und fixer (rechts) Aufständering, (Bildquelle: Fraunhofer ISE) .....	38
Abbildung 12: Schematische Darstellung Stakeholder Konstellation 1 und 2 im Falle Agri-PV, sowie die Stakeholder Konstellation im Referenzfall HN mit jeweiliger Kennzeichnung der greifenden Untersuchungsfälle APV-Agri, APV-PV (APV-Total) sowie HN, eigene Darstellung.....	64
Abbildung 13: Durchschnittliche Investitionskosten (CAPEX) einer Baumgeneration von HN und APV-Agri in €/ha.....	75
Abbildung 15: Jährliche Betriebskosten (OPEX) von HN und APV-Agri in €/ha/a.....	76
Abbildung 17: Durchschnittliche jährliche Einnahmen von HN und APV-Agri in €/ha/a .....	77
Abbildung 18: Durchschnittliche jährliche Einnahmen von APV-PV mit Referenz PV-FFA in €/kWp/a.....	78
Abbildung 19: Diskontierte Gesamtausgaben und -einnahmen sowie Net Present Value (NPV) nach Landwirtschaft (Agri), Stromerzeugung (PV) und Gesamtsystem (Total) von (a) HN und (b) Agri-PV .....	81
Abbildung 20: Kumulierte diskontierte Cashflows für HN, APV-Agri, APV-PV und APV-Total über 32 Jahre in €/ha mit markierten Amortisationszeitpunkten .....	82
Abbildung 21: Kumulierte diskontierte Cashflows von HN und APV-Agri über 32 Jahre in €/ha mit markierten Amortisationszeitpunkten.....	83

---

Abbildung 22: Gestehungskosten (LCOA) unterteilt nach CAPEX und OPEX pro erzeugte Apfel-Erntemenge über 32 Jahre von HN, APV-Agri, APV-Total und APV-Agri-Querfinanzierung in €/kg .....	84
Abbildung 24: Einnahmen in €/ha/a und Apfelertrag in t/ha/a sowie Stromertrag in 10MWh/ha/a über 32 Jahre von HN und APV-Total .....	87
Abbildung 25: Einnahmen in €/ha/a und Erzeugerpreis für Apfel in €/kg bzw. für Strom in 100€/MWh über 32 Jahre von HN und APV-Total.....	87
Abbildung 26: Häufigkeitsverteilung der prozentualen Einkommensschwankung in HN, APV-Agri und APV-Total.....	88

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Relevante Apfelsorten in Deutschland im konventionellen und ökologischen Anbau im Jahr 2017/18 nach Kreisel und Schlossberger (2019) und föko (2020) .....	7
Tabelle 2: Relevanz von Extremwetterlagen für den Apfelanbau, Experteneinschätzung mit 1 höchstes Risiko bis 11 niedrigstes Risiko nach Gömann et al. (2015).....	11
Tabelle 3: Übersicht praxisrelevanter Hagelnetzfarben nach ihrer Lichtdurchlässigkeit in Reduzierung der PAR und UVB-Strahlung in % sowie ihrer Haltbarkeit in Jahren.....	18
Tabelle 4: Übersicht der landwirtschaftlichen Anwendungsformen mit Zuordnung möglicher technischer Ausgestaltung nach Fraunhofer ISE (2020) und Lasta und Konrad (2018).....	22
Tabelle 5: Überblick über Agri-PV im Baumobstanbau nach Fraunhofer ISE (2021) und Gim et al. (2020).....	33
Tabelle 6: Modellierte durchschnittliche Ertragsmengen und Erzeugerpreise der Landwirtschaft und Energieerzeugung über den Zeitverlauf (32 Jahre) für Basisfall Hagelnetze (HN) und Untersuchungsfälle der Agri-PV.....	50
Tabelle 7: Grund- und Systemparameter der Apfel- und PV-Anlagen .....	53
Tabelle 8: Skalierungsfaktoren zur Anpassung der Kostenstruktur der Pilotanlage (258 kWp) auf eine Groß-Agri-PV-Anlage (1,4 MWp) .....	54
Tabelle 9: Lebensdauer und Standzeiten der Anlagenkomponenten von HN, APV-Agri bzw. APV-PV.....	56
Tabelle 10: Auswirkung der Reduktion (Red.) an PAR auf die Ertragsqualität sowie Sortenkompatibilität in unterschiedlichen Regionen in Deutschland.....	61
Tabelle 11: Quantifizierung der positiven (grün), neutralen (grau) und negativen (orange) Auswirkung der Agri-PV auf die Ökonomie der landwirtschaftlichen Praxis .....	63
Tabelle 12: Anwendungsgebiete der Untersuchungsfälle APV-Agri, APV-PV und APV-Total mit Referenzfall HN.....	65
Tabelle 13: Kalkulierte gewichtete Kapitalkosten (WACC) des PV-Sektor und Landwirtschaftssektors (Agri-Sektor), inklusive Inputparameter .....	69
Tabelle 14: Vergleich verschiedener EEG-Vergütungssätze auf die jährlichen Einnahmen in €/kWp/a mit Referenz PV-FFA .....	79
Tabelle 15: Ausgaben und Einnahmen von HN, APV-Agri, APV-Total, PV-FFA und APV-PV in €/ha bzw. €/ha/a (nominale Werte).....	79
Tabelle 16: Return on Investment von HN, APV-Agri, APV-Total sowie APV-PV .....	81
Tabelle 17: Net Present Value (NPV) und Amortisationszeit von HN, APV-Agri, APV-Total sowie APV-PV in €/ha bzw. Jahren.....	83
Tabelle 18: Schuldendienstdeckungsgrad von HN, APV-Agri sowie APV-Total .....	85
Tabelle 19: Korrelation zwischen Ertragsmengen sowie Erzeugerpreisen und den Einnahmen von HN, APV-Agri, APV-PV sowie APV-Total .....	86
Tabelle 20: Variierte Parameter der Szenarien Basis, S1-P und S2-O.....	93
Tabelle 21: CAPEX, OPEX, Einnahmen, Net Present Value (NPV), Amortisationszeit, Zahlungsfähigkeit (DSCR) sowie LCOE im Basisszenario ....	94

Tabelle 22: CAPEX, OPEX, Einnahmen, Net Present Value (NPV), Amortisationszeit, Zahlungsfähigkeit (DSCR) sowie LCOE mit prozentualer Änderung gegenüber Basisszenario im Szenario 1 – Pessimistisch (S1-P).....	95
Tabelle 23: CAPEX, OPEX, Einnahmen, Net Present Value (NPV), Amortisationszeit, Zahlungsfähigkeit (DSCR) sowie LCOE prozentualer Änderung gegenüber Basisszenario im Szenario 2 – Optimistisch (S2-O).....	96

## Abkürzungsverzeichnis

AFP	.....Agrarinvestitionsförderprogramm
Agri-PV	..... Agri-Photovoltaik
APV-Agri	..... Untersuchungsfall Landwirtschaft innerhalb Agri-PV-System
APV-PV	..... Untersuchungsfall Stromerzeugung innerhalb Agri-PV-System
APV-Total	..... Untersuchungsfall Gesamtsystem der Agri-PV (APV-Agri + APV-PV)
BauGB	.....Baugesetzbuch
BMEL	.....Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
B-Plan	..... Bebauungsplan
CAPEX	..... Investitionskosten, Englisch: Capital Expenditures
CF	..... Cash Flow
DLR RP	..... Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum Rheinpfalz
DSCR	.....Schuldendienstdeckungsgrad; Englisch: Debt Service Cover Ratio
EEG	..... Erneuerbare Energien Gesetz
ELER	.... Europäischen Landwirtschaftsfonds für die Entwicklung des ländlichen Raums
EO	..... Erzeugerorganisation
EU	..... Europäische Union
GAP	..... Gemeinsame Agrarpolitik
GCR	..... Flächenbelegungsgrad, Englisch: Ground Cover Ratio
GHI	..... Globalstrahlung, Englisch: Global Horizontal Irradiance
GMO	..... Gemeinsame Marktorganisation
HKL II	..... Herkunftsklasse II
HN	..... Referenzfall Hagelnetz
InnAusV	..... Innovationsausschreibungsverordnung
IRR	..... Interner Zinsfuß, Englisch: Internal Rate of Return
KTBL	..... Kuratorium für Technik und Bauwesen
LCOA	..... Gestehungskosten von Äpfeln, Englisch: Levelized Costs of Apples
LCOE	..... Stromgestehungskosten, Englisch: Levelized Costs of Electricity
LEH	..... Lebensmitteleinzelhandel
MUEEF	..... Ministerium für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten, Rheinland-Pfalz
NPV	..... Kapitalwert, Nettobartwert, Englisch: Net Present Value
OPEX	.....Betriebskosten, Englisch: Operational Expenditures
PAR	.....Photosynthetisch aktives Licht; Englisch: Photosynthetically Active Radiatio n
PERC	..... Passivated Emitter and Rear Cell
PPA	..... Power Purchase Agreement
PV	..... Photovoltaik
PV-FFA	..... Photovoltaik-Freiflächenanlage
ROI	..... Kapitalrendite, Englisch: Return On Investment
S1-P	..... Szenario 1 - pessimistisch

---

S2-O .....	Szenario 2 - optimistisch
UV .....	Ultraviolettstrahlung
UVB .....	Ultraviolettstrahlung im Wellenlängenbereich von 280-315 nm
WACC .	Gewichtete durchschnittliche Kapitalkosten, Englisch: Weighted Average Cost of Capital

## Begriffsbestimmungen

### **Alternanz**

Im Obstanbau können Erntemengen periodisch, bedingt durch Ereignisse in Vorjahren, schwanken. Zu den auslösenden Faktoren der Schwankungen zählen neben einer zu hohen Fruchtbehangsdichte in Vorjahren auch Spätfrost und übermäßiges Triebwachstum (Büchele und Lucas 2018, S. 25).

### **Evapotranspiration**

Diese setzt sich zusammen aus der Summe von Evaporation, sprich der Verdunstung einer Oberfläche, und der Transpiration, was die Abgabe von Wasserdampf durch Pflanzen umfasst. Somit steht sie für die Gesamtverdunstung einer bewachsenen Bodenoberfläche (DWD o. J.).

### **Geschützter Anbau**

Als geschützter Anbau wird jener Anbau verstanden, der vor Witterungseinflüssen geschützt ist. Damit sind vor allem Flächen unter Folie oder Glas zu verstehen (Büchele und Lucas 2018, S. 155)

### **Lichtsättigungspunkt**

Die Photosyntheserate von Pflanzen steigt mit zunehmender Lichtintensität bis zu einem gewissen Punkt, ab dem der Anstieg stagniert und die Photosyntheserate konstant bleibt. Dieser Punkt wird auch als Lichtsättigungspunkt bezeichnet. Er ist abhängig von verschiedensten Faktoren, wie unter anderem die Art der Pflanze sowie die Jahreszeit (Büchele und Lucas 2018, S. 43).

### **PAR (Photosynthetisch aktive Strahlung bzw. Photosynthetically active radiation)**

Licht, welches von der Pflanze für die Photosynthese genutzt werden kann. Dieses ist essentiell für die Assimilation, welche wiederum die Grundlage für das Pflanzenwachstum, die Blütenknospenbildung, die Versorgung des Fruchtertrages und die Ausbildung von Qualitätsfruchtertrag ist (Klophaus und Baab 2015).

### **Pflege- und Kulturmaßnahmen**

Darunter fall all jene Maßnahmen, um möglichst gute Bedingungen für die Pflanze zu schaffen, wie Kronengestaltung, Erziehung- und Schnittmaßnahmen, Wuchs- und

Behangsregulierung, Bodenpflege, Düngung, Bewässerung, Frost- und Hagelabwehr, Windschutz sowie Vogelabwehr (Büchle und Lucas 2018, S. 229ff)

### **Unterlagen**

Im Apfelanbau werden Sorten mit sogenannten Unterlagen veredelt. Diese sind nach dem jeweiligen Standort und Anwendungsfall zu wählen und beeinflussen unter anderem das Wachstum, die Winterhärte, die Robustheit gegen Schaderreger, die Nachbauchfähigkeit, etc. (Büchle und Lucas 2018, S. 167ff).

# 1 Einleitung

## Hintergrund

Der menschengemachte Klimawandel sowie die wachsende Weltbevölkerung werden zukünftig die Konkurrenz um die Flächennutzung verschärfen. Auf der einen Seite werden durch klimatische Veränderungen frucht- und nutzbare Böden knapper (BMEL 2018b), auf der anderen Seite hat das Wachsen der Weltbevölkerung zur Folge, dass die Nachfrage nach Flächen zur Erzeugung landwirtschaftlicher Produkte oder Energie (WBGU 2020) sowie für Siedlungsraum und sonstige Nutzungsarten (Destatis 2021a) immer mehr steigt. Die Landwirtschaft ist in hohem Maß von Klima, Witterung und Wetter abhängig (Gömann et al. 2015) und damit von den sich zukünftig ändernden Klimabedingungen betroffen (BLE 2017). Auch Extremwetterlagen, wie beispielsweise Hitze, Hagel, Starkregen, Wind oder Frost können zukünftig je nach Region häufiger auftreten (Gömann et al. 2015). Die deutsche Bundesregierung hat sich das Ziel gesetzt, sowohl den Flächenverbrauch in Form von steigender Siedlungs- und Verkehrsfläche zu reduzieren als auch die erneuerbaren Energien auszubauen. Bis 2030 soll deshalb der tägliche Zubau an Siedlungs- und Verkehrsfläche von 58 auf 30 ha reduziert (BMU 2019) und außerdem 100 GW Photovoltaik-Leistung in Deutschland installiert werden (vgl. § 4 Erneuerbare-Energien-Gesetz), wovon 53,8 GW bis zum Ende des Jahres 2020 installiert waren (BMWi 2021).

Ein Ansatz, der sowohl der Flächenknappheit entgegenwirken, gleichzeitig die Landwirtschaft resilienter gegen Umwelteinflüsse machen und den Ausbau der Erneuerbaren Energien vorantreiben kann, ist die Agri-Photovoltaik (Agri-PV). Diese Technologie vereint landwirtschaftliche Tätigkeit und Photovoltaik (PV) zur Stromerzeugung auf einer Fläche (Goetzberger und Zastrow 1981), wodurch die Fläche simultan genutzt werden kann. Zu den Schutzfunktionen, die von der Agri-PV ausgehen können, zählen unter anderem der Schutz vor übermäßiger Sonneneinstrahlung, Hagel sowie (Stark-)Regen (Fraunhofer ISE 2020). Insbesondere im Bereich der Dauerkulturen werden die Synergien der Agri-PV besonders hoch und als wirtschaftlich vielversprechend eingeschätzt. Denn hier kann die Unterkonstruktion der Agri-PV Stütz- und Schutzkonstruktionen substituieren. Es wird eine niedrigere Durchfahrtshöhe und damit ein verringerter Materialeinsatz als im Ackerbau benötigt, und die ohnehin vorgegebenen, überjährigen Anbaureihen bieten sich für eine Implementierung an (Schindele et al. 2020; Willockx et al. 2020).

Bereits heute sind viele Apfelanlagen in Deutschland mit Hagelnetzen versehen, um die Bäume vor Hagelereignissen zu schützen (Wiebusch und Hilbers 2017). Dies führt zu erhöhten Investitionskosten für Landwirte<sup>1</sup>, um ihre Betriebe zu erhalten. Durch den Klimawandel und die sich abzeichnende Zunahme der Anbauintensität im Apfelanbau (Steinbacher und Schlossberger 2016) könnte sich dieser Trend in vielen Teilen Deutschlands verbreiten. Vor diesem Hintergrund erscheint das Potenzial der Agri-PV im Apfelanbau vielversprechend. Die Arbeit basiert auf dem Fallbeispiel der ersten deutschen Agri-PV-Anlage im Apfelanbau, welche im Frühjahr 2021 in Rheinland-Pfalz an einem Bio-Obsthof installiert wurde.

### Ziel und Forschungsfragen

In dieser Arbeit wird eine Wirtschaftlichkeitsanalyse von Agri-PV im Apfelanbau durchgeführt. Hierzu wird der Apfelanbau unter Hagelschutznetzen, einer konventionellen Kulturschutzmaßnahme, mit dem unter einer Agri-PV-Anlage verglichen. Dabei soll in erster Linie die Frage beantwortet werden, ob die Implementierung einer konventionellen Anlage mit Hagelnetzen oder eine Agri-Photovoltaik-Anlage im Apfelanbau aus Sicht des Landwirts ökonomisch sinnvoller ist. Außerdem sollen die einflussnehmenden Faktoren und Rahmenbedingungen herausgearbeitet werden. Die Arbeit geht vom Basisfall Hagelnetz (HN) aus und analysiert darauf aufbauend die Untersuchungsfälle der Agri-PV aus Sicht des Landwirts, zum einen getrennt vom PV-System (APV-Agri) und zum anderen das komplette Agri-PV-System einbeziehend (APV-Total). Die Stromerzeugungsseite (APV-PV) wird analysiert, soll aber nicht Fokus der Untersuchung sein. Eine PV-Freiflächenanlage (PV-FFA) wird hierfür als Referenz einbezogen. Die Wirtschaftlichkeit der Fälle wird mittels statischer und dynamischer Investitionsrechnung auf ihre Rentabilität und Profitabilität untersucht. Außerdem werden die Zahlungsfähigkeit sowie Einkommensstabilität des Landwirts analysiert und die Untersuchungsfälle anhand der Gestehungskosten der erzeugten Waren verglichen. Als Basis dient dabei eine für diese Arbeit generierte Aufstellung der Investitions- und Betriebskosten sowie Einnahmen aus der Landwirtschaft bzw. der Stromerzeugungsseite mit und ohne Agri-PV-System.

---

<sup>1</sup> In vorliegender Arbeit wurde versucht möglichst geschlechterneutrale Begriffe zu verwenden. War dies nicht möglich, wurde aus Gründen der besseren Lesbarkeit auf die gleichzeitige Verwendung der Sprachformen männlich, weiblich und divers (m/w/d) verzichtet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten im Sinne der Gleichbehandlung grundsätzlich für alle Geschlechter.

## Aufbau

Um die Fragestellungen zu beantworten, werden in einem ersten Schritt der **Apfelanbau in Deutschland** mit seiner aktuellen Struktur und Verbreitung sowie auf ihn einwirkende Extremwetterlagen und mögliche Schutzsysteme dargelegt. Dies ist wichtig, um (a) einordnen zu können, welche Relevanz der Apfelanbau in Deutschland hat, um (b) zu verstehen, welche Wetterlagen für den Apfelanbau schädlich sind bzw. wie schädliche Einflüsse vermieden werden können, um (c) den Grundstein zu legen, um das Potenzial der Agri-PV im Apfelanbau in Deutschland flächenmäßig einordnen zu können und abschätzen zu können, inwieweit die Agri-PV eine Schutzfunktion übernehmen bzw. welche Auswirkungen auf die landwirtschaftliche Praxis und deren Erträge sich aus der Implementierung ein solchen Agri-PV ergeben können. Während die Punkte (a) und (b) weitgehend in Kapitel 2 erarbeitet werden, bauen die folgenden Kapitel auf den hier gewonnen Erkenntnissen auf, um Punkt (c) zu erarbeiten. In Kapitel 3 wird die Technologie der **Agri-PV** vorgestellt, in dem der Stand der Technik und ihre Anwendungsformen sowie Erkenntnisse zu Synergieeffekten und Wirtschaftlichkeit dargelegt werden. Anschließend wird das **Fallbeispiel**, welches der Arbeit zugrunde liegt, mit den Gegebenheiten der dortigen Anbauregion kurz vorgestellt. Kapitel 5 beleuchtet die **regulatorischen Rahmenbedingungen** der Agri-PV-Anlage von Seiten der PV und der Landwirtschaft. Hierbei wird auf baurechtliche und förderregulatorische Bedingungen eingegangen. Im darauffolgenden Kapitel wird die **Methodik** der Arbeit dargelegt, wobei insbesondere auf die Agri-PV sensitiven Parameter der Landwirtschaft eingegangen wird. Kapitel 7 legt die **Ergebnisse** der Wirtschaftlichkeitsberechnung offen und Kapitel 8 analysiert zwei mögliche **Szenarien** des in dieser Arbeit aufgebauten Modells und gibt Einblick zum theoretischen **Potential** der Agri-PV im Apfelanbau. Den Abschluss dieser Arbeit mit **Diskussion, Fazit und Ausblick** bilden Kapitel 9 und 10.

## 2 Apfelanbau in Deutschland

In diesem Kapitel werden die Verbreitung des Apfelanbaus in Deutschland analysiert sowie ökonomische und wetterbedingte Einflussgrößen und Risikofaktoren herausgearbeitet.

### 2.1 Verbreitung und Struktur

Der Apfel als Baumobst wird neben Strauch- und Erdbeeren dem Obstbau zugeordnet. Im Jahr 2017<sup>2</sup> gab es in Deutschland ca. 11.000 Betriebe mit ca. 75.400 ha **Obstanbaufläche**. Hiervon entfallen 66 % auf Baumobstflächen, wovon wiederum 68 % auf die Kulturart Apfel zurückzuführen sind (Abbildung 1). Auf schätzungsweise 5.000 ha werden Tafeläpfel ökologisch angebaut (föko 2020).

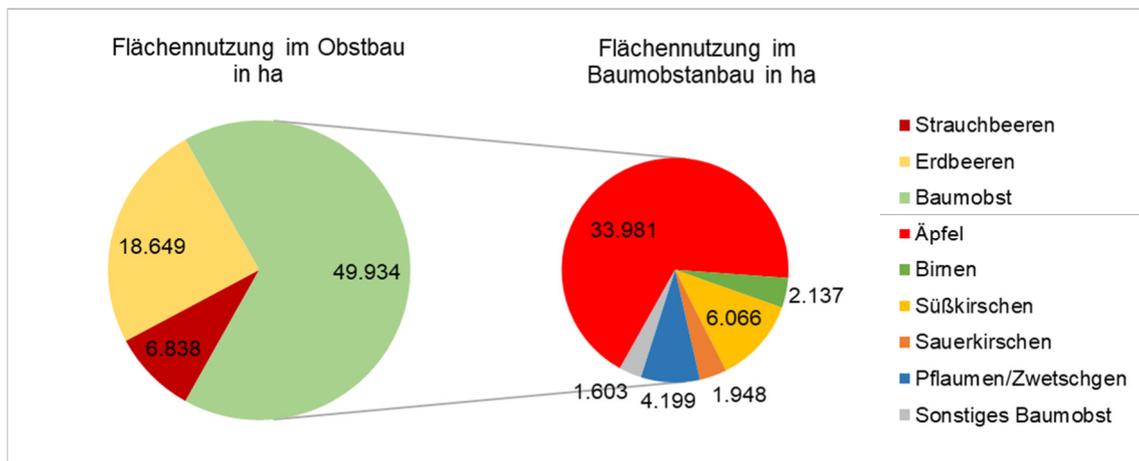


Abbildung 1: Anbauflächen im Obstbau in Deutschland in ha nach Kulturart mit Unterteilung der Kulturarten des Baumobstanbaus, eigene Darstellung nach Garming et al. (2018) und Destatis (2017b)

Während der Obstbau in Deutschland 2017 nur 0,4 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche in Anspruch nahm (Destatis 2017a), war er Grund für 1,3 % der gesamtdeutschen Verkaufserlöse aus landwirtschaftlich Produkten (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg 2020). Die Anbaufläche von Äpfeln ist in Deutschland über die letzten Jahre relativ konstant geblieben (Abbildung 2).

Die **Produktionsgebiete** für Obstbau in Deutschland sind historisch durch Faktoren, wie Naturräume und Bodenbeschaffenheit, begünstigendes Klima, sowie räumliche Entfernung zu Märkten, Vermarktungsstrukturen und verarbeitende Industrie gewachsen

<sup>2</sup> Baumobstanbauerhebung findet alle 5 Jahre statt, letztes Erhebungsjahr war 2017, weshalb nachstehende Ausführungen sich überwiegend auf dieses Jahr beziehen

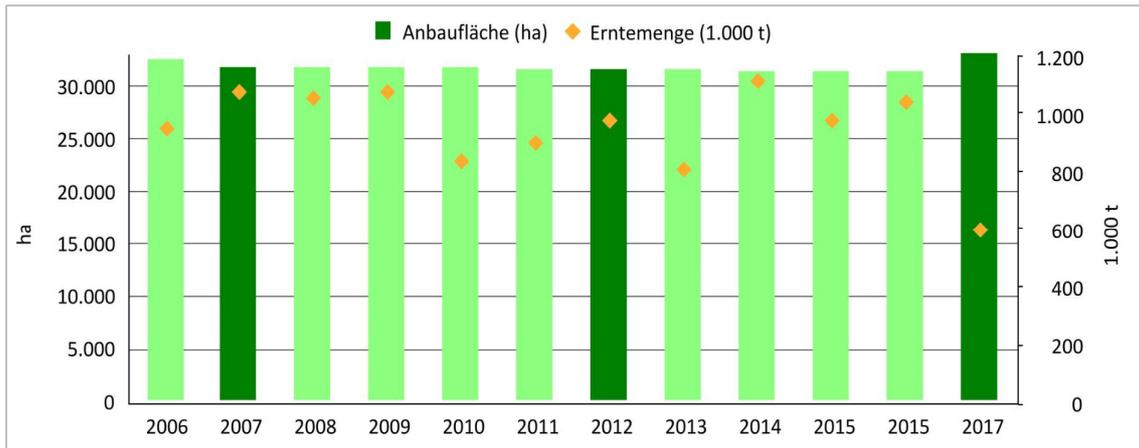


Abbildung 2: Apfel-Anbaufläche und Erntemengen der Jahre 2006 bis 2017 in Deutschland (Garming et al. 2018, S. 76)

(Garming et al. 2018). Sie konzentrieren sich vor allem auf Regionen an der Niederelbe und am Bodensee, Baden-Württemberg beheimatet etwa 50 % der gesamtdeutschen Obstbaubetriebe (BMEL 2019a). Auf Baden-Württemberg, Niedersachsen und Sachsen entfallen insgesamt zwei Drittel der bundesweiten Apfelanbauflächen (Steinbacher und Schlossberger 2016).

Der **Strukturwandel**, der den Landwirtschaftssektor prägt, zeichnet sich auch im Obstbau ab. So sinkt die Anzahl kleinerer Betriebe und die durchschnittliche Anbaufläche pro Betrieb steigt (Garming et al. 2018). Insbesondere bei Betrieben mit landwirtschaftlicher Nutzfläche bis 1 ha nehmen Betriebsanzahl und Nutzfläche ab, lediglich bei Betrieben mit mehr als 20 ha kann ein Zuwachs beider Größen verzeichnet werden (BMEL 2019a). Vorangetrieben wird dieser Prozess durch die Mechanisierung, Skaleneffekte, Wettbewerbsdruck aber auch durch die Einführung des Mindestlohns. Die Betriebsgrößen folgen der klassischen, innerdeutschen Verteilung. Während im Süden die Betriebe deutlich kleiner sind, finden sich im Norden und Ostdeutschland deutlich größere Betriebe (Garming et al. 2018).

Weltweit gibt es 20.000 **Apfelsorten**, davon sind in Deutschland mengenmäßig 30 Sorten relevant (BLE 2020). In nachstehender Tabelle 1 sind die zehn wichtigsten Sorten in Deutschland getrennt nach konventionellem und ökologischem Anbau aufgelistet.

Tabelle 1: Relevante Apfelsorten in Deutschland im konventionellen und ökologischen Anbau im Jahr 2017/18 nach Kreisel und Schlossberger (2019) und föko (2020)

Rang	Konventioneller Anbau		Bio-Anbau	
	Apfelsorte	Sortenanteil [%]	Apfelsorte	Sortenanteil [%]
1	Elstar	18,7	Elstar	16,4
2	Red Prince	11,4	Topaz	15,4
3	Braeburn	10,7	Jonagold	12,8
4	Jonagold	9,2	Braeburn	8,4
5	Jonagored	8,7	Santana	5,7
6	Gala	7,9	Pinova	4,2
7	Pinova	4,0	Gala	4,2
8	Boskoop	2,9	Boskoop	3,7
9	Golden Delicious	2,7	Natyra	3,2
10	Idared	2,5	Delabrestivale	2,0

Seit Jahrzehnten ist der Obstsektor geprägt von hohen Importmengen (Garming et al. 2018). Der Apfel nimmt **weltweit** 12 % der Obsterzeugung ein und wird zu 64 % in Asien angebaut. In Europa macht der Apfel 22 % der Obsterzeugung aus und wird vorwiegend in Polen, Italien, Frankreich und Deutschland angebaut.

## 2.2 Ökonomische Einflussgrößen im Apfelanbau

Auf Verbraucherebene lässt sich seit einigen Jahren der Trend hin zu regional erzeugten Lebensmitteln erkennen. Auch bei Obsterzeugnissen lässt sich diese verstärkte **Nachfrage** ablesen. Hierdurch ergibt sich ein Potenzial zur Ausdehnung der heimischen Erzeugung. Erreicht werden kann diese durch angepasste Produktionssysteme, wie den geschützten Anbau, oder angepasste Kulturführung (Garming et al. 2018). Zwar ist der pro Kopf-Verbrauch von Äpfeln in Deutschland seit einigen Jahren rückläufig (Garming et al. 2018), dennoch bleibt der Apfel, rechnet man Erzeugungsprodukte mit ein, auf Platz eins der meistnachgefragten Obstsorten in Deutschland (BLE 2020).

Die **Kaufentscheidung** eines Konsumenten hängt im hohen Maß von der **Qualität** des Apfels ab. Ausschlaggebend für diese sind seine äußere Erscheinung in Größe, Form und Ausfärbung, sowie innere Qualitätsmerkmale, wie sortentypischer Geschmack, Zuckergehalt, Konsistenz, Festigkeit und Saftigkeit (Krengel et al. 2015). Darüber hinaus

wird die Kaufentscheidung vom Preis, dem Zeitpunkt der Verfügbarkeit am Markt und der Distribution beeinflusst. Diese Faktoren führen zu einem intensiven Wettbewerb der einzelnen Anbaugebiete (Steinbacher und Schlossberger 2016). Von Seiten des Erzeugers ist es außerdem wichtig, ein hohes Maß an Transportfestigkeit und Lagerfähigkeit zu erreichen (Krengel et al. 2015).

Durchschnittlich liegt der **Ernteertrag** von Apfelanlagen je nach Bewirtschaftungsform zwischen 25 bis 40 t/ha (Garming et al. 2018). Diese schwanken jedoch bedingt durch Alternanz und Witterungseinflüsse jährlich teilweise stark (vgl. Abbildung 2). Dies kann zu erheblicher Einkommensvolatilität für die Apfelproduzenten führen. Verstärkt wird diese Unsicherheit durch den schwankenden Verkaufspreis.

Die **Preisbildung** am Obstmarkt ist abhängig von der vorhandenen Erntemenge, der Qualität der Ernte, dem Preisniveau anderer Obstarten, dem Angebot anderer Anbauregionen und der wetterabhängigen Nachfrage nach Obstarten (Kreisel und Schlossberger 2019). In Deutschland hat außerdem die Sparte des Streuobst- und Hausgartenanbaus einen nicht unerheblichen Einfluss. Die Erntemenge fällt bei extensiver Bewirtschaftung erheblich volatiler aus, da hier die Alternanz generell höher liegt als im Intensivobstanbau. In Jahren, in denen hier hohe Ernten erzielt werden, wird dadurch vor allem im Herbst die Nachfrage nach Tafelobst stark beeinflusst und die Erlöserpreise für Tafelware sinken (Steinbacher und Schlossberger 2016).

Beim Verkauf von Frischobst wird sich in Deutschland verschiedener **Absatzkanäle** bedient. Mengenmäßig wird in Deutschland der größte Anteil genossenschaftlich vermarktet. Eine genossenschaftliche Vermarktung setzt die Mitgliedschaft eines Betriebes in einer nach EU-Recht zulässigen Erzeugerorganisation (EO) voraus. Diese ist dann für die Lagerung, Sortierung und Vermarktung der erhaltenen Ware zuständig. Sie verkauft die Äpfel an den Lebensmitteleinzelhandel (LEH), Großhändler oder die verarbeitende Industrie. Im Jahr 2014 wurden in Deutschland 43 % der gesamten Obsterzeugung durch EO vermarktet, wobei der Anteil über die letzten Jahrzehnte gesunken ist (Garming et al. 2018). Insbesondere im Kernobst ist ein hoher Bündelungsgrad sinnvoll, da hier Läger mit kontrollierter Atmosphäre und großer Kapazität für lange Zeitspannen von bis zu einem Jahr notwendig sind (Steinbacher und Schlossberger 2016). Eine andere Option ist die Selbstvermarktung. Hier verkauft der Erzeuger sein Obst direkt an den LEH. Des Weiteren ist es möglich, Erträge direkt an die verarbeitende Industrie zu verkaufen. Eine weitere Option ist die Direktvermarktung,

bei der direkt an den Verbraucher verkauft wird. Schätzungsweise 13 % entfallen auf diesen Sektor (Garming et al. 2018).

Der Apfel als lagerfähiges Obst ermöglicht es, den **Verkaufszeitpunkt** vom Erntezeitpunkt zu entkoppeln. Der **Erntezeitpunkt** ist demnach auch abhängig von Art der Verwendung. Jene Äpfel, die für die **Lagerung** bestimmt sind, werden früher geerntet als solche, die für eine sofortige Vermarktung vorgesehen sind. Der Erntezeitpunkt und die Lagerfähigkeit ergibt sich aus der Apfelgesundheit, der sortenspezifischen Größe, der physiologischen Entwicklung und dem Zuckergehalt (BLE 2020). Die Erntezeitpunkt der deutschen Hauptsorten liegt zwischen Anfang September und Ende Oktober (Krengel et al. 2015).

Dauerkulturen bergen im Gegensatz zu jährlich angebauten Kulturen ein höheres **Investitionsrisiko**. Denn das Kapital wird langfristig gebunden und zukünftige Rahmenbedingungen sind schwer absehbar (Ebert et al. 2006). Aus betriebswirtschaftlicher Sicht ist eine **Intensivierung** der Erträge pro Fläche sinnvoll. Denn mit steigendem Ertrag auf der gleichen Fläche können Fixkosten auf mehr Früchte umverteilt werden. Außerdem erhöht sich hierdurch die Wahrscheinlichkeit, Ertragsschwankungen ausgleichen und Liefervereinbarungen gerecht werden zu können, was insbesondere für Betriebe mit hoher Kundenbindung wichtig ist (Wicke 2015b). Hierfür werden hohe Pflanzdichten und vitale Bäume benötigt (Ebert et al. 2006; Steinbacher und Schlossberger 2016). Wie bereits genannt, ist die Ernte neben Alternanz von der Witterung abhängig, weshalb Betriebe nicht zuletzt einen hohen Aufwand im Kulturschutz haben und immer mehr Kulturen im geschützten Anbau zu finden sind. Diese Ertragsabsicherung ist wiederum mit erhöhtem Investitionsbedarf verbunden (Wicke 2015b). In den letzten Jahren ist die Arbeitsleistung im Obstbau leicht gestiegen, obwohl die Fläche und Zahl an Betrieben gleichbleibend bzw. rückläufig sind. Auch dies ist ein Indiz für die Intensivierung im Obstbau durch beispielsweise höhere Pflanzdichten. Generell ist der Obstbau geprägt von **Saisonarbeitskräften**, welche einen Anteil von 73 % an der Gesamtbeschäftigtenzahl ausmachen. Im Durchschnitt arbeiten pro Betrieb 0,8 Festarbeitskräfte, 2 Familienmitglieder und 7,8 Saisonarbeitskräfte (BMEL 2019a).

## 2.3 Ausgewählte Extremwetterlagen und ihre Gefahr für den Apfelanbau

Der Erwerbsobstbau ist mit seinen Dauerkulturen in hohem Maß von Umweltfaktoren abhängig, da diese für viele Jahre an einen Standort gebunden und sie somit Wetterbedingungen ganz- und mehrjährig ausgesetzt sind. Das Risiko, das von Extremwetterlagen, wie Dürre, Hagel, Stark- und Dauerregen, extremen Frösten oder Stürmen, ausgeht, ist entsprechend hoch. Diese können die Pflanzengesundheit von Dauerkulturen verändern, zu Ertragseinbußen bis zum Totalausfall führen und Auswirkungen auf Folgejahre und deren Erträge haben (Krengel et al. 2015). Ist eine Pflanze geschwächt, ist das Risiko eines Sekundärschadens durch beispielsweise Pilze, Bakterien oder Insekten erhöht (Gömann et al. 2015). Wie hoch mögliche Ertragseinbußen sind, hängt neben der Intensität und dem Zeitpunkt der Extremwetterlage auch davon ab, ob es sich für die betroffene Obstanlage um ein aus anderen Gründen ertragsschwaches Jahr gehandelt hat. Negative Auswirkungen auf Folgejahre reichen von einem erhöhtem Arbeitsaufwand der Kulturmaßnahmen bis zu erheblichen Ertragseinbußen aufgrund beispielsweise nicht ausgebildeter Blütenansätze im Vorjahr (Krengel et al. 2015). Gerade weil Sonderkulturen eine hohe Wertschöpfung innewohnt, bergen Schäden erhebliche Risiken für den Landwirt (Deutscher Bundestag 2018). Durch den Klimawandel könnten sich Extremwetterlagen in Zukunft häufen. Für Landwirte wären eine klare Abschätzung für die Zukunft und konkrete Anpassungsmöglichkeiten von außerordentlicher Relevanz. Hierzu bedarf es einer verbesserten Daten- und Informationslage (Gömann et al. 2015). Im Folgenden werden die für den Apfelanbau risikoreichsten Extremwetterlagen und Prognosen sowie deren zukünftige Entwicklung analysiert.

Risiken gehen für den Apfelanbau in Süddeutschland primär von Hagel aus, gefolgt von Trockenheit, Spätfrost und Hitze. In Norddeutschland sind Risikofaktoren in erster Linie Hagel und Spätfrost sowie Staunässe und Dauerregen (Tabelle 2). Die folgenden Ausführungen konzentrieren sich deshalb auf die eben genannten Extremwetterlagen, wobei Hagel und Hagelschutz im Fokus stehen.

*Tabelle 2: Relevanz von Extremwetterlagen für den Apfelanbau, Experteneinschätzung mit 1 höchstes Risiko bis 11 niedrigstes Risiko nach Gömann et al. (2015)*

Extremwetterlage	Einordnung	
	Niederelbe	Bodensee
Hagel	1	1
Spätfrost	2	3
Staunässe/Überschwemmung	3	11
Dauerregen	4	6
Kahl-/Winterfrost	5	9
Hitze	6	4
Starkregen	7	5
Frühfrost	8	10
Sturm	9	7
Extreme Dürre	10	8
Trockenheit	11	2

### 2.3.1 Hagel

Ein Hagelereignis kann mechanische Schäden an Pflanzenteilen, wie Blüten, Blätter und Holz verursachen (Jacob und Koch 2005; Gömann et al. 2015). Es kann zur Senkung der Photosyntheseleistung, Fruchtfall sowie Reifeverzögerung führen. Auch im Folgejahr kann der Ertrag negativ beeinflusst werden und es kann zu Mehraufwand durch Kulturmaßnahmen und Ersatz von Hagelnetzen kommen. Darüber hinaus können Eintrittsflächen für Infektionen entstehen (Gömann et al. 2015). Wie hoch der Hagelschaden ausfällt hängt von Standort, Zeitpunkt der Vegetationsperiode, der Bewirtschaftungsform und der Sorte der angebauten Kultur ab (Gömann et al. 2015). Die größte Wahrscheinlichkeit eines Hagelereignisses liegt in Deutschland zwischen April und Juli (Jacob und Koch 2005), wobei ein besonders hohes Schadenspotenzial im Juli bis September zu erwarten ist (Kröling 2019).

Wenngleich von Hagel als Extremwetterlage das größte Risiko gegenüber dem Apfelanbau ausgeht und **Prognosen** über zukünftige Ereignisse für Landwirte von Wichtigkeit wären, sind gerade ein Hagelereignisse schwierig zu analysieren und prognostizieren. Es liegen kaum belastbarer Daten zu dieser Extremwetterlage vor, da sie lokal auftritt und meteorologische Messverfahren diese nur unzureichend aufzeichnen. Momentan können Aussagen nur mittels Proxi-Indikatoren abgeleitet werden. Schadensmeldungen von Versicherungen beispielsweise legen nahe, dass Hagelschäden von Osten nach Westen und Norden nach Süden zunehmen. Jedoch sind

diese Meldungen durch Anbauregionen und Vorhandensein von Hagelversicherungen verzerrt. Besonders gefährdet sind windoffene Lagen sowie Westhänge (Gömann et al. 2015). Ungeachtet des zukünftigen Trends zum Auftreten von Hagelereignissen macht die Intensivierung des Apfelanbaus ihn anfälliger gegenüber dieser Extremwetterlage. Denn Früchte sind zunehmend in der Peripherie des Baumes zu finden, wo sie leichter zu ernten sind und eine bessere Ausfärbung erreichen können. Doch so sind sie auch einem erhöhten Risiko durch Hagelschlag ausgesetzt (Gömann et al. 2015; Jacob und Koch 2005). Zwischen 1990 und 2006 war Hagel in der Landwirtschaft für durchschnittlichen 99,6 Mio. € Schaden jährlich verantwortlich (Deutscher Bundestag 2018). Eine konkrete Angabe, wie hoch dieser im Apfelanbau liegt, konnte nicht gefunden werden.

### 2.3.2 Spätfrost

Als Spätfrost wird jener Frost bezeichnet, der nach Beginn der Vegetationsperiode auftritt. Er bedroht vor allem Blüten sowie junge Blätter und Früchte. Beim Apfel ist er insbesondere während der Blütezeit problematisch. Tritt ein solches Ereignis auf, kann es zur Schädigung von Pflanzenteilen, Behinderung der Fruchtentwicklung und Qualitätseinbußen bis zum Totalausfall der Ernte kommen. Je weiter das Entwicklungsstadium der frostempfindlichen Pflanzenteile fortgeschritten ist, desto mehr steigt die Frostempfindlichkeit. Zu Beginn kann bei grünen Knospen noch ein Wert von ca.  $-7\text{ °C}$  mehr oder weniger schadensfrei überstanden werden, bis zur Vollblüte können jedoch schon Temperaturen um  $0\text{ °C}$  kritisch werden (Gömann et al. 2015). Auch kann ein Frostereignis die Alternanz verstärken sowie einen gesteigerten Bedarf an Pflanzenschutzmitteln nach sich ziehen. Beides erhöht den Aufwand für Kulturmaßnahmen und hat Auswirkungen auf Folgejahre (Köppler 2017). Spätfröste treten meist zwischen März und Juni auf (Gömann et al. 2015). Besonders gefährdet sind Lagen, an denen die Bildung von Kaltluftseen möglich sind (Krengel et al. 2015).

Es wird davon ausgegangen, dass die Zahl an Spätfrösten in den kommenden Jahren abnehmen wird. Diesem **Trend**, der sich risikosenkend für den Apfelanbau auswirken würde, steht jedoch die Entwicklung entgegen, dass sich Vegetationszeitpunkte zunehmend verfrühen (Gömann et al. 2015). In den letzten 30 bis 40 Jahren hat sich die Blühphase in Deutschland um zwei bis drei Wochen nach vorne verlagert. Hierdurch nimmt die Frostgefährdung der Apfelanlagen zu (Krengel et al. 2015).

### 2.3.3 Trockenheit, Hitze und Sonneneinstrahlung

Bei langanhaltender **Trockenheit** kann es beim Apfel trotz seiner tiefwurzelnden Eigenschaft zu unzureichender Versorgung mit Wasser bzw. Nährstoffen kommen (Krengel et al. 2015). Es kann zum gehemmten Triebwachstum und negativer Fruchtentwicklung bis Fruchtfall kommen. Auch die Gefahr des Befalls durch trockenolerante Erreger steigt. Negative Auswirkungen auf das Folgejahr können vor allem durch die reduzierte Einlagerung von Reservestoffen hervorgerufen werden, was eine weniger stark ausgeprägte Winterhärte nach sich ziehen kann. Die größte Gefahr für Trockenheit geht von den Monaten Juni bis August aus. Prognosen inwieweit sich die Niederschlagsmenge bis Ende des 21. Jahrhunderts verändern wird, reichen von + 10 bis - 30 %. Generell wird es aber eine Zunahme an Trockentagen in den Monaten März und April geben. Vor allem in Süddeutschland sind Betriebe von Trockenheit betroffen (Gömann et al. 2015), aber auch in Sachsen werden Prognosen zufolge in Zukunft mehr als die Hälfte der Obstbaubetriebe auf zusätzliche Bewässerung angewiesen sein (LfULG 2011). Neben den Einflüssen des Klimawandels verstärkt die Intensivierung des Obstbaus die Problematik, da hohe Pflanzdichten ohnehin vielerorts einen überproportionalen Wasserbedarf nach sich ziehen (Jacob und Koch 2005).

Als **Hitze** werden Temperaturanstiege über 30 °C bezeichnet. Es kann zu Schäden von Zellen und Membranen führen, die Photosyntheseleistung kann sinken, das Ausbringen von Düngern und Pflanzenschutzmitteln kann behindert werden und der Wasserbedarf der Pflanze steigt. Bis Ende des 21. Jahrhunderts soll sich die Anzahl an Hitzetagen in den Sommermonaten Juli bis August verdrei- bis vervierfachen. In für Hitzetage untypischen Monaten wie Mai soll sich die Zahl sogar verzehnfachen. Insbesondere der östliche und südliche Teil Deutschlands wird betroffen sein (Gömann et al. 2015). Die für die Apfelqualität wichtige Ausfärbung ist neben einer ausreichenden Sonneneinstrahlung auf Temperaturschwankungen zwischen Tag und Nacht angewiesen (Krengel et al. 2015). Auch sind kühle Nächte im Herbst für den Reifeprozess wichtig (Jacob und Koch 2005). Von Mai bis September werden in Zukunft steigende Abendtemperaturen prognostiziert (Gömann et al. 2015).

In Deutschland ist im Apfelanbau **Licht** eher ein begrenzender Faktor. Produzenten versuchen deshalb, durch geeignete Pflanzsysteme und Baumerziehung möglichst viel Licht in den Baum zu bringen (Jacob und Koch 2005). Übermäßiger Sonneneinfall in Kombination mit hohen Temperaturen kann jedoch zu Sonnenbrand auf Blättern und Früchten führen (Willcockx et al. 2020). Dabei sind gerade frühe Entwicklungsstadien

anfällig für Verbrennungen. Hiervon ist zumeist die nordwestliche Peripherie des Baumes betroffen. Beeinflussende Faktoren sind Standort, Art und Alter der Sorten, Ausrichtung der Anlage, Sonnenhöhe und Bewölkung. Insbesondere in den Monaten Mai bis Juli sind die Mittags- und Nachmittagsstunden kritisch (Gömman et al. 2015; Jacob und Koch 2005). Eine Zunahme dieser Problematik wird insbesondere in Süddeutschland prognostiziert (Gömman et al. 2015). Teilweise treten Schäden erst bei der Lagerung auf (Jacob und Koch 2005).

#### 2.3.4 Dauer- und Starkregen, Staunässe und Wind

Niederschlag über einen langen Zeitraum (**Dauerregen**) und hoher Niederschlag über einen kurzen Zeitraum (**Starkregen**), können zu **Staunässe** und im Zuge dessen zur mangelhaften Versorgung der Pflanze mit Sauerstoff führen. Darüber hinaus können Nährstoffe ausgewaschen werden und Bodenerosionen auftreten. Die Gefahr durch feuchtigkeitsliebende Krankheitserreger kann durch Blattnässe und Aufschleudern von Pilzsporen erhöht werden. Starkregen kann außerdem Pflanzenteile oder Früchte abbrechen. Im Zuge dessen kann es in Apfelanlagen zur Qualitätseinbußen bis Totalausfällen kommen. Das höchste Risiko besteht in den Monaten Juni bis August. Zukünftig soll die Gefahr von Starkregen zunehmen. Eine Zunahme von Dauerregen wird für die Monate März und April prognostiziert, Starkregen soll in den Monaten März bis Oktober steigen (Gömman et al. 2015).

Durch **Wind** können Unterstützungsstrukturen sowie Bäume und Pflanzenteile beschädigt werden. Außerdem kann das Ausbringen von Pflanzenschutzmitteln verhindert werden. Es kann zu Entwicklungs- bzw. Reifeverzögerungen und Qualitätseinbußen kommen und das Risiko von sekundärem Befall durch Folgeerkrankungen erhöhen. Das Schadenspotenzial nimmt mit fortgeschrittenem Entwicklungsstadium zu. Der zukünftige Trend für Stürme lässt sich nur schwer modellieren, da hierfür zeitlich und räumlich sehr variable Parameter einfließen (Gömman et al. 2015).

### 2.4 Risikomanagementinstrumente und Kulturschutzmaßnahmen

Wie soeben dargelegt, sind Erträge im Apfelanbau an klimatische Faktoren gebunden, von denen bei einer Abweichung von den Standortgegebenheiten ein nicht unerhebliches unternehmerisches Risiko ausgeht. Früchte, die Schäden durch beispielsweise Hagel oder Sonnenbrand aufweisen, können nicht mehr wie ursprünglich

vorgesehenen vermarktet werden. Hat ein Extremwetterereignis nicht den Totalausfall der Ernte zur Folge, erhöhen sich die Kosten für Ernte und Sortierung. Durch den Ertragsausfall können gegebenenfalls Liefervereinbarungen nicht einhalten werden, die Marktpräsenz kann gefährdet und das Vertrauen der Kunden beeinträchtigt werden (Handsack 2013). Außerdem werden Betriebskapazitäten nicht optimal ausgenutzt (Jacob und Koch 2005). Inwieweit Extremwetterereignisse schädigende **wirtschaftliche Folgen** nach sich ziehen, hängt im großen Maße von der Betriebsstruktur und dem Vorhandensein von Risikomanagementinstrumenten ab. Vor allem in spezialisierten Obstbetrieben können sich Ertragseinbrüche in hohem Maß auf Einkommen und Liquidität bis hin zur Existenzgefährdung auswirken (Gömann et al. 2015). Nicht zuletzt deshalb ist ein Risikomanagement von außerordentlicher Bedeutung (Gömann et al. 2015; LfULG 2011). Im Folgenden werden verschiedene Risikomanagementinstrumente bzw. Kulturschutzmaßnahmen vorgestellt.

#### 2.4.1 Extremwetter- und Ernteversicherungen

Versicherungen stellen außerbetriebliche Instrumente zur Risikominderung im Schadensfall dar. Im Kernobstanbau kann gegen Starkregen, Sturm, Hagel, Extremfrost, Überschwemmung und zum Teil Dürren versichert werden, nicht jedoch gegen Frost da es sich hierbei um ein sogenanntes Kumulrisiko handelt. Es können Ertragsverluste bezogen auf Menge und Qualität, aber auch Anlagenkonstruktionen, wie Hagelschutznetzsysteme, versichert werden (Deutscher Bundestag 2018). Die Versicherungssumme kann dabei vom Versicherten festgesetzt werden, und die Prämienhöhe wird abhängig vom Auftreten von Hagelereignissen festgelegt (Wiebusch und Hilbers 2017). Bei der Entscheidung über das Abschließen einer Versicherung sollte auf die Differenz von Versicherungsprämie und erwarteter Versicherungsleistung geachtet werden (Gömann et al. 2015). Eine Versicherung entschädigt den Produzenten zwar finanziell für entstanden Schaden, aber kann den physischen Ernteausfall nicht verhindern. Die Gefahr, dass langfristige Lieferbeziehungen beschädigt und die Marktpräsenz durch nicht kontinuierliche Lieferungen riskiert werden, bleibt bestehen. Zudem erhöht sich der Arbeitsaufwand für die Sortierung einer nur teilweise vom Wetterextrem betroffenen Ernte (Jacob und Koch 2005; Gömann et al. 2015). Hinzu kommt, dass die zu zahlende Versicherungsprämie steigen wird, sollten Extremwetterlagen, wie Hagel, zukünftige vermehrt auftreten (Jacob und Koch 2005). Derzeit sind circa 35 bis 40 % der Kernobstfläche gegen Hagel versichert (Wiebusch und Hilbers 2017).

## 2.4.2 Hagelschutzmaßnahmen

Neben der bereits ausgeführten Möglichkeit der Versicherung, können Hagelschäden außerdem durch aktive Hagelabwehr, wie Hagelflieger oder Hagelkanonen, abgewandt werden. Hagelflieger bringen Silberjodid in entstehende Wolken ein und Hagelkanonen zertrümmern herabfallende Hagelkörner durch Stoßwellen. Beide Maßnahmen sind aufgrund hoher Kosten bzw. geringer sozialer Akzeptanz in Deutschland nicht weit verbreitet. (Handsack 2013). Eine andere Möglichkeit wäre das betriebliche Risiko zu minimieren, indem Anbauflächen, -sorten und -kulturen räumlich gestreut werden. Da Hagelereignisse lokal auftreten, kann so der Anteil des Ausfalls am Gesamterzeugnis unter Umständen minimiert werden. Diese Herangehensweise ist jedoch erst ab einer gewissen Betriebsgröße praktikabel und demnach eher in Norddeutschland zu verorten, wo Hagelereignisse tendenziell ohnehin weniger zahlreich sind (Wiebusch und Hilbers 2017; Gömann et al. 2015). Eine weitere Möglichkeit ist der Einsatz von Hagelschutznetzen, auf welchen im Folgenden genauer eingegangen wird.

### 2.4.2.1 Hagelschutznetze: Verbreitung, Systeme und Einfluss auf das Mikroklima

Einen nahezu vollständigen physischen Schutz des Ernteguts können nur Überdachungssysteme, wie Hagelschutznetze, leisten (Deutscher Bundestag 2018). Vor allem in Süddeutschland werden bei der Errichtung von Apfel-Neuanlagen Hagelschutznetzvorrichtungen implementiert, aber auch teilweise Altanlagen nachgerüstet. In der Anbauregion um die Niederelbe in Norddeutschland sind Hagelschutznetze weniger stark verbreitet (Gömann et al. 2015). Die Bundesländer mit dem größten Anteil an mit Hagelnetzen ausgestatteten Apfelanbauflächen waren 2015 Baden-Württemberg mit ca. 39 %, Bayern mit ca. 18 %, Rheinland-Pfalz mit ca. 16 % und Nordrhein-Westfalen mit 15 %. In Niedersachsen und Sachsen waren weniger als 1 bzw. 3 % der Apfelanbauflächen mit Hagelnetzen ausgestattet (Wiebusch und Hilbers 2017).

**Systeme**, die in der Praxis zur Anwendung kommen, sind Mehrreihen- oder Einzelreihensysteme (Abbildung 3). Als Standardsystem gilt das Einzelreihensystem mit Querverspannung (Baab 2015). Als Gerüstmaterial kommen Holz- oder Betonpfähle zum Einsatz. Das Material Holz hat den Vorteil der höheren Elastizität und leichteren Handhabung, hingegen verfügt Beton über eine längere Lebensdauer und leichtere Entsorgung (Handsack 2013). Eine Überspannung der Obstanlage ist von Ende Mai bis zur Ernte sinnvoll (LfULG 2011; Handsack 2013).



*Abbildung 3: Hagelschutzsysteme:  
Einzelreihensystem mit Querverspannung  
(oben links) und ohne Querverspannung (oben  
rechts) sowie Mehrreihensystem (unten links)  
nach Wiebusch und Hilbers (2017, S. 370ff)*

Hagelschutznetze beeinflussen das **Kleinklima** von Apfelanlagen, wobei in erster Linie das Lichtangebot verändert wird und Luftfeuchte und -temperatur nur geringfügig beeinflusst werden (Thalheimer und Paoli 2005). Außerdem wird die Wärme von Blättern und Früchten reduziert sowie deren Abtrocknen verlangsamt (Widmer 2005). Relevant ist vor allem die **Minderung** des sichtbaren bzw. photosynthetisch aktiven **Lichts** (PAR), das für das Pflanzenwachstum essenziell ist, und der UVB-Strahlung, die für die Fruchtausfärbung wichtig ist. Auch der Anteil an reflektiertem bzw. diffusem Licht wird durch das Hagelschutznetz erhöht, sowie die Infrarotstrahlung beeinflusst (Blanke 2007). Durch Lichtstreuung wird das einfallende Licht für den Baum unbrauchbar. Dieser Effekt wird an bewölkten Tagen verstärkt (Handsack 2013). Die Lichtdurchlässigkeit von Hagelnetzen (Tabelle 3) wird durch die Maschenweite, Anteil an farbigen Fäden, die Fadendicke und -anzahl, sowie das Alter beeinflusst. Mit zunehmenden Alter kommt es zur Verschmutzung, Faltenbildung (Blanke 2007) und Auswaschung. Die Haltbarkeit der Netze richtet sich nach ihrer UV-Stabilität (Jacob und Koch 2005) und steht dabei in umgekehrter Wechselwirkung mit ihrer Lichtdurchlässigkeit. In der Praxis kommen vor allem schwarze, graue und weiße bzw. kristallfarbene Hagelnetze zum Einsatz. Netze, die nicht weiß sind, wurden durch Karbonsubstanzen, wie Ruß, behandelt. Dies wirkt sich positiv auf ihre Lebensdauer und negativ auf ihre Lichtdurchlässigkeit aus (Blanke 2007). Über die Lebenszeit gleichen sich die Verschattungsraten jedoch immer weiter

an, da die Lichtdurchlässigkeit der weißen Netze durch Verschmutzung sinkt und die der schwarzen bzw. grauen Netze durch Auswaschung der UV-Stabilisatoren steigt (Klophaus und Baab 2015).

*Tabelle 3: Übersicht praxisrelevanter Hagelnetzfarben nach ihrer Lichtdurchlässigkeit in Reduzierung der PAR und UVB-Strahlung in % sowie ihrer Haltbarkeit in Jahren*

Netzfarbe	Reduzierung PAR	Reduzierung UVB	Haltbarkeit (in Jahren)
Schwarz	18 <sup>(a,b,d)</sup> – 28 <sup>(c)</sup> %	15 <sup>(a)</sup> %	20 <sup>(b)</sup> – 30 <sup>(c)</sup>
Grau	13 <sup>(a)</sup> – 24 <sup>(c)</sup> %	15 <sup>(a)</sup> %	10 <sup>(c)</sup> - 15 <sup>(b,c)</sup>
Weiß	7 <sup>(a)</sup> – 18,5 <sup>(c)</sup> %	11 <sup>(a)</sup> %	5 – 7 <sup>(b)</sup> , 8 -12 <sup>(c)</sup>
mit (a) Blanke 2007, (b) Handschack 2013, (c) Klophaus und Baab 2015, (d) Widmer 2005			

Auch farbige Netze, wie beispielsweise in rot oder grün, wurden in Untersuchungen von Blanke (2007) untersucht. Denn das für die Photosynthese relevante Spektrum liegt im Bereich des roten Lichts bei etwa 667 nm und die für die Ausfärbung notwendige UVB-Strahlung bei etwa 300 nm, was man sich durch die Wahl der Netzfarbe und damit der Durchlässigkeit verschiedener Wellenlängenbereiche zunutze machen könnte. Durch farbige Netze konnten jedoch keine derart großen Vorteile erwirtschaftet werden als, dass sie die deutlich geringere Akzeptanz im Landschaftsbild rechtfertigen würden. Bei den in der Praxis angewandten Hagelnetzfarben werden hellere Netze als das Landschaftsbild störender empfunden als dunklere und genießen eine geringere gesellschaftliche Akzeptanz (Handschack 2013; Thalheimer und Paoli 2005).

#### 2.4.2.2 Kosten von Hagelschutznetzen

Die **Kosten** von Hagelschutzkonstruktionen hängen vom gewählten System und den darin verwendeten Materialien der Unterkonstruktion und des Netzes ab. Denn diese haben Auswirkungen auf Lebensdauer und damit Notwendigkeit von Reparatur- bzw. Ersatzkosten. Während Holzpfähle weniger langlebig als Betonpfähle sind (Wicke 2015b), sind weiße Hagelnetze weniger langlebig als schwarze (vgl. Kapitel 2.4.2.1). Außerdem hat das Material Auswirkungen auf den Montageaufwand. Dieser liegt bei Beton höher als bei Holz. Auch der Reihenabstand der Pfähle und die Höhe des Systems haben Auswirkungen auf die Kosten, da mit verringertem Reihenabstand bzw. zunehmender Höhe der Materialaufwand und damit die Kosten steigen. Ein verringerter Reihenabstand kann die Stabilität und eine höhere Aufständigung die Lichtverfügbarkeit verbessern (Wicke 2015b). Pauschalangaben zu den Kosten von Hagelschutzkonstruktionen können kaum getroffen werden, da diese stark abhängig

vom gewählten System und den Standortvoraussetzungen und -bedürfnissen sind. Investitionskosten klassischer Hagelschutzsysteme mit Betonpfählen reichen von etwa 22.600 €/ha (Wicke 2015a) über ca. 38.100 €/ha (Wiebusch und Hilbers 2017) bis etwa 43.600 €/ha (LfULG 2011). Die Unterkonstruktion ist dabei verantwortlich für ca. 74 % (Wiebusch und Hilbers 2017) bis 91 % der Kosten (LfULG 2011). Beim Einsatz von Holzpfählen konnten bisher etwa 600 €/ha Materialkosten sowie 200 €/ha Installationskosten gegenüber der Betonbauweise eingespart werden (Wicke 2015b). Der Trend geht aufgrund des Preisanstiegs von Holzpfählen in den letzten Jahren jedoch hin zu Betonunterkonstruktionen, da mit einer Annäherung der Investitionskosten die Vorteile, die aus der längeren Lebensdauer von Betonpfählen resultieren, überwiegen (Wiebusch und Hilbers 2017). Neben Verlässlichkeit birgt die längere Lebensdauer den Vorteil, dass Investitionskosten über einen längeren Zeitraum abgeschrieben werden können (Kröling 2019). Einsparungen können durch den Eigenbau erreicht werden, wobei hier dringend auf eine fachkundliche Begleitung geachtet werden muss, damit Fehler nicht zum frühzeitigen Verschleiß oder Stabilitätseinbußen führen (Wicke 2015b). In jedem Fall ermöglichen Hagelschutzkonstruktionen Einsparungen beim Stützgerüst der Apfelbäume, weshalb sich eine Investition in ein Hagelnetz insbesondere bei Neuanlagen lohnen kann (Stehr und Hahn 2016). Welche Förderungen es für Hagelschutznetze in Deutschland gibt, wird in Kapitel 5.2.1 beleuchtet. Jährliche Arbeitskosten ergeben sich durch das Öffnen und Schließen der Hagelnetze, was einmal im Frühjahr nach der Blüte und im Herbst vor der Ernte erfolgt. Es kann mit 15 bis 30 Stunden pro ha Arbeitsaufwand gerechnet werden (Wiebusch und Hilbers 2017).

### 2.4.3 Frostschutzmaßnahmen

Forstschutz kann im Obstbau auf unterschiedliche Weisen erreicht werden: durch Luftverwirbelung, direkte Lufterwärmung – wie Geländeheizungen, Frostkerzen, Heizdrähte – sowie Folienabdeckungen oder Frostschutzberegnung (Gömann et al. 2015), wobei in der Obstbaupraxis vor allem die letzten beiden Optionen zur Anwendung kommen (Jacob und Koch 2005). Im Apfelanbau wird überwiegend auf Frostschutzberegnung zurückgegriffen (Krengel et al. 2015). Bei der Unterkronen- oder Überkronenbewässerung wird die Erstarrungswärme des gefrierenden Wassers genutzt, damit Gewebetemperaturen nicht unter – 0,5 bis – 1 °C sinken (Jacob und Koch 2005). So können Fröste von bis zu – 6 °C abgewandt werden (Gömann et al. 2015). Bei der Unterkronenbewässerung wird der Boden unterhalb der Pflanze benetzt, bei der Überkronenbewässerung die Baumkrone und damit auch die Blüten des Baumes (Jacob und Koch 2005). An der Niederelbe sind etwa 75 % der Betriebe mit einer solchen

Vorrichtung ausgestattet, in Süddeutschland etwa 5 % (Krengel et al. 2015). Kritisch sollten bei der Frostschutzberechnung der hohe Wasserbedarf und die eventuell knappe Wasserverfügbarkeit gesehen werden (Gömann et al. 2015). Außerdem können bedingt durch das hohe Gewicht Baumkronenteile abbrechen und es besteht die Gefahr der Bodenvernässung. Die Wirkung des Forstschutzes kann gegebenenfalls durch geschlossene Überdachung oder Hagelschutznetze verstärkt werden, da die Abstrahlung sowie der Einfluss durch Wind minimiert werden (Jacob und Koch 2005).

#### 2.4.4 Maßnahmen für eine optimale Wasserverfügbarkeit

Gerade im Bereich der Dauerkulturen sind Bewässerungsvorrichtungen in vielen Regionen sinnvoll und notwendig, um ausreichende Ertrags- und Qualitätsstandards zu erreichen (Gömann et al. 2015; Gesellschaft für Kunststoffe im Landbau e.V. 2006). In Mitteleuropa muss bereits heute in der Regel für Zusatzbewässerung gesorgt werden (Krengel et al. 2015). Der Wasserbedarf von Äpfeln ist im Vergleich zu anderen Obstgehölzen relativ hoch. Zudem benötigen sie rund 60 % ihres Gesamtwasserbedarfs während ihrer Hauptvegetationsphase. Gängige Bewässerungsarten sind die Tropf-, Mikrosprinkler- aber auch Überkronenbewässerung. Bei der Auswahl des Systems ist neben den Anschaffungskosten die Wasserverfügbarkeit ein entscheidender Faktor (Krengel et al. 2015), die Tropfbewässerung ist von den genannten Varianten die am wasser- und bodenschonendste (Gesellschaft für Kunststoffe im Landbau e.V. 2006).

#### 2.4.5 Zwischenfazit

Die Wahl geeigneter Kulturschutzmaßnahmen ist regionen- und standortabhängig. Auf Apfelanbauflächen am Bodensee werden zum Kulturschutz gegen Extremwetterlagen vielerorts Hagelschutznetze eingesetzt, an der Niederelbe vor allem Frostschutzberechnung und in Mitteldeutschland findet sich eine Mischung (Garming 2016). Auch kann es aus betriebswirtschaftlicher Sicht sinnvoller sein auf eine Versicherung zurückzugreifen, wenn die Investitionskosten anderer Schutzmaßnahmen unverhältnismäßig zur Wahrscheinlichkeit eines Schadenseintritts stehen (Stehr und Hahn 2016). Jedoch kann diese den physischen Ertragsausfall nicht verhindern. Bei der Implementierung von Schutzabdeckungen kann es zur Änderung des Mikroklimas kommen. Welche Auswirkungen dies auf die Ernte und Kulturmaßnahmen haben kann wird in Kapitel 6.2.3 behandelt. Doch, wie dieses Kapitel auch gezeigt hat, kann sich durch den Klimawandel bedingt die Notwendigkeit für Schutzmaßnahmen zukünftig ändern.

## 3 Das Konzept der Agri-Photovoltaik

Dieses Kapitel beleuchtet das Konzept der Agri-PV. Es gibt einen kurzen Überblick zu technischen Ansätzen und Erkenntnissen weltweit, untersucht das Konzept insbesondere auf seine Wirtschaftlichkeit und beleuchtet abschließend die Agri-PV im Apfelanbau.

### 3.1 Definition, Entwicklung und Verbreitung

Die Agri-PV beschreibt das Konzept der simultanen Nutzung einer Fläche zur Erzeugung landwirtschaftlicher Produkte und Strom. Während die Idee der Landwirtschaft unter PV schon 1981 das erste Mal veröffentlicht wurde (Goetzberger und Zastrow 1981), erlangte das Thema vor 10 bis 15 Jahren weltweit vermehrt Interesse und erste Forschungsvorhaben entstanden. Anfangs waren sie vor allem in Japan und Frankreich zu finden, heute insbesondere in Japan und China sowie den USA, Frankreich, Italien, Deutschland und Südkorea. Während in Japan kleinskalige Anlagen installiert sind und das Land gemessen an der Anzahl an Agri-PV-Anlage weltweit führend ist, verfügt China über die meiste installierte Leistung. Im Jahr 2020 waren weltweit mehr als 2,8 GWp und über 2.000 Agri-PV-Anlagen implementiert (Schindele et al. 2020).

In Deutschland gibt es momentan vier Forschungsanlagen im Agri-PV-Bereich, wobei drei im Ackerbau und eine im Obstbau zu finden sind. Diese stehen in Freising (Bayern), Heggelbach (Baden-Württemberg), Dresden (Sachsen) und Grafschaft-Gelsdorf (Rheinland-Pfalz). Darüber hinaus gibt es acht kommerzielle Anlagen, welche in Altheimberg und Warmisried (Bayern), Bürstadt und Lampertheim (Hessen), Donaueschingen (Baden-Württemberg), im Eppelborn (Saarland), Leipzig (Sachsen) und Steinhausen (Nordrhein-Westfalen) stehen (Fraunhofer ISE 2021). Im Mai 2021 wurde eine Vornorm zur Agri-PV veröffentlicht, welche Vertreter aus Forschung, Landwirtschaft und Energiewirtschaft erarbeitet haben. Hierin sind verschiedene Agri-PV-Systeme und Anforderungen an die landwirtschaftliche Nutzung definiert (Vornorm DIN SPEC 91434: 2021-05). Eine schematische Übersicht dieser Systeme findet sich im Anhang in Abbildung A-1.

### 3.2 Anwendungsformen und Systemanlagendesign



Abbildung 4: Agri-PV-Anlagen über Ackerbau in Deutschland, Weinbau in Frankreich und Dauergrünland in Deutschland (von links nach rechts), (Bildquellen: Bay Wa r.e., Sun'Agri, Next2Sun)

So vielfältig der Sektor der Landwirtschaft ist, so vielfältig sind auch die Ansätze der Agri-PV den Bedürfnissen der Landwirtschaft gerecht zu werden. Während eine PV-FFA das primäre Ziel der Stromerzeugungsmaximierung pro Fläche hat, vereint die Agri-PV zwei Erzeugungsformen auf einer Fläche. Dabei könnte sich eine optimale Auslegung für eine Bewirtschaftungsform negativ auf die optimale Stromerzeugung auswirken und vice versa. Ein gelungenes Anlagendesign sollte möglichst beiden Seiten gerecht werden. Einen Einblick, wie Agri-PV-Anlagen im Acker- oder Weinanbau aussehen können, gibt Abbildung 4. Bilder von Agri-PV-Anlagen im Obstanbau können der Abbildung A-2 im Anhang sowie dem Kapitel 3.5 entnommen werden. Tabelle 4 gibt einen Überblick über landwirtschaftliche Anwendungsformen sowie die technische Ausgestaltung der Agri-PV.

Tabelle 4: Übersicht der landwirtschaftlichen Anwendungsformen mit Zuordnung möglicher technischer Ausgestaltung nach Fraunhofer ISE (2020) und Lasta und Konrad (2018)

Landwirtschaftliche Anwendung		Technik					
Nutzungsart	Beispiel	HA	HA+T	ZM	ZM+T	V	GH
Einjährige, überjährige	Acker-, Gemüse-, Feldfutterbau,	xx	xx	x	x	x	
Dauerkulturen	Obst-, Weinbau	xx	xx				
Dauergrünland	Weide- und Wiesennutzung			xx	xx	xx	
geschlossener Anbau	Pflanzenanbau in Gewächshäusern, unter Folientunneln						xx
Aquakulturen	Süß- und Salzwasser	xx					xx
mit Hochaufgeständert (HA), Zwischen Modulen (ZM), Vertikal (V), Gewächshaus (GH), Tracking (T) und sehr guter (xx) bis guter (x) Eignung							

Welche Aspekte beim Agri-PV-Anlagendesign beachtet werden müssen, werden im Folgenden dargelegt. Eine zentrale Rolle spielt die **Lichtverteilung** innerhalb der Anlage. Eine möglichst homogene Lichtverteilung kann durch größere Reihenabstände, höhere Aufständigung, Anlagenausrichtung nach Süd-Westen oder Süd-Osten (Trommsdorff et al. 2021), Verwendung von kleineren oder semitransparenten Modulen (Fraunhofer ISE 2020) sowie Sondermodulen, durch veränderte Modulordnung (Willockx et al. 2020) oder Tracking (Wang und Sun 2018) erreicht werden. Außerdem beeinflusst die Agri-PV-Anlage das **Mikroklima**. Auch wenn sich keine Pauschalaussagen treffen lassen und jedes System standortspezifisch untersucht werden muss, zeigen verschiedene Untersuchungen einen Trend. Eine Agri-PV-Anlage kann zur Folge haben, dass die Bodenfeuchte sich erhöht (Barron-Gafford et al. 2019; Hassanpour Adeg et al. 2018), die Evapotranspiration sinkt (Elamri et al. 2018; Marrou et al. 2013a), die Tag-Nacht-Temperaturschwankungen der Luft (Barron-Gafford et al. 2019) und Pflanzen (Marrou et al. 2013b) sich verringert und die Bodentemperatur sinkt (Marrou et al. 2013b). Inwieweit das **Pflanzenwachstum** und der **Ernteertrag** von der Agri-PV-Anwendung beeinflusst werden, wurde bereits unter anderem für Kartoffeln, Weizen, Sellerie (Fraunhofer ISE 2020), Salat (Elamri et al. 2018; Marrou et al. 2013a; Marrou et al. 2013b; Marrou et al. 2013c; TANI et al. 2014; Valle et al. 2017), Agave (Ravi et al. 2014), Tomaten und Paprika (Barron-Gafford et al. 2019), Java Tee (Othman et al. 2015), Reis (Honma et al. 2016), Mais (Amaducci et al. 2018; Sekiyama und Nagashima 2019) und Trauben (Sekiyama und Nagashima 2019) untersucht. Welche Pflanze sich als für die Agri-PV geeignet erweist, hängt in hohem Maß von ihrer Fähigkeit ab die verringerte Lichtverfügbarkeit auszugleichen (Beck et al. 2012). Ein System sollte zudem so gewählt sein, dass von den angebauten Pflanzen keine Verschattung auf die Module möglich ist (Scharf et al. 2021). Eine umfassende Literaturanalyse zu den Auswirkungen auf die Erntequalität hat Weselek et al. (2019) durchgeführt. Fraunhofer ISE (2020) empfiehlt, dass Ertragseinbußen von 20 % nicht überschritten werden sollten, um eine Akzeptanz der Technologie nicht zu gefährden. Als geeignet erscheinen insbesondere schattentolerante Pflanzen, wie Blattgemüsearten oder Feldfutterarten sowie Kern-, Stein- und Beerenobstarten oder andere Sonderkulturen, wie Bärlauch, Spargel sowie Hopfen (Fraunhofer ISE 2020). Eine Übersicht zur Schattentoleranz hat unter anderem Khanh (2020) zusammengestellt. Besonders hohe Synergien werden bei Dauerkulturen erwartet (vgl. Kapitel 3.4.5). Um einen rückstandlosen **Rückbau** der Agri-PV-Anlage zu ermöglichen und negative Auswirkung auf den Boden zu vermeiden, sollte

vorzugsweise mit betonloser Fundamentierung durch beispielsweise Schraub- oder Rammfundamente gearbeitet werden (Scharf et al. 2021).

### 3.3 Potenziale der Agri-PV – Synergieeffekte schaffen

Die Agri-PV birgt einige Potenziale, die hier in Kürze aufgeführt werden und ausführlich von Fraunhofer ISE (2020) dargelegt werden. Durch das Möglichmachen einer Doppelnutzung von Flächen kann die **Landnutzungseffizienz** gesteigert werden, was bei zunehmender Flächenknappheit von wachsender Bedeutung sein wird. Darüber hinaus kann die Agri-PV **Schutz** für Kulturen vor **Wettereinflüssen**, wie Hagel, Regen, Sonne, Dürre und Nässe, bieten. Der Bewässerungsbedarf kann reduziert, Regenwassersammlung ermöglicht und Winderosionen vermindert werden. Beim Einsatz nachgeführter Systeme, könnten sich diese nach den Bedürfnissen der Pflanzen flexibel ausrichten und so eine Optimierung der Lichtverfügbarkeit und des Mikroklimas nach sich ziehen sowie ihre Schutzfunktion maximieren (Fraunhofer ISE 2020). Der Agri-PV wohnt somit das Potenzial inne Ernteeinbußen oder -ausfällen entgegenzuwirken und die Landwirtschaft dabei zu unterstützen resilienter zu werden (Scharf et al. 2021). Auch die **Stromerzeugung** kann von der innovativen Systemkonfiguration profitieren. Der kühlende Effekt auf die Module kann eine höhere **Effizienz** dieser mit sich bringen. Werden bifaziale Module, bei denen auf Vorder- und Rückseite Strom erzeugt wird, eingesetzt, kann deren Effizienz durch die höhere Aufständigung bzw. den größeren Reihenabstand gesteigert werden (Fraunhofer ISE 2020). Darüber hinaus kann die Agri-PV einen Beitrag zur **Wertschöpfung** in der Region leisten, indem sie dezentral durch die Sonne Strom erzeugt (Fraunhofer ISE 2020). Durch die Agri-PV kann außerdem ein zusätzliches, stabiles und langfristiges **Einkommen** für den Landwirt generiert werden, was im Gegensatz zu den schwankenden landwirtschaftlichen Preisen steht (Scharf et al. 2021). Somit kann Agri-PV die Landwirtschaft nicht nur resilienter im Hinblick auf Wetterlagen, sondern auch Betriebe ökonomisch widerstandsfähiger machen. Das Potenzial der Agri-PV ist hoch. Allein in Deutschland liegt das technische Potenzial der Agri-PV, wenn man vorwiegend schattentolerante Kulturen berücksichtigt, bei 1.700 GW (Fraunhofer ISE 2020). Dies würde die noch fehlenden ca. 46 GW, die bis 2030 installiert werden müssten, um die PV-Ausbauziele der deutschen Bundesregierung zu erreichen (vgl. Kapitel 1), um ein Vielfaches übersteigen.

## 3.4 Wirtschaftlichkeit von Agri-PV-Anlagen

Im Folgenden soll die Wirtschaftlichkeit von Agri-PV-Anlagen untersucht werden. In vorliegender Literatur wird dies vorwiegend durch den Vergleich mit Photovoltaik-Freiflächenanlagen (PV-FFA), getan.

### 3.4.1 Investitions- und Betriebskosten: Landwirtschaft und Stromerzeugung

#### 3.4.1.1 Landwirtschaft

Inwieweit sich die **Investitionskosten** (englisch: *Capital Expenditures*, kurz *CAPEX*) sowie **Betriebskosten** (englisch: *Operational Expenditures* kurz: *OPEX*) der Landwirtschaft verändern, wurde bisher in vorliegender Literatur nur unzureichend untersucht. Als kostenbeeinflussende Faktoren werden der möglicherweise erhöhte Arbeitsaufwand durch das Umfahren der Konstruktion, sowie längere Arbeitswege genannt. Bei landwirtschaftlicher Praxis, welche ohnehin Unterstützungs- und Schutzkonstruktionen benötigt, können sich synergetische Kosteneinsparungspotenziale ergeben (Schindele et al. 2020). Wichtige Kulturarbeiten und daraus entstehende *OPEX* im Apfelanbau sind der Baumschnitt, Fruchtausdünnung, Bodenpflegearbeiten, Düngung, Pflanzenschutzmaßnahmen, Unkrautbekämpfung und die Ernte sowie damit einhergehende Arbeiten (Krengel et al. 2015).

#### 3.4.1.2 Stromerzeugung

Welche **Investitionsausgaben** durch eine PV-Anlage anfallen können, stellen Richter et al. (2017, 37ff) dar. Diese steigen für Agri-PV-Anlagen im Vergleich zu PV-FFA je nach System um 6 % (Khanh 2020) bis 111 % (Fraunhofer ISE 2020). Diese hohe Varianz lässt sich durch die verschiedenen Anwendungsformen der Agri-PV erklären und legt nahe, dass es keine Pauschalaussage zur Wirtschaftlichkeit dieser gibt. Während sich beispielweise Agri-PV zur Schafbeweidung nicht maßgeblich von der klassischen PV-FFA in ihrer Systemkonfiguration unterscheiden muss, sind die Anforderungen bei Agri-PV im Ackerbau mittels hochaufgeständerter Systeme signifikant andere (Horowitz et al. 2020).

Die ausschlaggebenden **einflussnehmenden Faktoren** auf die Investitionskosten sind die Modifizierung der Unterkonstruktion, die Kosten der Installation und Balance of System Komponenten (Horowitz et al. 2020; Agostini et al. 2021; Moreda et al. 2021;

Schindele et al. 2020) sowie der PV-Module (Agostini et al. 2021; Moreda et al. 2021; Schindele et al. 2020). Der Materialaufwand und die damit verbundenen Investitionskosten der Agri-PV für die Unterkonstruktion steigen insbesondere bei den hochaufgeständerten Varianten an (Horowitz et al. 2020). Die Mindesthöhe der Agri-PV-Anlage und damit ihr Material- und Kostenaufwand richten sich dabei maßgeblich nach der Bewirtschaftungsform innerhalb des Agri-PV-Systems (Magami 2018). Auch der Arbeits- und Kostenaufwand, der durch die komplexere Installation anfällt, erhöht sich. Denn um die spätere landwirtschaftliche Tätigkeit nicht negativ zu beeinflussen, muss auf eine boden- und gegebenenfalls vegetationsschonende Installation geachtet werden und gerade bei Installation auf mehreren Metern Höhe steigt die Komplexität (Magami 2018). Jedoch entfallen Kosten anderweitiger Standortvorbereitungen, die bei einer PV-FFA notwendig werden, wie beispielweise Rodungsarbeiten, Begradigung oder extra Bodenverdichtung (Horowitz et al. 2020) sowie das Aufstellen eines Zauns (Schindele et al. 2020). Dennoch ist die Projektentwicklung, Standortwahl und -vorbereitung von einer höheren Komplexität durch das Koordinieren verschiedener Stakeholder und deren Interesse geprägt (Horowitz et al. 2020). Werden im Agri-PV-System Spezialmodule eingesetzt, wie es in der Regel der Fall ist, steigen die Investitionskosten, da diese in ihrer Anschaffung deutlich teurer ausfallen können, weil sie bisher nicht serienmäßig produziert werden (Scharf et al. 2021).

Potenzial zur **Steigerung der Wirtschaftlichkeit** von Agri-PV-Anlagen wird in der Kostenreduktion der Unterkonstruktion gesehen, indem geringere Aufständehöhen notwendig sind bzw. materialeffizientere Konstruktionen entwickelt werden (Schindele et al. 2020). Diese Möglichkeit kann unter anderem bei der Anwendung von Agri-PV in Verbindung mit Obst- und Weinbau entstehen (vgl. Kapitel 3.4.5). Positiv kann sich außerdem eine hohe Eigenverbrauchsquote auswirken, denn dadurch kann teurer Bezugsstrom eingespart werden (Fraunhofer ISE 2020). Diese Möglichkeit besteht jedoch nur bis zu einer gewissen Anlagengröße (vgl. Kapitel 5.2.2). Darüber hinaus wirken sich Kosteneinflussfaktoren des PV-Sektors auf die Investitionskosten der Agri-PV aus. Hierzu gehören die relative Reife der PV-Industrie vor Ort, Kosten der PV-Module und Balance of System Komponenten, Zugang zu Finanzierungsmechanismen, Steuern sowie Anreizstrukturen (Dinesh und Pearce 2016). Nicht anders als bei PV-FFA profitieren Agri-PV-Anlagen bei wachsender Anlagengröße von den Skaleneffekten und die Kosten pro installierter Leistung nehmen ab (Horowitz et al. 2020). Auch mit zunehmender Marktpräsenz kann die Agri-PV von Skalen- und Lerneffekten profitieren. PV-Module beispielsweise haben in der Vergangenheit eine Lernkurve von

20 % aufgewiesen, was bedeutet, dass bei jeder Verdopplung des weltweiten Handelsvolumens der Preis für PV-Module um 20 % abnimmt (Scharf et al. 2021). Gerade beim Einsatz von Sondermodulen besteht hier noch ein großes Potenzial. Eine Durchdringung des Marktes mit Agri-PV wäre für die Wirtschaftlichkeit dieser Anlagen demnach wünschenswert. Welche Faktoren erfüllt werden müssen, um dies zu erreichen wird in Kapitel 3.4.4 behandelt.

Die jährlichen **Betriebskosten** hingegen sind laut Schindele et al. (2020) in der Regel um 13 % geringer als bei herkömmlichen PV-FFA. Sowohl Landentgelte, Kosten für Instandhaltung und Überwachung, Versicherung sowie Wuchsbekämpfung können geringer ausfallen. Bei hoch aufgeständerten Systemen steigen die Kosten für die Reparatur, da die Module und Komponenten schwerer zu erreichen sind (Schindele et al. 2020).

### 3.4.2 Gesamtwirtschaftliche Bewertung der Agri-PV

Die Effizienz der Module, die Ausrichtung der Gesamtanlage und der Flächenbelegungsgrad (Englisch: Ground Cover Ratio, kurz *GCR*) haben einen großen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit des Agri-PV-Systems (Horowitz et al. 2020). Die **GCR** beschreibt das Verhältnis von Modulfläche zur Projektfläche und variiert zwischen Agri-PV-Systemen je nach Lichtbedürfnis der Pflanzen (vgl. Kapitel 3.2). Größere Reihenabstände und geringere Zahl an Modulen pro Fläche bzw. PV-Zellen innerhalb der Module, verringern die installierte Leistung pro Flächen und die Einnahmen aus Stromerträgen (Dinesh und Pearce 2016). Je geringer die *GCR* desto höher die Kosten pro installierte Leistung, da die Kosten für Unterkonstruktion und Landentgelte stärker ins Gewicht fallen (Agostini et al. 2021), wobei die Unterkonstruktion durchschnittlich für 70 % und die Landentgelte für etwa 30 % dieser Preissteigerung verantwortlich sind (Khanh 2020). Während bei einer PV-FFA die PV-Module für den größten Anteil der Investitionskosten ausschlaggebend sind, nimmt mit abnehmender *GCR* die Unterkonstruktion den größten Anteil der Kosten ein (Khanh 2020). Bei nicht optimaler Südausrichtung der Anlage und einer verringerten *GCR* senken sich die Systemeffizienz und damit die Stromerzeugung und die daraus resultierenden Einnahmen pro Fläche. Demnach ist es wahrscheinlich, dass Pflanzen, die neben einer hohen Wertschöpfung gleichzeitig schattentolerant sind, aus wirtschaftlicher Sicht am sinnvollsten in einem Agri-PV-System einzusetzen sind. Denn Pflanzen, die eine höhere Schattentoleranz aufweisen, lassen eine höhere *GCR* zu und weisen damit eine geringere *CAPEX* pro installierte Leistung auf (Khanh 2020).

Die **Stromgestehungskosten** (Englisch: *Levelized Costs of Electricity*, kurz *LCOE*) liegen bei der Agri-PV je nach System um 5 % (Agostini et al. 2021) bis 38 % (Schindele et al. 2020) höher als bei PV-FFA. Ausschlaggebend sind die höheren Investitionskosten bei gleichzeitig geringeren Einnahmen (Schindele et al. 2020).

Vergleicht man die **Einnahmen** innerhalb des Agri-PV-System getrennt nach Landwirtschaft und PV, fällt eine starke Dominanz der PV-Einnahmen auf (Dinesh und Pearce 2016). Während die Einnahmen auf Seiten der Landwirtschaft im Tausenderbereich liegen, befinden sich die der PV im Millionenbereich (Scharf et al. 2021; Agostini et al. 2021). So sind teilweise nur zwischen 4 % (Scharf et al. 2021) und 6 % (Malu et al. 2017) der Einnahmen im Agri-PV-System auf die Landwirtschaft zurückzuführen. Dieses Verhältnis zeigt zum einen wie wenig sensitiv das Agri-PV-System gegenüber den landwirtschaftlichen Einnahmen ist und birgt damit die Gefahr, dass der Anreiz des Fortführens der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung innerhalb des Systems gering ist (Scharf et al. 2021), aber auch welchen Zugewinn die Landwirte durch diese Einnahmen generieren können (Malu et al. 2017). Malu et al. (2017) zeigen beispielsweise, dass sich die Einnahmen durch die PV für Landwirte, die in Indien Trauben anbauen, mehr als verfünzfachen können. Dinesh und Pearce (2016) errechnen eine Steigerung der ökonomischen Wertschöpfung um 30 % bei Anwendung der Agri-PV in Zusammenhang mit schattentoleranten Pflanzen. Die Diskrepanz der Einnahmen kann sich durch Einsatz von Kulturen mit hoher Wertschöpfung gegebenenfalls verringern (Scharf et al. 2021), es besteht jedoch noch Forschungsbedarf wie stark diese Auswirkung ist.

### 3.4.3 Geschäftsmodelle

Da der Landbesitzer, Agri-PV-Anlagebetreiber und Landbewirtschafter nicht immer eine Person sein muss, ergeben sich verschiedene Geschäftsmodelle. Diese können grob in zwei Varianten unterschieden werden: (1) Landbesitzer, Agri-PV-Anlagenbetreiber und Landbewirtschafter sind eine Person und (2) Landbesitzer, Agri-PV-Anlagenbetreiber und Landbewirtschafter sind verschiedene Personen. Darüber hinaus gibt es weitere Mischformen (Magami 2018; Schindele et al. 2020). Bei (1) würden alle Verantwortlichkeiten in der Hand des Landwirtes liegen. Im Falle von (2) würde beispielsweise der Anlagenbetreiber dem Landbesitzer eine Pacht zahlen und dem Landbewirtschafter ein Entgelt, das ihn für die eventuell geringere zu bewirtschaftende Fläche und Ernteeinbußen und den erhöhten Arbeitsaufwand und Kraftstoffeinsatz kompensiert. Vorteile für den Landbewirtschafter ergeben sich in beiden Varianten durch

die Diversifizierung des Einkommens unabhängig von seiner Ernte. In Frankreich gibt es im Weinbau bereits Praxisbeispiele der zweiten Variante (Schindele et al. 2020).

Neben dem klassischen PV-Projektierer sind Bürgerenergiegenossenschaften als Verantwortliche der PV-Anlagen denkbar. Denn wie in verschiedenen Untersuchungen gezeigt (Schweizer-Ries et al.; ThEGA 2014), kann sich die Akzeptanz vor Ort gegenüber Erneuerbaren Energien durch Bürgerbeteiligungen erhöhen. Außerdem würde die Wertschöpfung der Region zugutekommen. Gerade, da die Landwirtschaft in EOs organisiert ist (vgl. Kapitel 2.2), sollte auch eine Errichtung von Agri-PV gestützt durch diese nicht außer Acht gelassen werden.

#### 3.4.4 Marktakzeptanz und -entwicklung

Marktakzeptanz umfasst die Markteinführung einer Technologie und ihre Akzeptanz durch Konsumenten, Investoren und Unternehmen. Faktoren, die eine Marktakzeptanz steigern können, sind Produktionskosten, Informations- und Feedbackmechanismen sowie Zugang zu Finanzierung. Außerdem wird sie von vorherrschenden Regulierungen, den Kosten, Risiken und Nutzen beeinflusst. Hierbei spielt das persönliche Empfinden eine nicht zu vernachlässigende Rolle (Pascaris et al. 2021). Die Untersuchungen von Pascaris et al. (2021) zeigen die enge Wechselwirkung der Marktverbreitung der Agri-PV und ihrer sozialen, kommunalen und wirtschaftlichen Akzeptanz.

Auf Seiten der **Agrarwirtschaft** erwies sich als wichtiges Kriterium die Sicherheit, dass die Qualität der Fläche durch die Langzeitbindung nicht sinkt. Flächen sollten nach dem Rückbau wieder uneingeschränkt zu nutzen sein. Die Diversifizierung des Einkommens und auch die Absicherung über einen langen Zeitraum werden als positiv bewertet. Darüber hinaus ist die Kompatibilität mit der landwirtschaftlichen Praxis ausschlaggebend für eine erfolgreiche Adaption. Elementar ist, dass Landwirte transparent über Einnahmen, Kosten und Standzeit informiert werden. Die finanzielle Vergütung muss den möglichen erhöhten Arbeitsaufwand bzw. Ertragseinbußen mindestens ausgleichen bzw. wirtschaftlich attraktiver als die konventionelle Praxis sein, damit eine Implementierung attraktiv wird. Eine vom Landwirt als verhältnismäßig empfundene Beteiligung ist dabei elementar. Für die Marktakzeptanz wäre eine Flexibilität und Anpassung an sich verändertes Marktgeschehen wichtig. So sollte ein System es zulassen, dass eine andere Nutzung darunter möglich ist, damit Landwirte sich nicht für die komplette Standzeit der Agri-PV-Anlage an die Nutzungsart, bezogen auf Bewirtschaftungsform und angebaute Kultur, binden müssen (Pascaris et al. 2020).

Darüber hinaus wird auf Seiten der Landwirte mit einem Wertzugewinn landwirtschaftlicher Produkte durch die Kombination aus Landwirtschaft und PV gerechnet, was neue Potenziale für Marketingstrategien mit sich bringt (Pascaris et al. 2021).

Die Technologie wird von Seiten der **Solarindustrie** im Vergleich zu konventionellen Solarprojekten in Bezug auf ihr Systemdesign, die Koordination von Stakeholdern und ihre Projektkosten als komplexer eingestuft. Als vorteilhaft wird die Kooperation mit dem Landwirt gesehen, durch die lokale Partnerschaften aufgebaut und die soziale Akzeptanz vor Ort begünstigt werden. Ein Mehraufwand hingegen wird durch zusätzlich notwendige vertragliche Absicherungen prognostiziert. Denn da die Landwirte in der Agri-PV-Anlage arbeiten, müssen die Sicherheit der Arbeitenden sowie die Unversehrtheit der Anlage bzw. die Verantwortung im Schadensfall geregelt werden. Auch die soziale Akzeptanz könnte gesteigert werden, indem die Landwirtschaft erhalten bleibt. Die soziale Akzeptanz wiederum ist Grundlage zur Legitimierung von Agri-PV-Projekten (vgl. Kapitel 3.4.3) und kann wiederum eine für die Agri-PV vorteilhafte Politik begünstigen. Als zentrale Einflussgröße auf die Technologieadaption wird deren Wirtschaftlichkeit eingestuft. Investoren könnten von Unsicherheiten, die von neuen Technologien ausgehen, abgeschreckt sein. Zudem könnten der Arbeitsaufwand und die damit verbundenen Kosten durch die Koordination der Doppel-Einkommensquelle steigen. Während ein Zusatzeinkommen gegenüber einer PV-FFA für den Anlagenbetreiber nicht zu erwarten ist, wird der Anreiz der Investition eher in den Kosteneinsparungen gesehen, die sich beispielsweise durch das Wegfallen von Wuchsbekämpfungskosten ergeben (Pascaris et al. 2021).

Um Sicherheit für Akteure innerhalb der Agri-PV-Systeme aufzubauen, müssen rechtliche Rahmenbedingungen geschaffen werden (Scharf et al. 2021), innerhalb derer die Technologie wirtschaftlich sinnvoll betrieben und vom Markt akzeptiert werden kann.

### 3.4.5 Besonderes Potenzial von Sonder- und Dauerkulturen

Wirtschaftlich betrachtet gelten Sonderkulturen für Agri-PV-Systeme als besonders vielversprechend (Schindele et al. 2020; Willockx et al. 2020) und dabei insbesondere Obst, Wein, Kräuter, Nüsse, pharmazeutische Pflanzen oder Hopfen (Schindele et al. 2020). Sie zeichnen sich oft durch eine hohe **Wertschöpfung** aus, was sich positiv auf die Gesamtwirtschaftlichkeit auswirken kann. Handelt es sich um Dauerkulturen, sind die Reihen ohnehin vorgegeben und werden über die **Standzeit** nicht verändert, womit

die Anforderungen an die Agri-PV nicht jährlich variieren (Willcockx et al. 2020). Die zum Einsatz kommenden **Maschinen** sind deutlich kleiner als die im Ackerbau eingesetzten, was potentiell niedrigere und damit kostengünstigere Agri-PV-Anlagen zulässt (Schindele et al. 2020). Zudem haben Dauerkulturen oft einen erhöhten Schutzbedarf vor Extremwetterlagen. In der Regel werden hier **Stütz- und Schutzkonstruktionen** zur Kulturerziehung oder Anbringung von Schutznetzen bzw. Folien notwendig, welche nun durch die Agri-PV substituiert oder übernommen werden könnten (Fraunhofer ISE 2020). Die Agri-PV zeichnet sich durch eine erheblich längere Lebensdauer als herkömmliche Schutzkonstruktionen sowie die dort eingesetzten Hagelschutznetze oder Folien aus. Diese sind schadensanfälliger gegenüber Sturm, der wiederum oft in Kombination mit Extremwetterlagen, wie Hagel oder Starkregen, einhergeht, vor der die Konstruktion schützen sollte. Eine statisch standhaftere Schutzabdeckung kann sich somit als vorteilhaft erweisen (Scharf et al. 2021). Demnach kann die Agri-PV dabei unterstützen, das Ertragsrisiko zu senken und eine qualitativ hochwertige Ernte zu erzielen. Während durch die Konstruktion einer Agri-PV-Anlage in der Regel beim Ackerbau ein Teil der **Anbaufläche** nicht mehr nutzbar ist und der **Arbeitsweg und -aufwand** erhöht werden (Trommsdorff 2016), sollte dies bei Dauerkulturen mit ihrer ohnehin vorgegebenen Reihenstrukturen bzw. Unterstützungs- und Schutzkonstruktionen und den Erfahrungen der Landwirte im Umgang mit diesen nicht der Fall sein.

Die gesellschaftliche **Akzeptanz** von Agri-PV-Anlagen in Kulturanlagen, die sich konventionell ohnehin bereits durch Unterstützungs- und Schutzkonstruktionen auszeichnen, könnte höher als im Ackerbau liegen. Denn Menschen sind bereits an Konstruktionen oberhalb der Kulturen gewöhnt, die Technologie würde deutlich geringere Dimensionen aufweisen als über Ackerbau, Plastikeinsatz könnte abgelöst und Flächen könnten doppelt genutzt werden (Scharf et al. 2021).

Die hier dargelegten Kosteneinsparungspotenziale für Unterstützungs- und Schutzkonstruktionen, die bereits vorhandene Erfahrung der Landwirte mit Konstruktionen innerhalb der Anbaufläche sowie die potentiell höhere soziale Akzeptanz sind Indizien dafür, dass die Marktakzeptanz und damit Implementierungsrate bei Dauerkulturen gegenüber dem Anwendungsfall im Ackerbau erhöht sein könnte.

### 3.5 Agri-PV im Apfelanbau

Während für viele Feldfrüchte bereits umfassende Untersuchungen zu Auswirkungen von Beschattung auf den Ertrag bzw. Erkenntnisse zum Lichtsättigungspunkt vorliegen,

sind diese beim Apfel, aber auch Kernobst insgesamt noch sehr unterrepräsentiert. In dieser Arbeit wird deshalb auf Erkenntnisse und Erfahrungswerte von Untersuchungen zu Hagelschutznetzen zurückgegriffen. Beim Design einer Agri-PV-Anlagen im Apfelanbau sollte darauf geachtet werden, dass das Licht nicht um mehr als 30 % reduziert wird, da die Kultur verhältnismäßig wenig schattentolerant ist (APC Group 2018).

Der Apfel als Sonderkultur hat ein hohes ökonomisches Potenzial zur Implementierung von Agri-PV (vgl. Kapitel 3.4.5). Gerade im Obstanbau sind viele Betriebe mit Kühlvorrichtungen ausgestattet, die zur Lagerung notwendig sind und meist einen hohen Strombedarf ausweisen (föko 2020). Diese können durch die Agri-PV mit Strom versorgt werden, was wiederum den Eigenstromverbrauch erhöht (Willcockx et al. 2020) und die Wirtschaftlichkeit verbessern kann (vgl. Kapitel 3.4.1.2).

Momentan gibt es weltweit wenige bekannte Agri-PV-Anlagen im Baumobstanbau. Diese stehen in Japan, Südkorea, Frankreich, Belgien und Deutschland. Agri-PV im Apfelanbau ist in Frankreich und in Deutschland installiert (Tabelle 5).

Die einzigen agrarwissenschaftlichen **Untersuchungen** zur Auswirkung von Agri-PV auf den Apfelanbau liegen momentan aus **Frankreich** vor. In Mallemort wurde 2018 in einer 10 Jahre alten Ertragsanlage der Sorte Golden Delicious auf 730 m<sup>2</sup> eine Agri-PV-Anlage errichtet (vgl. Abbildung 5). Die Anlage ist mit nachgeführten Modulen und einem Bewässerungssystem ausgestattet und wird von Mai bis Oktober durch ein Hagelnetz ergänzt. Der Verschattungsgrad in der Anlage liegt zwischen 50 bis 55 %. Die Ergebnisse der agrarwissenschaftlichen Analyse zeigen, dass die Agri-PV zu keiner Veränderung des Wachstums der einzelnen Früchte führte. Als Erklärung führen die Autoren die bessere Wasserverfügbarkeit an, welche den Einfluss des verringerten Lichteinfalls ausgeglichen haben soll. Während bei der Frischmasse keine Auswirkungen zu verzeichnen waren, so wurde die Trockenmasse leicht gesenkt und der Fruchtwassergehalt stark erhöht, was wiederum darauf schließen lässt, dass sich die Fruchtqualität verschlechtert, da der Wassergehalt der Früchte steigt. Es wurden keine weiteren Untersuchungen zur Auswirkung auf die Fruchtqualität, wie Ausfärbung, vorgenommen. Zudem nahm der Fruchtbehang in der Agri-PV ab und es waren rund 41 % weniger Früchte am Baum zu finden (Juillion et al. 2020). Zum einen lässt sich dies durch eine geringere Anfangsblütenbildung erklären, auf den weniger Früchte folgen können. Zwar war auf der Blütenfall im Agri-PV-System verringert und somit verblieben

Tabelle 5: Überblick über Agri-PV im Baumobstanbau nach Fraunhofer ISE (2021) und Gim et al. (2020)

Installationsjahr	Standort	Leistung [kWp]	Agri-PV-Design	Kulturart	Institution
2011	Japan, Chiba	34,8 (anteilig)	Verschattung: 32%	Baumobst	
2018	Südkorea, Naju-si, Jeollanam-do,	10	Faltbare Agri-PV; Verschattung variiert von 0 bis 30 %	Birne	Green-Energy-Institute
2018	Südkorea, Naju-si, Jeollanam-do,	10	Verschattung 30 %	Birne	Green-Energy-Institute
2019	Frankreich, Provence-Alpes-Côtes d'Azur, Mallemort	61	Nachgeführt; bewässert; zusätzliches Hagelnetz; GCR: 41 %	Apfel (Golden 972)	Sun'Agri
2020	Belgien, Gent	13,30	Bifaziale Glas-Glas-Module; zusätzliches Hagelnetz	Pears	KU Leuven
2021	Deutschland, Rheinland-Pfalz, Grafschaft-Gelsdorf	258	Fix und nachgeführt; zwei semitransparente Modultypen	Apfel (versch. Sorten, Bio)	Fraunhofer ISE

mehr Blüten von den ursprünglich ausgebildeten am Baum, doch konnte dieser Effekt den geringen Anfangsblütenbehang nicht kompensieren, sodass insgesamt weniger Früchte an den Bäumen angesetzt wurden. Zum anderen ist der Fruchtfall im Agri-PV-System erhöht. Vor allem im späten Stadium der Früchte war ein starker Unterschied zu sehen, so war der Fruchtfall in der Wachstumsphase im Juni viermal höher als auf der Referenzfläche (Juillion 2021). Damit beeinflusste die Agri-PV im vorliegenden Beispiel das Fruchtwachstum nicht negativ, hingegen sinkt der Ertrag pro Fläche, da der Fruchtbehang und die Trockenmasse sinken (Juillion et al. 2020).

Erkenntnisse zur Auswirkung auf Fruchtqualität und Ertrag durch die Agri-PV im Birnenanbau gibt es durch eine Forschungsanlage in **Südkorea**. Die Verschattungsrate variiert dort von 0 bis 30 %. Dort sind zwei unterschiedliche Systeme mit jeweils 10 kW installiert. Ein System ist mobil und kann zusammengeklappt werden und damit den darunter wachsenden Bäumen individuell Schutz und Licht spenden. Die Ergebnisse der agrarwissenschaftlichen Untersuchungen zeigen, dass die Blütenrate verbessert wurde. Als Erklärung führen die Autoren die Senkung der Frostgefahr und Verlängerung der Blütenperiode an. Diese Untersuchung zeigt außerdem, entgegen der vorangegangenen, dass der Fruchtfall durch die Agri-PV um 38 % gesenkt wurde.

Hingegen wurde auch die Fruchtanzahl und -qualität durch den geringeren Lichteinfall verringert. Die Fruchtgröße sank um 6,5 % bei gleicher Wachstumsperiode wie unter ungeschütztem Anbau. Verlängert man hingegen die Wachstumsperiode um zwei Wochen, steigt die Fruchtgröße um 8,5 % im Agri-PV-System im Gegensatz zur Referenz. Der Zuckergehalt der Früchte blieb etwa gleich. Der Ertrag pro Fläche ist um etwa 6,7 % gesunken (Gim et al. 2020). Bei der kleinen Anlagengröße ist jedoch fraglich, ob Randeffekte genügend eliminiert werden konnten, um signifikante Aussagen zu gewährleisten (Trommsdorff et al. 2021).

Nachdem die Forschungsanlage über Birnen in **Belgien** erst im Jahr 2020 installiert wurde (dargestellt in Abbildung 5), können erste Erkenntnisse erst im September 2021 erwartet werden, weshalb diese nicht mehr in diese Arbeit einfließen können. Jedoch lassen erste vorläufige Ergebnisse folgenden Trend zum Mikroklima und Ertrag erkennen: Die Agri-PV hat einen kühlenden Effekt an heißen Tagen und einen leicht wärmespeichernden an kalten Tagen. Damit können Früchte und Bäume vor Sonnenbrand geschützt werden, was potentiell die Qualität der Ernte erhöht. Die Blütenbildung und der Fruchtansatz haben sich gegenüber der Referenzfläche nicht verändert (Willockx, persönliche Mitteilung 2021).



Abbildung 5: Agri-PV-Pilotanlage in Frankreich über Äpfeln (links) und in Belgien über Birnen (rechts) (Bildquellen: Sun'Agri, KU Leuven)

## 4 Fallbeispiel: Agri-PV-Pilotanlage im Apfelanbau auf einem Bio-Obsthof in Rheinland-Pfalz

### 4.1 Verortung des Projektes

In **Rheinland-Pfalz** befanden sich 2017 mit 4.864 ha 6,5% der gesamtdeutschen Obstanbaufläche (Garming et al. 2018). Die wichtigsten Obstanbaugebiete in Rheinland-Pfalz sowie die Verortung des Forschungsprojektes in der Gemeinde Grafenschaft-Gelsdorf im **Landkreis Ahrweiler** können der Abbildung 6 entnommen werden.

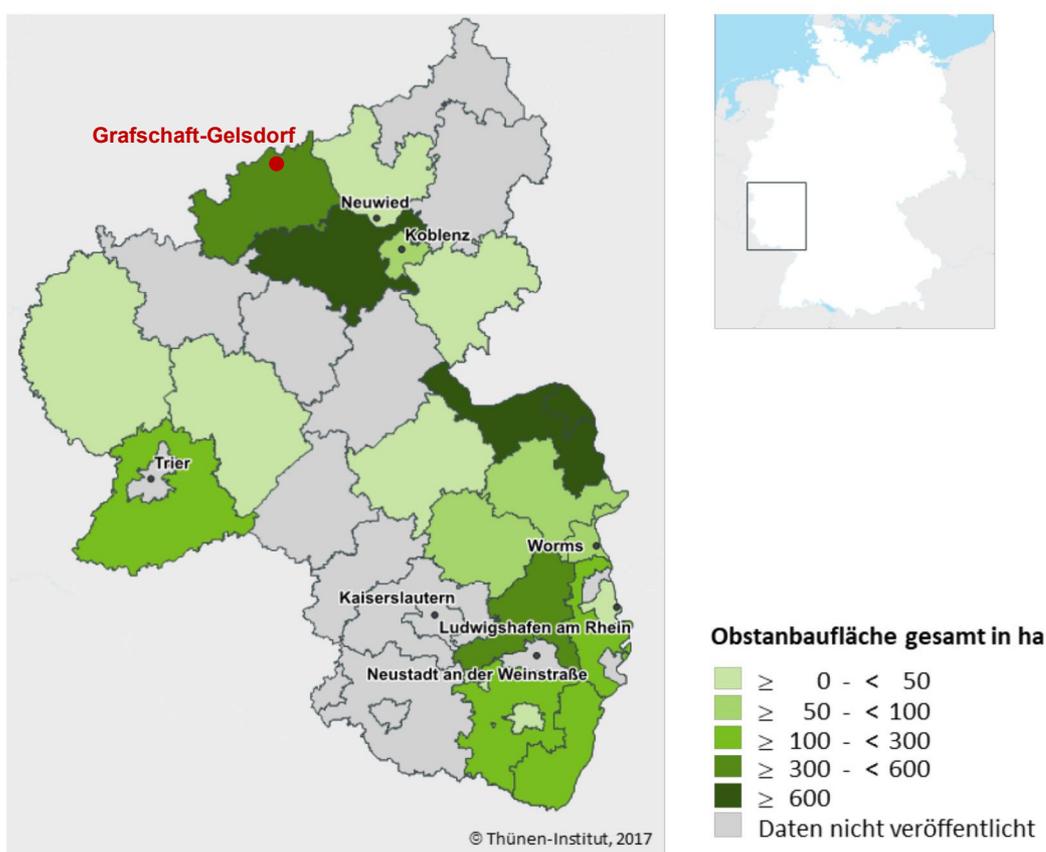


Abbildung 6: Obstanbaufläche in Rheinland-Pfalz im Jahr 2017, modifiziert nach Garming et al. (2018, S. 52)

Der Landkreis Ahrweiler ist ein wichtiges Obstanbaugebiet in Rheinland-Pfalz. Im Jahr 2017 wurden auf 476 ha Obst angebaut (Garming et al. 2018). Mehr als Dreiviertel davon konnten in gleichen Teilen auf den Anbau von Erdbeeren und Äpfeln zurückgeführt werden (Abbildung 7). Insgesamt waren von den 41 dort verorteten Obstbaubetrieben 15 im Apfelanbau tätig, welche über eine durchschnittliche Apfelanbaufläche von 12 ha pro Betrieb verfügt haben (Garming et al. 2018).

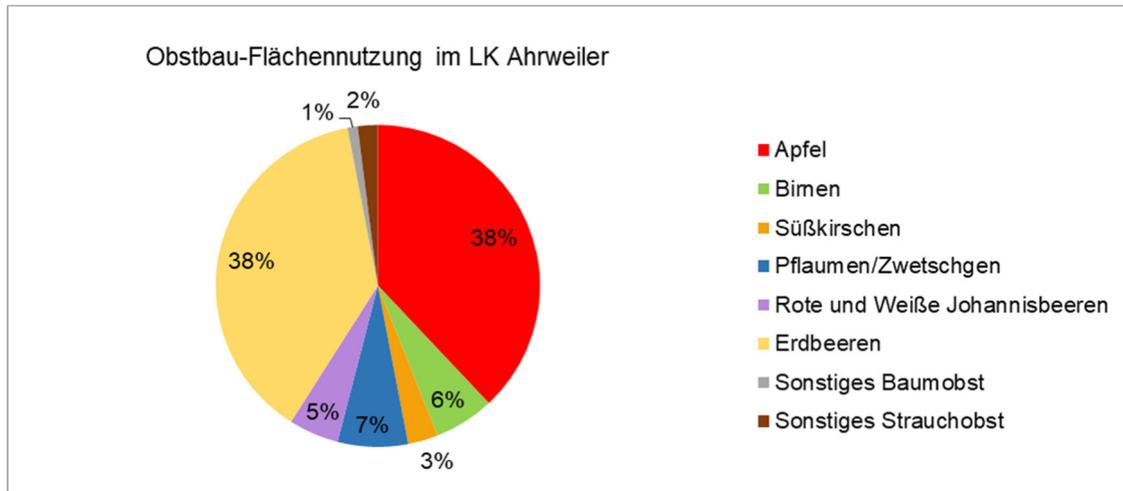


Abbildung 7: Flächennutzung im Obstbau im Landkreis Ahrweiler nach Kulturart, eigene Darstellung nach Garming et al. (2018)

## 4.2 Pilotanlage und Versuchsaufbau

Innerhalb des durch das Ministerium für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten des Landes Rheinland-Pfalz (MUEEF) und das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) geförderten Forschungsprojektes Agri-PV Obstbau wird von 2020 bis 2025 an der Agri-PV im Apfelanbau geforscht. Seit Mai 2021 sind auf ca. 3.600 m<sup>2</sup> etwa 258 kWp Agri-PV-Leistung auf der Fläche des Bio-Obsthofes Nachtwey installiert (Abbildung 8). Als Referenzfläche dienen 5.500 m<sup>2</sup>, die zu gleichen Teilen mit Hagelschutznetzen bzw. Folie überdacht sind (vgl. Abbildung 9).



Abbildung 8: Betriebsgelände des Bio-Obsthofes, Kennzeichnung der Agri-PV-Anlage mit roter Markierung (Bildquelle: Johannes Nachtwey)



Abbildung 9: Luftbildaufnahme mit 6 Reihen Hagelnetz, 6 Reihen Folienüberdachung und 11 Reihen Agri-PV (von links nach rechts), (Bildquelle: BayWa r.e.)

Sowohl die Folien- bzw. Hagelschutznetzkonstruktion als auch die Agri-PV werden als Stützgerüst der Bäume genutzt. Die Varianten sind jeweils durch eine Überkronenberegnung zum Frostschutz und eine Tropfbewässerung zur Vegetationsbewässerung ausgestattet, die in der Region mittlerweile vielerorts Standard sind und für die Zukunft als immer öfter notwendig eingeschätzt werden (Zimmer, persönliche Mitteilung 2021a).

Beim **Agri-PV-System** handelt es sich um ein mehrreihiges System mit Südwest-Ausrichtung. Es werden drei Anlagendesigns getestet. Es kommen semi-transparente Glas-Glas-Module mit erweitertem Abstand zwischen den PV-Zellen zum Einsatz, die sich durch eine unterschiedliche Anordnung der Zellen innerhalb des Moduls unterscheiden. Der Modultyp „Zebra“ ist in vier Reihen fix<sup>3</sup> aufgeständert, bei Modultyp

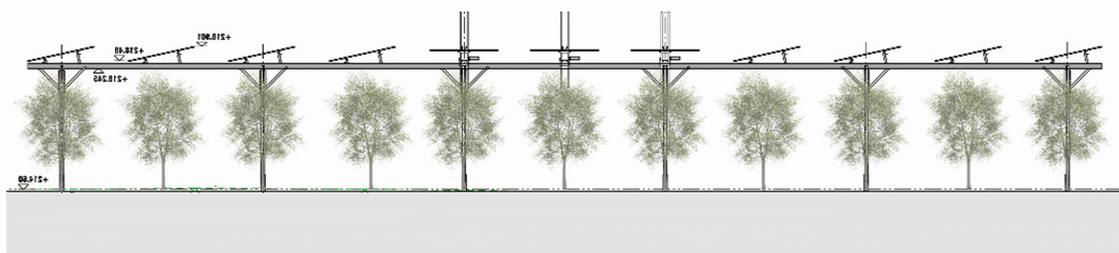


Abbildung 10: Systemdesign der Agri-PV in Seitenansicht aus Südosten, modifizierte Bildquelle: kgarchitektur

<sup>3</sup> PV-Anlagen können mit einer fixen bzw. starren Anbringung installiert sein oder der Sonne folgend nachgeführt werden

„Block“ ist neben vier Reihen fixer Aufständering auch in drei Reihen ein der Sonne nachgeführtes System zu finden (Abbildung 10, Abbildung 11).



Abbildung 11: Agri-PV-Anlage mit Modultypen „Block“ (links) und „Zebra“ (rechts), sowie nachgeführter (links) und fixer (rechts) Aufständering, (Bildquelle: Fraunhofer ISE)

Die Agri-PV-Module sind auf 3,9 m Höhe mit einem Neigungswinkel von 12° aufgeständert und weisen eine Leistung von 225 W auf. Eines der Ziele der Agri-PV im Apfelanbau ist der Schutz vor Hagel und damit idealerweise der komplette Ersatz von Hagelnetzen. Doch aufgrund des Reihenabstandes von drei Metern und der derzeit maximal verfügbaren Modullänge von zwei Metern und dem daraus resultierenden Abstand zwischen den Modulreihen, können Hagelschäden in der Pilotanlage nicht ausgeschlossen werden. Die Agri-PV-Anlage wird zunächst ohne Hagelnetze getestet, ist aber mit der Option der Nachrüstung von Hagelnetzen designt.

Die **Hagelschutznetzkonstruktion**, die für vorliegende Untersuchung als Referenzfall dienen wird, setzt sich aus einer Betonunterkonstruktion sowie einem weißen Hagelschutznetz zusammen. Aus ästhetischen Gründen wurden braun eingefärbte

Betonpfähle verwendet, was auf ca. drei Euro Mehrkosten pro Pfahl hinausläuft. Es wird ein Mehrreihensystem mit Querverspannungen verwendet. (Zimmer, persönliche Mitteilung 2021b).

Es werden die acht **Sorten** Delijonca, Delbar, Gala, Elstar, Red Topaz, Pinova, Natyra und Braeburn auf der Fläche getestet. Es wurden gut färbende Mutanten der jeweiligen Sorten gewählt, um die Auswirkung der Verschattung auf den Ertrag zu minimieren und einen möglichst hohen Qualitätsanteil zu erreichen (mehr dazu in Kapitel 6.2.3). Diese wurden randomisiert in drei bzw. vier Wiederholungen verteilt.

Der Aufbau des kompletten Versuchsdesigns kann der Abbildung A-3 im Anhang entnommen werden.

Es wurde ein privilegiertes **Baugenehmigungsverfahren** nach § 35 Abs. 1 Nr. 4 Baugesetzbuch (BauGB) durchlaufen. Hierfür mussten unter anderem Anlagen- und Konstruktionsbeschreibungen, Lagepläne, Bauzeichnungen, Statikprüfungen, Bodengutachten sowie naturschutzfachliche und landespflegerische Gutachten eingereicht werden. Da sich die auf diesem Weg erhaltene Baugenehmigung nur auf die Projektlaufzeit bezieht, muss bis 2023 ein Bauleitverfahren eingeleitet werden, damit die Anlage auch über das Forschungsprojekt hinaus bestehen bleiben kann. Mehr Informationen zum Baugenehmigungsverfahren von Witterungsschutzsystemen und Agri-PV-Anlagen finden sich im folgenden Kapitel.

## 5 Regulatorische Rahmenbedingungen

In diesem Kapitel sollen die rechtlichen Rahmenbedingungen von Hagelschutznetzkonstruktionen und Agri-PV-Systemen in Deutschland mit dem Fokus auf Rheinland-Pfalz beleuchtet werden. Dabei wird untersucht, ob und welche Genehmigungsverfahren die beiden Schutzkonstruktionen durchlaufen müssen und inwieweit diese finanziell förderfähig sind.

### 5.1 Baurechtliche Grundlagen

Zunächst soll dargestellt werden, welche Unterschiede von genehmigungsrechtlicher Seite auf einen Landwirt zukommen, wenn er sich für ein Hagelnetz oder eine Agri-PV-Anlage entscheiden würde.

#### 5.1.1 Hagelnetze

Die Genehmigung von Konstruktionen zur Hagelabwehr sind nicht in allen Bundesländern gleich geregelt. So müssen laut Deutscher Bundestag (2019) in einigen Bundesländern ein Baugenehmigungsverfahren durchlaufen werden, das Landwirte durch die Anforderungen der Landschaftsschutzbehörde und der unteren Naturschutzbehörde vor mehr oder weniger große Herausforderungen stellen kann. Nicht betroffen sind in vielen Fällen Bestandsanlagen, die durch Hagelschutznetze nachgerüstet werden.

In Rheinland-Pfalz sind Hagelschutznetze nach § 62 Abs. 1 Nr. 1 Buchst. c LBauO genehmigungsfrei, wenn diese nicht höher als 4 m sind (vgl. § 62 Abs. 1 Nr. 1 Buchst. f LBauO). Deshalb musste im vorliegenden Fallbeispiel zumindest für die Hagelnetze kein Baugenehmigungsverfahren durchlaufen werden.

#### 5.1.2 Agri-PV

Als bauliche Anlage bedarf eine Agri-PV-Anlage einer Baugenehmigung. Welches Verfahren durchlaufen werden muss, hängt zuerst einmal vom Standort der Anlage ab (Vollprecht, persönliche Mitteilung 2021).

#### **Innenbereich – Bauleitplanverfahren**

Handelt es sich um ein Gebiet, in dem ein Bebauungsplan (B-Plan) gilt, ist ein Vorhaben nur zulässig, wenn dieses zu den Vorgaben des B-Plans nicht widerspricht (vgl. § 30 BauGB). Damit muss dieser gegebenenfalls geändert werden, bevor eine

Baugenehmigung erteilt werden kann. Handelt es sich um ein unbeplantes Gebiet im Innenbereich muss ein Bebauungsplan aufgestellt werden (vgl. § 34 BauGB). In beiden Fällen kann es außerdem notwendig werden den Flächennutzungsplan zu ändern, da der Bebauungsplan immer mit dem darüberliegenden Flächennutzungsplan im Einklang stehen muss (vgl. § 8 BauGB).

### **Außenbereich – Bauleitplanverfahren oder Privilegierung**

Mit großer Wahrscheinlichkeit wird eine Agri-PV-Anlage im Außenbereich errichtet, weshalb die hier greifenden Regelungen relevant sind. Liegt die Fläche im Außenbereich kann zwischen privilegierten und sonstigen Vorhaben unterschieden werden. Im Außenbereich gilt der Grundsatz, dass dieser möglichst geschont werden soll und nur unter gewissen Voraussetzungen bebaut werden darf und nur, wenn keine öffentlichen Belange entgegenstehen und eine Erschließung ausreichend gesichert ist (vgl. § 35 Abs. 1 BauGB). Sonstige Vorhaben müssen ein **Bauleitplanverfahren** mit B-Plan-Aufstellung und eventueller Flächennutzungsplanänderung durchlaufen, wie im vorangehenden Abschnitt dargestellt. Die **Privilegierung** im Außenbereich ist in § 35 Abs. 1 BauGB genauer geregelt. Nach § 35 Abs. 1 Nr. 1 & 2 BauGB handelt es sich um ein privilegiertes Verfahren, wenn das Vorhaben dem landwirtschaftlichen bzw. gartenbaulichen Betrieb dient. Bisher gab es noch keine Agri-PV-Anlagen in Deutschland, die in diese Kategorie eingestuft wurde. Im Folgenden werden Argumente gesammelt, welche dafür sprechen der Agri-PV eine dem Betrieb dienende Funktion zuzusprechen. Zum einen könnte ein weit überwiegender Eigenverbrauchsanteil des erzeugten Stroms als dem Betrieb dienend eingestuft werden. Auch denkbar wäre, dass der Agri-PV durch ihre Schutzfunktion für den landwirtschaftlichen Ertrag vor Hagel, Sonne, Nässe bzw. Frost die dienende Funktion zugesprochen wird. Jedoch muss bedacht werden, dass eine Agri-PV-Anlage dauerhaft installiert wird, wohingegen die konventionellen Schutzkonstruktionen nur temporär auf das Feld gebracht werden. Denn Folienüberdachung oder Hagelnetze werden immer zu den Jahreszeiten ausgerollt oder aufgehängt, in denen ein Kulturschutz notwendig wird (Vollprecht, persönliche Mitteilung 2021). Übergeordnetes Ziel des § 35 BauGB ist der größtmögliche Schutz des Außenbereichs, was erst einmal gegen eine dauerhaft installierte Kulturschutzvorrichtung sprechen könnte. Doch gerade im Hinblick darauf, dass Agri-PV auch einen Schutz der Kulturen gegen Schneelasten, Stürme, etc. bieten könnte, könnte eine Installation auch außerhalb des Vegetationszeitraums gerecht fertig werden. Ebenso könnten bei der Umsetzung einer Agri-PV-Anlage die Nr. 3, 4 oder 8 des § 35

Abs. 1 BauGB relevant sein, da hier Energieerzeugungsformen genannt werden bzw. auf die Anforderungen an die Umgebung eingegangen wird. Agri-PV oder PV-FFA sind jedoch nicht explizit genannt.

## 5.2 Finanzielle Förderung

### 5.2.1 Landwirtschaft

#### **EU-Direktzahlungen**

Bei den EU-Direktzahlungen handelt es sich um flächenbezogene jährliche Zahlungen, die aus der gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) stammen. Landwirtschaftliche Betriebsinhaber können diese beantragen (BLE 2021). Die Höhe, die Landwirte aufgrund der DirektzahlDurchfV von der Europäischen Union (EU) erhalten können, wird jährlich angepasst. Für das Jahr 2021 werden voraussichtlich eine Basisprämie von 173 €/ha und eine Greeningprämie von 85 €/ha angesetzt, und aus der Umverteilprämie ergeben sich weitere 50 € bezogen auf die ersten 30 ha und 30 € bezogen auf weitere 16 ha, für die Direktzahlungen in Anspruch genommen werden können. Darüber hinaus können Junglandwirte in ihren ersten fünf aktiven Jahren zusätzlich 44 €/ha erhalten (ADD; mwvlw 2021). Durch den Bau einer Agri-PV-Anlage würde jedoch der Anspruch auf EU-Direktzahlungen erst einmal wegfallen, da Flächen, auf denen Anlagen zur Solarstromerzeugung stehen, unter hauptsächlich nicht-landwirtschaftliche Tätigkeit fallen und damit nach bisheriger Auffassung die notwendige Voraussetzung, dass eine Fläche primär landwirtschaftlich genutzt wird, entfällt (Fraunhofer ISE 2020). Doch könnte sich dies in Zukunft ändern. Durch die Novellierung der EU-Direktzahlungen 2023 wird es zu einer Prüfung kommen, inwieweit zukünftig Flächen, auf denen Agri-PV installiert ist, auch in Deutschland diese Förderung erhalten können (Deutscher Bundestag 2021). Denn bereits heute bleiben die EU-Direktzahlungen in anderen Ländern wie Frankreich durch das Implementieren von Agri-PV erhalten (Kreuzmann 2021).

#### **Witterungsschutzmaßnahmen**

Kulturschutzmaßnahmen sind in Deutschland teilweise förderfähig. Die Förderung ist dabei je nach Bundesland geregelt und kann entweder, wenn der Landwirt Teil einer EO ist, durch das operationelle Programm dieser EO geschehen (Deutscher Bundestag 2019) oder investiv über das Agrarinvestitionsförderprogramm (AFP), das durch den Europäischen Landwirtschaftsfonds für die Entwicklung des ländlichen Raums (ELER) finanziert wird. Es können sowohl Investitionen als auch Aktionen gefördert werden, die

dem Schutz der Qualität der Produktion dienen. In einigen Bundesländern sind Hagelschutznetze sowie weitere Witterungsschutzeinrichtungen und auch effiziente Bewässerungssysteme beihilfefähig (Gömann et al. 2015). Was speziell durch die EO gefördert werden kann, wird von der EO auf Grundlage der „Nationalen Strategie für nachhaltige operationelle Programme der Erzeugerorganisationen für Obst und Gemüse in Deutschland“ und des EU-Rechts festgelegt (Deutscher Bundestag 2018).

In Rheinland-Pfalz können Hagelnetze für Mitglieder von EOs mit 50 % gefördert werden. Alle anderen Landwirte können mittels des AFP eine Förderung von 20 % erhalten (Deutscher Bundestag 2019). Das Gleiche gilt für Baden-Württemberg (Gömann et al. 2015). In Baden-Württemberg beträgt die Förderhöhe durch AFP Mittel bis zu 20 %, in Nordrhein-Westfalen 20 % und in Sachsen 25 %. In Bayern können Investitionen zur Abwendung von Witterungsschäden beim Anbau von Dauerkulturen mit bis zu 25 % bezuschusst werden (Deutscher Bundestag 2019).

Doch wie die Bundesländer Rheinland-Pfalz und Nordrhein-Westfalen zeigen, ist eine Förderung durch AFP Mittel in den letzten Jahren kaum bis gar nicht zum Tragen gekommen. Und auch die Förderung durch EOs ist in Zukunft unsicher, da nicht abzuschätzen ist, ob nach der Umschichtung der Mittel der Gemeinsamen Marktorganisation, kurz GMO, (Europäisches Parlament) Hagelschutznetze auch zukünftig noch im operationellen Programm der EOs berücksichtigt werden.

### 5.2.2 Stromerzeugung

Förderungen für Agri-PV-Anlagen gibt es weltweit unter anderem in Japan, Südkorea, China, Frankreich und Massachusetts (Schindele et al. 2020). Bis 2021 gab es in Deutschland keine Sonderregelung zur Förderung von Agri-PV und musste bis dato mit konventionellen PV-Anlagen konkurrieren. In der Novelle zum Erneuerbare Energien Gesetz (EEG) 2021 wurde die Agri-PV das erste Mal innerhalb der Innovationsausschreibungen (§ 39n & 88d EEG) durch die Innovationsausschreibungsverordnung (InnAusV) berücksichtigt. Bei dieser Ausschreibungsart dürfen Anlagenkombinationen teilnehmen (§ 4 InnAusV). Als Anlagenkombination gilt der Zusammenschluss verschiedener steuerbarer und nicht-steuerbarer erneuerbarer Energiequellen bzw. Speicher (§ 2 Nr. 1 InnAusV). Dabei muss die Energiespeicherkapazität nach § 13 Abs. 2 InnAusV mindestens zwei Stunden der Nennleistung entsprechen. Agri-PV taucht innerhalb der Innovationsausschreibungen im Segment der sogenannten „besonderen Solaranlagen“ auf (§ 2 Nr. 1a InnAusV).

Hierunter fallen PV-Anlagen auf Gewässern, bewirtschafteten Ackerflächen und Parkplätzen welche bis zum 01.10.2021 von der Bundesnetzagentur genauer definiert werden (§ 15 InnAusv). Laut pv magazine (2021) soll die Flächenkulisse der Agri-PV auf Sonderkulturen erweitert werden. Teilnehmende Anlagen dürfen eine Größe zwischen 100 kW und 2 MW haben (§ 16 Abs. 1 InnAusV). Es wird eine einmalige Ausschreibungsrunde zum 01.04.2022 (§ 17 Abs. 1 InnAusV) mit 150 MW (pv magazine 2021). Bezuschlagte Anlagen erhalten eine fixe Marktprämie, deren Höchstwert bei 7,5 ct/kWh liegt (§ 8 Abs. 1 i. V. m. § 10 Abs. 1 InnAusV). Zwar ist die Flächenkulisse nach § 37 Abs. 1 Nr. 2 EEG innerhalb der Innovationsausschreibung nicht anzuwenden, dennoch gibt es für Agri-PV-Anlagen, die nicht in einer Anlagenkombination auftreten und demnach nicht an den Innovationsausschreibungen teilnehmen dürfen keine Öffnung der Flächenkulisse i. S. d. § 37 Abs. 1 Nr. 2 & 48 Abs.1 Nr. 3 EEG. Auch wird der § 27a EEG für Anlagen, die innerhalb der InnAusV bezuschlagt werden, nicht außer Kraft gesetzt. Dieser regelt, dass Betreiber von Anlagen, die ihre Vergütung durch eine Ausschreibung erhalten haben, den Strom nicht zur Eigenversorgung nutzen dürfen. Dies betrifft Anlagen mit einer installierten Leistung von mehr als 750 kWp (§ 22 Abs. 3 EEG).

Es bleibt dennoch abzuwarten, ob insbesondere hoch aufgeständerte Agri-PV-Anlagen, wie sie im Obstbau verwendet werden, in einer gemeinsamen Ausschreibung gegen schwimmende PV-Anlagen und PV-Anlagen über Parkplätzen konkurrenzfähig sein werden (Trommsdorff 2021). Um zu ermöglichen, dass besondere PV-Anlagen aus allen drei Sektoren umgesetzt werden können, wäre eine Aufsplittung der Ausschreibungsmenge nach Anwendungsfall eventuell hilfreich.

## 6 Methodik

Für die vorliegende Arbeit wurde im ersten Schritt eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt. Darauf aufbauend wurden mittels Expertenbefragung weitere Daten erhoben, anschließend aufbereitet und ausgewertet. Im Folgenden wird auf die einzelnen Vorgehensweisen eingegangen.

### 6.1 Datengrundlage

Die in Kapitel 4 vorgestellte Pilotanlage dient als Ausgangspunkt und Grundlage dieser Arbeit und wird an verschiedenen Stellen angepasst bzw. vereinfacht, um eine Übertragbarkeit auf mögliche andere Anwendungsfälle im Apfelanbau zu gewährleisten. Diese Anpassungen basieren auf Erkenntnissen wissenschaftlicher Veröffentlichungen, sowie auf generierten Daten aus den Expertenbefragungen und auch auf einschlägigen Veröffentlichungen relevanter Institutionen.

#### 6.1.1 Literaturrecherche

Um eine ausreichende **Literaturgrundlage** zu schaffen, wurden die Datenbanken Web of Science, SpringerLink, Google Scholar, sowie die Hochschulbibliothek der FH Erfurt auf einschlägige Literatur hin durchsucht. Verwendete **Suchbegriffe** waren unter anderem Agri-Photovoltaik, Agrophotovoltaik, Obstbau, Bio-Apfelanbau, Kulturschutzmaßnahmen, Schutzsysteme, Hagelschutznetzsysteme, Hagelnetzfarben, Verschattungsgrade, Förderung, Wirtschaftlichkeit, Preisentwicklung, Strommarkt, Extremwetterlagen, Ernteversicherungen, Bewässerungsmethoden, Frostschutzmaßnahmen, Ertragsmenge, Fruchtqualität, EEG, PV-Ausbau sowie Akzeptanz. Hierbei wurde sowohl deutsch- als auch englischsprachige Literatur berücksichtigt. Um ein möglichst hohes Maß an Aktualität zu erreichen, begrenzt sich der **Veröffentlichungszeitraum** ausgewerteter Literatur auf die Jahre 2015 bis 2021, mit einigen wenigen Ausnahmen, bei denen es sich um Veröffentlichungen handelt, die bis heute Relevanz genießen. Zur Erweiterung der Suchergebnisse wurden zudem die Vorwärts- und Rückwärtssuche in der gefundenen Literatur angewendet und relevante Inhalte und Veröffentlichungen herausgefiltert. Die so geschaffene Literaturgrundlage wurde in einem nächsten Schritt anhand ihrer **Güte** eingegrenzt. Hierbei ist die inhaltliche **Relevanz** für das Thema der vorliegenden Arbeit ebenso wie ihre Belastbarkeit eingeflossen. Es wurde darauf geachtet, dass wissenschaftliche Veröffentlichungen peer-reviewed sind und den Kriterien des wissenschaftlichen

Arbeitens standhalten. Diese sind nach Müller et al. (2013, 75ff) unter anderem die Reputation des Autors bzw. Herausgebers, der veröffentlichenden Institution, des Erscheinungsortes, der beauftragenden Instanz, die Struktur und Verständlichkeit des Inhaltsverzeichnisses sowie die Güte der Quellennachweise und das Literaturverzeichnis. Darüber hinaus ist bei der Eingrenzung die Relevanz der Veröffentlichung in Fachkreisen eingeflossen, welche daran bemessen wurde wie häufig die vorliegende Quelle bereits in anderen Veröffentlichungen zitiert wurde. Hierzu wurden die Angaben, die sich auf Google Scholar finden lassen, herangezogen.

### 6.1.2 Expertenbefragung

Zur Konkretisierung und Validierung der erhobenen Daten wurden Experten, sowohl mittels semistandardisierter Leitfadeninterviews als auch per E-Mail und Telefon befragt.

#### 6.1.2.1 Experteninterviews

Zur Erarbeitung und Gewichtung der Agri-PV-sensitiven Parameter wurden fünf Apfel- bzw. Obstbauexperten befragt. Es wurde jeweils ein Experte der Obstbauregionen Bodensee, Neckar/Baden, West, Niederelbe und Ost herangezogen. Diese Aufteilung orientiert sich an föko (2020). Damit soll gewährleistet werden, dass die erhobenen Daten Erfahrungen der verschiedenen Anbauregionen in Deutschland widerspiegeln. Die Auswahl der Gesprächspartner erfolgte aufgrund ihrer Erfahrungen mit Schutzüberdachungen im Apfelanbau. Für die Befragungen wurde ein spezieller Gesprächsleitfaden entwickelt (siehe Interviewleitfaden 1/4 bis 4/4 im Anhang). Alle Gespräche wurden via MS Teams geführt und aufgezeichnet und im Anschluss transkribiert. Die Aufzeichnungen werden im Anschluss an diese Arbeit gelöscht. Die Gespräche wurden im Zeitraum vom 11. bis 21.05.2021 durchgeführt. Ihre Dauer variiert zwischen 38 und 95 Minuten. Auf die hieraus generierte Datengrundlage wird in dieser Arbeit mit „Experteninterviews 2021“ verwiesen.

#### 6.1.2.2 Austausch mit Fachexperten

Des Weiteren fand ein direkter Austausch mit Fachexperten via E-Mail oder Telefon statt, um zusätzliche Informationen über die Agri-PV-sensitiven Parameter hinaus zu ermitteln. Hierbei wurden Experten aus der Agrarbranche und insbesondere dem Obstbau, sowie aus dem Solarsektor befragt. Dabei wurden insbesondere die Projektpartner des dieser Arbeit zugrundeliegenden Forschungsprojektes einbezogen. Für praxisrelevante Fragen und Gegebenheiten vor Ort wurde der Bio-Obsthof Nachtwey eingebunden. Weitere Informationen zum Systemdesign, auf die Region

bezogene Apfelbaupraxis sowie betriebswirtschaftliche Benchmarks für den Apfelanbau konnten im Austausch mit dem Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum Rheinpfalz (DLR RP) erarbeitet werden. Für PV-System Spezifika wurde BayWa r.e. herangezogen. EWS Schönau, ein regionales Energieversorgungsunternehmen, wurde für zukünftige Preisentwicklungen auf dem Strommarkt befragt. Im Folgenden wird auf die Gesprächspartner mit „Zimmer“, „Nachtwey“, Vollprecht“, „Wicke“, „Schlaak“ und „Barthelmess“ hingewiesen.

### 6.1.3 Erhebung der Kosten- und Einnahmenezusammensetzung

Die Kosten und Einnahmen werden getrennt nach Landwirtschaft und Stromerzeugung erhoben.

#### 6.1.3.1 Kosten

Die betrachteten Kosten setzen sich aus den Investitionskosten, sowie den jährlichen Betriebskosten zusammen.

#### **Landwirtschaft**

Für die Kostenkalkulation des ökologischen Apfelanbaus wurde sich zunächst an den Kostenpunkten aus dem Kostenkalkulationstool des Balmer und Wicke (2020) und des Kuratoriums für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, kurz KTBL (Balmer 2010, 95ff) orientiert. Danach wurden diese durch Austausch mit Wicke (2021b) und mit Hilfe weiterführender Literatur optimiert und auf die Untersuchungsfälle hin angepasst. In der Apfelanlage ist eine Tropfbewässerung und eine Frostschutzberegnung implementiert. Kosten für das Bewässerungs- und Frostschutzsystem wurden durch Erfahrungswerte und Angebote, die dem Obsthof bereits vorlagen bzw. für diese Arbeit von irriport GmbH (01.04.21) eingeholt wurden, ermittelt. Neben der benötigten Wassermenge ist die Herkunft des Wassers von zentraler Bedeutung für die Wirtschaftlichkeit. Die Kosten für Brauchwasser werden mit 0,25 €/m<sup>3</sup> und für Trinkwasser mit 2,5 €/m<sup>3</sup> angesetzt (Nachtwey, persönliche Mitteilung 2021). Die benötigte Wassermenge wird mit 1.520 m<sup>3</sup>/ha/a angenommen. Der Bedarf an Wasser setzt sich aus 540 m<sup>3</sup> Wasser zur Vegetationsbewässerung von 3.000 Bäumen pro Hektar (Immik 2019) an 150 Tagen im Jahr (LfULG 2011) und aus 980 m<sup>3</sup> zur Frostschutzberegnung (Immik 2019) in 4 Nächten im Jahr (Nachtwey, persönliche Mitteilung 2021) zusammen. Das Wasser stammt dabei zu 80 % aus Brauchwasser (Wicke, persönliche Mitteilung 2021b). Die Kosten der Hagelnetzkonstruktion wurden auf Grundlage von Wicke (2020) erstellt und im Austausch mit Wicke (2021b) validiert und ergänzt. Da Hagelschutznetze in Rheinland-

Pfalz genehmigungsfrei sind (vgl. Kapitel 5.1.1), werden hier keine zusätzlichen Kosten angesetzt. Die betrachtete Fläche wird ökologisch bewirtschaftet, weshalb chemische Pflegemaßnahmen nicht berücksichtigt werden. Beim Einsatz von Hagelnetzsystemen ist es teilweise nicht mehr möglich bestimmte Geräte einzusetzen, wie beispielsweise Mehrreihen- oder Tunnelsprühgeräte (Wiebusch und Hilbers 2017). Im vorliegenden Fallbeispiel ist der Betrieb an die Bewirtschaftung unter Hagelnetzen angepasst und alle Maschinen sind mit diesem kompatibel.

### **Stromerzeugung**

Als Datengrundlage dienen in der vorliegenden Arbeit, die im zugrundeliegenden Forschungsprojekt gewonnen Erkenntnisse und in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner BayWa r.e. generierte Benchmarks, welche auf die Untersuchungsfälle angepasst wurden (vgl. Kapitel 6.2.1). Es wird davon ausgegangen, dass zur Errichtung des Agri-PV-Systems ein Bauleitplanverfahren durchlaufen werden muss.

#### **6.1.3.2 Einnahmen**

Einnahmen entstehen durch den Verkauf der geernteten Äpfel bzw. des produzierten Stroms.

### **Landwirtschaft**

Durch den Untersuchungszeitraum von 32 Jahren werden zwei komplette Apfelbaumgenerationen betrachtet. Die Einnahmen setzen sich aus der Höhe des Hektarertrags, sowie des erzielten Verkaufspreises zusammen. Die Apfelbäume stehen ab dem 3. bzw. 4. Jahr im Vollertrag (Wicke, persönliche Mitteilung 2021a; Krengel et al. 2015) und haben bis zum 15. Jahr ein mehr oder weniger konstantes Ertragspotenzial, danach fällt dieses leicht ab. Da die untersuchten Bäume eine Standzeit von 16 Jahren haben, ist davon auszugehen, dass dies kaum Auswirkungen haben wird. Je nach Datengrundlage wird von Qualitätsabfällen ab den Standjahren 6, 8 (Klophaus und Baab 2015) bzw. 13 (Schwartau, persönliche Mitteilung 2021) ausgegangen. In vorliegender Berechnung wurde angenommen, dass dies ab Jahr 10 eintritt und ab diesem Jahr der Mostanteil um 5 % höher liegt.

Die **Ertragsmengen** sowie die Qualitätsanteile in den Jahren 17 bis 32 replizieren sich aus der ersten Apfelgeneration in den Jahren 1 bis 16. Dabei wurde eine für den Bio-Erwerbsapfelanbau typische Ertragsverteilung angenommen. Diese orientiert sich an den Daten des Kalkulationstools des Balmer und Wicke (2020). Da der Erntezeitpunkt,

wie in Kapitel 2.2 dargelegt, beim Apfel sortenspezifisch variiert und die Fruchtqualität bzw. Lagerfähigkeit beeinflusst wird, kann es wie von Gim et al. (2020) herausgearbeitet von Vorteil sein, den Erntezeitpunkt beim Anbau innerhalb eines Agri-PV-Systems gegenüber der Referenzfläche nach hinten zu verschieben. Dies wird in vorliegender Untersuchung nicht berücksichtigt, da die Erntemengen und -preise mittels der Jahresdurchschnitte in die Berechnung einfließen. Die Vergütung richtet sich nach der Qualität der Äpfel bzw. in welcher Handelsklasse und durch welchen Absatzkanal die Äpfel verkauft werden. Biologisch angebaute Äpfel fallen in Handelsklasse II (HKL II) oder Mostäpfel. Äpfel, die aufgrund ihrer Beschaffenheit der HKL II zugeordnet werden, können als Tafelware verkauft werden. Tafelware bezeichnet den Qualitätsanteil der Ernte. Beim Verkauf dieser Ware kann noch einmal in den Absatz durch die Direktvermarktung oder die Genossenschaft unterteilt werden (Nachtwey, persönliche Mitteilung 2021). Unter Hagelnetzen, was in dieser Arbeit als Basisfall dienen wird, sind in der Regel 10 % der Erträge Mostäpfel. Die restlichen 90 % fallen in HKL II und werden zu 25 % direktvermarktet.

Um die **Preisentwicklung** auf dem Bio-Apfelmarkt der nächsten 32 Jahre abzubilden, wurde auf die durchschnittlichen Erzeugerpreise für genossenschaftliche Tafel- und Mostäpfel der letzten sechs Jahre zurückgegriffen. Weiter zurückliegende Daten sind nicht verfügbar. Momentan ist der Markt an Bio-Äpfeln noch nicht gesättigt, was bedeutet, dass eine steigende Apfelproduktion nicht zwangsläufig eine Reduktion der Erzeugerpreise nach sich zieht. Auf lange Frist wird jedoch von einer etwa 20%igen Reduktion im Preis ausgegangen (Schwartau, persönliche Mitteilung 2021). Diese Reduktion wurde in einem ersten Schritt durch lineare Interpolation in eine Preisentwicklung bis zum Jahr 20 abgebildet. Der Ausgangserzeugerpreis im Jahr 0 stellt den Durchschnitt der Erzeugerpreise der letzten sechs Jahre dar und der Endpunkt ist ein um 20 % reduzierter Erzeugerpreis im Vergleich zum Jahr 0. Ab dem Jahr 21 wird das Preisniveau als konstant angenommen, da dann eine Sättigung des Marktes eingesetzt haben sollte. Im zweiten Schritt wird über den Zeitraum der 32 Jahre eine Schwankung der Erzeugerpreise einberechnet. In den ersten 20 Jahren, in denen der Markt noch nicht gesättigt ist, werden die Schwankungen der sechs letzten Jahre im Bio-Apfelanbau herangezogen. Ab dem Jahr 21 muss von einer höheren Schwankung ausgegangen werden, weshalb sich an den Preisschwankungen am konventionellen Apfelmarkt orientiert wird und die Preisänderungen der letzten 12 Jahre herangezogen werden. Die Preisschwankung von Most- und Tafeläpfeln fallen unterschiedlich aus, was sich auch in den Erzeugerpreisen im Bio-Apfelanbau der letzten sechs Jahre

widerspiegelt. Dies könnte durch die stärkeren Auswirkungen durch Streuobst- und Kleingartenanbau (vgl. Kapitel 2.2) und durch die weniger strikte Auslegung der Qualitätskriterien im Bio-Apfelanbau (Experteninterviews 2021) erklärt werden. In vorliegender Arbeit wird eine Preisentwicklung basierend auf der vergangenen Preisschwankung von Tafeläpfeln (Destatis 2021b) modelliert, da keine differenzierten Angaben für Mostäpfel verfügbar sind. Eine Korrelation zur Ertragsmenge konnte nicht eingerechnet werden, da die Datenlage hierzu ungenügend war. Denn es ist denkbar, dass in Jahren mit niedriger Ernte die Großmarktpreise generell höher sind und vice versa. Zwar wurde bei der Untersuchung für die vorliegenden Werte der letzten sechs Jahre im Bio-Apfelanbau eine Korrelation von zumindest  $-0,579^4$  bei Tafelware festgestellt, was diesen negativen Zusammenhang bestätigen würde, jedoch war diese aufgrund der geringen Datenreihe nicht signifikant (p-Wert von  $0,173^5$ ). Mostäpfel wiesen keine negative Korrelation zwischen Erzeugerpreis und -menge auf, jedoch war auch dieses Ergebnis nicht signifikant (vgl. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** im Anhang). Der Preis für Tafeläpfel in der Direkterzeugung wurde als konstant angenommen, da dieser weitaus weniger von Großmarktschwankungen betroffen sein sollte. Die hieraus resultierenden Durchschnittswerte, können u.a. aus Tabelle 6 entnommen werden.

*Tabelle 6: Modellierte durchschnittliche Ertragsmengen und Erzeugerpreise der Landwirtschaft und Energieerzeugung über den Zeitverlauf (32 Jahre) für Basisfall Hagelnetze (HN) und Untersuchungsfälle der Agri-PV*

		HN	Agri-PV
Apfelertrag *	[t/ha/a]	26	26
Preis Most *	[€/kg]	0,25	0,25
Preis HKL II (genoss.) *	[€/kg]	0,92	0,92
Preis HKL II (Direktvermarktung) *	[€/kg]	1,7	1,7
Stromertrag *	[kwh/ha/a]	-	697.244
Stromvergütung (bis Jahr 20)	[ct/kWh]	-	11,17
Stromvergütung (Jahr 21 – 32) **	[ct/kWh]	-	4,37
Mit Herkunftsklasse II (HKL II); genossenschaftliche Vermarktung (genoss.)			
* Durchschnittliche Werte über den Betrachtungszeitraum von 32 Jahren			
** Durchschnittliche Werte über 12 Jahre			

<sup>4</sup> Die Ergebnisse der Korrelation können zwischen  $-1$  (kompletter negativer Zusammenhang) und  $1$  (kompletter positiver Zusammenhang) liegen

<sup>5</sup> In der Regel sollte für signifikante Ergebnisse von Korrelationen von einem Signifikanzniveau von mindestens  $0,95$  und damit einem p-Wert von  $0,05$  ausgegangen werden Sibbertsen und Lehne 2015.

Angenommene landwirtschaftliche Förderungen sind lediglich EU-Direktzahlungen. Förderungen für Witterungsschutzsysteme werden aufgrund der geringen erfolgreichen Förderquote für Landwirte außerhalb von EOs und der Unsicherheiten, die mit der Umschichtung der GMO-Mittel verbunden sind, nicht berücksichtigt (vgl. Kapitel 5.2.1). Da am Standort Hagelschutznetze auch ohne Förderung wirtschaftlich eingesetzt werden, scheint dies als Basisfall auch ohne Förderung realistisch.

### **Stromerzeugung**

Durch die installierte PV-Anlage wird 32 Jahre Strom erzeugt. Die ersten 20 Jahre wird eine EEG-Vergütung in Höhe von 11,17 ct/kWh angenommen. Das entspricht der Summe der angenommenen durchschnittlichen Strommarktpreise der nächsten 20 Jahre plus einer angenommenen Marktprämie von 7 ct/kWh. Die angenommene Marktprämie liegt damit knapp unter dem Höchstwert, den man innerhalb der Innovationsausschreibungen für besondere PV-Anlagen erhalten kann (vgl. Kapitel 5.2.2). Die Höhe der Vergütung wurde gesetzt, da diese notwendig ist, damit sich die PV-Anlage vor der Hälfte ihrer Laufzeit amortisiert und einen *Internal Rate of Return (IRR)* von mehr als 5,5 % aufweist. Dies wiederum wurde als kritische Marke für Investitionen in PV-Projekte angenommen (Schlaak, persönliche Mitteilung 2021). Damit ist diese Einspeisevergütung notwendig, damit die Agri-PV-Anlage realistisch gebaut werden würde. Die Strompreisentwicklung und der daraus resultierende Mittelwert der nächsten 20 Jahre wurde durch Interpolation des Mittelwertes der Strompreise der letzten 6 Jahre (BNetzA 2021b) und eines Szenarios zukünftiger Stromgroßmarktpreise des Projektpartner EWS Schönau (Barthelmess, persönliche Mitteilung 20.05.21) modelliert. Das Strompreisszenario wird außerdem herangezogen, um die folgenden 12 Jahre, in denen keine EEG-Vergütung mehr erhalten wird, abzubilden. Damit liegt die Stromvergütung nach Ende der EEG-Vergütung bei durchschnittlich 4,37 ct/kWh. Bei der hier untersuchten Anlage ist eine Eigenstromversorgung nicht möglich (vgl. Kapitel 5.2.2).

#### **6.1.4 Energieertragssimulationen**

Innerhalb des Forschungsprojektes wurden detaillierte Energieertragssimulationen für alle drei Systemkonfigurationen (vgl. Kapitel 4.2) durchgeführt. Erstellt wurde die Energieertragssimulation für den Standort der Pilotanlage mit der vom Fraunhofer ISE entwickelten PV-Simulationssoftware Zenith. Es wurden Ertragsabschätzungen für 25 Jahre Betriebslaufzeit erstellt, die für den Zweck dieser Arbeit linear auf 32 Jahre extrapoliert werden. Die Ergebnisse fließen als Jahreswerte ein. Die Systemparameter

der Ertragssimulation können der Tabelle 7 in Kapitel 6.2.1 entnommen werden. Die in dieser Arbeit herangezogene und untersuchte Systemkonfiguration werden in einem nächsten Schritt, anhand des spezifischen Stromertrags auf die Untersuchungsfläche hochskaliert.

## 6.2 Datenaufbereitung und Modellannahmen

Im Folgenden werden die der Berechnung zugrundeliegenden Modellannahmen für den Vergleich der Wirtschaftlichkeit zweier Arten von Schutzkonstruktionen im Apfelanbau dargestellt. Basierend auf Kapitel 4 werden die Untersuchungsfälle Apfelanbau unter Hagelschutznetz (HN) und Apfelanbau im Agri-PV-System untersucht. Die Folienüberdachung wird nicht als Untersuchungsfall einbezogen, da diese lediglich den agrarwissenschaftlichen Analysen als Referenz dient. In dieser Arbeit wird dabei zum einen die Seite der Landwirtschaft (APV-Agri) beleuchtet und zum anderen der Teil der Stromerzeugung (APV-PV), sowie die Kombination beider Teile (APV-Total).

Im Folgenden wird erläutert, inwieweit die Modellannahmen dieser Arbeit gegenüber der zugrundeliegenden Pilotanlage modifiziert wurden. Die Ergebnisse werden am Ende jedes Absatzes in einer Tabelle anhand der zentralen Parameter zusammengefasst.

### 6.2.1 Anlagendesignparameter: Pflanzsystem, Hagelnetz, Agri-PV

Die angenommene Fläche ist 2 ha groß, damit zum einen Skaleneffekte erreicht werden können und zum anderen eine erfolgreiche Integration in typische Betriebsgrößen vor Ort realisiert werden kann. Ein Apfelbetrieb in dieser Region verfügt über durchschnittlich 12 ha (vgl. Kapitel 4.1). Die in nachfolgender Tabelle 7 zusammengefassten Abmessungen richten sich nach dem Pflanzsystem der Apfelanlage.

#### **Ausgangspunkt: Apfelanlage**

Es werden Apfelanlagen im Erwerbsoflanbau untersucht, in dem Niederstammanlagen dominieren (BMEL 2019b). Es wird von dem auf dem Obsthof und in der Region üblichen Pflanzsystem ausgegangen. Mit einem Reihenabstand von 3 m und Baumabstand von 1 m sowie einem Verlust von 10 % der Fläche für Vorgewände etc. kommt man auf 3.000 Bäume pro ha. Es werden gut färbende Mutanten bzw. gelbe Sorten ohne Rotfärbung angebaut (Experteninterviews 2021). Dabei berücksichtigt das Modell keine konkreten Sorten, sondern vielmehr literaturbasierte Mittelwerte der in der Pilotanlage zukünftig untersuchten Apfelbäume. Die Bewirtschaftungsform ist biologisch. Um die Belichtung zu verbessern, sollte ein Lichtschacht erzeugt werden, indem ein Abstand der Bäume

zum First des Überdachungssystem von mindestens einem halben Meter eingehalten wird (Wiebusch und Hilbers 2017), was in vorliegendem Anlagendesign der Fall ist.

### Referenzfall: Hagelschutznetzkonstruktion

Es wird davon ausgegangen, dass der Landwirt zukünftige Neuanlagen nur noch mit Hagelschutzkonstruktionen ausgestattet implementiert, so dass die Hagelnetzschutzkonstruktion am Standort aus betriebswirtschaftlicher Sicht sinnvoller ist, als der Abschluss einer Versicherung. Demzufolge wird die Option der Versicherung in vorliegender Analyse nicht untersucht. Die Hagelschutzkonstruktion setzt sich aus einem weißen bzw. kristallfarbenen Netz und einer Betonunterkonstruktion zusammen. Einziger Unterschied zur in der Pilotanlage implementierten Konstruktion ist, dass im vorliegenden Modell auf keine eingefärbten Pfähle zurückgegriffen wird, da dies für das Pilotprojekt umgesetzt wurde, aber nicht der gängigen Praxis entspricht (Zimmer, persönliche Mitteilung 2021b).

### Untersuchungsfälle: Agri-PV-Anlage

Die untersuchte Agri-PV-Anlage ist fix aufgeständert und nach Südwesten ausgerichtet. Es wird der Modultyp „Block“ herangezogen, da dieser auch in einer möglichen zukünftigen Variante der Pilotanlage verwendet wird und damit eine Erweiterung dieses Modells im Rahmen einer Folgearbeit möglich ist. Das Untersuchungsdesign der Pilotanlage sieht vor, dass die Agri-PV-Anlage zunächst ohne zusätzlich Hagelnetze getestet wird. Doch da es wahrscheinlich ist, dass zusätzlich Hagelnetze in der Agri-PV-Anlage angebracht werden müssen, da sonst die Gefahr des Hagelschlages zu hoch ist (Zimmer, persönliche Mitteilung 2021b), kalkuliert vorliegende Arbeit mit Hagelnetzen, die in den Gängen zwischen den Modulreihen gehängt werden. Dass dies nicht notwendig sein wird, wurde durch andere Experten bestätigt. Nur einer der fünf Befragten geht davon aus, dass das momentane Agri-PV-Design ausreichend vor Hagel schützen kann, jedoch nur, wenn die Anlage an den Rändern mit Hagelnetzen ausgestattet wird (Experteninterviews 2021).

*Tabelle 7: Grund- und Systemparameter der Apfel- und PV-Anlagen*

	Einheit	HN	APV
Fläche	[ha]	2	2
Fläche Vorgewende	[ha]	0,2	0,2
Reihenanzahl	[Stk.]	55	55
Reihenlänge	[m]	110	110

	Einheit	HN	APV
Baumabstand	[m]	1	1
Reihenabstand	[m]	3	3
Material Unterkonstruktion	[ ]	Beton	Stahl, fix
Modultyp	[ ]	-	„Block“
Hagelnetzfarbe	[ ]	Weiß	Weiß
Standort	[ ]	50°35'09", 07°01'55"	
GHI	[kWh/m²]	1.084	1.084
Ausrichtung	[ ]	Süd-West	Süd-West
Performance Ratio *	[%]	-	83,2
Minderung gegenüber Inbetriebnahme *	[%]	-	-3,1
Installierte Leistung	[kWp/ha]	-	700
Spezifischer Stromertrag **	[kWh/kWp]	-	996
Reduktion an PAR	[%]	23	30
* Durchschnitt über 25 Jahre; ** Durchschnitt über 32 Jahre			

Ausgehend von den Kosten der Pilotanlage wurden im Austausch mit Schlaak (2021) Skalierungsfaktoren für die Kostenpositionen Wechselrichter, Unterkonstruktion, Systemdesign sowie Montage angenommen. Denn diese sollten sich bei einem System, das im Vergleich zur Pilotanlage nur aus einer Modul- und Aufständervariante auf einer 5,4-mal so großen Fläche aufgebaut ist, ergeben. Darüber hinaus wurden für PV-Module und Risikoprämie Lerneffekte einberechnet, die mit zunehmender Etablierung der Technologie eintreten sollten. Denn da es sich um Sondermodule handelt, sollte der Preis dieser mit zunehmender Etablierung der Agri-PV am Markt und anheben der entsprechenden Bestellmenge Skalierungseffekt auftreten (vgl. Kapitel 3.4.1.2). Die angenommenen Skalierungsfaktoren sind in nachstehender Tabelle 8 enthalten.

*Tabelle 8: Skalierungsfaktoren zur Anpassung der Kostenstruktur der Pilotanlage (258 kWp) auf eine Groß-Agri-PV-Anlage (1,4 MWp)*

	Einheit	Skalierungsfaktor
PV-Module	[%]	-10
Wechselrichter	[%]	-5
Unterkonstruktion	[%]	-20
Systemdesign	[%]	-80
Montage	[%]	-35
Marge bzw. Risikoprämie	[%]	-20

Zudem wird davon ausgegangen, dass ein Bauleitplanverfahren durchlaufen werden muss, denn zwar wurde die Pilotanlage nach § 35 Abs. 1 Nr. 4 BauGB genehmigt, doch

auch diese Anlage muss noch ein Bauleitplanverfahren durchlaufen (vgl. Kapitel 4). Da es noch keine klare Regelung zum Agri-PV-Genehmigungsprozess gibt, wird in vorliegender Arbeit davon ausgegangen, dass ein Bauleitplanverfahren durchlaufen werden muss.

### **Vergleichsgröße: PV-FFA**

Um die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des PV-Systems der Agri-PV später besser einordnen zu können, wird eine PV-FFA nach Fraunhofer ISE (2020) herangezogen. Damit diese als Referenz dienen kann, wurden sie auf die dieser Berechnung zugrundeliegenden Annahmen angepasst. Im Einzelnen sind das ein WACC mit 2,46 %, die Betrachtungsdauer von 32 Jahren, ein für den Standort typischen anfänglichen spezifischen Stromertrag von etwa 1088 kWh/kWp (Solargis s.r.o. 2021), welcher wiederum in einem angenommenen durchschnittlichen spezifischen Ertrag über die Betrachtungsdauer von etwa 1004 kWh/kWp mündet, sowie einer Einspeisevergütung von 5,03 ct/kWh, was dem durchschnittlichen gewichteten Zuschlagswert von März 2021 entspricht (BNetzA 2021a) sowie 1000 kWp/ha installierter PV-Leistung.

### **6.2.2 Standzeit der Apfelanlage und Lebensdauer Schutzkonstruktionen**

Der Untersuchungszeitraum beträgt 32 Jahre. Es wird von einer Apfelbaumstandzeit von 16 Jahren ausgegangen. Diese Standzeit ist nicht nur für den untersuchten Obsthof und die Region repräsentativ (Nachtwey, persönliche Mitteilung 2021), sondern ist auch in anderen Regionen zu finden (agri benchmark 2014). Die Unterkonstruktion weist sowohl im Fall HN als auch APV-Agri jeweils eine Standzeit von zwei Apfelgenerationen und damit 32 Jahren auf. Jedoch müssen die restlichen Komponenten der Hagelschutzvorrichtung nach den 16 Jahren Apfelbaumstandzeit getauscht werden. Die Hagelschutznetze werden im dritten Standjahr aufgelegt, da sich die Bäume dann in der Regel im Vollertrag befinden. Diese werden nach Hälfte der Rest-Standzeit je Apfelgeneration, also nach sieben Jahren getauscht (Tabelle 9). Je nach Handhabung können die Netze längere Lebensdauern aufweisen (vgl. Kapitel 2.4.2.1). Die Annahmen bezüglich des Zeitpunkts und der Dauer der Netzimplementierung basieren auf Empfehlungen nach Wicke (2015b) und richten sich nach der Herstellergarantie von weißen Netzen (Klophaus und Baab 2015; Stehr und Hahn 2016). Somit werden innerhalb des Untersuchungszeitraums zwei Apfelbaumgenerationen implementiert. Im Fall HN bleiben die Betonpfähle über den Gesamtbetrachtungszeitraum hinaus implementiert, jedoch werden die übrigen Unterkonstruktionskomponenten einmal und

die Hagelschutznetze dreimal getauscht. Das Agri-PV-System mit seinen Modulen und der Unterkonstruktion hingegen kann insgesamt 32 Jahre auf der Fläche installiert bleiben, jedoch müsse die Hagelnetze ebenfalls dreimal ausgetauscht werden.

*Tabelle 9: Lebensdauer und Standzeiten der Anlagenkomponenten von HN, APV-Agri bzw. APV-PV*

	Einheit	HN	APV-Agri/ APV-PV
Bäume	[a]	16	16
Unterkonstruktion	[a]	Pfähle: 32; übrige Komponenten: 16	32
Hagelnetze	[a]	7	7

### 6.2.3 Einfluss der Agri-PV: Agri-PV sensitive Parameter

Die potenziellen Auswirkungen der Agri-PV auf den Apfelanbau wurden durch eine Literaturanalyse herausgefiltert. Da es wenige Agri-PV-Anlagen im Kernobstanbau und nur ungenügende Erkenntnisse zur Wirkung von Agri-PV auf den Apfelanbau gibt, werden wissenschaftliche Untersuchungen zum Effekt von Überdachungskonstruktionen, vor allem zu Hagelschutznetzen, als Ausgangspunkt herangezogen und durch die geführten Experteninterviews validiert. Die Erkenntnisse von Untersuchungen anderer Agri-PV-Anlagen im Kernobstanbau (vgl. Kapitel 3.5) können kaum und wenn nur als Trendwerte hinzugezogen werden, da eine Übertragung auf die hiesigen Anbaugelände bei den meisten Parametern nur bedingt möglich ist und auch die Unterschiede von Referenzfall zu Systemdesign der dortigen Agri-PV-Anlagen teilweise stark abweichen. Im Folgenden werden die Annahmen, die in das der Arbeit zugrundeliegende Modell einfließen, ausgeführt und in Tabelle 11 zusammengefasst.

#### Investitionskosten

Die Agri-PV kann die Hagelschutzunterkonstruktion und Teile der eingesetzten **Hagelnetze** ersetzen. Das Modell nimmt an, dass die Unterkonstruktion zu 100 % und die Hagelnetze zu 60 % substituiert werden können. Die Kosten für Bäume, Pflanzmaterial und Bewässerungssystem bleiben gleich (Experteninterviews 2021). Der Arbeitsaufwand der Bodenvorbereitung nach der Installation der Agri-PV erhöht sich um 150 %. Gründe hierfür sind zum einen, dass die zur Installation benötigten Maschinen deutlich schwerer sind und den Boden entsprechend stärker verdichten, zum anderen werden bei der Implementierung der Hagelschutznetze nur die Fahrspuren und nicht auch die Pflanzreihen befahren. Bei der Installation der Agri-PV mussten auch die

Pflanzreihen gequert und anschließend wieder gelockert werden (Zimmer, persönliche Mitteilung 2021b).

### **Arbeitsaufwand und Materialeinsatz von Pflegearbeiten**

Die Agri-PV kann eine Veränderung der Anforderungen an Pflanzenschutz, Düngung, Bodenbearbeitung, Ernte und Aussaat nach sich ziehen, was Auswirkungen auf Arbeitszeitbedarf, sowie Material- und Kraftstoffbedarf haben kann und damit auf die Betriebskosten. Die Überdachung einer Apfelanlage führt zur Veränderung des Mikroklimas (Experteninterviews 2021). Am stärksten beeinflusst wird die **Lichtverfügbarkeit** (vgl. Kapitel 2.4.2.1). Leichter Lichtmangel erzeugt bei Bäumen Streckenwachstum, was sich wiederum auf die Kulturführung der Apfelanlage auswirkt. Durch geeignete Erziehungsform kann einer signifikanten Veränderung des **Schnittaufwands** entgegengewirkt werden (Handsack 2013). Während schwachwachsende Unterlagen die zusätzliche Verschattung ausgleichen können, kann es bei starkwachsenden bzw. zu Alternanz neigenden Sorten zu einem Mehraufwand durch wuchsberuhigende Maßnahmen, wie Wurzelschnitt, kommen. Je nach angebaute Sorte und Unterlage kann sich hier der Arbeitsaufwand erhöhen. In der vorliegenden Berechnung wird ein Mehraufwand von 10 % angenommen (Experteninterviews 2021). Eine Verschattung verstärkt die Wirkung von **Ausdünnungsmaßnahmen** (Klophaus und Baab 2015), weshalb diese unter Umständen im Agri-PV-System vermindert durchgeführt werden müssen. Auch die Untersuchungen von Juillion (2021) zeigen, dass im Apfelanbau innerhalb eines Agri-PV-Systems durch eine verminderte Blütenbildung und höhere Rate an Fruchtfall die Kosten der Handausdünnung gesenkt werden könnten. In vorliegender Arbeit wird von einer Reduktion um 10 % ausgegangen (Experteninterviews 2021).

Die Implementierung einer Überdachung zieht in der Regel eine Veränderung in der Verwendung von **Pflanzenschutzmitteln** nach sich. Durch den Schutz der Bäume vor Nässe beispielsweise kann der Einsatz von **Fungiziden** reduziert werden (Arnegger et al. 2018). Der Anteil der Fungizide an den Gesamtpflanzenschutzmitteln wird auf 16 % und der Anteil der Fungizide am Arbeitsaufwand zum Ausbringen von Pflanzenschutzmitteln auf 10 % geschätzt. Doch einige Überfahrten kombinieren verschiedene Präparate. Eine Einsparung im Arbeitsaufwand für die Kulturmaßnahme Pflanzengesunderhaltung ergibt sich demnach nur, wenn die Fungizide entkoppelt ausgebracht würden. Der Anteil an Fungiziden, auf den dies zutrifft, wird auf zwei Drittel geschätzt (Experteninterviews 2021). Im zugrundeliegenden Modell wird eine Reduktion

an Fungiziden um 50 % angenommen. Gemessen am Gesamtpflanzenschutzmittelaufwand würde sich daher eine Reduktion um 8 % der Materialkosten und um 3 % der Arbeitskosten ergeben. Doch es muss mit einem Mehraufwand an **Insektiziden** und **Akariziden** gerechnet werden, da es durch ausbleibende Niederschläge bzw. höhere Temperaturen, geringere Luftzirkulation und Reduktion von schwefelhaltigen Pflanzenschutzmitteln zu einem erhöhten Auftreten von Milben und Läusen kommen kann (Buchleither und Arnegger 2021). Weil es sich bei der Agri-PV um keine durchgehende Überdachung der kompletten Fläche handelt, sollte dieser Trend abgemildert werden. Denn anders als bei anderen Agri-PV-Designs (vgl. Kapitel 3.2), werden gewächshausähnliche Klimabedingungen vermutlich nicht erreicht werden. In vorliegender Arbeit wird ein Mehraufwand an Material und Arbeitskosten von 5 % am Gesamtaufwand der Pflanzengesundheit angesetzt, wobei diese Annahme mit hoher Unsicherheit behaftet ist (Experteninterviews 2021). Gesamt gesehen reduzieren sich die Kosten für Pflanzengesunderhaltung damit um 5 % Materialkosten und weniger als 1 % Arbeitskosten.

Die Agri-PV ist so konzipiert, dass sie einen konventionellen **Maschineneinsatz** ermöglicht und hier keine Auswirkungen auf die Arbeitsweise mit sich bringt. Auch werden durch die Agri-PV im Gegensatz zur Referenzfläche die **Arbeitswege** bei der Ernte bzw. bei Pflegearbeiten nicht verlängert. Das **Hagelnetzhandling** wird um 10 % geringer angesetzt, denn es sind zwar weniger große Netze notwendig, doch das Schließen und Öffnen der Netze bleibt dennoch notwendig. Da dieser Vorgang von drei der fünf Experten als der wesentliche Arbeitsaufwand gesehen wird, verringert sich dieser nur geringfügig im Verhältnis zur Materialeinsparung (Experteninterviews 2021).

Der Aufwand an **Frostschutzberegnung** könnte bezogen auf die Wassermenge und den Arbeitsaufwand sinken, da erwartet wird, dass die Agri-PV-Anlage das Potenzial birgt Frostnächte weiter abzumildern, als es bereits Hagelnetze teilweise vermögen. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn die Überdachung einen gewissen Abstand zum Baum und damit eine nach oben verlagerte Ausstrahlungsfläche hat. Untersuchungen zeigen, dass der Spätfrosteintritt unter Hagelnetzen um bis zu zwei Stunden verzögert und um 1,2 K abgeschwächt werden kann. Damit können Frostnächte, die an der Grenze zur Schadensschwelle sind ohne zusätzliche Frostschutzmaßnahme überstanden werden (Handschack 2013). Ebenso zeigen Untersuchungsergebnisse aus Südkorea im Birnenanbau eine sinkende Gefahr von Frostschäden innerhalb der Agri-PV (Gim et al. 2020). Im Zuge der Experteninterviews

(2021) wurde darüber hinaus darauf hingewiesen, dass die Agri-PV den Vorteil mit sich bringt, dass sie im Gegensatz zum Hagelnetz schon während der frostempfindlichen Blühphase auf der Fläche installiert ist. Erste Einschätzungen von Willockx (2021) durch die Agri-PV-Pilotanlage über Birnen in Belgien legen allerdings nahe, dass diese keine frostmindernden Auswirkungen mit sich bringt. Wie in den Experteninterviews (2021) außerdem ausgeführt wurde, kann eine Überdachung generell, wenn überhaupt, nur gegen Strahlungsfröste in windstillen Zeiten positive Effekte erzielen. Wie bereits im vorletzten Absatz angemerkt, ist die Agri-PV jedoch nicht durchgehend geschlossen, womit fraglich ist, ob von ihr entsprechende Wärmespeicherkapazitäten ausgehen. Da die hier ausgeführten Annahmen mit so großer Unsicherheit behaftet und eine mögliche Veränderung nicht ausreichend sicher quantifiziert werden kann, wird sie in dieser Arbeit als unverändert angenommen.

Bei der **Bewässerung** kann hingegen ein positiver Effekt verzeichnet werden. Juillion et al. (2020) haben einen verminderten Bewässerungsbedarf von bis zu 30 % bei Apfelbäumen festgestellt. Unter Zuhilfenahme der Abschlussarbeit von Keinath (2021) zur Evapotranspiration wurde eine auf die in der Region herrschenden Klimaverhältnisse angepasste Senkung des Bewässerungsbedarfs von 3 % angenommen. Diese wirkt sich positiv auf die Materialkosten aus, jedoch sollte sich der Arbeitsaufwand nicht signifikant verändern (Experteninterviews 2021).

Des Weiteren wurde in den Experteninterviews (2021) genannt, dass die Überdachung zu geringeren Schäden durch **Lagerfäule** führen kann. Gerade im Bioanbau sind diese ein nicht zu unterschätzendes wirtschaftliches Risiko. Untersuchungen zeigen, dass unter Überdachung die von Lagerfäule betroffenen Äpfel um bis zu 49 % reduziert werden und auf das kostenaufwändige **Heißwassertauchverfahren** verzichtet werden konnte (Buchleither und Arnegger 2021). Da dieses Verfahren vor allem in den südlichen Anbauregionen notwendig wird und in der hier untersuchten Region kaum in die Praxis umgesetzt werden muss (föko 2020) sowie am hier zugrundeliegenden Obsthof nicht zur Anwendung kommt, wird dieser Kostenfaktor in vorliegendem Modell nicht eingepreist.

### **Auswirkungen auf Ertrag und Fruchtqualität**

Der zentrale beschränkende Faktor auf die Pflanzen in Agri-PV-Anlagen ist das Licht (Marrou et al. 2013b). Laut Büchele und Lucas (2018, S. 80) gibt es in Apfelanlagen auf natürliche Weise, neben der Eigenverschattung der Bäume, reduzierte **Lichtverfügbarkeit** nur, wenn die Anlage durch seine Standortbedingung verschattet

wird. Dies ist vermutlich auch der Grund, warum es kaum Untersuchungen zum Lichtsättigungspunkt von Äpfeln in Deutschland gibt. Da die Verschattungsgrade innerhalb des Agri-PV-Systems dieser Arbeit etwa mit denen schwarzer Hagelnetze vergleichbar sind, werden die Untersuchungsergebnisse dieser herangezogen, um Annahmen zu Ertragsmengen und -qualität zu treffen. Eine pauschale Aussage zur Auswirkung der Verschattungsgrade auf Ertragsmenge und -qualität kann für Deutschland nicht getroffen werden (vgl. Tabelle 10). Eine Schattierung von Apfelbäumen gilt mit zunehmendem Breitengrad als problematischer, da die Baum- und Fruchtentwicklung unverhältnismäßig stark negativ beeinflusst werden kann (Handsack 2013). Untersuchungen zu Verschattungsgraden, wie sie beispielsweise durch schwarze Hagelnetze herbeigeführt werden, haben gezeigt, dass sie in Süddeutschland als unkritisch einzustufen sind und diese an sonnenreichen und warmen Tagen sogar erwünscht sein können, um qualitätsmindernden Effekten wie Sonnenbrand entgegenwirken zu können (Thalheimer und Paoli 2005; Handsack 2013). In Norddeutschland sollte auf geringere Verschattungsgrade geachtet werden (Wiebusch und Hilbers 2017). In Mitteldeutschland können Verschattungsgrade, die mit schwarzen Netzen vergleichbar sind, durch eine Aufständehöhe der Überdachung von mindestens 4 m vertretbar sein (Handsack 2013). Dies wurde in der hier untersuchten Agri-PV-Anlage eingehalten.

Untersuchungen zur Reaktion des Ernteertrags in unterschiedlichen deutschen Regionen unter Hagelnetzen verschiedener Farben wiesen keine nennenswerten Abweichungen der **Ertragsmenge** zwischen weißen und schwarzen Netzen auf (Handsack 2013; Blanke 2007; Klophaus und Baab 2015). Dies wurde auch durch die Prognosen der Experteninterviews (2021) bestätigt. In vorliegender Arbeit wird deshalb, entgegen den Erkenntnissen aus Agri-PV-Anlagen anderer Anbauregionen bzw. Untersuchungssettings (vgl. Kapitel 3.5), die Ertragsmenge zwischen den Untersuchungsfällen als konstant angenommen. In Deutschland liegen Erntemengen je nach Bewirtschaftung, Standort und Sorte zwischen 30 und 80 t/ha/a (Krengel et al. 2015), die Ertragsmengen im Bio-Anbau liegen jedoch deutlich unter diesen Werten (Wicke, persönliche Mitteilung 2021b). In vorliegendem Modell werden durchschnittlich 26 t/ha/a angenommen. Es sollten ertragsstarke, ertragsstabile Sorten eingesetzt werden, die wenig zu Alternanz neigen (Experteninterviews 2021).

Durch die Implementierung der Agri-PV-Anlage kommt es zu keiner Verringerung der **landwirtschaftlichen Nutzfläche**, da auf der Referenz-Fläche ebenso Pfähle der

Hagelschutznetzkonstruktion implementiert sind. Somit bleibt es bei gleicher nutzbarer Fläche.

Was die Auswirkung auf den **Qualitätsanteil** betrifft, richtet sich die Verschattungstoleranz in hohem Maß nach der angebauten Apfelsorte bzw. Mutante. So sollte tendenziell immer die besser färbende Mutante der jeweiligen Sorte gewählt werden (Experteninterviews 2021). Untersuchungen aus Rheinland-Pfalz haben ergeben, dass die Ausfärbung bei diesen auch unter schwarzen Hagelnetzen ausreichend war. Zwischen schwarzen und weißen Hagelnetzen wurde hier eine Reduktion des Qualitätsertrages von 6,5 % bei Elstar van der Zalm und 19,4 % bei Evelina festgestellt (Klophaus und Baab 2015). Doch nicht nur der Lichteinfall beeinflusst die Fruchtausfärbung der Äpfel maßgeblich, sondern auch der Temperaturunterschied zwischen Tag und Nacht (vgl. Kapitel 2.3.3). Vermindert sich dieser, kann die Ausfärbung behindert werden. Untersuchungen fanden außerdem keine Veränderungen in der Festigkeit (Widmer 2005; Handschack 2013; Klophaus und Baab 2015) oder dem Auftreten von Lagerschäden (Handschack 2013) durch erhöhte Verschattung. Außerdem könnten sich der Zuckergehalt und weitere Inhaltsstoffe und Fruchtgröße verändern (Experteninterviews 2021). Diesem Trend kann jedoch mit einer späteren Ernte entgegengewirkt werden (vgl. Kapitel 3.5). Auswirkungen verschiedener Verschattungsgrade auf die Ertragsqualität sowie Sortenempfehlungen sind außerdem in nachfolgender Tabelle 10 zu finden.

*Tabelle 10: Auswirkung der Reduktion (Red.) an PAR auf die Ertragsqualität sowie Sortenkompatibilität in unterschiedlichen Regionen in Deutschland*

Red. PAR	Gebiet	Ertragsqualität	Sortenempfehlung
18 - 28 %	Rheinland-Pfalz	Fruchtausfärbung: gut bis schlecht (mutantenabhängig), positive Wirkung gegen Sonnenbrand	Grüne oder gut färbende rote Mutanten; <i>Jugala, Annaglo</i> <sup>(a), (c)</sup>
	Sachsen	Fruchtgröße: gleichbleibend, Fruchtausfärbung: vermindert (minus 5-23 %)	<i>Elstar Elshof, Elstar Red Elswout, Gala Must, Gala Royal, Gala Brookfiled, Gala Jugala, Rubinette rosso, Rucla, Sabora</i> <sup>(b)</sup>
	Tirol	Fruchtausfärbung: geringfügig schwächerer Deckfarben Ausprägung (minus 5 %), positive Wirkung gegen Sonnenbrand	Sorten ohne bzw. mit genetisch bedingter Fruchtfarbe, bei zweifarbigen Äpfeln Ausfärbung tendenziell problematischer <sup>(e)</sup>

Red. PAR	Gebiet	Ertragsqualität	Sortenempfehlung
13 – 24 %	Rheinland-Pfalz	Fruchtausfärbung: geringer	- (c)
	Sachsen	-	<i>Braeburn Mariri Red, Elstar Elshof Evelina, Golden Delicious, Jonagroed Novajo, Kanzi, Red Falstaff, Rubens</i> (b)
7 – 19 %	Rheinland-Pfalz	Fruchtgröße: gleichbleibend, Fruchtausfärbung: ausreichend (mutantenabhängig)	Lichtbedürftige bzw. gut bis schwer färbende Sorten, keine spätreifenden Sorten; <i>Evelina, Elstar (gut ausfärbende Mutante)</i> (a), (c)
	Sachsen	Fruchtgröße: gleichbleibend, Fruchtausfärbung: annähernd gleichbleibend	<i>Braeburn, Evelina, Diwa, Kanzi, Mairac, Pinova, Red Falstaff, Wellant</i> (b)
	Tirol	-	Schlecht färbende Sorten (e)
	Niedersachsen (Altes Land)	Fruchtgröße: gleichbleibend, Fruchtausfärbung: annähernd gleichbleibend	<i>Evelina, Junami, Rubens, Red Jonaprince</i> (f)

mit (a) Blanke 2007, (b) Handschack 2013, (c) Klophaus und Baab 2015, (d) Widmer 2005, (e) Thalheimer und Paoli 2005, (f) Stehr und Hahn 2016

### Auswirkungen auf sonstige Kosten

Dadurch, dass die Schutzkonstruktionen jeweils über zwei Apfelgenerationen im Boden bleiben, können **Nachbauprobleme** entstehen, da die Kultur nicht gewechselt wird und auch die Reihen nicht in die Fahrgasse verlegt werden können, wie es sonst in der Praxis üblich wäre. Diesem Problem wird in beiden Untersuchungsfällen mit ausreichend Bewässerung und einem Unterlagenwechsel begegnet (Experteninterviews 2021). Auf Austausch oder Entseuchung des Bodens wird aus Kostengründen verzichtet. Die Hagelschutzkonstruktionen müssen am Ende der Kulturstandzeit von 16 Jahren mit Ausnahme der Pfähle erneuert und nach 32 Jahren komplett zurückgebaut werden. Die hiermit verbundenen **Rückbaukosten** können im Agri-PV-System vermieden werden. Informationen zu Rückbaukosten des Agri-PV-Systems finden sich in Kapitel 7.1.1.2. Außerdem entfällt dem Landwirt durch die Implementierung der Agri-PV unter den momentanen rechtlichen Rahmenbedingungen der Anspruch auf **EU-Direktzahlungen**. Ein Vorteil ergibt sich hingegen durch die Doppelnutzung der Fläche, da sich die **Pachtzahlung** zwischen Landwirt und dem PV-Anlagenbesitzer geteilt werden kann, weshalb hier eine Reduktion von 50 % auf der Landwirtschaftsseite angenommen wird.

Tabelle 11: Quantifizierung der positiven (grün), neutralen (grau) und negativen (orange) Auswirkung der Agri-PV auf die Ökonomie der landwirtschaftlichen Praxis

Beeinflussender Parameter	Effekt	Beeinflusster Parameter	Angenommene Veränderung
PV-Module	Hagelschutz	Hagelschutzkonstruktion: Hagelnetz (Material, Arbeitsaufwand, CAPEX)	-60%
		Hagelschutzkonstruktion: Hagelnetz (Arbeitsaufwand, OPEX)	-10%
	Frostschutz	Frostschutzberechnung: Wasser (Material, OPEX)	0%
		Frostschutzberechnung: Wasser (Arbeitsaufwand, OPEX)	0%
	veränderte Regenverteilung	Tropfbewässerung: Bewässerung (Material, OPEX)	-3%
		Tropfbewässerung: Bewässerung (Arbeitsaufwand, OPEX)	0%
	Überdachung	Pflanzengesunderhaltung (Material, OPEX)	-5.1%
		Pflanzengesunderhaltung (Arbeitsaufwand, OPEX)	-0.4%
	mit Regenschutz	Fungizideinsatz (Material, OPEX)	-50% *
	mit Veränderung Mikroklima	Schädlingsbekämpfung Mehraufwand (Material, Arbeitsaufwand, OPEX)	5% *
	veränderter Lichteinfall	Ertrag: Menge (Einnahmen)	0%
		Ertrag: Qualität (Einnahmen)	-10%
		Baumschnitt (Arbeitsaufwand, OPEX)	+10%
		Handausdünnung (Arbeitsaufwand, OPEX)	-10%
weitere Kulturmaßnahmen (Mulchen, Düngen, etc.)		0%	
Unterkonstruktion	Ersatz der Konstruktion	Hagelschutzkonstruktion: Unterkonstruktion (Material, Arbeitsaufwand, CAPEX)	-100%
		Rückbaukosten (OPEX)	-100%
		Reparaturkosten (OPEX)	-40%
	Flächenverlust	Ertrag: Menge (Einnahmen)	0%
Installation	Bodenverdichtung	Bodenvorbereitung	150%
Nutzungsartenerweiterung	Doppelnutzung	Landpacht	-50%
	EU-Dirktzahl.	Förderung Agri	-100%

\* Fließen nicht direkt in Berechnung ein, sondern dient als Ausgangsannahme für Pflanzengesunderhaltung (Material, Arbeitsaufwand OPEX)

## 6.3 Datenanalyse

### 6.3.1 Untersuchungsrahmen – Stakeholder Konstellationen

Grundlage der Untersuchung sind eine Stakeholder Konstellation im Fall von HN und zwei verschiedene im Fall der Agri-PV, welche sich aus den in Kapitel 3.4.2 dargelegten Geschäftsmodellen ableiten (Abbildung 12). Diese Betrachtung ermöglicht es für die Agri-PV die Wirtschaftlichkeit der Landwirtschaftsseite getrennt von der Gesamtwirtschaftlichkeit des Systems zu betrachten. Konstellation 1 geht davon aus, dass der Landwirt und der Anlagenbesitzer nicht die gleiche Person sind. In der Konstellation 2 wird davon ausgegangen, dass der Landwirt sowohl das Land bestellt als auch die Agri-PV-Anlage besitzt. In allen Optionen ist die Fläche gepachtet, was die Tatsache miteinbezieht, dass in Deutschland der überwiegende Teil der landwirtschaftlich genutzten Flächen gepachtet ist (Destatis 2019). In Konstellation 1 wird die Pacht, die dem Landbesitzer gezahlt wird, zu gleichen Teilen vom Landwirt und dem Anlagenbesitzer getragen, denn beide Parteien nutzen das Land. In der Konstellation 2 übernimmt damit der Landwirt die komplette Pachtzahlung. In der Konstellation 1 erhält der Landwirt vom Anlagenbesitzer darüber hinaus eine Vergütung, die sich nach dem Mehraufwand, der durch die Implementierung der Agri-PV entstehen

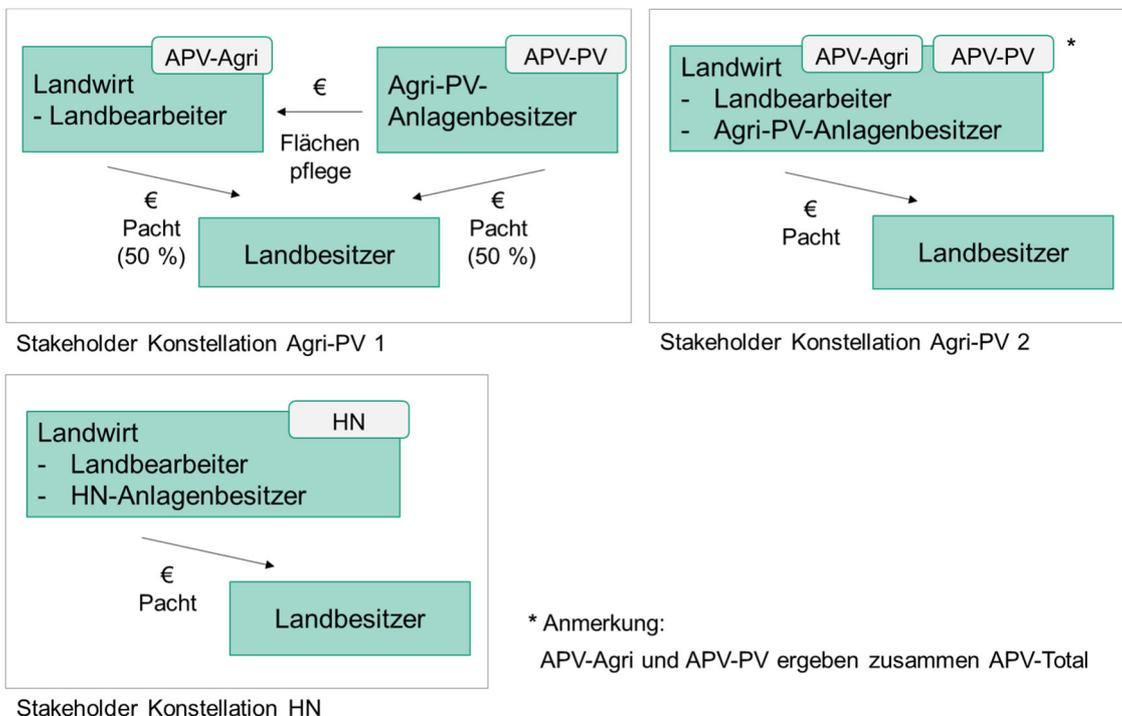


Abbildung 12: Schematische Darstellung Stakeholder Konstellation 1 und 2 im Falle Agri-PV, sowie die Stakeholder Konstellation im Referenzfall HN mit jeweiliger Kennzeichnung der greifenden Untersuchungsfälle APV-Agri, APV-PV (APV-Total) sowie HN, eigene Darstellung

kann, richten sollte. In vorliegender Arbeit wird eine Vergütung in Höhe der nicht mehr gezahlten EU-Direktzahlungen (vgl. Kapitel 5.2.1) angesetzt. Da, wie im vorangehenden Abschnitt und Kapitel 3.4.5 ausgeführt, kein signifikanter Mehraufwand durch die Implementierung von Agri-PV im Apfelanbau zu erwarten ist und der Landwirt von der kostenlosen Schutzkonstruktion profitieren kann, wird dies in dieser Arbeit als faire Vergütung angesehen. Die Anreizstrukturen zur Implementierung von Agri-PV-Anlagen wurden in Kapitel 3.4.4 dargelegt.

Hieraus ergeben sich die drei Untersuchungsfälle, die in Tabelle 12 noch einmal veranschaulicht werden:

1. HN: Landwirtschaft unter Hagelschutznetz als Referenzfall
2. APV-Agri: Landwirtschaft im Agri-PV-System als Fall, in dem der Landwirt nicht verantwortlich für das PV-System ist
3. APV-Total: setzt sich zusammen aus APV-Agri und APV-PV, wobei APV-PV die Stromerzeugung im Agri-PV-System darstellt

*Tabelle 12: Anwendungsgebiete der Untersuchungsfälle APV-Agri, APV-PV und APV-Total mit Referenzfall HN*

	HN	APV-Agri	APV-PV	APV-Total
Landwirtschaft: Kosten und Einnahmen	x	x		x
Stromerzeugung: Kosten und Einnahmen			x	x

### 6.3.2 Kalkulationstools im Obstbau und der Agri-Photovoltaik

Um die Bereiche Landwirtschaft und Stromerzeugung der Agri-PV zu vereinen und mit der herkömmlichen Praxis zu vergleichen wurde ein Excel-Kalkulationstool innerhalb dieser Arbeit entwickelt. Grundlage hierfür war das Kalkulationstool zur Wirtschaftlichkeitsberechnung der Agri-PV, das in den Abschlussarbeiten von Trommsdorff (2016) entwickelt und Schlaak (2016) überarbeitet wurde. Für die Landwirtschaft wurde sich am Kalkulationstool zur Wirtschaftlichkeitsberechnung im Obstbau von Balmer und Wicke (2020) und Balmer (2010) orientiert. Diese wurden für die Durchführung der im nachfolgenden Kapitel dargelegten ökonomischen Analysen angepasst und erweitert.

### 6.3.3 Ökonomische Analysen

Anhand der drei zentralen Unternehmensziele des Betriebsmanagement im Obstbau nach Büchele und Lucas (2018, S. 456) Rentabilität, Liquidität und Stabilität wurde in vorliegender Arbeit die Wirtschaftlichkeit der Agri-PV im Apfelanbau auf ihre Rentabilität, Profitabilität, Finanzierungsfähigkeit sowie das Potenzial zur Einkommensstabilisierung analysiert. Im Folgenden werden die der Berechnung zugrundeliegenden Parameter dargelegt und darauffolgend die herangezogenen Kennzahlen und zugrundeliegenden Formeln offengelegt.

#### 6.3.3.1 Rentabilität und Profitabilität

Eine Investition in eine Agri-PV-Anlage ist dann aus wirtschaftlicher Sicht lohnend, wenn der Gewinn aus Landwirtschaft und Stromerzeugung im Agri-PV-System höher als der Gewinn der herkömmlichen Landwirtschaft auf der gleichen Fläche wäre (Dinesh und Pearce 2016). Dazu werden hier die Anfangsinvestitionen, sowie die jährlichen Ausgaben und Einnahmen der Agri-PV untersucht und mit jenen im Referenzfall HN verglichen. Hierzu werden Methoden der statischen und dynamischen Investitionsrechnung herangezogen.

##### (1) Kapitalrendite

Um besser abschätzen zu können, inwieweit der Kapitaleinsatz der Anfangsinvestition lohnend ist, wird auf den Ansatz des *Return On Investment (ROI)* zurückgegriffen, ein Ansatz der **statischen Investitionsrechnung**. Hierbei wird der Kapitaleinsatz mit den jährlichen Gewinnen gegenübergestellt. Die Formel zur Berechnung ist folgende (Heesen 2016, S. 10ff):

$$ROI = \frac{E_t - A_t}{I_0} \quad (1)$$

Mit

$I_0$  = Investitionsauszahlung im Jahr 0;

$E_t$  = Einzahlung am Ende von Periode t;

$A_t$  = Auszahlung am Ende von Periode t;

Durch Methoden der **dynamischen Investitionsrechnung** kann die wirtschaftliche Performance über einen Zeitraum sinnvoll abgebildet werden (Busse von Colbe et al. 2015, S. 21). Im Zuge dieser Arbeit werden die Kapitalwertmethode und die dynamische Amortisation herangezogen. Eine zusätzlich weit verbreitete Kennzahl wäre *Internal Rate of Return (IRR)*. Diese Methode errechnet den Zinssatz, bei dem der Kapitalwert

einer Investition gleich Null wird (Heesen 2016, S. 58 ff). Jedoch ist diese Methode insbesondere dann anwendbar, wenn die anfängliche Investitionsauszahlung negativ und die darauffolgenden Cashflows positiv sind. Kommt es innerhalb der Zeitreihe zu negativen Cashflows, kann die Ermittlung mehrere Nullpunkte ergeben und kein eindeutiges Ergebnis liefern (Busse von Colbe et al. 2015, S. 127). Da es sich bei vorliegender Arbeit nicht um eine Normalinvestitionen im Sinne einer anfänglichen Auszahlung mit darauffolgenden Einzahlungen über den Betrachtungszeitraum handelt, kann der Nullpunkt nicht eindeutig bestimmt werden (Heesen 2016, S. 60). Deshalb wird in dieser Arbeit auf diese Größe verzichtet.

## (2) Kapitalwertmethode

Der Kapitalwertmethode liegt zugrunde, dass Ein- und Auszahlungen heute mehr wert sind als zu zukünftigen Zeitpunkten. Der Kapitalwert, auch Nettobarwert oder *Net Present Value (NPV)* genannt, berücksichtigt den heutigen Wert zukünftiger Zahlung durch Diskontierung dieser. Er ist die Summe der abgezinsten Einzahlungsüberschüsse abzüglich Investitionsauszahlungen zuzüglich des diskontierten Restwertes. Dementsprechend sollte sich bei positiven *NPV* für die untersuchte Investition gegenüber der Anlage am Kapitalmarkt entschieden werden. Vergleicht man mehrere Investitionen mittels der Kapitalwertmethode, sollte sich aus ökonomischer Sicht für die Investition entschieden werden, die den höchsten *NPV* erzielt (Heesen 2016, S. 28; Busse von Colbe et al. 2015, S. 111). Als Kalkulationszinssatz werden die gewichteten durchschnittlichen Kapitalkosten verwendet. Der Resterlös wird mit Null angenommen (vgl. Kapitel 7.1.1.2).

Die Formel zur Berechnung des Nettobarwertes ist folgende (Heesen 2016, S. 25ff; Busse von Colbe et al. 2015, S. 156ff):

$$NPV = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{E_t - A_t}{(1 + WACC)^t} + \frac{R_n}{(1 + WACC)^t} \quad (2)$$

Mit

$n$  = Betrachtungsdauer;

$t$  = Kalkulationsperiode;

$WACC$  = gewichtete durchschnittliche Kapitalkosten;

$R_n$  = Resterlös am Ende der Kalkulationsperiode

Die gewichteten durchschnittlichen Kapitalkosten, auf Englisch *Weighted Average Cost of Capital (WACC)* berechnen sich wie folgt (Heesen 2016, S. 136):

$$WACC_n = C_e * S_e + C_d * S_d * (1 - s) \quad (3)$$

Mit

$C_e$  = Eigenkapitalkostensatz (cost of equity);

$C_d$  = Fremdkapitalkostensatz (cost of debt);

$S_e$  = Anteil Eigenkapitalkosten (share of equity);

$S_d$  = Anteil Fremdkapitalkosten (share of debt);

$s$  = Steuersatz

Wobei sich  $C_e$  wie folgt durch die sogenannte Capital Asset Pricing Methode kalkuliert lässt (Heesen 2016, S. 129):

$$C_e = r_f + \beta * r_p \quad (4)$$

Mit

$r_f$  = Zinssatz für risikofreie Kapitalanlage;

$\beta$  = Betafaktor der Investition;

$r_p$  = Marktrisikoprämie;

Wobei die Formel für  $r_p$  Folgende ist (Heesen 2016, S. 125):

$$r_p = r_m - r_f \quad (5)$$

Mit

$r_m$  = erwartete Kapitalrendite

Es wurden unterschiedliche Kapitalkostenstrukturparameter für den Landwirtschafts- und Energiesektor angenommen. Damit Preissteigerungen sektorspezifisch berücksichtigt werden können, wurde der nominal  $WACC_n$  mit Preissteigerungsraten verrechnet. Auf Seiten der PV wurde die mittlere prozentuale Preisveränderung mit Hilfe des Verbraucherpreisindex der letzten 25 Jahre kalkuliert und auf Seiten der Landwirtschaft der Index der Einkaufspreise landwirtschaftlicher Betriebsmittel der letzten 25 Jahre herangezogen. Die Tabelle 13 gibt Aufschluss über die  $WACCs$  und den ihr zugrundeliegenden angenommenen Parameter.

Tabelle 13: Kalkulierte gewichtete Kapitalkosten (WACC) des PV-Sektor und Landwirtschaftssektors (Agri-Sektor), inklusive Inputparameter

WACC		Einheit	PV-Sektor	Agri-Sektor
Anteil des Eigenkapitals am Gesamtkapital	(S <sub>e</sub> )	[%]	0,26 <sup>(a)</sup>	0,70 <sup>(b)</sup>
Anteil des Fremdkapitals am Gesamtkapital	(S <sub>d</sub> )	[%]	0,74	0,30
Eigenkapitalkostensatz	(C <sub>e</sub> )	[%]	9,18	8,75
beta-Faktor der Investition	(β)	[ _ ]	2,09 <sup>(c)</sup>	1,97 <sup>(c)</sup>
Rendite risikoloser Kapitalanlagen	(r <sub>f</sub> )	[%]	1,74 <sup>(d)</sup>	1,74 <sup>(d)</sup>
erwartete Kapitalrendite	(r <sub>m</sub> )	[%]	5,30 <sup>(e)</sup>	5,30 <sup>(e)</sup>
Marktrisikoprämie	(r <sub>p</sub> )	[%]	3,56	3,56
Fremdkapitalkostensatz	(C <sub>d</sub> )	[%]	2,90 <sup>(f)</sup>	1,70 <sup>(g)</sup>
Unternehmenssteuer	(s)	[%]	0,30 <sup>(h)</sup>	0,30 <sup>(h)</sup>
gewichteter durchschnittlicher Kapitaleinsatz (nominal)	(WACC <sub>n</sub> )	[%]	3,87	6,48
Preissteigerung		[%]	1,38	2,09
gewichteter durchschnittlicher Kapitaleinsatz (real)	(WACC)	[%]	2,46	4,30
Quellen: (Quelle: (a) IfM Bonn 2020, (b) BMEL 2018a, (c) Onvalue GmbH & Co. KG 2021, (d) Bundesrepublik Deutschland – Finanzagentur GmbH 2021, (e) Fernandez 2020, (f) KfW 2021, (g) Landwirtschaftliche Rentenbank 2021, (h) KPMG 2021, (i) Destatis 2021c, (j) Destatis 2021d				

### (3) Dynamische Amortisation

Die Amortisationszeit gibt die Periode an, die benötigt wird, um eine Investition inklusive Verzinsung durch die Einzahlungen zurückzugewinnen. Dies ist der Fall, sobald der *NPV* dem Wert Null entspricht, denn dann sind die kumulierten abgezinsten Einzahlungsüberschüsse gleich der anfänglichen Investitionsauszahlung. Beim Vergleich verschiedener Investitionen anhand dieser dynamischen Investitionsrechnungsmethode sollte man sich aus ökonomischer Sicht für die mit der geringeren Amortisationsdauer entscheiden (Heesen 2016, S. 42ff; Busse von Colbe et al. 2015, S. 29).

Die Formel zur Berechnung lautet (Heesen 2016, S. 42):

$$NPV = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{E_t - A_t}{(1 + WACC)^t} + \frac{R_n}{(1 + WACC)^t} = 0 \quad (6)$$

bzw.

$$A_d = t_{K,neg} + \frac{K_{neg}}{K_{pos} + K_{neg}} \quad (7)$$

Mit

$t_{K,neg}$  = Periode, zu der der Kapitalwert das letzte Mal negativ war

$K_{neg}$  = letzter negativer Kapitalwert

$K_{pos}$  = erster positiver Kapitalwert

Um die Werte der letzten negativen und des ersten positiven Kapitalwertes zu erhalten, müssen die Barwerte der Cashflows über die einzelnen Perioden kumuliert werden.

### 6.3.3.2 Finanzierungsfähigkeit

Die Finanzierung eines Vorhabens kann dieses vor Herausforderungen stellen, wenn zum Zeitpunkt, zu dem der Schuldendienst fällig wird, nicht genügend liquide Mittel zur Begleichung bereitstehen. Zum Abbilden dieses Zusammenhangs wird in dieser Arbeit der Schuldendienstdeckungsgrad, auf Englisch *Debt Service Cover Ratio (DSCR)* herangezogen. Die Formel zur Berechnung ist folgende (Wöltje 2013, S. 539):

$$DSCR = \frac{CF}{C_K} \quad (8)$$

Mit

$CF$  = Cash Flow

$C_K$  = jährliche Kapitalkosten bzw. Schuldendienst

Die Differenz zwischen Einnahmen  $E_t$  und Ausgaben  $A_t$  wird als Cashflow bezeichnet (Heesen 2016, S. 29). Der Schuldendienst setzt sich aus der Schuldentilgung und der Zinszahlung zusammen (Wöltje 2013, S. 539). Wird der *DSCR* kleiner eins kann der Kreditforderung nicht entsprochen werden. Je größer *DSCR* wird, desto besser ist der Schuldner fähig Forderungen aus Schuldentilgung und Zinszahlungen zu entsprechen (Decker 2008, S. 110ff).

Als Kredit wird ein Tilgungsdarlehen der landwirtschaftlichen Rentenbank herangezogen. Es wird ein Darlehen innerhalb des Förderprogramms Energie vom Land angenommen. Die Laufzeit wird auf 16 Jahre angesetzt und die Tilgung erfolgt jährlich. Der Zins berechnet sich nach der Preisklasse, in die der Endkreditnehmer fällt. Für vorliegenden Fall wird eine Preisklasse C – D angenommen, weshalb die Obergrenze der Klasse C herangezogen wird. Der nominale Zins liegt damit bei 1,7 %. Das erste Jahr ist tilgungsfrei (Landwirtschaftliche Rentenbank 2021).

### 6.3.3.3 Einkommensstabilisierung

In verschiedener Literatur wird prognostiziert, dass Agri-PV dazu beitragen kann das Einkommen von Landwirten zu stabilisieren (Schindele et al. 2020; Scharf et al. 2021; Fraunhofer ISE 2020). In vorliegender Arbeit wird die Stärke der Einkommensschwankung der Fälle HN, APV-Agri, APV-T und APV-PV verglichen. Hierfür wird die jährliche Abweichung vom Mittelwert des Einkommens über 32 Jahre betrachtet. Je geringer und weniger häufig die Abweichungen sind, als desto weniger volatil ist das Einkommen. Darüber hinaus wird die Korrelation zwischen Einkommen und einflussnehmenden Faktoren bestimmt, um herauszuarbeiten, wodurch die größten Einkommensveränderungen entstehen und ob Agri-PV dazu beitragen kann, diese abzumildern.

### 6.3.4 Gestehungskosten von Strom und Äpfeln

Mit Hilfe der Stromgestehungskosten bzw. der *Levelized Costs of Electricity (LCOE)* kann man Stromerzeugungsanlagen miteinander vergleichen. Dazu werden die Anfangsinvestitionen sowie Ausgaben über die Laufzeit und durch die Menge an erzeugtem Strom in eben dieser Zeit dividiert. Die Entsorgung der Anlage bzw. der Restwert wird in vorliegender Betrachtung den Rückbaukosten gleichgesetzt (vgl. Kapitel 7.1.1.2) und fließt deshalb nicht mit ein. Sowohl die Ausgaben als auch die Strommenge werden aus finanzmathematischen Gründen mittels der *WACC* auf einen gemeinsamen Bezugspunkt diskontiert (Kost et al. 2021). Zur Diskontierung der Stromerträge wurde der *WACC* des Energiesektors gewählt. Der Kapitalwertmethode folgend werden diese mittels dieser Formel berechnet (Konstantin 2013):

$$LCOE = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{A_t}{(1 + WACC)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{M_{t,el}}{(1 + WACC)^t}} \quad (9)$$

Mit  
 $M_{t,el}$  = produzierter Strommenge in Periode in kWh

Diesem Ansatz folgend werden in dieser Arbeit außerdem die Gestehungskosten der Äpfel in €/kg errechnet, um die verschiedenen Anbaufälle gegeneinander vergleichen zu können. Hierzu werden die Anfangsinvestitionen mit den diskontierten Ausgaben aufsummiert und durch die diskontierten Erträge dividiert. Zur Abzinsung der

Ernteerträge wurde der WACC des Landwirtschaftssektors gewählt. Daraus ergibt sich folgende aus Formel (9) abgeleitete Formel:

$$LCOA = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{A_t}{(1 + WACC)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{M_{t,lw}}{(1 + WACC)^t}} \quad (10)$$

Mit

$LCOA$  = Levelized Costs of Apples

$M_{t,lw}$  = produzierter Menge an Äpfeln in Periode t in kg

### Querfinanzierung

Es ist denkbar, dass sich die Apfel- und die PV-Anlage innerhalb der Agri-PV querfinanzieren. In Stakeholder Konstellation Agri-PV 1 (vgl. Kapitel 6.3.1) könnten mögliche Kosteneinsparungen, die sich durch die Agri-PV als Schutzkonstruktionen in der Landwirtschaft ergeben, genutzt werden, um die Wirtschaftlichkeit des PV-Systems zu verbessern. Dadurch könnte das Aufstellen eines Agri-PV-Systems, das der Landwirt dann als Unterstützungs- und Schutzkonstruktion nutzen kann, für den PV-Investor attraktiver werden. Dies wird in vorliegender Arbeit einberechnet, in dem die Differenz der NPV von HN und APV-Agri über den Betrachtungszeitraum von den Betriebskosten der Agri-PV-Anlage immer dann abgezogen werden, wenn der  $CF_{APV-Agri}$  größer  $CF_{HN}$  ist. Denn nur dann steht überschüssiges Einkommen durch die Kosteneinsparung zur Verfügung. Als Formel ausgedrückt, bedeutet das Folgendes:

$$LCOE_{Querfin} = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{A_t}{(1 + WACC)^t} - \sum_{t=1}^n \frac{CF_{APV-Agri} - CF_{HN}}{(1 + WACC)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{M_{t,el}}{(1 + WACC)^t}} \quad (11)$$

Wenn  $CF_{APV-Agri} > CF_{HN}$

Mit

$LCOE_{Querfin}$  = Levelized Costs of Electricity mit Querfinanzierung

$CF_{HN}$  = Cash Flow des Untersuchungsfall HN

$CF_{APV-Agri}$  = Cash Flow des Untersuchungsfall APV-Agri

In Stakeholder Konstellation Agri-PV 2 wäre es denkbar, dass die Kosten der Landwirtschaft mittels der überschüssigen Einnahmen querfinanziert werden. Der Landwirt würde damit die Einnahmen aus der PV-Stromerzeugung nutzen, um die Kosten der Apfelproduktion in Teilen zu decken. Das ist möglich, sobald die

Stromerzeugungsanlage sich selbst refinanziert hat, das heißt die akkumulierten diskontierten  $CF_{APV-PV}$  größer null sind. Danach wird jährlich immer so viel querfinanziert, wie es der Höhe der Betriebskosten der Landwirtschaft im Agri-PV-System entspricht. Damit ist die Formel zur Berechnung der Querfinanzierung der Landwirtschaftsseite folgende:

$$LCOA_{Querfin} = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{A_t}{(1+WACC)^t} - \sum_{t=1}^n \frac{CF_{APV-PV}}{(1+WACC)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{M_{t,el}}{(1+WACC)^t}} \quad (12)$$

Wenn  $\sum_{t=1}^n \frac{CF_{APV-PV}}{(1+WACC)^t} > 0$ ; mit  $CF_{APV-PV} = [0; CF_{HN}]$

Mit

$LCOA_{Querfin}$  = Levelized Costs of Apples mit Querfinanzierung

$CF_{APV-PV}$  = Cash Flow des Untersuchungsfall APV-PV

## 7 Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsanalyse

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung dargelegt. Die den Berechnungen zugrundeliegenden Parameter können, wenn nicht im Folgenden dargelegt, dem Kapitel 6.3.3 entnommen werden. Im ersten Schritt wird auf die Struktur der Kosten und die Einnahmen eingegangen, um im nächsten Schritt die Profitabilität, Rentabilität und Finanzierungsfähigkeit sowie die Auswirkungen auf die Einkommensvolatilität zu bewerten. Dies wird für die Untersuchungsfälle HN, APV-Agri und APV-Total vorgenommen. Im Fokus soll die Landwirtschaft stehen.

### 7.1 Betriebswirtschaftliche Finanzkennzahlen

Die Ausgaben und Einnahmen werden getrennt nach Landwirtschaft und Stromerzeugung analysiert. In der Landwirtschaft werden Kosten und Einnahmen pro ha ausgedrückt. Für die Stromerzeugung werden diese pro kWp angegeben, da die installierte Leistung pro Fläche bei einer PV-FFA in der Regel höher ist (vgl. Kapitel 3.2) und ein Vergleich so sinnvoller ist. Um dennoch eine Vergleichbarkeit mit den landwirtschaftlichen Ergebnissen sicher zu stellen, werden in Kapitel 7.1.3 die Ergebnisse pro Hektar zusammengefasst.

#### 7.1.1 Ausgaben

Im Folgenden werden die *CAPEX* und *OPEX* nach Landwirtschaft und Stromerzeugung getrennt betrachtet. Eine Übersicht aller Kosten im Detail kann dem Anhang und dem externen Datenträger entnommen werden.

##### 7.1.1.1 CAPEX

###### **Landwirtschaft**

Die Kosten der Landwirtschaft sind für eine Baumgeneration angegeben und berechnen sich aus dem Durchschnitt der anfallenden Kosten innerhalb der beiden Baumgenerationen. Der höchste Anteil der Investitionskosten bei HN kann dem Pflanzmaterial, der Hagelschutzkonstruktion, sowie deren Implementierung zugeschrieben werden. Bei APV-Agri sind Pflanzmaterial, die Pflanzung sowie Tropf- und Frostschutzbewässerung die ausschlaggebenden Kostenfaktoren.

Durch die Implementierung einer Agri-PV-Anlage sinken die Investitionskosten im Bereich der Landwirtschaft um mehr als ein Viertel. Dies ist vor allem auf die Substitution des Hagelschutzsystems zurückzuführen, wodurch die Material- und Montagekosten

sinken. Eine leichte Kostensteigerung zieht der erhöhte Aufwand der Bodenbearbeitung vor der Pflanzung nach sich, da der Boden durch die Installation der Agri-PV deutlich mehr verdichtet wird und langwieriger wieder gelockert werden muss. Dies liegt nicht zuletzt am komplexeren Implementierungsprozess, für den es schwerer Maschinenbedarf (Abbildung 13).

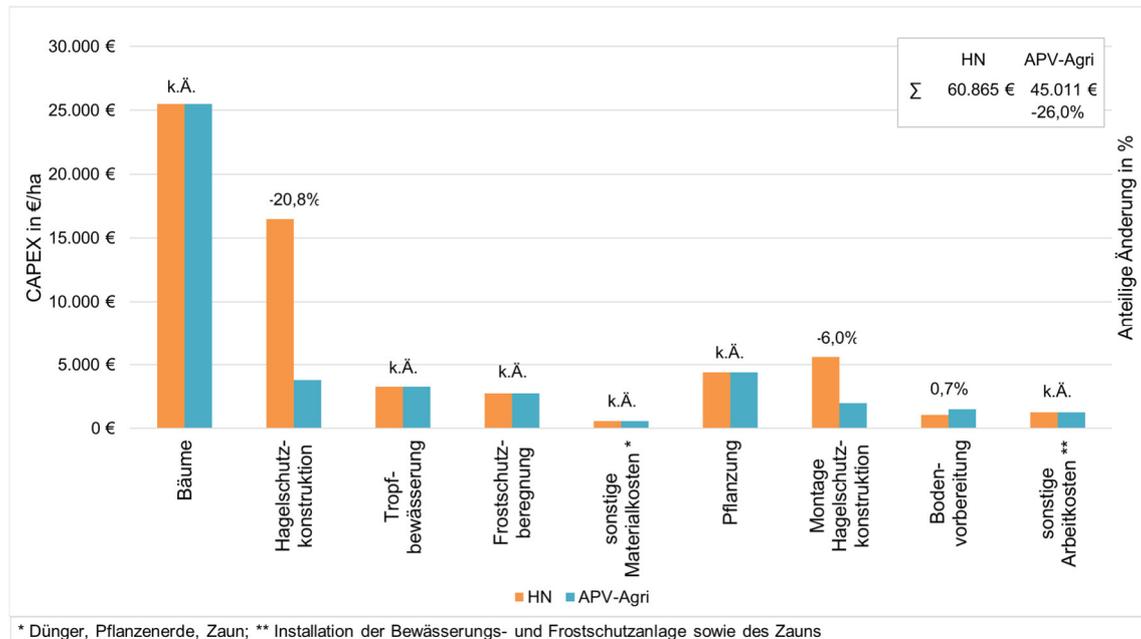


Abbildung 13: Durchschnittliche Investitionskosten (CAPEX) einer Baumgeneration von HN und APV-Agri in €/ha

## Stromerzeugung

Das Agri-PV-System ist pro installierte Leistung um etwa 94 % teurer als die PV-FFA. Für den überwiegenden Teil der Investitionskosten sind die PV-Module, die Unterkonstruktion sowie deren Installation und Flächenvorbereitung verantwortlich. Diese Kostenanteile sind auch jene, bei denen das PV-System der Agri-PV die größten anteiligen Kostensteigerungen im Vergleich zur klassischen PV-FFA aufweist. Gründe hierfür sind, dass Sondermodule eingesetzt werden, die Unterkonstruktion komplexer und höher, sowie die Installation bodenschonend vorgenommen werden muss. Auch die Projektierung und Systementwicklung eines solchen Systems liegt zum jetzigen Zeitpunkt höher als bei herkömmlichen PV-FFA. Eine gewisse Einsparung ergibt sich durch das Wegfallen eines benötigten Zauns im Falle der Agri-PV.

### 7.1.1.2 OPEX

#### Landwirtschaft

Die Kosten für Ernte, Vermarktung sowie Pflanzengesunderhaltung machen in beiden Untersuchungsfällen den größten Anteil der Betriebskosten in der Landwirtschaft aus. Durch die Agri-PV ergeben sich gesamt jährliche Kosteneinsparungen von 8,2 %. Wie in Abbildung 14 dargestellt, ist diese Reduzierung vor allem auf die niedrigeren Vermarktungskosten, Landentgelt und die Summe verschiedener anderer Betriebskosten zurückzuführen. Die Kosten für Vermarktung pro Hektar im Jahr sinken,

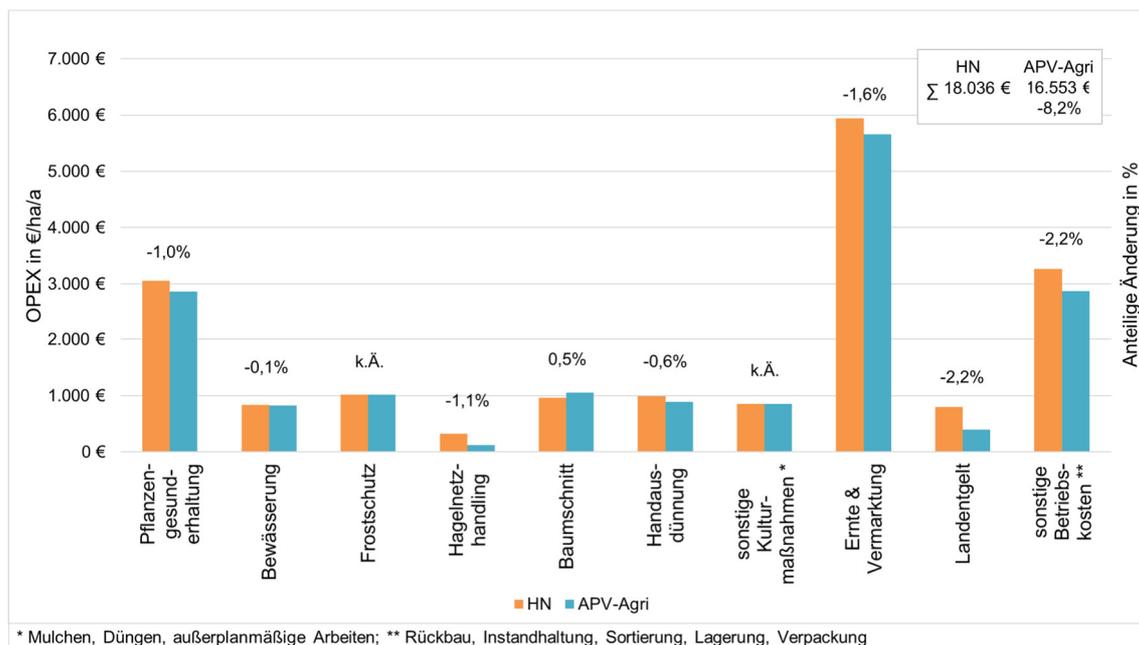


Abbildung 14: Jährliche Betriebskosten (OPEX) von HN und APV-Agri in €/ha/a

da der Anteil an hoch qualitativen Äpfeln verringert wird. Das Landentgelt reduziert sich, weil es zwischen PV-Anlagenbesitzer und dem Landwirt geteilt wird. Der Rückgang an sonstigen Betriebskosten kann vor allem durch die nicht mehr notwendige Rücklage an Instandhaltungskosten der Hagelschutznetzkonstruktion erklärt werden.

#### Stromerzeugung

Durch die kaufmännische Betriebsführung, das Landentgelt, sowie die Wartung und das Monitoring fallen die meisten Betriebskosten der PV-FFA an. Für die PV-Anlage des Agri-PV-Systems ändert sich dies durch das Sinken des Landentgelts (vgl. vorgegangener Abschnitt) sowie einen Anstieg der Wartungskosten. Denn durch die veränderte und höhere Aufständigung sowie die Notwendigkeit die im Agri-PV-System stehenden Bäume zu schützen, ergeben sich vermehrte Kosten für Wartung aber auch Reparatur. Auch die Rücklagen des Ersatzteilmanagements erhöhen sich, da

es im Schadensfall notwendig werden kann Komponenten auszutauschen, die nicht serienmäßig produziert werden, wie beispielsweise die Spezial-PV-Module. Die Rückbaukosten der Agri-PV-Anlage belaufen sich gegen Null, denn die entstehenden Kosten liegen etwa auf Höhe des Anlagen-Restwerts gemessen am verbauten Stahl. Die größten anteiligen Kosteneinsparungen im Vergleich zu einer PV-FFA ergeben sich aus den wegfallenden Kosten der Sicherheitsüberwachung, dem reduzierten Landentgelt und den reduzierten Kosten für Flächenpflege, die durch ein Entgelt an den Landwirt für die Bestellung der Felder vergolten wird (vgl. Kapitel 6.3.1).

### 7.1.2 Einnahmen

Nachfolgend werden die Einnahmen der Landwirtschaft für HN und APV-Agri betrachtet, sowie die der Stromerzeugung für APV-PV. Hierfür werden wiederum Durchschnittswerte einer PV-FFA, wie in Kapitel 6.2.1 dargestellt, herangezogen. Eine Übersicht aller Einnahmen im Detail kann dem Anhang und externen Datenträger entnommen werden.

#### Landwirtschaft

Betrachtet man die Zusammensetzung der Einnahmen im Ausgangsfall HN, werden die Unterschiede im erzielten Preis der Äpfel je nach Absatzweg und Qualität ersichtlich (vgl. Kapitel 6.1.3.2). Von den Gesamtapfelerträgen werden 10 % als Mostäpfel, 22,5 % als HKL II direkt und 67,5 % als HKL II genossenschaftlich vermarktet. Sie schlagen jedoch mit 3 % bzw. 37 % sowie 60 % der Einnahmen zu Buche.

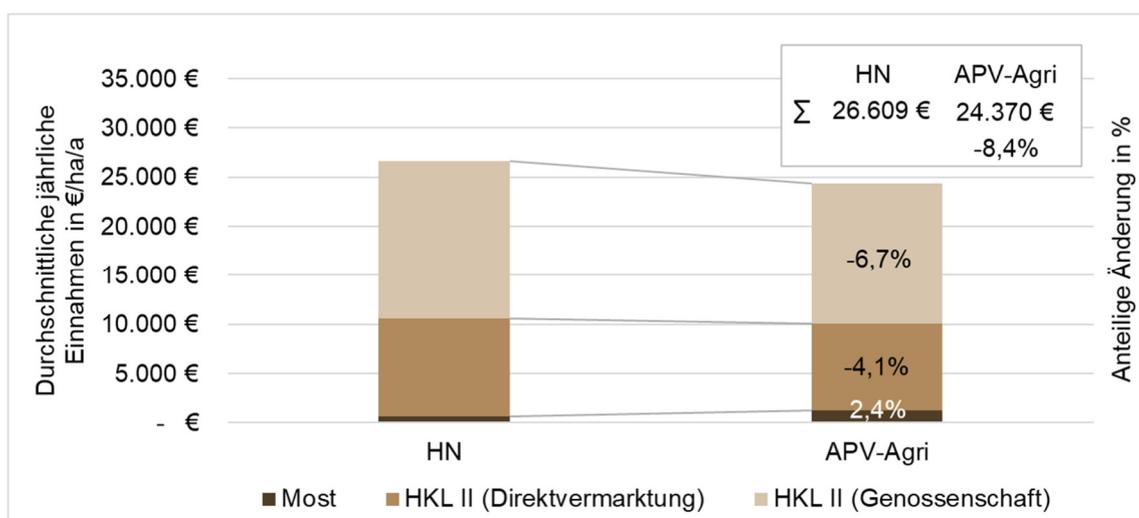


Abbildung 15: Durchschnittliche jährliche Einnahmen von HN und APV-Agri in €/ha/a

Durch Implementierung einer Agri-PV-Anlage verringern sich die jährlichen durchschnittlichen Einnahmen aus Apfelerträgen um insgesamt 2.239 €/ha/a. Dies lässt sich dadurch erklären, dass sich der Anteil an Qualitätsertrag und damit Äpfeln, die in HKL II verkauft werden können, reduziert (vgl. Kapitel 6.2.3). In Abbildung 15 ist diese Veränderung dargestellt.

### Stromerzeugung

Bei Betrachtung der Einnahmen auf Seiten der Stromerzeugung wird ersichtlich, dass der überwiegende Teil sowohl bei der PV-FFA als auch der Agri-PV durch die EEG-Vergütung generiert wird. Dies ist zum einen dadurch zu erklären, dass die EEG-Vergütung mit 20 Jahren über einen längeren Zeitraum greift, als die Vergütung durch den Strommarkt, die lediglich die restlichen 12 Jahre erfolgt. Zum anderen liegen die Vergütungssätze der EEG deutlich höher als der am Strommarkt erzielte Erzeugerpreis.

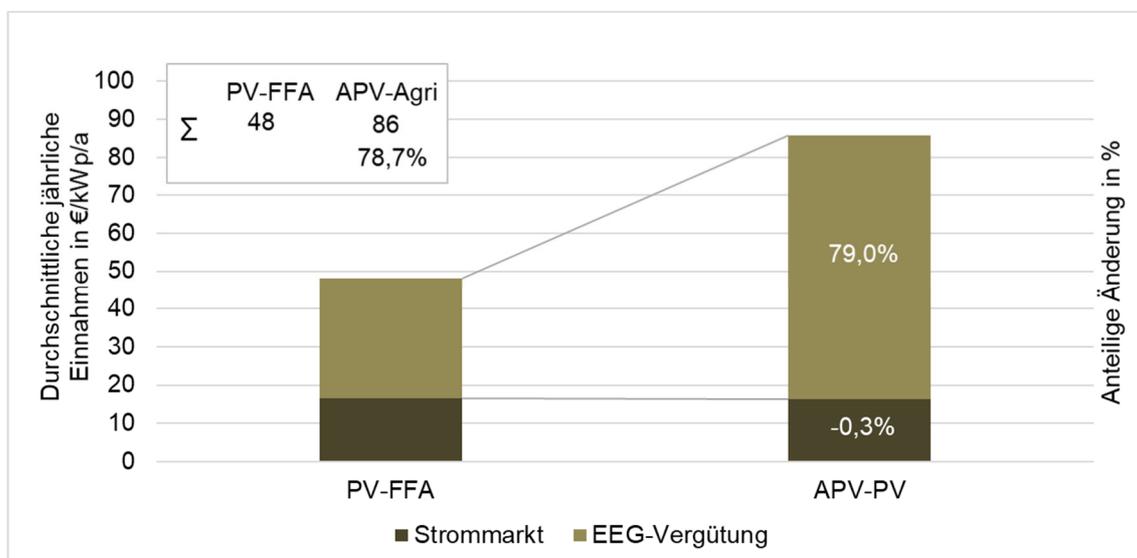


Abbildung 16: Durchschnittliche jährliche Einnahmen von APV-PV mit Referenz PV-FFA in €/kWp/a

Vergleicht man die Einnahmen pro installierte Leistung der Agri-PV mit denen der PV-FFA wird noch einmal die höhere EEG-Vergütung der Agri-PV ersichtlich. Wie in Abbildung 16 veranschaulicht, steigen diese um 79 % an. Eine minimale Reduktion von -0,3 % stammt von den am Strommarkt generierten Einnahmen, was auf einen höheren spezifischen Stromertrag von PV-FFA zurückzuführen ist (vgl. Kapitel 6.2.1).

Um zu verdeutlichen, was das Ausbleiben der EEG-Vergütung bzw. eine niedrigere EEG-Vergütung für Auswirkungen auf die jährlichen Einnahmen von APV-PV hätte, stellt

Tabelle 14 die EEG-Vergütungssätze sowie die jährlichen Aussageben von PV-FFA und APV-PV mit den Varianten „Basis“, „ohne EEG“ und „Verminderte EEG“ dar. „Basis“ bezieht sich dabei auf die in der Arbeit angenommenen Vergütungssätze, „ohne EEG“ verdeutlicht die Variante, in der keine EEG-Vergütung gezahlt wird und „verminderte EEG“ berechnet die jährlichen Einnahmen unter der Annahme, dass die EEG-Vergütung gerade so hoch ist, dass sich die PV-Anlage des Agri-PV-Systems nach 32 Jahren selber refinanziert.

*Tabelle 14: Vergleich verschiedener EEG-Vergütungssätze auf die jährlichen Einnahmen in €/kWp/a mit Referenz PV-FFA*

		PV-FFA	APV-PV Basis	APV-PV Ohne EEG	APV-PV Verminderte EEG
<b>EEG-Vergütung</b>	[ct/kWh]	5,03	11,17	0	8,43
<b>Jährliche Einnahmen</b>	[€/kWp/a]	48	86	43	69
<b>Anteilige Änderung (Referenz: PV-FFA)</b>	[%]		+ 78,7	- 9,4	+ 43,3

Es wird deutlich wie stark die Einnahmen von der erhaltenen Stromvergütung abhängig sind. Im Folgenden wird mit der in Kapitel 6.1.3.2 angenommenen Einspeisevergütung von 11,17 ct/kWh gerechnet. In Kapitel 8.1 wird unter anderem untersucht, welche Auswirkungen das Wegfallen der EEG-Vergütung auf die Wirtschaftlichkeit des Systems hat.

### 7.1.3 Vergleich der jährlichen Ausgaben und Einnahmen

Um einen besseren Vergleich zwischen den Kosten sowie Einnahmenverteilungen der Landwirtschaftsseite und der Stromerzeugungsseite zu erhalten, stellt Tabelle 15 die CAPEX, OPEX und Einnahmen noch einmal pro Fläche dar.

*Tabelle 15: Ausgaben und Einnahmen von HN, APV-Agri, APV-Total, PV-FFA und APV-PV in €/ha bzw. €/ha/a (nominale Werte)*

		HN	APV- Agri	PV-FFA	APV-PV	APV- Total
<b>CAPEX **</b>	[€/ha]	121.730	90.022	xxx	xxx	xxx
<b>OPEX *, **</b>	[€/ha/a]	18.036	16.553	xxx	xxx	xxx
<b>Einnahmen *, **</b>	[€/ha/a]	26.609	24.370	48.014	60.075	84.444

\* Durchschnitt über Betrachtungszeitraum von 32 Jahren; \*\* nominal

Im Agri-PV-System ist die Landwirtschaft (APV-Agri) für nur 9 % der *CAPEX*, jedoch für 59 % der *OPEX* und nur 29 % der Einnahmen des Gesamtsystems (APV-Total) verantwortlich. Dieses Gefälle verdeutlicht die Asymmetrie der Kapitalintensität zwischen Landwirtschaft und Stromerzeugung. Außerdem gibt es einen Hinweis auf den Unterschied der Arbeitsintensität und macht deutlich, dass die Einnahmen von der gleichen Fläche, wenn sie durch die Landwirtschaft generiert werden, deutlich geringer ausfallen als die durch Stromerzeugung.

Außerdem kann durch den Vergleich der Ausgaben und Einnahmen pro Hektar verdeutlicht werden, dass bei der Agri-PV im Gegensatz zur PV-FFA weniger Leistung pro Fläche installiert ist. Vergleicht man die Kosten pro Hektar der Untersuchungsfälle APV-PV und PV-FFA, zeigt sich, dass die *CAPEX* nur noch um 36 % höher und die *OPEX* um sogar 35 % geringer ist. Ebenso steigen die Einnahmen pro Hektar nur noch um 12 % (vgl. Tabelle 15). Würde man die Einnahmen der Agri-PV-Anlage mit der EEG-Vergütung der PV-FFA berechnen, käme man auf 31 % weniger Einnahmen pro Jahr, was eben dieser geringeren installierten Leistung der Agri-PV entspricht (vgl. Kapitel 6.2.1).

## 7.2 Gesamtwirtschaftliche Betrachtung

In diesem Abschnitt werden die Ausgaben und Einnahmen in ihrem Zeitverlauf betrachtet und ins Verhältnis mit dem durch das System produzierten Produkt gesetzt. Es werden die Untersuchungsfälle HN, APV-Agri sowie APV-Total miteinander verglichen. Teilweise wird APV-PV ausgewiesen und PV-FFA wieder als Vergleichsobjekt herangezogen.

### 7.2.1 Rentabilität und Profitabilität

Wie im letzten Abschnitt gezeigt, weist APV-PV im Vergleich zu APV-Agri höhere Anfangsinvestitionen und Einnahmen sowie niedrigere Betriebskosten auf. Jedoch zeigt der *ROI*, dass die Anfangsinvestition im Falle der APV-PV und somit auch in APV-Total überproportional höher sind im Gegensatz zum erzielten Gewinn. Während dieser in HN bei 12 % liegt, kommt APV-PV nur auf 6 % und ist damit nur knapp über der von PV-FFA. Die höchste Rentabilität, gemessen am *ROI*, weist jedoch der Fall APV-Agri auf (Tabelle 16).

Tabelle 16: Return on Investment von HN, APV-Agri, APV-Total sowie APV-PV

	Einheit	HN	APV-Agri	PV-FFA	APV-PV	APV-Total
ROI	[%]	12	16	5	6	6

Die Ergebnisse legen nahe, dass aus ökonomischer Sicht eine Entscheidung für die Agri-PV aus Sicht des Landwirts sinnvoll sein kann, gesamtwirtschaftlich betrachtet jedoch nicht. Doch da die Betrachtung die Zeitpunkte der Zahlungen sowie zukünftige Preisentwicklungen und alternative Investitionen außer Acht lässt, werden die Fälle im Folgenden anhand ihres *NPV* auf ihre Profitabilität hin untersucht.

Die Ergebnisse zeigen, dass der *NPV* in allen Fällen positiv ist, was bedeutet, dass überall eine Profitabilität gegeben ist. Diese ist sowohl für den Fall APV-Agri also auch

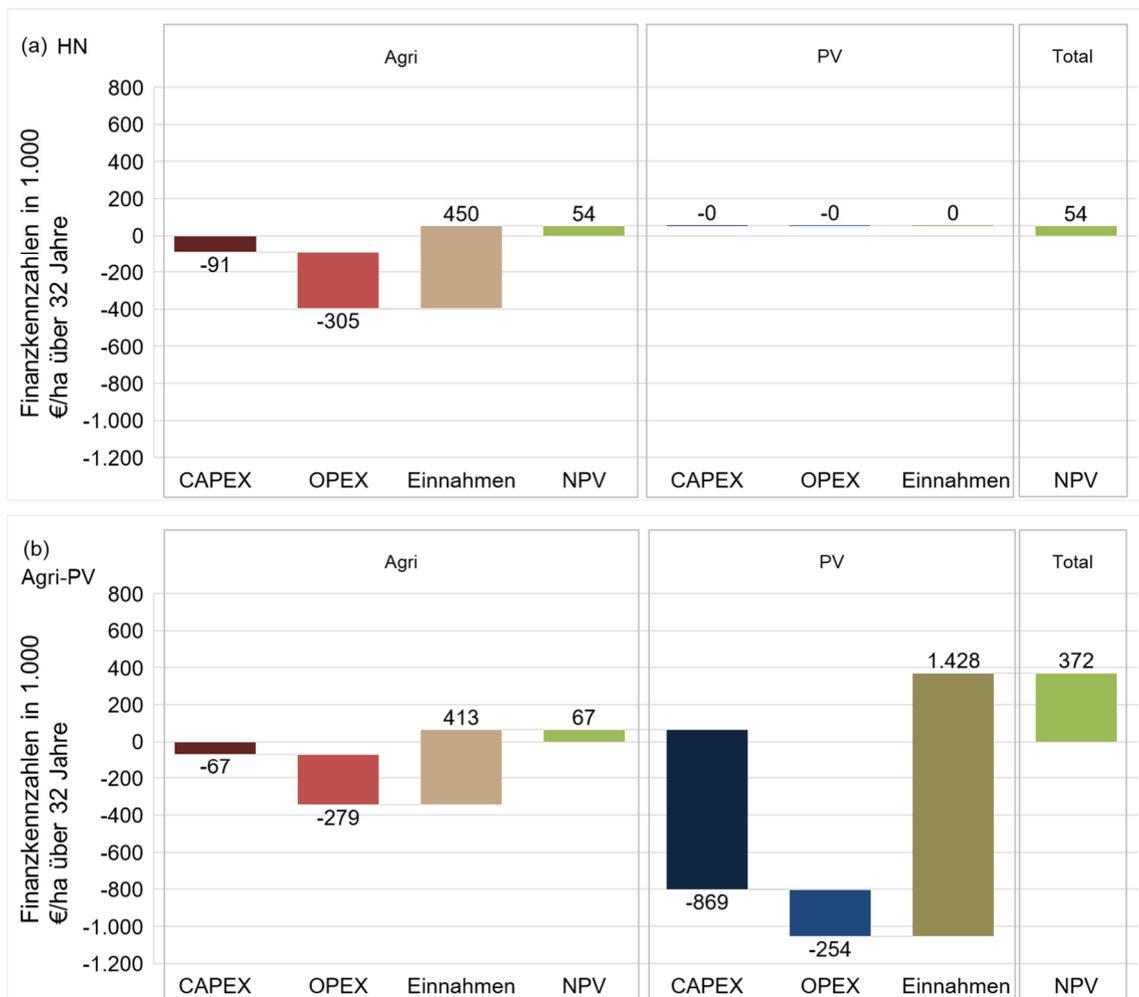


Abbildung 17: Diskontierte Gesamtausgaben und -einnahmen sowie Net Present Value (NPV) nach Landwirtschaft (Agri), Stromerzeugung (PV) und Gesamtsystem (Total) von (a) HN und (b) Agri-PV

APV-Total höher als für HN (Abbildung 17). Während dieser in HN bei 54.143 €/ha liegt, ist er in APV-Agri bei 67.078 €/ha und in APV-Total sogar bei 371.771 €/ha. Damit steigt der *NPV*, wenn man sich für den Anbau in einem Agri-PV-System entscheidet, um den Faktor 1,2 bzw. 6,9 im Vergleich zum Referenzfall HN an. Dies ist bei APV-Agri durch die sinkenden Investitions- und Betriebskosten sowie Einnahmen der Landwirtschaft und bei APV-Total den zusätzlichen Gewinnen aus der Stromerzeugung zuzuschreiben.

Summiert man die diskontierten Cashflows von Jahr 1 bis Jahr 32, wie in Abbildung 18 und Abbildung 19, auf, kann man die ökonomische Entwicklung über die Zeit besser beurteilen. Wie bereits festgestellt, ist die Anfangsinvestition der Fälle mit PV deutlich höher als die der Landwirtschaftsseite. Auch wurde bereits gezeigt, kann jedoch hier noch einmal verdeutlicht werden, dass der *NPV*, der dem Endwert der aufsummierten diskontierten Cashflows entspricht, ebenfalls höher, jedoch nicht direkt proportional zum höheren Kapitalinput ist.

Die **Amortisation** der Anlagen wird erreicht, sobald der Nullpunkt geschnitten wird. Dies geschieht im Fall von APV-Agri im Jahr 7 und bei HN im Jahr 11. APV-Total hat sich nach 15 Jahren und APV-PV nach 16 Jahren komplett amortisiert. Den höchsten *NPV* erreicht APV-Total (Abbildung 18).

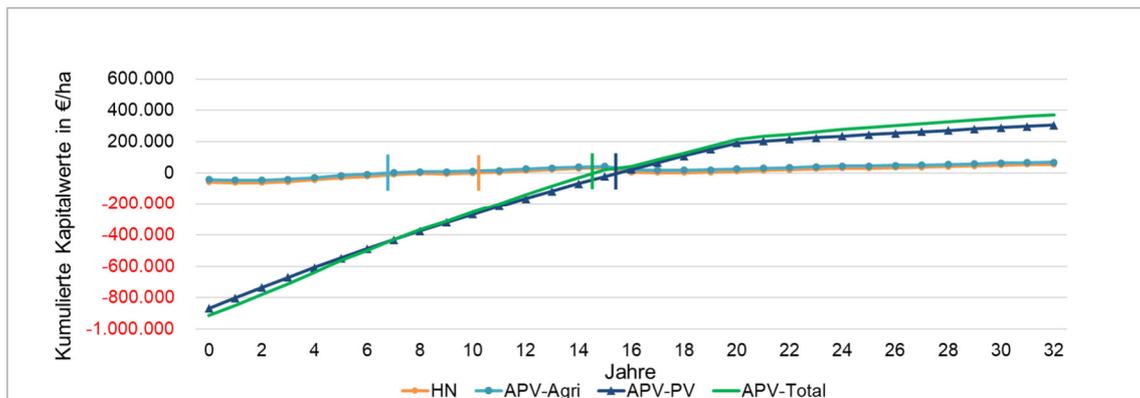


Abbildung 18: Kumulierte diskontierte Cashflows für HN, APV-Agri, APV-PV und APV-Total über 32 Jahre in €/ha mit markierten Amortisationszeitpunkten

In Abbildung 19 werden die Schwankungen der Cashflows auf Landwirtschaftsseite über die Standzeit der beiden Apfelgenerationen deutlich. APV-Agri hat über den kompletten Zeitverlauf eine höhere Rentabilität als HN. Ansonsten spiegeln die Verläufe ein ähnliches Bild wider. In den ersten beiden Jahren der jeweiligen Apfelgeneration sind die Bäume noch nicht im Vollertrag, wodurch die Cashflows negativ sind. Danach steigen sie bis zum Ende der Apfelgeneration an. Zu einer Absenkung kommt es im Jahr 16 durch die notwendigen Investitionen der zweiten Apfelgeneration sowie im Jahr 9 bzw. 25, in welchen die Hagelnetze getauscht werden müssen.

Einen Überblick über die NPVs sowie das Amortisationsjahr der verschiedenen Untersuchungsfälle gibt zusammenfassend die Tabelle 17.

Tabelle 17: Net Present Value (NPV) und Amortisationszeit von HN, APV-Agri, APV-Total sowie APV-PV in €/ha bzw. Jahren

	Einheit	HN	APV-Agri	APV-PV	APV-Total
<b>NPV</b>	[€/ha]	54.143	67.078	304.693	371.771
<b>Amortisation</b>	[a]	11	7	16	15

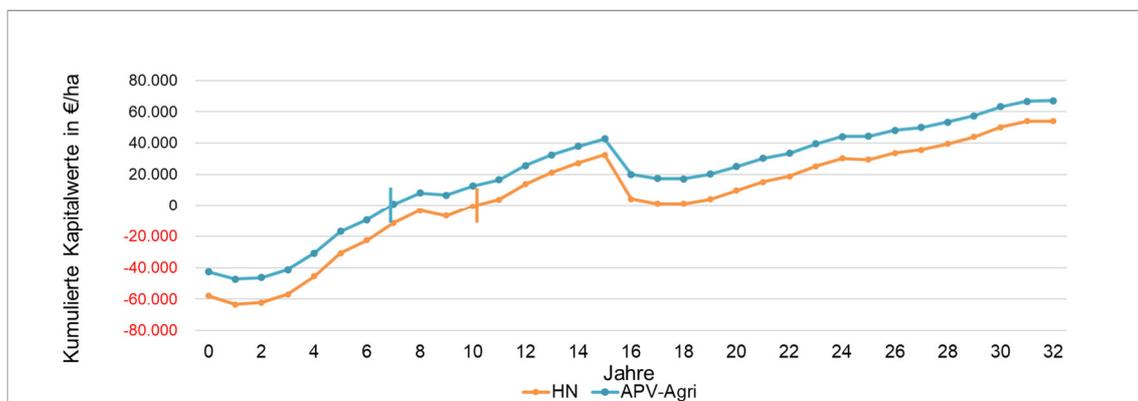


Abbildung 19: Kumulierte diskontierte Cashflows von HN und APV-Agri über 32 Jahre in €/ha mir markierten Amortisationszeitpunkten

### Zwischenfazit

Aufgrund der oben dargelegten Ergebnisse kann man sagen, dass es bei einer Entscheidung für oder gegen die Implementierung eines Agri-PV-Systems darauf ankommt, welche Zielgrößen als ausschlaggebend angesehen werden. Ist eine möglichst hohe Rentabilität und schnelle Rückzahlung des Investments gewünscht, sollte sich für APV-Agri entschieden werden. Wird eine möglichst hohe Profitabilität angestrebt, sollte APV-Total gewählt werden. Wie jedoch in Kapitel 7.1.2 gezeigt, ist dies

auch von der angenommenen Stromvergütung abhängig. Welcher der Agri-PV-Fälle wirtschaftlich sinnvoller ist, hängt somit auch davon ab, aus der Sicht welches Akteurs man die Agri-PV bewertet.

### 7.2.2 Gestehungskosten und Querfinanzierung

Innerhalb des Systems werden zwei unterschiedliche Güter erzeugt, Äpfel und Strom. Daher werden im Folgenden die Produktionskosten pro erzeugte Einheit wieder getrennt nach Landwirtschaft und Stromerzeugung analysiert.

#### Landwirtschaft

Ein Vergleich der Gestehungskosten der Äpfel zeigt, dass deren Produktion für den Landwirt im Agri-PV-System um ca. 12 % kostengünstiger im Vergleich zu HN ist (Abbildung 20). Dies war zu erwarten, denn die Erntemenge der erzeugten Äpfel wird durch die Agri-PV nicht verändert (vgl. Kapitel 6.2.3). Die Gestehungskosten von APV-Total lägen um etwa das 3,7-fache höher als bei HN. Jedoch muss beachtet werden, dass die Gestehungskosten für Äpfel den erzeugten Strom nicht miteinbeziehen und diese Kenngröße für APV-Total ohne weitere Interpretationsgrößen nicht allzu aussagekräftig ist. Ohne Stromerzeugungsabsichten wäre eine Agri-PV-Anlage unverhältnismäßig teuer. Ungeachtet dessen wird auch in diesem Vergleich die hohe Kapitalintensität sichtbar. Am kostengünstigsten ließen sich Äpfel in einem Szenario produzieren, in dem die überschüssigen Einnahmen aus der Stromproduktion den Kosten der Apfelproduktion zugutekommen, wie der Fall APV-Agri-Querfinanzierung

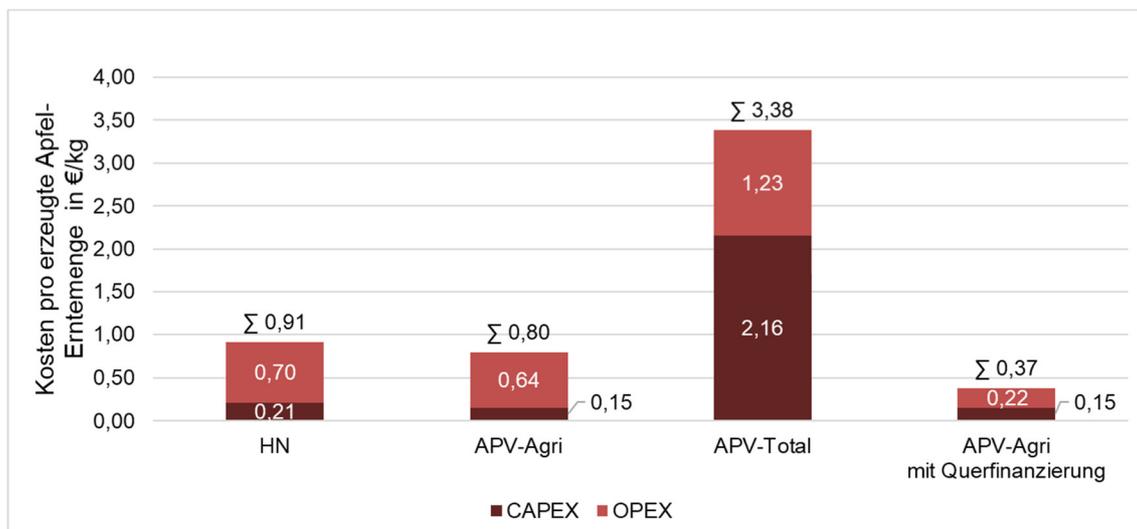


Abbildung 20: Gestehungskosten (LCOA) unterteilt nach CAPEX und OPEX pro erzeugte Apfel-Erntemenge über 32 Jahre von HN, APV-Agri, APV-Total und APV-Agri-Querfinanzierung in €/kg

verdeutlicht. Hier könnten die Gestehungskosten um etwa 59 % im Gegensatz zu HN gesenkt werden.

### Stromerzeugung

Bei der Untersuchung der Stromgestehungskosten wurden neben PV-FFA auch eine kleine PV-Dachanlage nach Fraunhofer ISE (2020) herangezogen. Die *LCOE* der Agri-PV-Anlage liegen um etwa 40 % höher als die Stromgestehungskosten herkömmlicher PV-FFA. Verglichen mit kleinen PV-Dachanlagen, die durchschnittlich *LCOE* von etwa 9,80 ct/kWh aufweisen, würde die Agri-PV jedoch kosteneffizienter Strom erzeugen. Eine Querfinanzierung durch Mehrgewinne aus der Landwirtschaft im Agri-PV-System, kann die *LCOE* nicht in einen konkurrenzfähigen Bereich zu PV-FFA verschieben, denn die Querfinanzierung würde lediglich eine Reduktion um 0,17 ct/kWh herbeiführen.

## 7.3 Zahlungsfähigkeit

Problematisch für eine Investitionsentscheidung ist außerdem, inwieweit sich das Vorhaben finanzieren lässt. Hierzu wurde anhand des *DSCR* von HN, APV-Agri sowie APV-Total untersucht, inwieweit sich der Schuldendienst aus Sicht des Landwirtes decken ließe. Wenn der Wert über 1 liegt, bedeutet dies, dass der Cashflow größer war als der entsprechende Schuldendienst im jeweiligen Jahr. Je größer der *DSCR*, desto besser kann der aufgenommene Kredit zurückgezahlt werden. Der Kredit hat hier eine Laufzeit von 16 Jahren, die sich an der Standzeit einer Apfelgeneration orientiert (vgl. Kapitel 6.3.3.2). Die Ergebnisse zeigen, dass der Landwirt den Kredit am Besten in APV-Agri zurückzahlen kann. Doch auch in HN und APV-Total ist eine Finanzierung möglich (Tabelle 18).

*Tabelle 18: Schuldendienstdeckungsgrad von HN, APV-Agri sowie APV-Total*

	HN	APV-Agri	APV-Total
<b>DSCR</b>	1,15	1,63	1,06
* Durchschnitt über 20 Jahre Kreditlaufzeit			

## 7.4 Einkommensstabilität

Untersucht werden soll, ob sich die Agri-PV einkommensstabilisierend auswirkt. Betrachtet wird dies anhand der absoluten sowie relativen Einkommensveränderung

über den gesamten Betrachtungszeitraum im Verhältnis zur Ertrags- bzw. Preisänderung.

Das Einkommen wird in beiden Sektoren sowohl durch den Erzeugerpreis als auch die Ertragsmenge bestimmt. Um die Haupteinflussgrößen auf die Einnahmen zu ermitteln, wurde die Korrelation der Preis- bzw. Ertragsschwankungen mit den Einnahmen berechnet. Die Ergebnisse, die in Tabelle 19 zusammengefasst sind, zeigen, dass in der Landwirtschaft der Apfelertrag den ausschlaggebenden Faktor auf die Einnahmen ausmacht. In Fällen mit Stromerzeugung wirkt sich der Strompreis am stärksten aus. Betrachtet man das Agri-PV-System als Ganzes, fällt auf, dass die Einnahmen insgesamt dominierend durch Faktoren der PV-Seite beeinflusst werden. Dies wird nachfolgend über den Zeitverlauf analysiert.

*Tabelle 19: Korrelation zwischen Ertragsmengen sowie Erzeugerpreisen und den Einnahmen von HN, APV-Agri, APV-PV sowie APV-Total*

<b>Korrelation</b>	<b>HN</b>	<b>APV-Agri</b>	<b>APV-PV</b>	<b>APV-Total</b>
<b>Apfelertrag</b>	0,966	0,965	-	0,156
<b>Preis Most</b>	0,367	0,382	-	0,174
<b>Preis HKL II (genoss.)</b>	0,302	0,305	-	0,000
<b>Preis HKL II (Direktvermarktung)</b>	0,000	0,000	-	0,084
<b>Stromertrag</b>	-	-	0,862	0,811
<b>Strompreis</b>	-	-	0,999	0,926

### **Absolute Einkommensentwicklung**

Abbildung 21 zeigt den Verlauf der jährlichen Einnahmen über 32 Jahre im Vergleich zum Ertrag aus Landwirtschaft und Stromerzeugung und Abbildung 22 im Vergleich zu den jeweils erzielten Preisen. Damit eine Darstellung innerhalb eines Diagramms möglich ist, wurde der Ertrag der PV in 10 MWh/ha/a und der erzielte Preis in 100 €/MWh angegeben.

Die **Erträge** aus der Stromerzeugung sind deutlich konstanter als die der Landwirtschaft. Obwohl sie eine Veränderung durch den Leistungsabfall der PV-Module von etwa 56 MWh/ha/a zwischen Jahr 1 und 32 aufweisen, ist diese Veränderung im Gegensatz zur Landwirtschaft nahezu linear. Die Schwankung der Ertragsmengen der Landwirtschaft spiegeln sich im Verlauf der Einnahmen wider. Dieser Trend ist im Fall HN, APV-Agri sowie APV-Total ersichtlich. Die Einnahmen in APV-Total liegen jedoch

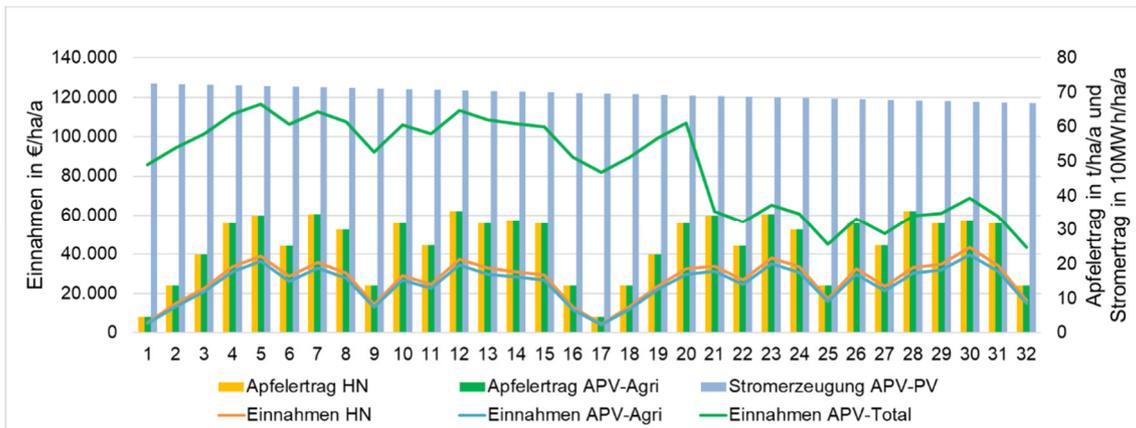


Abbildung 21: Einnahmen in €/ha/a und Apfel- und Stromertrag in t/ha/a sowie Stromertrag in 10MWh/ha/a über 32 Jahre von HN und APV-Total

deutlich höher und im Jahr 20 ist ein starker Abfall zu erkennen (vgl. Abbildung 21), der sich nicht anhand einer Ertragsänderung, sondern durch eine Preisänderung aufgrund der wegfallenden EEG-Vergütung erklären lässt (Abbildung 22).

Um eine übersichtlichere Darstellung der **preisbedingten** Auswirkungen zu erreichen, wurden die verschiedenen Preise der Landwirtschaft für Most, HLK II Direktvermarktung und HKL II Genossenschaft in gewichteten, durchschnittlichen Apfelpreisen verrechnet. Diese schwanken ab dem Betrachtungsjahr 21 deutlich stärker, da hier die Marktsättigung erreicht wurde (vgl. Kapitel 6.1.3.2). Jedoch sind die Auswirkungen auf die Einkommensvolatilität verhältnismäßig gering und entsprechend bleiben die Einkommensschwankungen von Jahr 17 bis 32 mit denen der Jahre 1 bis 16 vergleichbar. Ab dem Jahr 21 kann auch beim Strompreis eine Preisschwankung festgestellt werden. Vergleicht man die Schwankungen der Jahre 21 bis 32 von APV-Total und APV-Agri stellt man fest, dass diese kaum Einfluss nehmen.

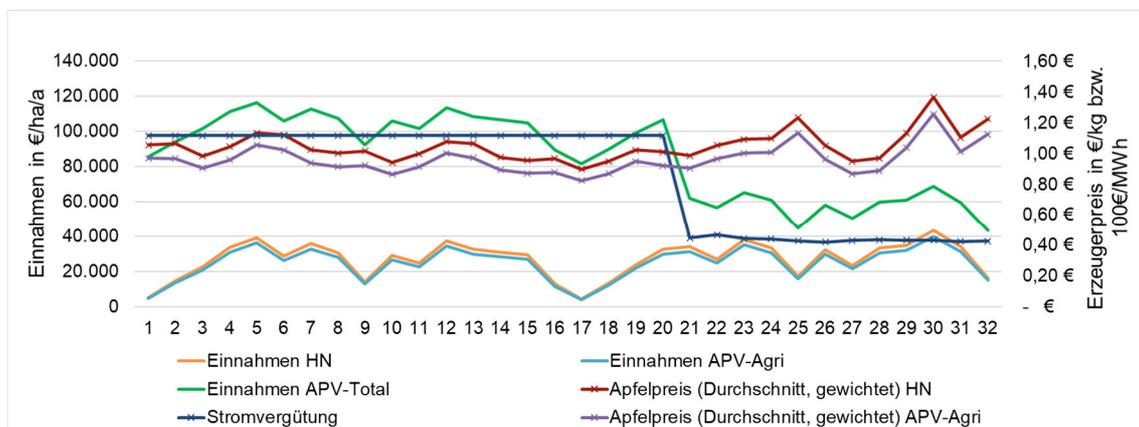


Abbildung 22: Einnahmen in €/ha/a und Erzeugerpreis für Apfel in €/kg bzw. für Strom in 100€/MWh über 32 Jahre von HN und APV-Total

Diese Erkenntnisse verdeutlichen den unterschiedlichen Einfluss durch Ernteertrag und Erzeugerpreise auf die Einnahmen, die am Anfang des Abschnittes anhand der errechneten Korrelationen dargelegt wurden. Wie die Graphen außerdem zeigen, ist zwischen HN und APV-Agri kaum eine Änderung der Einkommensschwankung erkennbar und auch bei APV-Total können Einkommensschwankungen über die Laufzeit abgelesen werden.

Diese Betrachtung lässt jedoch den **relativen Einfluss** außer Acht. Um dies zu untersuchen, wurde zum einen die prozentuale jährliche Abweichung vom Mittelwert der Einnahmen über 32 Jahre und zum anderen die prozentuale Änderung zum Vorjahr herangezogen. Die Ergebnisse können der Tabelle A- 1 im Anhang entnommen werden und zeigen, dass die Fälle HN sowie APV-Agri die größte und APV-Total die geringste Spannweite der Schwankung um den Mittelwert aufweisen. So sind die prozentualen Schwankungen in HN fast doppelt so hoch wie in APV-Total. Betrachtet man die Abweichungen der Einnahmen eines Jahres bezogen auf die Einnahmen des jeweiligen Vorjahres, weisen die Fälle HN sowie APV-Agri ebenfalls die größte Spannweite auf. Die Spannweite von APV-Total ist geringer. Die Volatilität von APV-Agri beträgt Zweidrittel der Volatilität von APV-Total, ausgedrückt in der Änderung zum Vorjahreswert (vgl. Tabelle A- 1 im Anhang). Doch nicht nur die Höhe der Schwankungen, sondern auch die Häufigkeit ihres Auftretens ist bei der Bewertung der Einkommensstabilisierung von Interesse. Abbildung 23 zeigt die Verteilung der prozentualen Veränderung des Einkommens zum Vorjahreswert nach ihrer Häufigkeit unterteilt in Klassen, die 20 %-Schritten folgen. Der Bereich von - 20 % bis + 20 % wurde der Übersichtlichkeit halber in 10 %-Schritten dargestellt. Es wird ersichtlich, dass sich APV-Total einer Normalverteilung annähert, während HN und APV-Agri deutlich breiter gestreut sind.

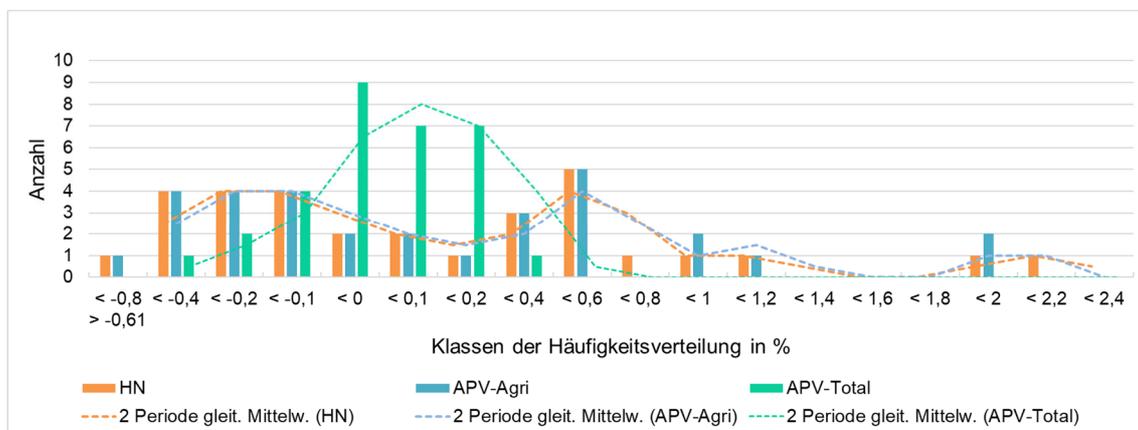


Abbildung 23: Häufigkeitsverteilung der prozentualen Einkommensschwankung in HN, APV-Agri und APV-Total

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass durch Hinzunahme der Einnahmequelle aus Stromverkäufen die Einnahmen nicht nur in ihrer Schwankungsintensität, sondern auch unvorhersehbare Schwankungen zwischen den Jahren verringert werden. Ohne Hinzunahme der Stromeinkünfte ergibt sich hingegen keine signifikante Änderung. Somit wirkt sich APV-Total einkommensstabilisierend gegenüber HN aus, APV-Agri erfährt diese Wirkung jedoch nicht.

## 8 Szenarien-Analyse und Potenzialabschätzung

Dieses Kapitel untersucht die Agri-PV im Apfelanbau auf Grundlage der bisherigen Erkenntnisse auf ihr zukünftiges Entwicklungspotenzial sowohl anhand einer Szenarien-Analyse als auch einer theoretischen Potenzialanalyse.

### 8.1 Szenarien-Analyse

In diesem Abschnitt werden die getroffenen Modellannahmen des Agri-PV-Systems, die mit hoher Unsicherheit einhergehen oder sich mittel- bzw. langfristig ändern könnten, in zwei Szenarien geprüft. Hierbei untersucht das pessimistische Szenario 1 (S1-P) die Szenarienparameter unter der Annahme, dass sich die Umstände für die Agri-PV nicht zuträglich gestalten werden, das optimistische Szenario 2 (S2-O) geht vom Gegenteil aus. Ausgangspunkt sind die Untersuchungsfälle APV-Agri, APV-PV und APV-Total, hier als Basisszenario zusammengefasst.

#### 8.1.1 Parameter

Die Variation der untersuchten Parameter wird im folgenden Abschnitt dargelegt und ist in Tabelle 18 zusammengefasst.

#### Auswirkungen auf die Landwirtschaft

Das Ziel des Forschungsprojektes Agri-PV-Obstbau ist es unter anderem, eine vollständige **Substitution von Hagelnetzen** zu erreichen. Dies könnte Einsparungspotenziale sowohl in *CAPEX*, durch Materialkosten, als auch in *OPEX*, durch wegfallendes Hagelnetzhandling, nach sich ziehen. In S2-O wird davon ausgegangen, dass eine Reduktion um 100 % möglich sein wird. S1-P hingegen nimmt die Reduktion von 35 % entsprechend dem Basisszenario an. Um einen vollständigen Ersatz zu ermöglichen, ist es notwendig, den Spalt zwischen den Baumreihen zu verringern, sodass Streuhagel weniger wahrscheinlich die Pflanzen und Früchte erreicht (Experteninterviews 2021). Dies könnte durch größere PV-Module, die mehr Fläche abschirmen, erzielt werden. Doch es muss beachtet werden, dass die Verschattung durch die Module nicht zunehmen sollte, das heißt die Anzahl der PV-Zellen im Modul muss konstant bleiben. Die Kosten für PV-Module und Befestigung würden steigen. Dies ist in S2-O berücksichtigt. Eine weitere Einsparung könnte sich durch eine **bodenschonendere Implementierung** ergeben. Dabei wäre das Verwenden von Bodenplatten, eine Sensibilisierung der Arbeiter oder auch eine Weiterentwicklung von

Maschinen denkbar. Wichtig für eine Reduktion der Bodenverdichtung ist, die Maschinen nur in Fahrspuren und nicht zwischen den Pflanzreihen fahren zu lassen. Eine gezielte Schonung der Bodenpartien kann durch eine entsprechende Schulung der Installateure erreicht werden. Hierdurch würden sich die Kosten der Bodenbearbeitung nach der Implementierung reduzieren (Zimmer, persönliche Mitteilung 2021b). Die Bodenbearbeitung, die im Basisszenario 2,5-mal so hoch war wie unter Hagelnetzen, wird in S2-O auf den Faktor zwei reduziert. S1-P geht davon aus, dass eine solche Entwicklung nicht stattfindet. Die Einschätzungen zu einem möglichen **Frostschutz** durch die Agri-PV, die dieser Arbeit zugrunde liegen, waren indifferent (vgl. Kapitel 6.2.3). In S2-O wird eine Reduktion von 5 % der Frostschutzkosten in *CAPEX* sowie *OPEX* angenommen, S1-P bleibt bei der Basisannahme von 0 %. Ebenso gab es unterschiedliche Einschätzungen bezüglich der Auswirkungen auf den Qualitätsanteil (vgl. Kapitel 6.2.3), weshalb S1-P von einem Mostapfelanteil von 15 % und S2-O von 5 % ausgeht.

### **Variation des implementierten PV-Systems**

Die größten zukünftigen Einsparungspotenziale der *CAPEX* bei Agri-PV werden in der Unterkonstruktion des PV-Systems, seiner Installation, der Weiterentwicklung und Kostensenkung von PV-Modulen sowie dem Baugenehmigungsverfahren angenommen. Mit zunehmender Verbreitung der Technologie könnten materialoptimierte und dadurch kostengünstigere **Unterkonstruktionen** entwickelt werden, wie beispielsweise Seilsysteme (Agostini et al. 2021). Im Gegensatz zum Ackerbau, wo sich solche Systeme durch ihre Abspannung negativ auf die Bewirtschaftungsweise oder Flächennutzung auswirken könnten, sollte dies im vorliegenden Anwendungsfall kein Problem darstellen, da im Apfelanbau durch Hagelnetze mit ebensolchen Abspannungen bereits heute umgegangen wird. Da es ein solches Agri-PV-System für den Obstbau jedoch noch nicht gibt und eine Abschätzung der Kostenveränderung dadurch schwer möglich ist, wird in dieser Analyse davon abgesehen, dieses Einsparungspotenzial mit aufzunehmen. Die Kosten der **Montage** könnten sich mit zunehmender Marktdurchdringung durch die Vernetzung im Sinne von Maschinenringen, wie sie heute in der Landwirtschaft Praxis sind (Maschinenringe Deutschland o. J.), reduzieren. Durch vorhandenes Know-how sowie geteilte Arbeitskräfte und Maschinen zur Installation könnten sich somit die Kosten senken. In S2-O wird das mit einer Absenkung an Montagekosten von - 10 % im Gegensatz zum Basisszenario einberechnet. Mit zunehmender **Marktdurchdringung** der Agri-PV-

Technologie und damit höherer Stückzahl an **Sondermodulen**, könnte sich deren Preis senken (vgl. Kapitel 3.4.1.2). Während S1-P davon ausgeht, dass dies nicht eintritt, wird bei S2-O ein Skaleneffekt von - 10 %, wie im Basisszenario, einberechnet. Darüber hinaus können mit fortschreitender Weiterentwicklung der PV-Technologie die Kosten pro kWp des Agri-PV-Systems sinken. Dies ist einerseits durch eine höhere Belegung der Module mit PV-Zellen möglich, was jedoch auch eine erhöhte Verschattung mit sich bringen würde und nach momentanem Kenntnisstand im Apfelanbau nicht empfehlenswert wäre (vgl. Kapitel 6.2.3). Andererseits könnte dies bei gleichbleibender Anzahl an PV-Zellen durch eine Erhöhung ihrer **Effizienz** geschehen. Denn es wird prognostiziert, dass die Effizienz von PV-Zellen weiter steigen wird. Laut VDMA (2020) wird die Leistung von PERC p-Type Modulen, wie sie in dem untersuchten System verwendet wurden, bis 2030 um 12,5 % ansteigen. Ausgehend von 225 W pro Modul würde das zu etwa 250 W pro Modul bei gleichbleibender Verschattung führen. Jedoch steigen hierdurch auch die Kosten pro Modul. In S2-O wird davon ausgegangen, dass diese 250 W-Module installiert sind. S1-P bleibt bei der Basissituation.

### **Regulatorische Rahmenbedingungen**

Im Basisszenario wurde angenommen, dass Förderungen von Hagelnetzen nicht zum Tragen kommen, da die Zukunft der GMO-Mittel mit Unsicherheiten behaftet ist (vgl. Kapitel 5.2.1). Sollte jedoch weiterhin eine Fördermöglichkeit bestehen, wäre das ein Nachteil für die Installation von Agri-PV-Anlagen im Vergleich zu Hagelschutznetzen. Deshalb wurde eine mögliche Förderung in S1-P angenommen, bei der 50 % der Kosten einer Hagelschutzkonstruktion gefördert werden können und als Opportunitätskosten einberechnet. S2-O geht wie das Basisszenario von keiner Fördermöglichkeit aus. Eine in vorliegender Arbeit angenommene EEG-Förderung ist davon abhängig, ob sich die betrachtete Anlage in der jeweiligen Ausschreibung durchsetzen kann. Da dies zum momentanen Zeitpunkt nicht absehbar ist (vgl. Kapitel 5.2.2), wird im S1-P davon ausgegangen, dass keine EEG-Vergütung zum Tragen kommt, sondern ein Power Purchase Agreement (PPA) greift, was sich nach dem durchschnittlichen Strompreis der kommenden Jahre richtet. Ein Szenario, das genau die EEG-Vergütung annimmt, die notwendig wird, damit sich das PV-System der Agri-PV selbst refinanziert (vgl. Kapitel 7.1.2), wird hier nicht herangezogen. Denn dieses würde keinen zusätzlichen Erkenntnisgewinn bringen, da die Seite der PV auf Null hinauslaufen würde und die Seite der Landwirtschaft durch keine Veränderung betroffen wäre. Die Wirtschaftlichkeit dieses Falls lässt sich bei APV-Agri ablesen. In S2-O wird der Höchstwert, der innerhalb

der InnAusV erhalten werden kann, angenommen. Um eine Anpassung auf die Zukunft zu gewährleisten, wird die jährliche Reduktion von 1 % vom Vorjahres-Höchstwert (vgl. § 10 InnAusV) berücksichtigt und damit der Höchstwert des Jahres 2030 errechnet. Damit liegt die Vergütung in S2-O bei 11,09 ct/kWh und damit etwas unter der des Basisszenarios. Momentan entfällt für Landwirte bei Implementierung einer Agri-PV-Anlagen der Anspruch auf EU-Direktzahlungen, was in vorliegendem Modell durch den PV-Anlagen-Betreiber an den Landarbeiter gezahlt wird. Doch könnte sich das in Zukunft ändern (vgl. Kapitel 5.2.1). Sich auf diese Argumentation stützend geht S2-O davon aus, dass Landwirte eine EU-Direktzahlung erhalten werden. S1-P nimmt dies nicht an. Da Hagelnetze an betrachtetem Standort genehmigungsfrei sind (vgl. Kapitel 5.1.1), liegt die Hürde der Implementierung eines solchen Systems niedriger als die der Agri-PV, bei der zum momentanen Stand eine Bauleitplanung durchlaufen werden muss (vgl. Kapitel 5.1.2). Eine Anpassung der baurechtlichen Rahmenbedingungen, die der Agri-PV ihre für die Landwirtschaft dienende Funktion zusprechen würden, und der Agri-PV somit eine Privilegierung i. S. d. § 35 Abs. 1 BauGB zu ermöglichen, würde nicht nur die Hürde der Implementierung sondern auch die Kosten dieser senken. Dies in S2-O berücksichtigt.

Tabelle 20: Variierte Parameter der Szenarien Basis, S1-P und S2-O

	Einheit	Basis-szenario	S1-P	S2-O
<b>Auswirkungen Landwirtschaft</b>				
Einsparungen Hagelnetz	[%]	-35%	-35%	-100%
Bodenbearbeitung	[%]	150%	150%	100%
Einsparungen Frostschutz	[%]	0%	0%	-5%
Erntequalitätsveränderung	[%]	-10%	-15%	-5%
<b>PV-System</b>				
Modulleistung	[W/Modul]	225	225	250
Installierte Leistung	[kWp/ha]	1.400	1.400	1.556
Skaleneffekte Modulpreis	[%]	-10%	0%	-10%
Skaleneffekte Montage	[%]	-35%	-35%	-45%
Baugenehmigungsverfahren		B-Plan	B-Plan	§35BauGB
<b>Förderung</b>				
Förderung Hagelnetze	[%]	0%	50%	0%
EEG-Vergütung	[ct/kWh]	11,17	-	11,09
EU-Direktzahlungen	[%]	-100%	-100%	0%
Mit Szenario 1 Pessimistisch (S1-P), Szenario 2 Optimistisch (S2-O)				

### 8.1.2 Ergebnisse der Szenarien-Analyse

Die oben dargestellten Parameter sind hinsichtlich ihrer Wirkung auf *CAPEX*, *OPEX*, Einnahmen, *NPV*, Amortisationszeit, *DSCR* und *LCOE* analysiert worden. Tabelle 21 zeigt das Basisszenario.

Tabelle 21: *CAPEX*, *OPEX*, Einnahmen, Net Present Value (*NPV*), Amortisationszeit, Zahlungsfähigkeit (*DSCR*) sowie *LCOE* im Basisszenario

Basisszenario		APV-Agri	APV-PV	APV-Total
<b>CAPEX **</b>	[€/ha]	66.830	xxx	xxx
<b>OPEX *, **</b>	[€/ha,a]	8.712	xxx	xxx
<b>Einnahmen *, **</b>	[€/ha,a]	12.897	44.609	57.506
<b>NPV</b>	[€/ha]	67.078	304.693	371.771
<b>Amortisation</b>	[a]	7	16	15
<b>DSCR</b>		1,63	-	1,06
<b>LCOE</b>	[ct/kWh]	-	7,29	7,29

\*Durchschnitt über Betrachtungszeit; \*\*diskontiert

Die Ergebnisse sowie die prozentuale Änderung gegenüber dem Basisszenario werden im Folgenden im Detail erläutert und sind jeweils am Ende in der Tabelle 22 und Tabelle 23 zusammengefasst. Wie hoch sich die Änderung der Parameter im Einzelnen auf die Zielgrößen auswirken, kann der **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** im Anhang entnommen werden.

#### Betrachtung von S1-P im Detail

Der *NPV* in S1-P sinkt in allen drei Untersuchungsfällen, wobei er in APV-PV und APV-Total deutlich stärker sinkt und zu einem negativen *NPV* führt, weshalb von einer Investition abgeraten werden sollte. Die Einnahmen, der *NPV*, die Amortisationszeit und die Zahlungsfähigkeit werden vor allem durch die ausbleibende Einspeisevergütung beeinflusst. Das lässt darauf schließen, dass das untersuchte Agri-PV-System ohne eine entsprechende Einspeisevergütung wirtschaftlich nicht rentabel ist. Die Amortisationszeit von APV-Agri steigt um 4 Jahre auf 11 Jahre und die Zahlungsfähigkeit sinkt gegenüber dem Basisszenario. Erklären lässt sich dies durch die negative Änderung des Qualitätsanteils sowie das Vorhandensein einer Förderung der Hagelschutzsysteme, welche wiederum ein konventionelles System der Hagelschutznetze besserstellen würde und sich deshalb relativ gesehen negativ auf den Business Case von APV-Agri auswirkt. Die Steigerung der *CAPEX* kann insgesamt

gesehen vor allem durch die höheren Modulpreise erklärt werden. Die Senkung der *OPEX* im Untersuchungsfall APV-Agri kann auf die geringeren Vermarktungskosten, die aus dem geringeren Qualitätsanteil resultieren, zurückgeführt werden. Die *OPEX* von APV-PV sowie APV-Total verändern sich nicht. Die *LCOE* würde sich in S1-P gegenüber dem Basisszenario erhöhen.

*Tabelle 22: CAPEX, OPEX, Einnahmen, Net Present Value (NPV), Amortisationszeit, Zahlungsfähigkeit (DSCR) sowie LCOE mit prozentualer Änderung gegenüber Basisszenario im Szenario 1 – Pessimistisch (S1-P)*

<b>Szenario 1 - Pessimistisch</b>							
		<b>APV-Agri</b>		<b>APV-PV</b>		<b>APV-Total</b>	
		$\Sigma$	$\Delta$ in %	$\Sigma$	$\Delta$ in %	$\Sigma$	$\Delta$ in %
<b>CAPEX **</b>	[€/ha]	73.720	10%	899.390	4%	973.110	4%
<b>OPEX *, **</b>	[€/ha,a]	8.637	-1%	7.939	0%	16.576	0%
<b>Einnahmen *, **</b>	[€/ha,a]	12.312	-5%	20.315	-54%	32.627	-43%
<b>NPV</b>	[€/ha]	43.863	-35%	-503.353	-265%	-459.489	-224%
<b>Amortisation</b>	[a]	11	57%	x	-100%	x	-100%
<b>DSCR</b>		1,13	-31%	-	-	-	-
<b>LCOE</b>	[ct/kWh]	-		7,49	3%	7,49	3%

\*Durchschnitt über Betrachtungszeit; \*\*diskontiert

### **Betrachtung von S2-O im Detail**

Durch die Gegebenheiten von S2-O kann der *NPV* sowie die Finanzierungsfähigkeit in allen Untersuchungsfällen gesteigert werden. Die Amortisationszeit verändert sich nicht. Obwohl die *LCOE* gesenkt werden können, wären diese mit heutigen PV-FFA noch immer nicht konkurrenzfähig (vgl. Kapitel 7.2.2). Änderungen in der *CAPEX* bei S2-O entstehen vor allem durch erhöhte Modulkosten, verringerten Montagekosten sowie die reduzierten Kosten für das Baugenehmigungsverfahren. In S2-O verändert sich die *OPEX* von APV-Agri nicht, da die verringerten Kosten durch gesenktes Hagelnetzhandling, Bodenbearbeitung und Frostschutz mit den erhöhten Kosten der Vermarktung aufgrund des höheren Qualitätsanteils ausgeglichen werden. Die Einnahmen werden vor allem durch die erhöhte Modulleistung gesteigert und übersteigen damit die Verluste, die mit der geringeren Einspeisevergütung einhergehen würden. Die Steigerung des *NPV*, der Zahlungsfähigkeit sowie die Senkung des *LCOE* können ebenfalls überwiegend durch die höhere installierte Leistung erklärt werden und weniger durch Einsparungen der *CAPEX*.

Tabelle 23: CAPEX, OPEX, Einnahmen, Net Present Value (NPV), Amortisationszeit, Zahlungsfähigkeit (DSCR) sowie LCOE prozentualer Änderung gegenüber Basisszenario im Szenario 2 – Optimistisch (S2-O)

		APV-Agri		APV-PV		APV-Total	
		$\Sigma$	$\Delta$ in %	$\Sigma$	$\Delta$ in %	$\Sigma$	$\Delta$ in %
<b>CAPEX **</b>	[€/ha]	60.703	-9%	842.826	-3%	903.528	-3%
<b>OPEX *, **</b>	[€/ha,a]	8.691	0%	7.939	0%	16.629	0%
<b>Einnahmen *, **</b>	[€/ha,a]	13.481	5%	49.260	10%	62.741	9%
<b>NPV</b>	[€/ha]	92.599	38%	479.450	57%	572.049	54%
<b>Amortisation</b>	[a]	7	0%	13	-19%	13	-13%
<b>DSCR</b>		2,24	37%	-		1,24	17%
<b>LCOE</b>	[ct/kWh]	-		7,12	-2%	7,12	-2%

\*Durchschnitt über Betrachtungszeit; \*\*diskontiert

## Zwischenfazit

Während die CAPEX nur geringfügig und die OPEX nahezu gar nicht betroffen ist, sind die Auswirkungen auf die Einnahmen und NPV deutlich höher. In beiden Szenarien S1-P und S2-O zeigt sich im Vergleich der Auswirkungen in APV-Agri, APV-PV und APV-Total, dass APV-PV deutlich dominanter das in APV-Total dargestellte Gesamtsystem beeinflusst als APV-Agri. Hierbei stellt sich insbesondere heraus, dass das Agri-PV-System ohne entsprechende Einspeisevergütung wirtschaftlich nicht rentabel ist und dass dies den ausschlaggebenden Faktor der Wirtschaftlichkeit des Agri-PV-Systems als Ganzes darstellt.

## 8.2 Potenzialanalyse

Im Folgenden wird knapp umrissen, welches Potenzial das in dieser Arbeit untersuchte Agri-PV-System bei einer Implementierung im innerdeutschen Apfelanbau theoretisch mit sich bringen könnte.

Ausgehend von den 33.981 ha innerdeutscher Apfelanbaufläche (vgl. Kapitel 2.1) könnten insgesamt 23,79 GWp Agri-PV installiert werden. Zieht man lediglich den Bio-Apfelanbau in Betracht, sind es 3,5 GWp. Der Apfelanbau hätte damit das Potenzial 51 % der noch verbleibenden etwa 46 GW PV-Leistung abzudecken, die bis 2030 in Deutschland installiert werden sollen (vgl. Kapitel 1). Die Agri-PV im Bio-Apfelanbau käme auf 8 %.

Eine von Seiten der Landwirtschaft empfehlenswerte Implementierung, die sich nach der Verschattungstoleranz verschiedener Apfelsorten nach Handschack (2013) richtet, ist im konventionellen Anbau zumindest für vier und im ökologischen Anbau für drei der jeweils zehn meist angebauten Sorten empfehlenswert (vgl. Kapitel 2.1). Hierdurch würde sich die installierte Leistung auf 10,31 GWp im konventionellen und 1,34 GWp im ökologischen Anbau reduzieren. Jedoch ist diese Abschätzung nur bedingt aussagekräftig, da es zu den übrigen Top-10-Sorten keine Einschätzung gibt, wie sie die Verschattung vertragen werden, woraus nicht zwangsläufig geschlossen werden muss, dass diese Sorten nicht geeignet sind.

Würde man die im Kapitel 8.1 dargestellte Steigerung der installierten Leistung in Betracht ziehen, ließe sich das Potenzial der Agri-PV um 11 % erhöhen, was im Apfelanbau gesamt 26,4 GWp und im Bio-Anbau 3,9 GWp installierter Leistung entspräche.

## 9 Diskussion

Wie diese Arbeit zeigt, kann die Agri-PV aus ökonomischer Sicht des Landwirts potentiell sinnvoller zum Kulturschutz eingesetzt werden als Hagelschutznetze. Im Folgenden werden die Ergebnisse diskutiert sowie Limitationen und Erweiterungen dieser Arbeit aufgezeigt.

### 9.1 Evaluierung der Ergebnisse

#### Einordnung der Ergebnisse

Die **Kostenstruktur** der **Landwirtschaftsseite** deckt sich größtenteils mit Kosten aus untersuchter Literatur. Die **Investitionskosten** für Bewässerungs- und Frostschutzsysteme (LfULG 2011; Jacob und Koch 2005; Maack 2020) und Pflanzmaterialien (Balmer 2010, S. 94) liegen im Durchschnitt der untersuchten Literatur, die Kosten des Hagelschutzsystems am unteren Ende (LfULG 2011; Wicke 2015b; Wiebusch und Hilbers 2017). Mit Vorliegen von Realdaten und weiteren Kostenabschätzungen aus dem Projekt könnte die Kostenstruktur weiter spezifiziert werden. In Kapitel 8 wurde eine mögliche Reduktion der Kosten zur Bodenbearbeitung nach Implementierung der Agri-PV herausgearbeitet. Dies gilt nur, wenn auch entsprechende Maschinen, wie sie bei der Implementierung von Hagelschutznetzen eingesetzt werden, für die Agri-PV Anwendung finden und sich eine entsprechende Marktpräsenz entwickelt.

Untersucht wurden die **Betriebskosten** basierend auf den wichtigsten Kulturarbeiten im Apfelanbau. Die prozentuale Kostenaufteilung unterscheidet sich teilweise von der anderer Literatur. So wird in vorliegender Arbeit im Vergleich zu Dietiker et al. (2017) der dreifache Aufwand für Pflanzenschutz, beinahe nur ein Drittel für die Behangregulierung und fast ein Viertel weniger für die Ernte angesetzt. Jedoch wurden von den Autoren keine Betriebskosten für Frost-, Hagel- und Bewässerungsschutzsysteme einbezogen, was die prozentuale Verschiebung erklären könnte. Kongruent ist hingegen, dass die Ernte mit etwa der Hälfte der Kosten den größten Kostenanteil einnimmt.

Die berechneten **Kosten der PV** innerhalb des Agri-PV-Systems pro installierte Leistung zeigen, dass sich gegenüber einer klassischen PV-FFA die **CAPEX** fast verdoppeln und die **OPEX** sich beinahe um ein Fünftel verringern. Auch die untersuchte Literatur bestätigt eine Steigerung der **CAPEX** (Agostini et al. 2021; Horowitz et al. 2020; Khanh

2020; Moreda et al. 2021; Schindele et al. 2020) sowie eine Senkung der *OPEX* (Schindele et al. 2020), jedoch wurden hier Systeme im Ackerbau untersucht. Ebenso bestätigt vorliegende Untersuchung, dass eine Steigerung der *CAPEX* vor allem auf die Kosten für PV-Module, Unterkonstruktion sowie Installation und Balance of System Komponenten (Agostini et al. 2021; Moreda et al. 2021; Schindele et al. 2020; Horowitz et al. 2020) zurückzuführen ist. Insbesondere Schindele et al. (2020) und Fraunhofer ISE (2020) stellen als Potenzial die Kostensenkung der Agri-PV bei Anwendung in Dauerkulturen heraus, da so beispielsweise Kosten der Unterkonstruktion eingespart werden können. Dies konnte in vorliegender Arbeit jedoch nur teilweise bestätigt werden. So kam diese Untersuchung auf Kosten der Unterkonstruktion von xxx €/kWp, was zwar eine Reduktion von xx % gegenüber den Kosten einer Unterkonstruktion im Ackerbau von Schindele et al. (2020) entspricht, bleibt jedoch weit über den von Fraunhofer ISE (2020) angenommenen 180 €/kWp für die Unterkonstruktion von Agri-PV im Bereich der Sonderkulturen zurück. Die Kosten für die Installation sinken um xx % im Vergleich zum Ackerbau (Schindele et al. 2020), aber waren mit xxx €/kWp ebenfalls wieder deutlich höher als von Fraunhofer ISE (2020) mit 140 €/kWp erwartet. Die anderen Kostenpositionen bewegten sich mehr oder weniger in der Abschätzung nach Fraunhofer ISE (2020).

Die Kostenzusammensetzung der *OPEX* deckt sich im Wesentlichen mit Schindele et al. (2020) und Fraunhofer ISE (2020), lediglich die angenommenen Summen für Monitoring und das Ersatzteilmanagement fallen in vorliegender Arbeit höher aus. Letzteres lässt sich dadurch erklären, dass nicht nur eine Reserve für einen Ersatz der Wechselrichter, sondern ebenso für Sondermodule einberechnet wurde. Ebenfalls unterscheidet sich die Kostenzusammensetzung im Hinblick auf Pachtentgelt und Flächenpflege. Das ist jedoch dem Umstand geschuldet, dass in vorliegender Arbeit unterschieden wird zwischen einer Pachtzahlung für das Land zwischen Landbewirtschafter und PV-Anlagenbesitzer und dem separaten Entgelt, die der Landwirt für die Flächenpflege erhält. Diese werden bei Schindele et al. (2020) und Fraunhofer ISE (2020) unter Pachtentgelt vereint.

Es wurden eine deutlich höhere **Kapitalintensität** und höhere **Einnahmen** für APV-PV im Vergleich zu APV-Agri festgestellt. Jedoch konnte eine derart starke Asymmetrie der Einnahmeseite, wie sie in der untersuchten Literatur angegeben ist, nicht gefunden werden. Während diese davon spricht, dass nur 6 % der Einnahmen im Agri-PV-System aus der Landwirtschaft stammen und die Einnahmen sich verfünffachen (Malu et

al. 2017), sind in vorliegender Arbeit 29 % auf die Einnahmen der Landwirtschaft zurückzuführen und die Einnahmen vervielfachen sich um den Faktor 3,5. Dies könnte dem Umstand geschuldet sein, dass die Agri-PV-Anlage aufgrund ihres Standortes und der installierten Leistung pro Fläche weniger Strom erzeugt hat und somit die Stromeinnahmen entsprechend geringer waren, denn Malu et al. (2017) hat eine Agri-PV-Anlage im Traubenanbau in Indien untersucht. Andererseits könnte es auch einen Hinweis darauf sein, dass mit höherer Wertschöpfung der angebauten Kulturen eine Abschwächung des Einnahmengenfalls zwischen energiewirtschaftlichen und landwirtschaftlichen Einnahmen stattfindet.

Generell ließe sich sowohl durch APV-Agri als auch APV-Total die **Profitabilität** gegenüber HN erhöhen. Auch in der Literatur wurde die Agri-PV bereits mehrfach als valider Business Case eingestuft (Agostini et al. 2021; Dinesh und Pearce 2016; Malu et al. 2017; Moreda et al. 2021; Ravi et al. 2016; Schindele et al. 2020; Trommsdorff 2016). Doch dies gilt nur unter der Annahme, dass es eine EEG-Vergütung erhalten wird. Wie die Sensitivitätsanalyse zeigt, wäre die PV-Seite der Agri-PV ohne diese nicht wirtschaftlich rentabel. Die **Amortisation** des Gesamtsystems in vorliegender Arbeit liegt mit 15 Jahren um 6 Jahre höher als bei Agostini et al. (2021). Jedoch wurde von den Autoren eine nachgeführte Agri-PV-Anlage im Ackerbau mit kosteneffizienter Seilbaukonstruktion in Italien untersucht, was den Unterschied erklären könnte. Auf Seiten der Landwirtschaft konnte die für den Apfelanbau nicht untypisch lange Amortisationszeit (Wicke, persönliche Mitteilung 2021b) im Fall APV-Agri auf 7 Jahre reduziert werden.

Während für die **LCOA** kein Vergleich aus anderer Literatur gefunden werden konnte, gibt es zur **LCOE** von Agri-PV-Anlage zwar Untersuchungen (Agostini et al. 2021; Dinesh und Pearce 2016; Schindele et al. 2020), doch diese rechnen meist mit einem Betrachtungszeitraum von 25 Jahren, weshalb ein direkter Vergleich nicht sinnvoll wäre. Hingegen kann bestätigt werden, dass die **LCOE** von Agri-PV im Vergleich zur PV-FFA höher ausfällt (Schindele et al. 2020). Eine Querfinanzierung der Landwirtschaft durch PV würde erhebliche positive Effekte auf Seiten der Landwirtschaft erzielen, andersherum eine Querfinanzierung der Stromerzeugung durch die Landwirtschaft würde kaum Auswirkungen nach sich ziehen, was in Anbetracht der Höhe der Einnahmen und damit auch der Zusatzgewinne, die für eine Querfinanzierung zur Verfügung ständen, logisch erscheint.

Des Weiteren war in allen Untersuchungsfällen die **Zahlungsfähigkeit** des *DSCR* mindestens ausreichend (Holstenkamp et al. 2015), lag jedoch in den Fällen ohne Stromerzeugung höher. Wobei hier zu bedenken gilt, dass gerade in Sektoren, in denen das Einkommen fluktuierender ist, ein höherer *DSCR* von Vorteil ist, da es hier eher zu unerwarteten Einkommensausfällen kommen kann, die die Zahlungsfähigkeit gefährden könnten. Fraglich ist, ob Landwirte eine derartige Investition für eine Fläche von 2 ha tätigen und ihr Kapital auf einen Zeitraum von 20 Jahren binden würden. Diese Berechnung ist im hohen Maß von den angenommenen Kreditkonditionen abhängig. In vorliegender Arbeit wurde auf entsprechende Konditionen von Landwirtschaftliche Rentenbank (2021) zurückgegriffen.

Eine **Einkommensstabilisierung**, wie durch Scharf et al. (2021) und Schindele et al. (2020) prognostiziert, konnte teilweise bestätigt werden. Wird die Agri-PV als Gesamtkonzept implementiert, birgt sie das Potenzial Einkommensvolatilitäten abzumildern, doch wie im Abschnitt vorher angesprochen, ist es fraglich, inwieweit Landwirte eine solche Investition tätigen könnten. Es gilt geeignete Geschäftsmodelle mit verschiedenen Beteiligungsmodellen zu entwickeln (vgl. Kapitel 3.4.3).

Die Szenarien-Analyse hat gezeigt, dass der **ausschlaggebende Faktor** der Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems die Einspeisevergütung ist. Diese wurde in vorliegender Arbeit mit 11,17 ct/kWh angenommen und wird in Kapitel 9.2 noch diskutiert. Kleine Änderungen können sich durch verbesserte Wirkungsgrade oder PV-Module sowie Einsparungen bei der Installation und dem Genehmigungsverfahren ergeben. Aspekte, die die Wirtschaftlichkeit der Landwirtschaftsseite betreffen, haben gesamtgesehen eine geringere Wirkung, können jedoch den Business Case des Landwirts innerhalb des Systems verbessern.

### **Übertragbarkeit der Ergebnisse**

Die Betrachtungen beziehen sich basierend auf der Pilotanlage auf ökologische Bewirtschaftungsformen. Doch sind in Deutschland nur 14,7 % der Kernobstfläche im **Bio-Anbau** zu finden (vgl. Kapitel 2.1). Während im ökologischen Anbau, insbesondere die in dieser Arbeit herausgearbeiteten Potenziale zur Reduktion von Fungiziden hoch sind, könnten im konventionellen Anbau andere Pflanzenschutzmittel oder Wachstums- und Ausdünnungsregulatoren eingesetzt werden, welche den Auswirkungen einer Lichtreduktion einfacher entgegenwirken könnten. Andererseits sind Qualitätsmerkmalsgrenzen bei Tafeläpfeln im konventionellen Anbau deutlich strenger,

was beispielsweise schon kleine Abweichungen in der Ausfärbung aus Vermarktungssicht kritisch machen (Experteninterviews 2021). Die hier gefundenen Ergebnisse können somit nicht direkt auf den konventionellen Apfelanbau übertragen werden. Während der Bio-Apfelanbau ein vielversprechendes Anwendungsgebiet bleibt, sollten Erkenntnisse im konventionellen Anbau gesammelt werden, um zusätzliche Potentiale auszuschöpfen.

Des Weiteren wurde von **Sorten** ausgegangen, die eine gute Ausfärbung mit sich bringen. Es wurde gezielt darauf verzichtet sich nur auf eine Apfelsorte zu fokussieren, um die Übertragbarkeit zu erhöhen. Im ökologischen Anbau nehmen die Sorten Elstar, Topaz und Jonagold den größten Anteil der Anbaufläche ein (vgl. Kapitel 2.1). Dabei wurde Elstar aufgrund seiner Alternanzanfälligkeit in Experteninterviews (2021) als eher kritisch unter Agri-PV eingestuft, andere Literatur stuft diese Sorte jedoch als verträglich im Umgang mit Schatten ein (Handsack 2013). Zu weiteren Apfelsorten wurde in der Literatur keine Einschätzung gefunden. Die Sorte Gala, die am häufigsten als geeignet in Experteninterviews (2021) genannt wurde, liegt deutschlandweit nur auf Platz sieben der Bio-Apfelproduktion, in der Anbauregion West jedoch auf Platz zwei (föko 2020) und im konventionellen Anbau auf Platz fünf (vgl. Kapitel 2.1). Darüber hinaus bleibt es zu klären, inwieweit Landwirte flexibel sein können, die gut färbenden Mutanten ihrer angebauten Sorten zu verwenden, wenn sie Interesse an der Implementierung von Agri-PV haben.

Die Apfelanlage umfasst mit einem Reihenabstand von 3 m und einem Baumabstand von 1 m etwa 3000 Bäume pro ha. Auch wenn die **Anbausysteme** innerhalb Deutschlands variieren (Krengel et al. 2015), wird durch diesen Intensivanbau die Praxis aus anderen Regionen Deutschlands widergespiegelt (Krengel et al. 2015; Handsack 2013).

## 9.2 Limitationen der Arbeit und mögliche Erweiterung

### Evaluierung der Kalkulationsparameter

Die Kalkulationen basieren auf den **Nettowerten** der Systeme. Durch die Betrachtung ohne Steuern wird die Realsituation vereinfacht dargestellt.

Die Berechnung basiert auf der Annahme, dass eine **EEG-Vergütung** in Höhe von 11,17 ct/kWh erhalten wird, damit eine Investition in dieses Agri-PV-System realistisch ist (vgl. Kapitel 6.1.3.2). Doch unter den momentanen rechtlichen Gegebenheiten ist es

ebenso denkbar, dass die Agri-PV keinen Zuschlag in den Innovationsausschreibungen erhält, wenn sie gegen schwimmende PV-Anlagen und PV-Anlagen über Parkplätzen konkurrieren muss. Darüber hinaus müsste das Agri-PV-System als Anlagenkombination mit einer steuerbaren Last an der Innovationsausschreibung teilnehmen. Dies wiederum müsste in den Kosten berücksichtigt werden. Wie in Kapitel 7.1.2 angerissen und Kapitel 8.1.2 offenlegt, ist der ausschlaggebende Faktor der Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems das Vorhandensein einer entsprechenden Stromvergütung für den erzeugten Strom. Würde auf ein PPA zurückgegriffen werden, welcher sich an der Höhe des momentanen Strompreises orientiert, wäre das Gesamtsystem nicht rentabel. Hingegen könnte hier der Strom wiederum teilweise selbst verbraucht werden, da das Verbot des Eigenstromverbrauchs der EEG entfällt, wenn die PV-Anlage ohnehin nicht durch die EEG vergütet wird. Wie sich gezeigt hat, müsste damit das PV-System der Agri-PV-Anlage sich selbst refinanzieren kann, mindestens eine Stromvergütung von 8,43 ct/kWh erhalten werden.

Durch die Länge des Betrachtungszeitraums bestehen Unsicherheiten bezüglich der **Erzeugerpreise** für Äpfel und **Preissteigerungen** für Strom. Bei der Berechnung der zukünftigen Apfelpreise wurden die Korrelation des Apfelpreises am Großmarkt und der Ertragsmengen des einzelnen Betriebes vernachlässigt, da es keine ausreichende Datengrundlage zur Berechnung gab und deshalb keine Aussage getroffen werden konnte, inwieweit ein Zusammenhang besteht. Hier wäre es sinnvoll in einer zukünftigen Arbeit die Erträge mehrerer Apfelanlagen an verschiedenen Standorten zu erheben und diese mit den Großhandelspreisen der jeweiligen Jahre zu vergleichen, um daraus eine Korrelation zu errechnen. Außerdem könnte durch weitere Informationen eine Schwankung zukünftiger Apfelpreise getrennt nach Preisen für Tafelware und Mostäpfeln vorgenommen werden, um die Prognosen weiter zu verfeinern, was in vorliegender Arbeit nicht möglich war. Durch eine solche Weiterentwicklung könnten fundierte Aussagen zur Einkommensstabilisierung getroffen werden. Denn, dass durch die Erträge aus der PV eine Stabilisierung stattfindet, ist aufgrund des deutlich höheren und stabileren Einnahmenlevels durch die PV aufgrund der EEG-Vergütung plausibel.

Darüber hinaus ist die Kalkulation in hohem Maß vom gewählten **Diskontierungsfaktor** abhängig (Agrora Energiewende 2015). Im vorliegenden Modell wurde hierzu die Methode der WACC herangezogen. Die errechneten Kalkulationszinssätze liegen für den Landwirtschaftssektor in einem realistischen Bereich (Wicke, persönliche Mitteilung

2021b) und decken sich für den Energiesektor mit anderen wissenschaftlichen Publikationen (Kost et al. 2021; Schindele et al. 2020).

Grundlage der Kalkulationen ist eine Abschätzung über die Auswirkungen der Agri-PV auf die landwirtschaftliche Praxis anhand von Literatur, Experteninterviews sowie Fach- und Praxisaustausch. Durch eine Erhebung von Realdaten im Laufe des Projektes können die Ergebnisse validiert werden.

### **Modellannahmen und mögliche Anpassungen**

Die betrachtete **Anbaufläche** wird als rechteckig angenommen und es wird davon ausgegangen, dass alle Reihen sowohl die gleiche Länge haben als auch aneinandergrenzend sind. Da dies in der Praxis nicht immer der Fall ist, müssten hierfür Preissteigerungen einberechnet werden (Wiebusch und Hilbers 2017).

Durch die Implementierung der Agri-PV, ebenso wie bei herkömmlichen Hagelschutznetzkonstruktionen, könnte teilweise **Überzeilentechnik** nicht mehr eingesetzt werden (Stehr und Hahn 2016). Dies wird in vorliegender Betrachtung nicht eingesetzt, müsste aber beachtet werden an Standorten, wo dies der gängigen Praxis entspricht. Man könnte dies durch Konzeption der Agri-PV als Mehrreihensysteme ermöglichen. In diesem Fall könnte jedoch das Agri-PV-System nicht mehr als Baumunterstützungsgerüst fungieren und es wäre ein nicht im Agri-PV-System integrierbares Unterstützungsgerüst erforderlich, was wiederum die Wirtschaftlichkeit in Frage stellen könnte.

Im vorliegenden Modell wird von einer **Apfelstandzeit** von 16 Jahre ausgegangen, doch diese kann abhängig von Region und Sorte variieren (Wicke 2015b; Jacob und Koch 2005; Wiebusch und Hilbers 2017; Experteninterviews 2021). Inwieweit eine Abweichung von dieser Standzeit sich auf die Wirtschaftlichkeit auswirkt, müsste je nach Fallbeispiel geprüft werden.

Den Berechnungen liegt ein vereinfachtes **Apfelertragsmodell** zugrunde. Dieses wurde für die Agri-PV entsprechend der **Lichtverfügbarkeit** angepasst. Wenngleich Marrou et al. (2013b) als zentralen beschränkenden Faktor des Pflanzenwachstum unter Agri-PV das Licht herausgearbeitet hat, stellt dies eine starke Vereinfachung dar. Andere Mikroklimaveränderungen wurden versucht mit abzuschätzen, doch das hierfür notwendige Detailwissen kann nur aus den Realdaten der kommenden Projektjahre generiert werden. Interessant wäre hierbei insbesondere, ob es zu einem kühlenden

Effekt oder sogar einem ungewollten Hitzestau unter den Modulen kommen könnte. Außerdem konnte in der Arbeit nicht einbezogen werden, dass beispielsweise der Insektenflug durch den Schutz vor Schnee verbessert werden könnte (Experteninterviews 2021). Hierfür lagen zum Stand der Arbeit zu wenige Erkenntnisse vor.

Wie vorangegangen beschrieben, werden in vorliegender Arbeit keine **sortenspezifischen** Unterschiede herausgearbeitet, was jedoch den Detailgrad der Arbeit erhöhen könnte. Außerdem gibt es Anpassungsmöglichkeiten der **Anbausysteme**, die noch nicht in das Modell aufgenommen wurden, weil die Quantifizierungsgrundlage gefehlt hat. Diese könnten beispielsweise die Lichtverfügbarkeit und damit die Erntequalität verbessern. Lichtverluste könnten beispielsweise durch kleine Baumformen, lichtere Kronen, genügend Pflanzabstand und Sorten mit ruhigem Triebwachstum abgemildert werden (Widmer 2005). Durch wachstumshemmende Unterlagen, wachstumsschwache Sorten sowie angepasste Kulturführung können die Ergebnisse ebenfalls positiv beeinflusst werden. Hierdurch kann unkontrolliertes Kronenwachstum verhindert und die Lichtverfügbarkeit erhöht werden (Handsack 2013). Es müsste geprüft werden, inwieweit ein Zusatz an Arbeitsaufwand bzw. Kosten entsteht und inwiefern dieser im Verhältnis zum verbesserten Ertrag steht.

In der Praxis hat sich gezeigt, dass die **Lebensdauer** von **Hagelnetzen** deutlich über der von den Herstellern angegebenen Garantie liegt (Wicke, persönliche Mitteilung 2021b), doch da dies nicht vorausgesetzt werden kann, wird dies in der Betrachtung vernachlässigt. Zudem wurde in die Berechnung nicht einbezogen, dass sich Hagelnetze über ihre Standzeit in ihrer Verschattungsintensität verändern. Da dies sowohl für die Hagelnetze als auch die Agri-PV gelten kann und man insbesondere bei der Agri-PV noch nicht weiß, wie sich Staub und Pflanzenschutzmittel auswirken werden, wurde im Fall der Hagelnetze konstant von der mittleren **Verschattung** über die komplette Standzeit und bei der Agri-PV von der höchsten im Forschungsprojekt simulierten Verschattungsrate im Ursprungszustand ausgegangen. Aus diesem Grund wurde in beiden Fällen die Veränderung des Qualitätsanteils nicht in Abhängigkeit zur Standzeit der Schutzkonstruktion gesetzt.

Als Grundlage zur Abschätzung wie sich die **Ertragsqualität** verändert, wurden Untersuchungen zu Hagelnetzen verschiedener Farben herangezogen, welche jedoch

im Gegensatz zu Agri-PV nicht ganzjährig implementiert sind, sondern erst nach der Blüte geschlossen (Experteninterviews 2021) bzw. teilweise erst im dritten Jahr aufgelegt (Wicke 2015b) werden. Auch stellen Hagelnetze keine durchgängige Überdachung dar, da sie wasserdurchlässig sind. Es bleibt anhand der im Projekt entstehenden Realdaten zu überprüfen, ob diese Übertragung zulässig ist.

Außerdem sollte die **Reifeverzögerung** von etwa drei (Klophaus und Baab 2015) bis sieben (Thalheimer und Paoli 2005) Tagen, die vor allem unter schwarzen Netzen auftritt und auch in Agri-PV-Anlagen bereits festgestellt wurde (vgl. Kapitel 3.5), einkalkuliert und der Erntezeitpunkt angepasst werden. Hierdurch kann vermieden werden, dass der Zucker-Säuregehalt zu sehr beeinflusst wird (Klophaus und Baab 2015; Handschack 2013). Im Modell werden **Erzeugerpreise** für Äpfel und Strom jährlich einberechnet. Doch Preise, die täglich im Falle der Landwirtschaft und stundenweise im Falle der Stromerzeugung einbezogen werden, könnten einen höheren Erkenntnisgewinn bringen. Bereits die Unterscheidung zwischen Haupt-, Neben-, und Nicht-Saison des Apfelanbaus, und dem möglichen Einfluss der Agri-PV darin, wäre interessant zu untersuchen. Während bei der Apfelproduktion eine Verspätung der Ernte dazu führen könnte, dass am Saisonbeginn höhere erzielbare Preise (Kreisel und Schlossberger 2019) nicht erhalten werden, könnte die PV durch die nicht optimale Südausrichtung von höheren Preisen bei niedrigerem Angebot profitieren. Denn da die Anlage nach Südwesten ausgerichtet ist, weichen die Leistungsspitzen in der Regel von denen klassischer PV-FFA ab, die an sonnenreichen Tagen vor allem zur Mittagszeit zu hohem Stromangebot und damit niedrigen Preisen führen (Fraunhofer ISE 2020). Detailliertere Preis- und Erzeugungsbetrachtungen könnten dieses Zusammentreffen von Erntemengen und Erzeugerpreisen explizit untersuchen.

Für das **PV-System** wurden die gleichen **Versicherungskosten** wie für klassische PV-FFA verwendet. Sie sollten aber aufgrund einer Risikobewertung der Agri-PV-Anlage im Detail berechnet werden, um einen höheren Detailgrad zu erlangen. Die **Rückbaukosten** wurden mit dem Restwert der Unterkonstruktion gleichgesetzt. Dabei wurden die Erlöse anhand der verbauten Stahlmenge errechnet. Bei einer solchen Berechnung besteht aufgrund der starken Preisschwankungen für Stahl ein hoher Unsicherheitsfaktor (Agostini et al. 2021).

Welche Erweiterungen neben den eben ausgeführten Punkten zur Modellanpassung interessant wären, wird im Folgenden dargelegt.

## Modellerweiterung

Interessant wäre die Untersuchung inwieweit sich ein **nachgeführtes System** positiv auf den Apfelertrag auswirken könnte. Denn Untersuchungen mit flexiblem Öffnen und Schließen von Hagelnetzen je nach Wettervorhersage haben gezeigt, dass dies je nach Sorte Qualitätsverbesserungen mit sich bringen kann (Kröling 2019). Gerade im August senkt das Hagelnetz den Lichteinfall im Gegensatz zu einer unüberdachten Fläche stark. In dieser Zeit ist das Licht aber notwendig, um eine ausreichende Ausfärbung zu erreichen (Klophaus und Baab 2015). Besonders in den letzten Wochen vor der Ernte ist der PAR Anteil für die Äpfel zur Ausfärbung besonders wichtig (Experteninterviews 2021). Hier könnte sich ein nachgeführtes System, im Gegensatz zu fixen Hagelnetzen, den Bedürfnissen der Pflanze anpassen. Auch wäre es durch ein solches System möglich die darunter wachsende Kultur zu wechseln. So könnte beispielsweise durch einen anderen Anstellwinkel der Module die Verschattung und damit die Kulturart variiert werden. Hierdurch könnten Landwirte flexibler auf die Marktsituation reagieren und Hürden der Marktakzeptanz (vgl. Kapitel 3.4.4) könnten verringert werden. Inwieweit ein solches Vorgehen wirtschaftlich sinnvoll ist, wäre mit einer Erweiterung des Modells überprüfbar. Um eine Nachfolgearbeit zu erleichtern, wurde in dieser Arbeit das PV-Modul herangezogen, das in der Pilotanlage sowohl fix aufgeständert als auch mit Nachführung eingesetzt wird. In der zugrundeliegenden Betrachtung sollte adressiert werden, inwieweit der Mehrgewinn des Trackings, bezogen auf beispielsweise verbesserte Pflanzengesundheit und -entwicklung, Fruchtqualität sowie Ernteertrag, gegenüber einem statischen System die höheren Kosten des nachgeführten Systems rechtfertigen.

Darüber hinaus ist die Kombination von Agri-PV mit **reflektierenden Folien** denkbar. Diese sollten vier bis sechs Wochen vor der Ernte 10 cm über dem Boden aufgespannt werden. Sie bergen das Potenzial die Rotfärbung der Äpfel zu verbessern, indem sie den Äpfeln vor der Ernte noch einmal zusätzliches Licht zur Verfügung stellen (Beaulieu Technical Textiles o. J.). Untersuchungen zeigen, dass die Äpfel durch das Auslegen dieser Folien besser gefärbt und der Zuckergehalt der Früchte sich erhöht hat (Funke und Blanke 2011). Beim Einsatz von bifazialen Modulen könnte nicht nur die Lichtverfügbarkeit für Äpfel verbessert werden, sondern darüber hinaus die Stromerzeugung von der ausgelegten Reflektionsfolie profitieren.

Schon im vorliegenden Modell kann die Agri-PV einen gewissen **Hagelschutz** gewährleisten, jedoch muss weiterhin auf Hagelnetze zurückgegriffen werden. Wie in

Kapitel 8.1 dargelegt, könnten größere PV-Module einen vollständigen Verzicht auf Hagelschutznetze ermöglichen, ohne die Verschattung signifikant zu erhöhen. Neben dem besseren Hagelschutz könnte durch größere Module außerdem die Abtropfkante der Module weiter in die Fahrgasse ragen, womit eine einseitige Verwässerung der Fahrgasse verhindert werden könnte. Auch sollte untersucht werden, ab welchem Neigungswinkel und welcher Ausrichtung Bäume optimal vor Hagel geschützt sind (Experteninterviews 2021). Darüber hinaus könnten auch Dachsysteme, wie sie bei Willockx et al. (2020) eingesetzt werden, auf ihre Fähigkeit des Hagelschutzes untersucht werden. Die Autoren argumentieren hierbei, dass sich durch diese Konstruktion eine Kostenreduktionen im Gegensatz zu einseitig ausgerichteten Modulen einstellt, da die Windlast und damit die Anforderungen an die Statik reduziert werden.

Das Modell konzentriert sich auf den Apfelanbau in der Region Ahrweiler. Eine Erweiterung um Anforderungen der **Anbauregionen** in Süddeutschland ist vielversprechend. Dies ist insbesondere deshalb der Fall, da hier die Sonneneinstrahlung höher ist, sogar schwarze Hagelnetze ohne nennenswerten Qualitätsverlust eingesetzt werden können (vgl. Kapitel 2.4.2.1) und die Gefahr von Sonnenbrand höher liegt, welchem durch Verschattung entgegengewirkt werden kann (Handschack 2013). Außerdem tritt hier vermehrt die Problematik der Lagerfäule auf (föko 2020), der durch kostenintensive Behandlungen, aber auch durch Überdachung begegnet werden kann (Buchleither und Arnegger 2021). Zudem weisen die Anbauregionen in Süddeutschland durch größere Niederschlagsmengen oftmals einen höheren Schorfdruck auf, wodurch das Einsparungspotenzial durch die Reduktion an Fungiziden nochmals steigt. Zudem sollte die Agri-PV durch die höhere Sonneneinstrahlung eine geringere Auswirkung auf Temperaturunterschiede von Tag und Nacht haben, welche entscheidend für eine ausreichende Ausfärbung der Äpfel ist (Experteninterviews 2021).

Darüber hinaus sollten **Geschäftsmodelle** entwickelt werden, die die Implementierung der Agri-PV unabhängig von der Entwicklung der EEG möglich machen könnten. So könnte beispielsweise untersucht werden, wie geeignete PPAs gefunden und Beteiligungsmodelle (vgl. Kapitel 3.4.3) geschaffen werden könnten. Diese könnten sich den landwirtschaftlichen Strukturen folgend an Zusammenschlüsse von Landwirten oder EOs orientieren. Auch ein hoher Eigenverbrauchsanteil von EOs als Betreiber einer Agri-PV Anlage mit seiner Wirkung auf die Wirtschaftlichkeit dieser sollte überprüft werden.

## 10 Fazit und Ausblick

Die Landwirtschaft wird in Zukunft wie kaum ein anderer Sektor vom Klimawandel betroffen sein (WBGU 2020), denn die hier generierten Erträge sind direkt von Klima-, Witterungs- und Wetterbedingungen abhängig (Gömann et al. 2015). Landwirte stehen unter Zugzwang, einen kontinuierlich hohen Qualitätsertrag zu liefern (Wicke 2015), was auch ein Grund dafür sein kann, dass der geschützte Anbau im Obstbau in den letzten Jahren gestiegen ist (Garming et al. 2018). Die Agri-PV birgt das Potential den Apfelanbau vor Extremwetterlagen zu schützen und gleichzeitig Strom auf der Anbaufläche zu generieren. Die für den Apfelanbau in Deutschland risikoreichsten Extremwetterlagen sind Hagel, Spätfrost, Starkregen und Trockenheit. Vor mindestens drei dieser könnte die Agri-PV Schutz bieten.

Ziel dieser Arbeit war es zu untersuchen, ob eine Agri-PV-Anlage aus Sicht des Landwirtes eine ökonomisch sinnvolle Alternative zu Hagelschutznetzen im Apfelanbau darstellt. Während sich Untersuchungen zur Ökonomie von Agri-PV-Anlagen bis dato vorwiegend auf die Seite der PV fokussiert haben, gibt diese Arbeit Einblicke in die wirtschaftlichen Auswirkungen auf der Seite der Landwirtschaft. Dies ist vor allem deshalb von hoher Bedeutung, da für eine Implementierung der Technologie Agri-PV die Akzeptanz von Landwirten elementar ist (vgl. Kapitel 3.4.4). Um die Auswirkungen der Agri-PV auf die Apfelproduktion abschätzen und in einem nächsten Schritt die wirtschaftlichen Folgen daraus ableiten zu können, wurde eine umfassende Literaturrecherche betrieben und die Ergebnisse anhand von Experteninterviews sowie weiterführenden Gespräche mit Praxis- und Fachspezialisten validiert. Mithilfe von Microsoft Excel wurden die Daten aufbereitet und analysiert.

Wie die Wirtschaftlichkeitsanalyse der Agri-PV im Apfelanbau zeigt, sind deren Ergebnisse abhängig davon, welche Akteurskonstellation herangezogen wird. Je nachdem, ob der Landwirt nur verantwortlich für die Apfel-Anlage oder zusätzlich auch für die PV-Anlage ist, wird das Agri-PV-System gesamt oder nur auf Seiten der Landwirtschaft betrachtet (vgl. Kapitel 3.4.3). Aus dieser Arbeit geht hervor, dass die Agri-PV ökonomisch sinnvoll im Bio-Apfelanbau eingesetzt werden kann, wenn am betrachteten Standort andernfalls eine Hagelschutzvorrichtung notwendig werden würde. Dabei ist sowohl der Apfelanbau innerhalb des Agri-PV-Systems sowie das komplette System der Agri-PV, das auch die Stromerzeugung umfasst, verglichen mit Apfelanbau unter Hagelnetzen ökonomisch rentabler, wenn die Agri-PV eine

entsprechende EEG-Vergütung erhält. Während sich auf der Seite der Landwirtschaft Kosteneinsparungen in Investitions- und Betriebskosten in Höhe von 26 % bzw. 8 % durch die Agri-PV ergeben und sich die Amortisationszeit um 4 Jahre verkürzt, ist die Agri-PV als Gesamtsystem deutlich kostenintensiver und braucht im Gegensatz zur Hagelschutzkonstruktion 4 Jahre länger, um den Break-Even-Punkt zu erreichen. Obwohl in der Apfelproduktion der Qualitätsanteil von 90 auf 80 % durch die Agri-PV sinkt und sich damit auch die Einnahmen um 8 % reduzieren, überwiegen die Einsparungen auf der Kostenseite. Wie diese Arbeit außerdem zeigt, können die Einnahmen der Stromerzeugungsseite dabei helfen, die Kosten pro produzierten Apfel um 59 % zu senken, wenn es zu einer Querfinanzierung der Landwirtschaft durch Gewinne aus den Stromverkäufen kommt. Insgesamt ließ sich feststellen, dass bei einer Betrachtung der Gesamtwirtschaftlichkeit des Agri-PV-Systems, die Inputparameter der Stromerzeugungsseite eine höhere Gewichtung haben als die der Landwirtschaft. Zudem konnte gezeigt werden, dass die Einnahmen der Landwirtschaftsseite deutlich volatiler sind als die der Stromerzeugung und diese durch eine Hinzunahme der Einkünfte aus Stromverkäufen stabilisiert werden können. Diese beiden Aspekte treffen jedoch nur bei einer Gesamtbetrachtung des Systems zu. Bei reiner Betrachtung der Landwirtschaft ist weder das Zustandekommen einer Querfinanzierung wahrscheinlich, noch konnte eine Einkommensstabilisierung festgestellt werden. Durch die Agri-PV über innerdeutschen Apfelanbaufläche wäre die Installation einer Gesamtleistung von fast 24 GWp möglich. Insbesondere, wenn sich Extremwetterlagen in Zukunft häufen und Landwirte vermehrt auf Kulturschutz setzen müssen, kann sich das Potenzial der Agri-PV deutlich steigern.

Durch zusätzliche Untersuchung weiterer Systemdesigns oder Anbauregionen und Bewirtschaftungsformen könnten die Ergebnisse dieser Arbeit erweitert und verglichen werden (vgl. Kapitel 9.2). Zukünftige Forschungen sollten das Mikroklima innerhalb der Agri-PV-Apfel-Anlage sowie deren Auswirkungen auf die Betriebskosten und Ernteerträge analysieren. Auch wäre die Frage von Interesse, inwieweit sich an der Agri-PV-Anlage durch die Bewirtschaftung Staub und Pflanzenschutzmittel anlagert und welche Auswirkungen dies wiederum auf die mikroklimatischen Bedingungen hat. Zudem ist es für eine erfolgreiche Implementierung der Technologie elementar, Informationen über die soziale Akzeptanz (vgl. Kapitel 3.4.3) zu generieren. Für die Marktakzeptanz wäre es von Vorteil Agri-PV-Systeme zu untersuchen, die Landwirte nicht dauerhaft an eine Bewirtschaftungsform und Kultur binden. Gerade in Regionen mit knappen Wasserressourcen sollte untersucht werden, inwieweit das Regenwasser,

das auf der Anlage auftrifft, gesammelt und den Bäumen wieder zugeführt werden kann und welche Kosteneinsparungen bzw. erhöhte Einnahmen durch verbesserte Erträge sich dadurch erwirtschaften ließen. Darüber hinaus könnte eine weitere Forschungsfrage sein, wie sich aus der Verbindung von Agri-PV und Robotik im Gegensatz zur konventionellen Bewirtschaftung Kostenänderungen ergeben.

Die Agri-PV im Apfelanbau kann für Landwirte einen validen Business Case darstellen, was mit der richtigen Stromvergütung auch auf das Gesamtsystem zutrifft. Mögliche Hürden, die bei der Implementierung der Agri-PV im Vergleich zu Hagelschutznetzen momentan noch überwunden werden müssen und durch vorliegende Arbeit gefunden wurden, sind das Wegfallen der EU-Direktzahlungen, das zeit- und kostenintensive Baugenehmigungsverfahren, Unsicherheiten bezüglich der Auswirkung auf die Apfelbäume, der geringe Bekanntheitsgrad und damit mögliche Unsicherheit der Landwirte gegenüber der Technologie, die hohe Kapitalintensität sowie keine feste Berücksichtigung in der EEG. Um der Agri-PV zuträgliche Voraussetzungen zu schaffen, ergibt sich die Notwendigkeit Akteurskonstellationen zu analysieren, Geschäftsmodelle zu entwickeln, agrarwissenschaftliche Untersuchungen durchzuführen, mit Landwirten und Landwirtschaftsverbänden in den Dialog zu treten und die regulatorischen Rahmenbedingungen anzupassen. Hierdurch sollten Wege aufgezeigt werden, wie eine Implementierung der Agri-PV möglichst kosteneffizient, synergienmaximiert und unbürokratisch durchgeführt werden kann. Einige dieser Aspekte werden in dem dieser Arbeit zugrundeliegenden Forschungsprojekt Agri-PV Obstbau adressiert. Vor dem Hintergrund sich häufender Risiken für die Landwirtschaft durch Extremwetterereignisse und dem steigenden Schutzbedarf mehrjähriger Kulturen sowie fehlenden PV-Kapazitäten in Deutschland kann Agri-PV einen wichtigen Beitrag zur sicheren Lebensmittel-, Strom- und damit Einkommens-Bereitstellung leisten.

## Literaturverzeichnis

- Agostini, Alessandro; Colauzzi, Michele; Amaducci, Stefano (2021): Innovative agrivoltaic systems to produce sustainable energy: An economic and environmental assessment. In: *Applied Energy* 281, 1–13. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.116102.
- agri benchmark (Hg.) (2014): Horticulture Report. understanding agriculture worldwide. Thünen Institut; German Agricultural Society. Online verfügbar unter <http://www.agribenchmark.org/horticulture/publications-and-projects1.html>.
- Vornorm DIN SPEC 91434: 2021-05, 2021: Agri-Photovoltaik-Anlagen – Anforderungen an die landwirtschaftliche Hauptnutzung. Online verfügbar unter <https://www.beuth.de/de/technische-regel/din-spec-91434/337886742>.
- Agrora Energiewende (Hg.) (2015): Current and Future Cost of Solar Photovoltaics. Key Insights. Online verfügbar unter [https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2014/Kosten-Photovoltaik-2050/Agora\\_Future\\_Cost\\_of\\_PV\\_Key\\_Insights\\_Presentation\\_web.pdf](https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2014/Kosten-Photovoltaik-2050/Agora_Future_Cost_of_PV_Key_Insights_Presentation_web.pdf).
- Amaducci, Stefano; Yin, Xinyou; Colauzzi, Michele (2018): Agrivoltaic systems to optimise land use for electric energy production. In: *Applied Energy* 220, 545–561. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.03.081.
- APC Group (2018): Solar Sharing for fun, Flyer about light saturation point of different crops. In cooperation with Sun Farm.
- Arnegger, Thomas; Buchleither, Sascha; Mayr, Ulrich (2018): Impact of a rain-roof-covering-system on the incidence of fungal diseases, quality parameters and solar radiation in organic apple production. In: International Federation of Organic Agriculture Movements Organics Europe (IFOAM Organics Europe) (Hg.): 18th International conference on organic fruit growing. Stuttgart.
- Aufsichts- und Dienstleistungsdirektion Rheinland-Pfalz (ADD) (Hg.): Antragsunterlagen Agrarförderung. Online verfügbar unter <https://add.rlp.de/de/themen/foerderungen/in-der-landwirtschaft-agrarfoerderungen/antragsunterlagen/>, zuletzt geprüft am 11.06.2021.
- Baab, Gerhard (2015): Hagelschutzsysteme im Vergleich. In: *Obstbau* 07, 276-282.
- Balmer, Martin (2010): Obstbau. Betriebswirtschaftliche und produktionstechnische Kalkulationen. Unter Mitarbeit von Till Belau. 4. überarbeitete Auflage. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL-Datensammlung).
- Balmer, Martin; Wicke, Margret (2020): Excel Kalkulationsprogramm "Invob-Apfelanlage". Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum - Rheinpfalz.
- Barron-Gafford, Greg A.; Pavao-Zuckerman, Mitchell A.; Minor, Rebecca L.; Sutter, Leland F.; Barnett-Moreno, Isaiah; Blackett, Daniel T.; Thompson, Moses;

- Dimond, Kirk; Gerlak, Andrea K.; Nabhan, Gary P.; Macknick, Jordan E. (2019): Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands. In: *Nature Sustainability* 2 (9), 848–855. DOI: 10.1038/s41893-019-0364-5.
- Barthelmeß, Johannes (20.05.21): AW: Agri-PV Stromvergütung: Prognose für in 20 Jahren? Experte Energiemarkt, EWS Schönau, 20.05.21, persönliche Mitteilung an Michaela Hopf.
- Beaulieu Technical Textiles (o. J.): Lumilys. Smart reflective groundcover. Online verfügbar unter <https://www.beaulieutechnicaltextiles.com/en/product-specs/c/2/agro-textiles/s/35/fruit-colouring/p/88/lumilys-wh100>.
- Beck, Michael; Bopp, Georg; Goetzberger, Adolf; Oberfell, Tabea; Reise, Christian; Schindele, Stephan (2012): Combining PV and Food Crops to Agrophotovoltaic – Optimization of Orientation and Harvest, 5 pages / 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition; 4096-4100 / 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition; 4096-4100. DOI: 10.4229/27thEUPVSEC2012-5AV.2.25.
- Blanke, M. (2007): Farbige Hagelnetze: Ihre Netzstruktur sowie Licht- und UV-Durchlässigkeit bestimmen die Ausfärbung der Apfelfrüchte. In: *Erwerbs-Obstbau* 4, 127–139. DOI: 10.1007/s10341-007-0048-6.
- Büchle, Manfred; Lucas, Eduard (Hg.) (2018): Lucas' Anleitung zum Obstbau. Eugen-Ulmer-Verlag. 33., erweiterte Auflage. Stuttgart (Hohenheim): Ulmer (Fachbibliothek Produktionsgartenbau). Online verfügbar unter <http://www.ulmer.de/artikel.dll/Webshop?RC=Book2Look&ISBN=978-3-8186-1868-1>.
- Buchleither, Sascha; Arnegger, Thomas (2021): Geschützter ökologischer Anbau von Tafeläpfeln. In: *Obstbau* 2, 71–76.
- Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) (Hg.) (2017): Agrarmeteorologie. Bundesinformationszentrum Landwirtschaft (BZL). Online verfügbar unter <https://www.ble-medien-service.de/1651/agrarmeteorologie>, zuletzt geprüft am 06.12.2020.
- Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) (Hg.) (2020): Äpfel. Produktinformation. Unter Mitarbeit von Hans-Georg Levin. Online verfügbar unter <https://www.ble-medien-service.de/0102/aepfel-produktinformation>, zuletzt geprüft am 06.12.2020.
- Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) (Hg.) (2021): Zahlungen aus den EU-Fonds für Landwirtschaft und Fischerei - EU-Agrarförderung. Online verfügbar unter [https://www.agrar-fischerei-zahlungen.de/agrar\\_foerderung.html#direktzahlungen](https://www.agrar-fischerei-zahlungen.de/agrar_foerderung.html#direktzahlungen), zuletzt aktualisiert am 18.05.2021, zuletzt geprüft am 11.06.2021.

- Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hg.) (2018a): Die wirtschaftliche Lage der landwirtschaftlichen Betriebe 2018. Textteil. Online verfügbar unter <https://www.bmel-statistik.de/landwirtschaft/testbetriebsnetz/testbetriebsnetz-landwirtschaft-buchfuehrungsergebnisse/>.
- Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hg.) (2018b): Welternährung verstehen. Fakten und Hintergründe. Online verfügbar unter <https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/Welternaehrung-verstehen.html>.
- Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hg.) (2019a): Der Gartenbau in Deutschland. Auswertung des Gartenbaumoduls der Agrarstrukturerhebung 2016. Online verfügbar unter [www.bmel.de/publikationen](http://www.bmel.de/publikationen).
- Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hg.) (2019b): Landwirtschaft verstehen. Fakten und Hintergründe. Online verfügbar unter <https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/Landwirtschaft-verstehen.html>.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (Hg.) (2019): Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050. Online verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschutzprogramm-2030-1673578>.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hg.) (2021): Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland. 1990-2020. Online verfügbar unter [https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare\\_Energien\\_in\\_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html](https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html).
- Bundesnetzagentur (BNetzA) (Hg.) (2021a): Beendete Ausschreibungen. Statistiken Solaranlagen-Ausschreibungen. Ausschreibungsrunde März 2021. Online verfügbar unter [https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen\\_Institutionen/Ausschreibungen/Solaranlagen1/BeendeteAusschreibungen/BeendeteAusschreibungen\\_node.html](https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/Ausschreibungen/Solaranlagen1/BeendeteAusschreibungen/BeendeteAusschreibungen_node.html), zuletzt geprüft am 24.06.2021.
- Bundesnetzagentur (BNetzA) (Hg.) (2021b): Marktdaten. Großhandelspreise Strom der Jahre 2015 bis 2021. Online verfügbar unter <https://www.smard.de/home/downloadcenter/download-marktdaten>.
- Bundesrepublik Deutschland – Finanzagentur GmbH (Hg.) (2021): Bundesanleihen. Online verfügbar unter <https://www.deutsche-finanzagentur.de/de/private-anleger/bundeswertpapiere/bundesanleihen/>, zuletzt geprüft am 30.05.2021.
- Busse von Colbe, Walther; Laßmann, Gert; Witte, Frank (Hg.) (2015): Investitionstheorie und Investitionsrechnung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

- Decker, Christian (2008): Internationale Projektfinanzierung. Konzeption und Prüfung, Grundsätze ordnungsmäßiger Offenlegung der wirtschaftlichen Verhältnisse bei internationalen Projektfinanzierungen. Norderstedt.
- Deutscher Bundestag (Hg.) (2018): Risikomanagement bei bestimmten Sonderkulturen. Ausarbeitung WD 5 - 3000 - 045/18. Online verfügbar unter <https://www.bundestag.de/blob/554944/1cd3aa3ea864ffda5f04825e814e7cbc/wd-5-045-18-pdf-data.pdf>, zuletzt geprüft am 06.12.2020.
- Deutscher Bundestag (Hg.) (2019): Subventionen für Hagelschutznetze. Sachstand WD 5 - 3000 - 014/19. Online verfügbar unter <https://www.bundestag.de/resource/blob/636062/6992e83113fd9c96c35816f1e2524ee9/WD-5-014-19-pdf-data.pdf>.
- Deutscher Bundestag (2021): Drucksache 19/30212. Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Nicole Bauer, Frank Sitta, Dr. Gero Clemens Hocker, weiterer Abgeordneter und der Fraktion der FDP, Potenziale von Agri-Photovoltaik. Online verfügbar unter <https://dip21.bundestag.de/dip21/btd/19/302/1930212.pdf>.
- Deutscher Wetterdienst (DWD) (o. J.): Evapotranspiration, Wetter- und Klimalexikon. Online verfügbar unter <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=100652&lv3=100776>, zuletzt geprüft am 26.05.2021.
- Dietiker, D.; Hanhart, J.; Bravin, E. (2017): Arbeiten im Obstbau. In: *Schweizer Zeitschrift für Obst- und Weinbau* 11, 9–13.
- Dinesh, Harshavardhan; Pearce, Joshua M. (2016): The potential of agrivoltaic systems. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 54, 299–308. DOI: 10.1016/j.rser.2015.10.024.
- Ebert, Georg; Schäfer, Sabine; Büttner, Carmen; Bokelmann, Wolfgang; Lindicke, Manfred; (Balmer); (Martin) (2006): Einsparungspotenziale an Pflanzenschutz- und Düngemitteln im ökologisch orientierten Obstbau durch Überdachungssysteme. Auswirkungen auf Mikroklima, Baumwachstum, Fruchtqualität sowie den phytosanitären Status von Süßkirschen. Humboldt-Universität zu Berlin Institut für Gärtnerische Pflanzensysteme.
- Elamri, Yassin; Cheviron, Bruno; Lopez, J.-M.; Dejean, C.; Belaud, G. (2018): Water budget and crop modelling for agrivoltaic systems: Application to irrigated lettuces. In: *Agricultural Water Management* 208, 440–453. DOI: 10.1016/j.agwat.2018.07.001.
- Europäisches Parlament (Hg.): Die künftige Gemeinsame Agrarpolitik nach 2020. Kurzdarstellungen zur Europäischen Union. Online verfügbar unter <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/de/sheet/113/die-kunftige-gemeinsame-agrarpolitik-nach-2020>, zuletzt geprüft am 11.06.2021.

- Experteninterviews (2021): Auswirkungen der Agri-PV auf den Apfelanbau in Deutschland, Interviews mit fünf Experten aus den fünf Anbauregionen in Deutschland. Interviewt durch Michaela Hopf.
- Fernandez, Pablo (2020): The Equity Premium in 150 Textbooks. In: *Journal of New Finance* 1 (3). DOI: 10.46671/2521-2486.1009.
- Fördergemeinschaft Ökologischer Obstbau e.V. (föko) (Hg.) (2020): Gesunderhaltung der Kulturpflanzen im Ökologischen Apfelanbau. auf der Basis einer Erhebung von Praxisdaten im Jahr 2018. Weinsberg. Online verfügbar unter <https://www.foeko.de/publikationen/gesunderhaltung-der-pflanzen-im-oeko-apfelanbau/>.
- Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (Fraunhofer ISE) (Hg.) (2020): Agri-Photovoltaik: Chance für Landwirtschaft und Energiewende. Ein Leitfaden für Deutschland. Online verfügbar unter <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/agri-photovoltaik-chance-fuer-landwirtschaft-und-energiewende.html>.
- Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (Fraunhofer ISE) (2021): Anlagendatenbank Agri-PV.
- Funke, Kerstin; Blanke, Michael (2011): Mikroklima-, Farb- und Geschmacksverbesserung durch Licht reflektierende Folie zu verschiedenen Auslegeterminen bei 'Elstar'- und 'Jonagold' Äpfeln unter schwarzem und weißem Hagelnetz. In: *Erwerbs-Obstbau* 1, 1–10. DOI: 10.1007/s10341-010-0120-5.
- Garming, Hildegard (2016): Ein Jahr Mindestlohn - Kosteneffekte, Anpassungsmaßnahmen und praktische Probleme im deutschen Gartenbau. In: Walter Dirksmeyer, Michael Schulte und Ludwig Theuvsen (Hg.): Aktuelle Forschung in der Gartenbauökonomie. Nachhaltigkeit und Regionalität – Chancen und Herausforderungen für den Gartenbau. 2. Symposium für Ökonomie im Gartenbau, 01.03.2016 (Thünen Report 44), 175–195.
- Garming, Hildegard; Dirksmeyer, Walter; Bork, Linda (2018): Entwicklungen des Obstbaus in Deutschland von 2005 bis 2017: Obstarten, Anbauregionen, Betriebsstrukturen und Handel. Thünen Institut. Braunschweig (Thünen Working Paper 100).
- Gesellschaft für Kunststoffe im Landbau e.V. (Hg.) (2006): Kunststoffeinsatz im Obstbau - Bewässerung und Folieneinsatz. GLK - Frühjahrstagung 2006, Sektion Gartenbau und Sonderkulturen. Bad Neuenahr-Ahrweiler, 10.-11.05.2006. Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum Rheinpfalz (DLR RP).
- Gim, Geun Ho; Park, Jongsung; Kim, Tae young; Kim, Deok Sung; Kim, Wooram; Nam, Jaewoo; Lim, Cheolhyun (2020): Investigation of pear growth under foldable agrivoltaic structure. In: National Research Institute for Agriculture, Food and Environment (INRAE) (Hg.): AgriVoltaics2020 - Launching Agrivoltaics Worldwide. online conference. France, Perpignan, 14.-16.10.2020.

- Goetzberger, Adolf; Zastrow, Armin (1981): Kartoffeln unter dem Kollektor. In: *Sonnenenergie* 81 (3), 19–22.
- Gömann, Horst; Bender, Andrea; Bolte, Andreas; Dirksmeyer, Walter; Englert, Hermann; Feil, Jan-Henning et al. (2015): Agrarrelevante Extremwetterlagen und Möglichkeiten von Risikomanagementsystemen. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut (Thünen Report, 30). Online verfügbar unter <http://d-nb.info/1072831090/>.
- Handsack, Margita (2013): Apfelanbau unter Hagelnetz. Anbau von Tafeläpfeln unter Hagelnetz unter sächsischen Bedingungen. In: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) (Hg.): Schriftenreihe LfULG, 11/2013 (Schriftenreihe LfULG).
- Hassanpour Adeg, Elnaz; Selker, John S.; Higgins, Chad W. (2018): Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency. In: *PloS one* 13 (11), 1-15. DOI: 10.1371/journal.pone.0203256.
- Heesen, Bernd (2016): Investitionsrechnung für Praktiker. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Holstenkamp, Lars; Gegenhart, Heinrich; Bettinger, Carola (2015): Anmerkungen zur Bestimmung der Finanzierbarkeit von Erneuerbare-Energien-Projekten als Bestandteil von SmartMicrogrid-Konzepten. In: *Arbeitspapierreihe Wirtschaft & Recht* 23.
- Honma, Masaru; Doi, Tetsuya; Yoshida, Yoshikuni (2016): Demonstration and simulation of agricultural photovoltaic power generation for rice cultivation. In: *Journal of Japan Society of Energy and Resources* 37 (6), 1–19.
- Horowitz, Kelsey; Ramasamy, Vignesh; Macknick, Jordan; Margolis, Robert (2020): Capital Costs for Dual-Use Photovoltaic Installations: 2020 Benchmark for Ground-Mounted PV Systems with Pollinator-Friendly Vegetation, Grazing, and Crops, Technical Report NREL/TP-6A20-77811. Hg. v. National Renewable Energy Laboratory (NREL). Online verfügbar unter [www.nrel.gov/publications](http://www.nrel.gov/publications).
- Immik, Elke (2019): Wasserbedarf, Nutzen und Kosten von Bewässerungsverfahren im Obstbau. In: Obstbauberatung des Kompetenzzentrum Gartenbau (KoGa) (Hg.): Profiseminar Obstbau. Oppenheim.
- Institut für Mittelstandsforschung Bonn (IfM Bonn) (Hg.) (2020): Durchschnittliche Eigenkapitalquoten der KMU und Großunternehmen sowie aller Unternehmen für den Zeitraum 1997 bis 2019. Stand: Dezember 2020. Online verfügbar unter <https://www.ifm-bonn.org/statistiken/mittelstand-im-einzelnen/eigenkapitalquote>.
- (irriport GmbH) (01.04.21): Preisabschätzung Frostschutzberechnung, 01.04.21, persönliche Mitteilung an Michaela Hopf.
- Jacob, H. B.; Koch, Michael (2005): Folgen, Maßnahmen und Kosten des Klimawandels für den Obstbau in Hessen. Im Rahmen des Integrierten Klimaschutzprogramms

- Hessen 2012 Baustein II Klimawandel und Klimafolgen in Hessen – Bereich Landwirtschaft, Sonderkultur Obstbau, Abschlussbericht. Geisenheim.
- Juillion, Perrine (2021): Impact of full sun tracking with photovoltaic panels on subsequent year bloom density and fruit drop in apple trees. In: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (Fraunhofer ISE) (Hg.): AgriVoltaics2021 - Connecting Agrivoltaics Worldwide. online conference. Germany, Freiburg, 14.-16.06.2021.
- Juillion, Perrine; Lopez, Gerardo; Fumey, Damien; Génard, Michel; Lesniak, Vincent; Vercambre, Gilles (2020): Water Status, Irrigation Requirements and Fruit Growth of Apple Trees Grown under Photovoltaic Panels. In: National Research Institute for Agriculture, Food and Environment (INRAE) (Hg.): AgriVoltaics2020 - Launching Agrivoltaics Worldwide. online conference. France, Perpignan, 14.-16.10.2020.
- Keinath, Tobias (2021): Reduktion der Evapotranspiration durch Agri-Photovoltaikanlagen. Modellierung der Mikroklimadaten der Pilotanlage in Heggelbach, Bachelorarbeit. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Freiburg.
- Khanh, Nguyen Quoc (2020): Examining The Financial Feasibility Of Dual Land Use Approach For Agriculture Production And Electricity Production From Solar PV In Vietnam. Hg. v. Netherlands Development Organisation (SNV). Hanoi.
- Klophaus, Lisa; Baab, Gerhard (2015): Apfelanbau unter Hagelnetz. Einfluss verschiedener Hagelnetzfarben auf Wachstum, Ertrag und Fruchtqualität. In: *Obstbau* 6, 347–353.
- Konstantin, Panos (2013): Praxisbuch Energiewirtschaft. Energieumwandlung, -transport und -beschaffung im liberalisierten Markt. 3., aktual. Aufl. 2013. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg (VDI-Buch). Online verfügbar unter <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10774929>.
- Köppler, Kirsten (2017): Existenzgefährdende Frostschäden im Obstbau - wie weiter?, Pflanzenschutz. Hg. v. Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg (LTZ). Karlsruhe.
- Kost, Christoph; Shammugam, Shivenes; Fluri, Verena; Peper, Dominik; Memar, Aschkan Davoodi; Schlegl, Thomas (2021): Stromgestehungskosten erneuerbare Energien. Juni 2021. Hg. v. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (Fraunhofer ISE).
- KPMG (Hg.) (2021): Corporate Tax Rates Table. Online verfügbar unter <https://home.kpmg/xx/en/home/services/tax/tax-tools-and-resources/tax-rates-online/corporate-tax-rates-table.html>, zuletzt geprüft am 30.05.2021.
- Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) (Hg.) (2021): Konditionsübersicht für Endkreditnehmer, Stand: 26.05.2021. Online verfügbar unter <https://www.kfw-formularsammlung.de/KonditionenanzeigerINet/KonditionenAnzeiger>.

- Kreisel, Alexander; Schlossberger, Florian (2019): Einzelkapitel 5 Obst. In: Agrarmärkte 2019, 74–98. Online verfügbar unter [https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/iem/dateien/by\\_05\\_obst-1.pdf](https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/iem/dateien/by_05_obst-1.pdf).
- Krengel, Sandra; Louis, Friedrich; Krauthausen, Hermann-Josef (2015): Definition von Extremwetterlagen bei Sonderkulturen des Wein-, Obst-, Hopfen- und Gemüseanbaus sowie die Abschätzung von Ursache-Wirkungsbeziehungen bei diesen Kulturen. Endbericht im Verbundprojekt "Agrarrelevante Extremwetterlagen und Möglichkeiten von Risikomanagementsystemen".
- Kreuzmann, Anna (2021): Äpfel mit Sonnenbrand. Technisch machbar - doch rechtliche Hürden verhindern in Deutschland den Erfolg der Agri-PV. In: *PHOTON* (Juni), 12–17. Online verfügbar unter <https://www.mkg-goebel.de/download/PHOTON%202021-06%20Artikel%20Agri-PV.pdf>.
- Kröling, Christian (2019): Apfelanbau unter Einzelreihenhagelnetzen. Anbau von Tafeläpfeln unter Einzelreihenhagelnetzen. In: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) (Hg.): Schriftenreihe LfULG, 09/2019 (Schriftenreihe LfULG).
- Landwirtschaftliche Rentenbank (Hg.) (2021): Konditionenrundschriften Nr. 5 / 2021. Online verfügbar unter <https://www.rentenbank.de/foerderangebote/konditionen/>, zuletzt aktualisiert am 04.05.2021.
- Lasta, Christian; Konrad, Georg (2018): Agro-Photovoltaik. Agrophotovoltaik: Doppelnutzung von Böden bei Flächenfraß als Gebot der Stunde. In: Technische Universität Graz (Hg.): Neue Energie für unser bewegtes Europa. 15. Symposium Energieinnovation (EnInnov2018), 14.-16.02.2018.
- Magami, Takeshi (2018): Diversification of facilities and business schemes in the prevalence of agricultural photovoltaic power generation (solar sharing), and the need to develop new business models Issues for dissemination. Reports and Activities. In: *Chiba University Public Research* 14 (1), 375–401.
- Malu, Prannay R.; Sharma, Utkarsh S.; Pearce, Joshua M. (2017): Agrivoltaic potential on grape farms in India. In: *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 23, 104–110. DOI: 10.1016/j.seta.2017.08.004.
- Marrou, H.; Dufour, L.; Wery, J. (2013a): How does a shelter of solar panels influence water flows in a soil–crop system? In: *European Journal of Agronomy* 50, 38–51. DOI: 10.1016/j.eja.2013.05.004.
- Marrou, H.; Guilioni, L.; Dufour, L.; Dupraz, C.; Wery, J. (2013b): Microclimate under agrivoltaic systems: Is crop growth rate affected in the partial shade of solar panels? In: *Agricultural and Forest Meteorology* 177, 117–132. DOI: 10.1016/j.agrformet.2013.04.012.
- Marrou, H.; Wery, J.; Dufour, L.; Dupraz, C. (2013c): Productivity and radiation use efficiency of lettuces grown in the partial shade of photovoltaic panels. In: *European Journal of Agronomy* 44, 54–66. DOI: 10.1016/j.eja.2012.08.003.

- Maschinenringe Deutschland (o. J.): Die Maschinenring Organisation. Der Maschinenring stellt sich vor. Online verfügbar unter <https://www.maschinenring.de/maschinenring-deutschland/mr-organisation.html>, zuletzt geprüft am 21.05.2021.
- Ministerium für Wirtschaft, Verkehr, Landwirtschaft und Weinbau Rheinland-Pfalz (mwvwlw) (Hg.) (2021): Merkblattmappe Agrarförderung - Allgemeiner Teil. Antragsjahr 2021. Online verfügbar unter <https://add.rlp.de/de/themen/foerderungen/in-der-landwirtschaft-agrarfoerderungen/antragsunterlagen/>.
- Moreda, Guillermo P.; Muñoz-García, Miguel A.; Alonso-García, M. Carmen; Hernández-Callejo, Luis (2021): Techno-Economic Viability of Agro-Photovoltaic Irrigated Arable Lands in the EU-Med Region: A Case-Study in Southwestern Spain. In: *Agronomy* 11 (593), 1–24. DOI: 10.3390/agronomy11030593.
- Müller, Ragnar; Plieninger, Jürgen; Rapp, Christian (Hg.) (2013): Recherche 2.0. Finden und Weiterverarbeiten in Studium und Beruf. Wiesbaden: Springer VS.
- Nachtwey, Christian (2021): Besprechung: Kostenstruktur Bio-Obsthof Nachtwey. Experte Bio-Obsthof Nachtwey, 23.02.2021, persönliche Mitteilung an Michaela Hopf.
- Onvalue GmbH & Co. KG (Hg.) (2021): Betafaktoren für Wirtschaftssektoren – Bandbreiten. Unternehmen, Europa. 31. März 2021. Online verfügbar unter <https://www.onvalue.de/kapitalkosten/branchenbetas/>.
- Othman, N. F.; Ya'acob, M. E.; Abdul-Rahim, A. S.; Shahwahid Othman, M.; Radzi, M. A. M.; Hizam, H.; Wang, Y. D.; Ya'acob, A. M.; Jaafar, H. Z. E. (2015): Embracing new agriculture commodity through integration of Java Tea as high Value Herbal crops in solar PV farms. In: *Journal of Cleaner Production* 91, 71–77. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.12.044.
- Pascaris, Alexis S.; Schelly, Chelsea; Burnham, Laurie; Pearce, Joshua M. (2021): Integrating solar energy with agriculture: Industry perspectives on the market, community, and socio-political dimensions of agrivoltaics. In: *Energy Research & Social Science* 75. DOI: 10.1016/j.erss.2021.102023.
- Pascaris, Alexis S.; Schelly, Chelsea; Pearce, Joshua M. (2020): A First Investigation of Agriculture Sector Perspectives on the Opportunities and Barriers for Agrivoltaics. In: *Agronomy* 10 (12). DOI: 10.3390/agronomy10121885.
- pv magazine (2021): EEG-Verordnungspaket: Änderungen für Agro-Photovoltaik und Speicher geplant. Online verfügbar unter <https://www.pv-magazine.de/2021/05/14/eeg-verordnungspaket-aenderungen-fuer-agro-photovoltaik-und-speicher-geplant/>, zuletzt aktualisiert am 14.05.2021, zuletzt geprüft am 20.05.2021.
- Ravi, Sujith; Lobell, David B.; Field, Christopher B. (2014): Tradeoffs and Synergies between biofuel production and large solar infrastructure in deserts. In:

- Environmental science & technology* 48 (5), 3021–3030. DOI: 10.1021/es404950n.
- Ravi, Sujith; Macknick, Jordan; Lobell, David; Field, Christopher; Ganesan, Karthik; Jain, Rishabh; Elchinger, Michael; Stoltenberg, Blaise (2016): Colocation opportunities for large solar infrastructures and agriculture in drylands. In: *Applied Energy* 165, 383–392. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.12.078.
- Richter, Mauricio; Tjengdrawira, Caroline; Vedde, Jan; Green, Mike; Frearson, Lyndon; Herteleer, Bert et al. (2017): Technical assumptions used in PV financial models review of current practices and recommendations. International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme: IEA PVPS Task 13, Subtask 1 : report IEA-PVPS T13-08:2017. Paris: International Energy Agency.
- Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) (Hg.) (2011): Anpassung von Anbaustrategien und -verfahren im Obstbau. Produkt 3.3.1c, REGKLAM Ergebnisbericht. Online verfügbar unter [www.regklam.de](http://www.regklam.de).
- Scharf, Johannes; Grieb, Michael; Fritz, Maendy (2021): Agri-Photovoltaik. Stand und offene Fragen, TFZ-Bericht 73. Straubing.
- Schindele, Stephan; Trommsdorff, Maximilian; Schlaak, Albert; Obergfell, Tabea; Bopp, Georg; Reise, Christian; Braun, Christian; Weselek, Axel; Bauerle, Andrea; Högy, Petra; Goetzberger, Adolf; Weber, Eicke (2020): Implementation of agrophotovoltaics: Techno-economic analysis of the price-performance ratio and its policy implications. In: *Applied Energy* 265 (114737), 1–19. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.114737.
- Schlaak, Albert (2016): Wirtschaftlichkeitsanalyse Agrophotovoltaik. Techno-ökonomische Bewertung der effizienten Nutzung von Ackerflächen unter Photovoltaikanlagen, Bachelorarbeit. Hochschule Flensburg, Flensburg.
- Schlaak, Albert (2021): Rentabilität von PV-Anlagen. Experte PV-Sektor, BayWa r.e., 21.05.2021, persönliche Mitteilung an Michaela Hopf.
- Schwartau, Helwig (2021): AW: WG: Kontaktformular Eva Würtenberger von AMI-informiert.de, 26.05.2021, persönliche Mitteilung.
- Schweizer-Ries, Petra; Rau, Irina; Nolting, Katrin; Keppler, Dorothee: Aktivität und Teilhabe - Akzeptanz Erneuerbarer Energien durch Beteiligung steigern. Projektabschlussbericht - FZK 0325052. Online verfügbar unter [https://www.tu-berlin.de/fileadmin/f27/PDFs/Forschung/Abschlussbericht\\_Aktivitaet\\_Teilhabe\\_format.pdf](https://www.tu-berlin.de/fileadmin/f27/PDFs/Forschung/Abschlussbericht_Aktivitaet_Teilhabe_format.pdf), zuletzt geprüft am 01.07.2021.
- Sekiyama, Takashi; Nagashima, Akira (2019): Solar Sharing for Both Food and Clean Energy Production: Performance of Agrivoltaic Systems for Corn, A Typical Shade-Intolerant Crop. In: *Environments* 6 (65), 1–12. DOI: 10.3390/environments6060065.
- Sibbertsen, Philipp; Lehne, Hartmut (2015): Hypothesentests. In: Philipp Sibbertsen und Hartmut Lehne (Hg.): Statistik. Einführung für Wirtschafts- und

- Sozialwissenschaftler. 2., überarbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler (Springer-Lehrbuch), 375–414.
- Solargis s.r.o. (Hg.) (2021): Global Solar Atlas 2.0. Location: Graftschaft, For additional information: <https://globalsolaratlas.info>. World Bank Group. Online verfügbar unter <https://globalsolaratlas.info/map?s=50.586223,7.036104&m=site&c=50.586223,7.036104,11>, zuletzt aktualisiert am 16.06.2021, zuletzt geprüft am 24.06.2021.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2017a): Fachserie 3 Reihe 2.1.2 - Land- und Forstwirtschaft, Fischerei - Bodennutzung der Betriebe (Struktur der Bodennutzung). Online verfügbar unter [https://www.statistischebibliothek.de/mir/receive/DEHeft\\_mods\\_00073397](https://www.statistischebibliothek.de/mir/receive/DEHeft_mods_00073397).
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2017b): Fachserie 3 Reihe 3.1.4 - Land- und Forstwirtschaft, Fischerei - Landwirtschaftliche Bodennutzung - Baumobstflächen -. Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Obst-Gemuese-Gartenbau/Publikationen/Downloads-Obst/baumobstflaechen-2030314179004.html>.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2019): Statistisches Jahrbuch 2019. Land- und Forstwirtschaft. Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Querschnitt/Jahrbuch/jb-land-forstwirtschaft.html>.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2021a): Anstieg der Siedlungs- und Verkehrsfläche in ha pro Tag. Online verfügbar unter [https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Flaechennutzung/\\_inhalt.html;jsessionid=9D4491DB55FD0AF2B8C084F86C82F098.live712#sprg239478](https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Flaechennutzung/_inhalt.html;jsessionid=9D4491DB55FD0AF2B8C084F86C82F098.live712#sprg239478).
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2021b): Erzeugerpreisindizes landwirtschaftlicher Produkte: Deutschland, Jahre, Landwirtschaftliche Produkte. Jahr 1996 bis 2020, Tafeläpfel. Online verfügbar unter <https://www-genesis.destatis.de/genesis//online?operation=table&code=61211-0001&bypass=true&levelindex=1&levelid=1616251347712#abreadcrumb>, zuletzt aktualisiert am 20.03.2021.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2021c): Index der Einkaufspreise landwirtschaftlicher Betriebsmittel: Deutschland, Jahre, Landwirtschaftliche Betriebsmittel. Jahr 1996 bis 2020. Online verfügbar unter <https://www-genesis.destatis.de/genesis//online?operation=table&code=61221-0001&bypass=true&levelindex=1&levelid=1616251344293#abreadcrumb>, zuletzt aktualisiert am 20.03.2021.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2021d): Verbraucherpreisindex (inkl. Veränderungsraten): Deutschland, Jahre. Jahr 1996 bis 2020. Online verfügbar

- unter <https://www-genesis.destatis.de/genesis//online?operation=table&code=61111-0001&bypass=true&levelindex=1&levelid=1616251232664#abreadcrumb>, zuletzt aktualisiert am 20.03.2021.
- Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (Hg.) (2020): Verkaufserlöse der Landwirtschaft – in jeweiligen Preisen – in Deutschland 2017 nach Bundesländern, Regionale Landwirtschaftliche Gesamtrechnung. Online verfügbar unter [https://www.statistik-bw.de/LGR/DE\\_VE\\_y.asp?y=2017](https://www.statistik-bw.de/LGR/DE_VE_y.asp?y=2017).
- Stehr, Rolf; Hahn, Andreas (2016): Transparentes Hagelnetz in Norddeutschland. Keine Beeinträchtigung hinsichtlich Ertrag und Fruchtqualität in den ersten drei Jahren. In: *Kernobst* 11, 300–302.
- Steinbacher, Nadine; Schlossberger, Florian (2016): Einzelkapitel 5 Obst. In: *Agrarmärkte* 2016, 92–118. Online verfügbar unter <https://www.lfl.bayern.de/publikationen/schriftenreihe/145723/index.php>.
- TANI, Akira; SHIINA, Suguru; NAKASHIMA, Kazuki; HAYASHI, Makio (2014): Improvement in lettuce growth by light diffusion under solar panels. In: *Journal of Agricultural Meteorology* 70 (3), 139–149. DOI: 10.2480/agrmet.D-14-00005.
- Thalheimer, Martin; Paoli, N. (2005): Auswirkungen von Hagelnetzen auf die Ertrags- und Wuchsleistung sowie auf die Fruchtqualität im Apfelanbau. In: *Laimburg Journal* (2 (1/2)), 1–8.
- Thüringer Energie- und GreenTech-Agentur GmbH (ThEGA) (Hg.) (2014): Wir können auch Anders. Die Energiewende vor Ort selbst gestalten - Leitfaden zur Bürgerbeteiligung bei Erneuerbaren Energien in Thüringen. Online verfügbar unter [https://www.thega.de/fileadmin/user\\_upload/Publikationen/thega\\_broschuere\\_energiewende\\_vor\\_ort.pdf](https://www.thega.de/fileadmin/user_upload/Publikationen/thega_broschuere_energiewende_vor_ort.pdf), zuletzt geprüft am 01.07.2021.
- Trommsdorff, Max (2021): Agri-Photovoltaik: Wohin geht die Reise? Hg. v. pv magazine. Online verfügbar unter <https://www.pv-magazine.de/2021/03/18/agri-photovoltaik-wohin-geht-die-reise/>, zuletzt aktualisiert am 24.03.2021, zuletzt geprüft am 03.07.2021.
- Trommsdorff, Max; Kang, Jinsuk; Reise, Christian; Schindele, Stephan; Bopp, Georg; Ehmann, Andrea; Weselek, Axel; Högy, Petra; Obergfell, Tabea (2021): Combining food and energy production: Design of an agrivoltaic system applied in arable and vegetable farming in Germany. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 140, 110694. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110694.
- Trommsdorff, Maximilian (2016): An Economic Analysis of Agrophotovoltaics: Opportunities, Risks and Strategies towards a More Efficient Land Use. In: *Constitutional Economics Network, Working Paper Series* 03.
- Valle, B.; Simonneau, T.; Sourd, F.; Pechier, P.; Hamard, P.; Frisson, T.; Ryckewaert, M.; Christophe, A. (2017): Increasing the total productivity of a land by combining

- mobile photovoltaic panels and food crops. In: *Applied Energy* 206, 1495–1507. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.09.113.
- VDMA Photovoltaic Equipment (VDMA) (Hg.) (2020): International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV). 2019 Results. Unter Mitarbeit von Markus Fischer, Michael Woodhouse, Susanne Herritsch und Jutta Trube.
- Vollprecht, Jens (2021): Möglichkeiten der Genehmigungsverfahren von Agri-PV-Anlagen. Experte Recht, bbh, 22.01.2021, persönliche Mitteilung an Michaela Hopf.
- Wang, Deng; Sun, Yaojie (2018): Optimizing Light Environment of the Oblique Single-axis Tracking Agrivoltaic System. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: 2nd International Symposium on Resource Exploration and Environmental Science* 170, 42069. DOI: 10.1088/1755-1315/170/4/042069.
- Weselek, Axel; Ehmann, Andrea; Zikeli, Sabine; Lewandowski, Iris; Schindele, Stephan; Högy, Petra (2019): Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities. A review. In: *Agronomy for Sustainable Development* 39:35, 1–20. DOI: 10.1007/s13593-019-0581-3.
- Wicke, Margret (2015a): Angebotssammlung, Materialkosten Hagelnetze. Kalkulationsgrundlage zu: Hagelnetze im Apfelanbau - wirtschaftlich betrachtet, Anlage zu: Obstbau 7, S. 411-415.
- Wicke, Margret (2015b): Hagelnetze im Apfelanbau – wirtschaftlich betrachtet. In: *Obstbau* 7, 411–415.
- Wicke, Margret (2020): Wirtschaftlichkeit von Apfelanlagen. Expertin Betriebswirtschaft Apfel, DLR RP, 26.11.2020, persönliche Mitteilung an Michaela Hopf.
- Wicke, Margret (2021a): Antwort: Preisbildung am Obstmarkt. Expertin Betriebswirtschaft Apfel, DLR RP, 07.05.2021, persönliche Mitteilung an Michaela Hopf.
- Wicke, Margret (2021b): Austausch zur Kostenzusammensetzung der Apfelanlage im Berechnungsmodell der Agri-PV. Expertin Betriebswirtschaft Apfel, DLR RP, 21.05.2021, persönliche Mitteilung an Michaela Hopf.
- Widmer, Albert (2005): Apfelanbau unter Hagelnetzen, Vortrag von Albert Widmer, Agroscope FAW Wädenswil, anlässlich der 52. Südtiroler Obstbautagung. In: *obstbau weinbau* 1, 6–8.
- Wiebusch, Jan-Henrik; Hilbers, Joerg (2017): Hagelschutz an der Niederelbe. In: *Kernobst* 12, 367–374.
- Willockx, Brecht (2021): agrivoltaics in orchard farming, 25.04.2021, persönliche Mitteilung an Michaela Hopf.
- Willockx, Brecht; Herteleer, Bert; Cappelle, Jan (2020): Techno-economic study of agrovoltaic systems focusing on orchard crops. In: 37th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 1761–1766.

- Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) (Hg.) (2020): Landwende im Anthropozän: Von der Konkurrenz zur Integration, Hauptgutachten. Berlin: WBGU.
- Wöltje, Jörg (2013): Investition und Finanzierung. Grundlagen, Verfahren, Übungsaufgaben, Lösungen. 1. Aufl. Freiburg: Haufe.
- Zimmer, Jürgen (2021a): Antwort: APV-Obstbau: Anlagendesign. Experte Apfelanbau, DLR RP, 27.04.2021, persönliche Mitteilung an Michaela Hopf. persönliche Mitteilung.
- Zimmer, Jürgen (2021b): Systemdesign der Pilotanlage in Grafschaft-Gelsdorf und Auswirkungen der Agri-PV auf den Apfelanbau. Experte Apfelanbau, DLR RP, 11.05.2021, persönliche Mitteilung an Michaela Hopf.

## Danksagung

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

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

Danke an Max Trommsdorff, einen großartigen Gruppenleiter, der meine Masterarbeit von Seiten des Fraunhofer ISE betreut hat, und Andreas Steinhüser, der als Projektleiter von Agri-PV Obstbau diese Arbeit überhaupt erst möglich gemacht hat. Danke für das Vertrauen, das mir entgegengebracht wurde.

Mein besonderer Dank gilt Margret Wicke vom Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum - Rheinfalz, die mich durch ihr außerordentliches Engagement inhaltlich in meiner Masterarbeit unterstützt hat und nicht müde geworden ist, sich mit mir auszutauschen.

Darüber hinaus danke ich allen weiteren Gesprächspartner:innen, die sich bereit erklärt haben, an einem Interview teilzunehmen oder auf andere Weise mit mir im Austausch waren. Vielen Dank für die Zeit und die wertvollen Informationen.

Zu guter Letzt gilt mein Dank den Projektpartnern des Forschungsprojektes Agri-PV Obstbau, dem Bio-Obsthof Nachtwey, BayWa r.e., Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum - Rheinfalz, EWS Schönau sowie Fendt, für die motivierte Zusammenarbeit innerhalb des Projektes.

## Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, 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

---

Michaela Hopf

## Anhang – Version 2

### Anhang I gedruckt

#### Abbildungen

Abbildung A-1: Illustration verschiedener Agri-PV-Systeme nach DIN SPEC, (Bildquelle: Fraunhofer ISE).....	ii
Abbildung A-2: Agri-PV-Anlagen im Obstbau von BayWa r.e. und Groeneleven in den Niederlanden über (a) Erdbeeren, (b) Blaubeeren, (c) Brombeeren, (d) Himbeeren, (Bildquellen: BayWa r.e.).....	ii
Abbildung A-3: Versuchsdesign der Agri-PV-Obstbauanlage © DLR RP .....	iii

#### Tabellen

Tabelle A- 1: Abweichung der Einnahmen vom Mittelwert bzw. relative Änderung zum Wert des Vorjahres von HN, APV-Agri, APV-PV sowie APV-Total .....	iv
---	----

#### Gesprächsleitfaden

Interviewleitfaden 1/4 .....	v
Interviewleitfaden 2/4 .....	vi
Interviewleitfaden 3/4 .....	vii
Interviewleitfaden 4/4 .....	viii

### Anhang II externer Datenträger

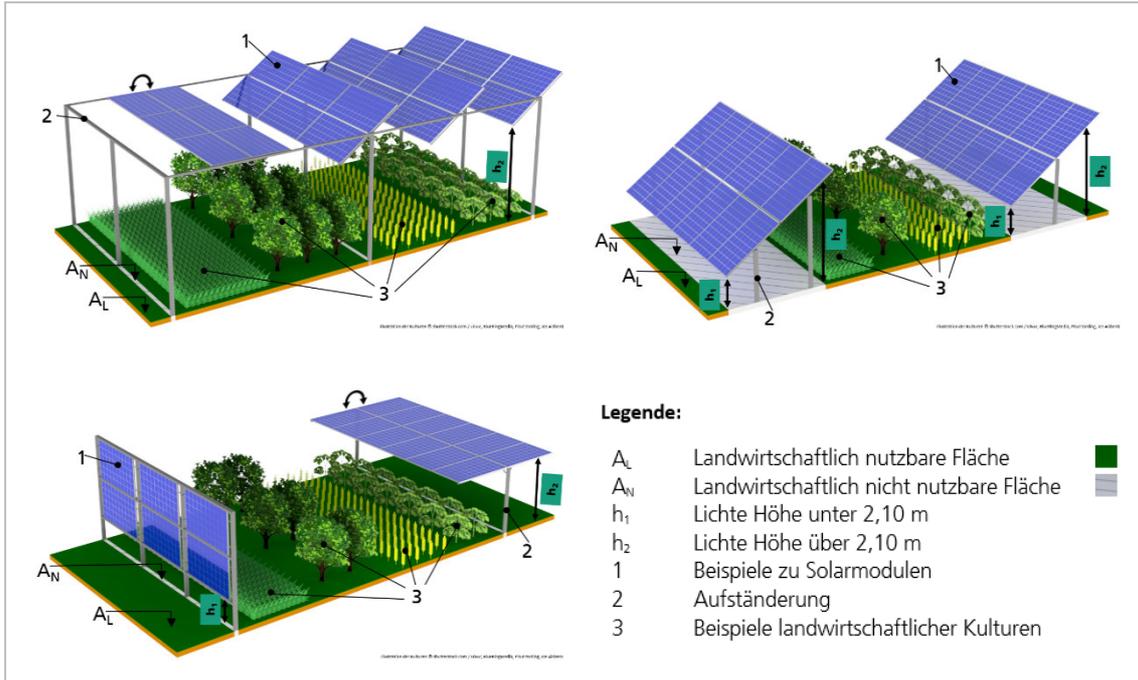


Abbildung A-1: Illustration verschiedener Agri-PV-Systeme nach DIN SPEC, (Bildquelle: Fraunhofer ISE)



Abbildung A-2: Agri-PV-Anlagen im Obstbau von BayWa r.e. und Groeneleven in den Niederlanden über (a) Erdbeeren, (b) Blaubeeren, (c) Brombeeren, (d) Himbeeren, (Bildquellen: BayWa r.e.)

Abbildung A-3: Versuchsdesign der Agri-PV-Obstbauanlage © DLR RP

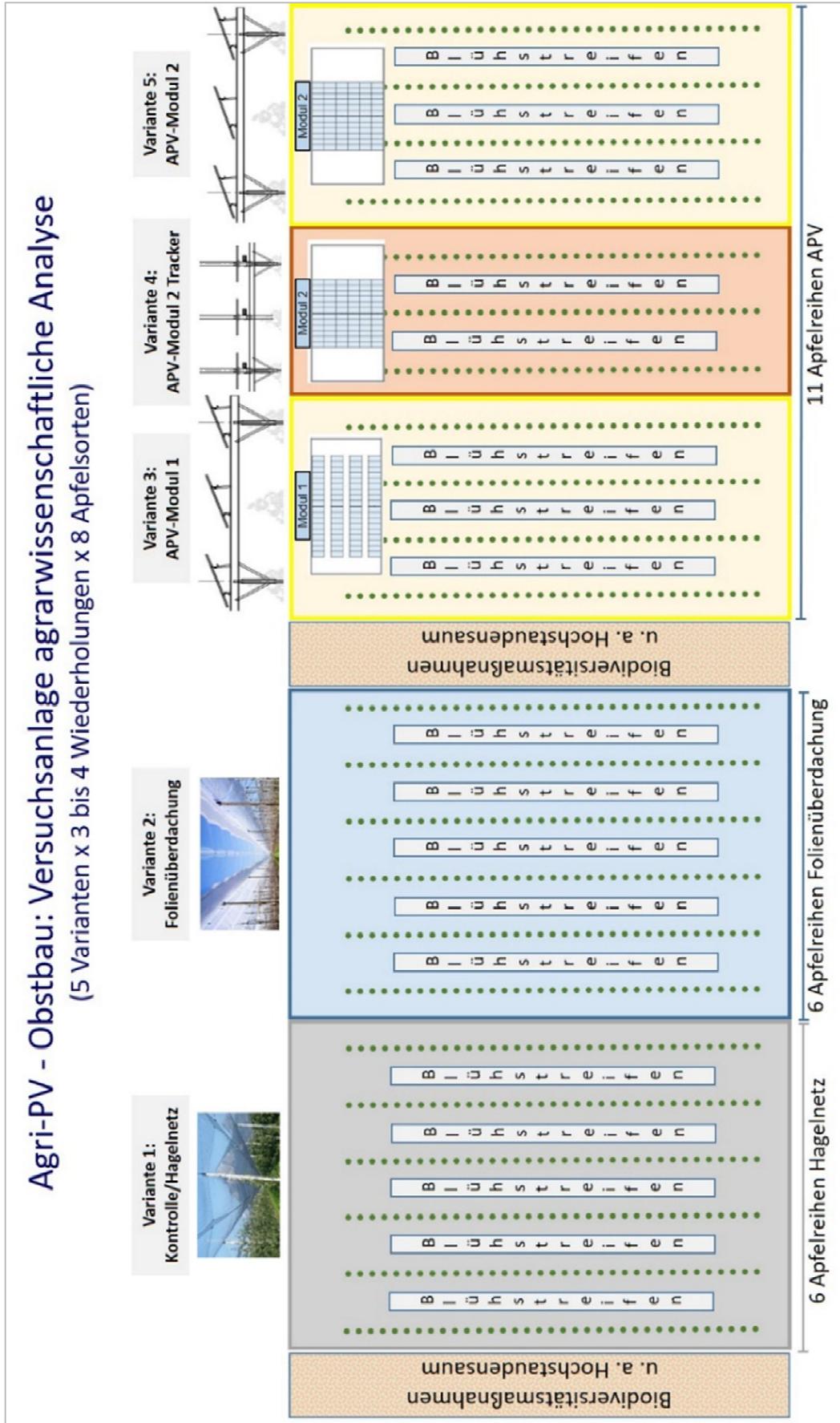


Tabelle A- 1: Abweichung der Einnahmen vom Mittelwert bzw. relative Änderung zum Wert des Vorjahres von HN, APV-Agri, APV-PV sowie APV-Total

		<b>HN</b>	<b>APV-Agri</b>	<b>APV-PV</b>	<b>APV-Total</b>
<b>Abweichung vom Mittelwert</b>	Min	-85%	-85%	-54%	-51%
	Max	69%	69%	34%	33%
	Spanne	153%	154%	89%	84%
<b>Abweichung zum Vorjahr</b>	Min	-69%	-69%	-61%	-45%
	Max	217%	216%	4%	33%
	Spanne	286%	285%	65%	78%

## Interviewleitfaden 1/4

### (1) Datenschutzinfo und Einverständniserklärung zum Interview

Die Daten werden im Rahmen eines mündlichen Gesprächs erhoben, das mit einem Aufnahmemedium aufgezeichnet wird. Zum Zwecke der Datenanalyse werden die mündlich erhobenen Daten verschriftlicht (Transkription), wobei die Daten anonymisiert werden. Eine Identifizierung der interviewten Person ist somit ausgeschlossen. Die erhobenen Daten finden für die Erstellung der Abschlussarbeit Verwendung und werden nicht weiterverwendet oder an Dritte weitergegeben. Die Teilnahme am Interview wird als Einwilligung gewertet.

Der Speicherung der personenbezogenen Daten zu Dokumentationszwecken kann durch die interviewte Person jederzeit widersprochen werden. Die Teilnahme an dem Gespräch erfolgt freiwillig. Das Gespräch kann zu jedem Zeitpunkt abgebrochen werden. Das Einverständnis zur Aufzeichnung kann jederzeit widerrufen werden.

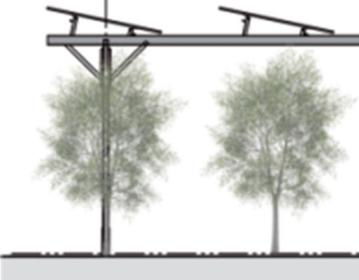
### (2) Hintergrund: Masterarbeit zur Wirtschaftlichkeit der Agri-PV im Apfelanbau

Die Agri-Photovoltaik beschreibt das Konzept Landwirtschaft und Solarstromproduktion auf der gleichen Fläche zu vereinen. Innerhalb des Forschungsprojektes Agri-PV Obstbau wurde in Rheinland-Pfalz an einem Bio-Obsthof eine Pilotanlage im Apfelanbau errichtet. Neben agrarwissenschaftlichen und gesellschaftspolitischen Analysen, soll unter anderem die Wirtschaftlichkeit einer solchen Anlage im Apfelanbau untersucht werden. Diese Thematik bearbeite ich in meiner Masterarbeit. Ich vergleiche inwieweit es wirtschaftlich sinnvoll ist eine Agri-PV-Anlage anstatt einer Hagelschutzkonstruktion zu implementieren.

### (3) Modellannahmen

Meine Modellentwicklung basiert auf der installierten Pilotanlage und meine Annahmen sind folgende:

- Fläche: 2 ha
- Apfelanlage
  - Biologische Bewirtschaftung
  - Reihenabstand: 3m; Baumabstand: 1m; 3,5 m Baumhöhe; Reihenlänge: 100 m

Hagelnetz	Agri-PV
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Netzfarbe: kristall</li> <li>• Verschattungsgrad: 23 % (Anfang: 18,5 %) PAR-Reduktion</li> <li>• Art der Konstruktion: Beton, Einzelreihen-Giebelsystem</li> <li>• Höhe: 4 m (identisch Agri-PV)</li> </ul>	<p>Die Anlage sieht schematisch dargestellt wie folgt aus</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Modulausrichtung: SW</li> <li>• Je Baumreihe eine Modulreihe</li> <li>• <b>Verschattungsgrad: ca. 30 %</b></li> <li>• Modulabmessungen: 2,03 m mit Neigungswinkel 12 Grad → Bodenüberdachung auf 1,99 m</li> <li>• Höhe: 3,88 (Modulunterkante) und 4,30 m (Moduloberkante)</li> </ul> <div style="text-align: center;">  </div> <p style="text-align: right;">Ausschnitt Darstellung Agri-PV-Anlage (NW-Ansicht)</p>

*Interviewleitfaden 2/4***(1) Spezifika der Anbauregion**

Frage 1: In welcher Anbauregion sind die tätig und sind Hagelschutznetze gängige Praxis in Ihrer Region?

Ja  Nein

Falls ja: Wie viel Prozent der Apfelanlagen sind schätzungsweise unter Hagelnetzen? Welche Hagelschutznetzfarbe wird vorwiegend eingesetzt?

---



---



---

**(2) Auswirkungen der Agri-PV auf Apfelanlagen**

Bitte beantworten Sie folgende Fragen ausgehend von Ihren Erfahrungen mit Schutzüberdachungen im Apfelanbau.

**1. Auswirkungen Schutzmaßnahmen****1.1 Hagelschutznetze**

Info: Das Design der Agri-PV-Anlage lässt zu, dass Hagelschutznetze zwischen den Reihen implementiert werden können. Momentan sind keine Hagelschutznetze vorgesehen.

Frage 2: Wie hoch schätzen Sie die Veränderung an Hagelschutznetzen (Material) ein? Kann komplett auf diese verzichtet werden bzw. um wie viel Prozent verändert sich ihr Einsatz? [Veränderung in %]

---



---

Frage 3: Basierend auf Ihrer Aussage in Frage 1, wie hoch schätzen Sie die Veränderung des jährlichen Arbeitsaufwandes des Hagelnetzhandling ein? [Veränderung in %]

*Anmerkung: bei Nachrüstung durch Hagelnetzen zwischen Reihen werden diese in Fahrgasse geöffnet und zu beiden Seiten aufgerollt.*

---



---

**1.2 Frostschutzberechnung**

Frage 4: Wie hoch schätzen Sie die Veränderung des Bedarfs an Frostschutzmaßnahmen mittels Überkronenberechnung ein? Am Standort wird von 4 Nächten ausgegangen, an denen Frostschutzberechnung notwendig wird. [Veränderung in % zur Ref. HN]

---



---



---

*Interviewleitfaden 3/4***1.3 Regenschutz**

Frage 5: Wie hoch schätzen Sie die Veränderung des Einsatzes an Fungiziden durch den Schutz vor Regen ein (Material)? [Veränderung in % zur Ref. HN]

---



---

Frage 6: Basierend auf Ihren Aussagen in Frage 5, wie hoch schätzen Sie die Veränderung des jährlichen Arbeitsaufwandes zum Ausbringen an Fungiziden? Wie stark wirkt sich die Veränderung auf die Pflanzenschutzausbringung gesamt aus? [Veränderung in % zur Ref. HN]

---



---

**2. Auswirkungen Ernteertrag (beeinflussender Faktor: reduzierte Sonneneinstrahlung)**

Die PAR-Reduktion innerhalb der Agri-PV-Anlage beträgt etwa 30 %; Verglichen sollen die Auswirkungen gegenüber einer Apfelanlage unter Hagelnetzen mit 23 % PAR-Reduktion werden

**2.1 Ertragsmenge**

Frage 7: Wie hoch schätzen Sie die Veränderung der Ertragsmenge (kg/ha) ein? [Veränderung in % zur Ref. HN]

---



---

**2.2. Ertragsqualität**

Frage 8: Welche Qualitätsveränderungen können Ihrer Meinung nach auftreten?

---



---

Frage 9: Wie hoch schätzen Sie die Veränderung an vermarktungsfähigen Äpfeln ein? [Veränderung in % zur Ref. HN]

---



---

Frage 10: Welche Apfelsorten sind Ihrer Meinung nach geeignet zum Einsatz unter Agri-PV-Anlagen?

---



---

*Interviewleitfaden 4/4***3. Auswirkungen auf weitere Kulturmaßnahmen**

Frage 11: Wie hoch schätzen Sie die Veränderung auf folgende Kulturmaßnahmen? [Veränderung in % zur Ref. HN]

Jährliche Kulturmaßnahme	Veränderung
Mulchen	
Düngen	
Tropfbewässerung	
Baumschnitt	
Handausdünnung	
Sonstige: _____ _____	

**4. Sonstiges**

Frage 12: Welche Voraussetzungen müssen Ihrer Meinung nach für eine erfolgreiche Implementierung gegeben sein?

---



---



---

Frage 13: Haben Sie weitere Anmerkungen oder Anregungen bezüglich der Auswirkungen der Agri-PV-Anlage auf Kulturmaßnahmen und Ernteerfolg, die bisher vom Fragebogen nicht abgefragt wurden?

---



---



---



---



---



---

Herzlichen Dank für Ihre Teilnahme! Bei Fragen und Anregungen stehe ich Ihnen jederzeit zur Verfügung unter [michaela.hopf@ise.fraunhofer.de](mailto:michaela.hopf@ise.fraunhofer.de)